

TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
MÜNCHEN

**Studiengang Restaurierung, Kunsttechnologie und Konservierungswissenschaft**

**Zur Volltränkung von Holz mit Methylmethacrylat**

**Diplomarbeit**

vorgelegt von

**Andreas Schwabe**

**April 2006**

**Prüfer: Prof. Erwin Emmerling  
Prof. Dr. Rainer Barthel**

## **Kurzfassung**

Die Festigung von biologisch geschwächtem Holz an Kunstwerken, archäologischem und technischem Kulturgut sowie an Baudenkmälern gehört zu den wohl immer stark der Empirie verhafteten Konservierungstechniken. Dies hat seinen Grund in ungenügend vorliegenden Untersuchungen zu diesem Problem und in der Natur dieser Maßnahme.

Die vorliegende Studie versucht durch die Volltränkung von nicht degradiertem Eichen-, Kiefern- und Fichtenholz mit Methylmethacrylat mit dem patentierten Kessel-Druck-Verfahren der Firma „IBACH Steinkonservierung“ grundlegende Erkenntnisse für die Möglichkeit der Festigkeitserhöhung von degradiertem Holz zu gewinnen. Dazu sind die Biege- und Druckfestigkeit von unbehandeltem sowie ungetrocknet und getrocknet getränktem Holz untersucht wurden. Ferner werden Aussagen zur Übertragung des Volltränkungsverfahrens der Firma „IBACH Steinkonservierung“ auf Holz gemacht.

Mit dieser Arbeit wurden erstmals Tendenzen und Probleme des seit Jahren in der Steinkonservierung verwendeten Verfahrens für die Holzfestigung behandelt. Diese können als Richtwerte für die Konservierung durch die Volltränkung von Holz mit Methylmethacrylat dienlich sein.

## **abstract**

The process of strengthening biological weakened wood on works of art, archaeological and technical cultural assets as well as on historical monuments probably belongs to the techniques of preservation which are mainly based on empirical methods of investigation. On the one hand this estimation is based on a shortage of investigations dealing with this problem, on the other hand reasons can be found in the peculiarity of the described measure.

The study in question aimed to gain fundamental knowledge about a possibility to increase the firmness of degraded wood. Therefore I used the patented kettle-pressure-process of the “IBACH Steinkonservierung” company requiring a complete soaking of untreated wood of oak, pine and spruce with methylmethacrylat. In this connection I analysed the pliability and the steadiness of pressure of untreated as well as of damped and dried wood after the soaking process.

Furthermore the study includes statements related to the soaking process by the “IBACH Steinkonservierung” company which in this case was used on wood. Above, this treatise for the first time shows tendencies and deals with problems according to the procedure of strengthening wood which has been used in the field of preservation of stones for years. The results produced during this investigation can be useful as an index to the preservation of wood by complete soaking the material with methylmethacrylat.

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	1
abstract .....	1
Abkürzungsverzeichnis .....	4
1 Einleitung .....	7
1.1 Restaurierungsethische Bedenken .....	8
1.2 Dank .....	10
2 Theoretische Grundlagen .....	11
2.1 Vorbemerkungen .....	11
2.1.1 Geschichte der Holzfestigung .....	11
2.1.2 Holzanatomische Merkmale in Bezug auf die Tränkbarkeit .....	14
2.1.3 Permeabilität von Holz .....	20
2.1.4 Thermisch-Hygrische-Dehnung von Holz .....	22
2.2 Methylmethacrylat .....	25
2.2.1 Geschichte des Methylmethacrylats .....	25
2.2.2 Chemische Grundlagen von Methylmethacrylat (MMA/PMMA) .....	26
2.3 Das Volltränkungsverfahren der Firma „IBACH Steinkonservierung“ .....	30
2.3.1 Verfahrenstechnik .....	30
2.3.2 Tränkflüssigkeit .....	32
3 Laborarbeiten .....	33
3.1 Versuchsvorbereitung .....	33
3.1.1 Versuchsplanung .....	33
3.1.2 Materialauswahl und Dimensionsfestlegung der Holzprüfkörper .....	34
3.2 Vorversuche zur Tränkung der Holzprüfkörper .....	35
3.2.1 Permeabilitätsmessung .....	35
3.3 Tränkung der Holzprüfkörper .....	38
3.3.1 Beschickung des Autoklaven .....	38
3.3.2 Verfahrensablauf .....	39
3.4 Untersuchung der getränkten Holzprüfkörper .....	40
3.4.1 Gewichtsänderungen .....	40
3.4.2 Thermisch-Hygrische-Dehnung unbehandelter und getränkter Probenzylinder .....	45
3.4.3 Optische Änderung und Änderung der Dimension .....	45
3.5 Festigkeitseigenschaften der unbehandelten und getränkten Holzprüfkörper ...	46
3.5.1 Biegefestigkeit .....	47
3.5.2 Druckfestigkeit .....	53
3.5.3 Feuchtigkeitsgehalt .....	57
3.6 Mikroskopische Untersuchung der unbehandelten und getränkten Holzprüfkörper .....	60
3.6.1 Lichtmikroskopie .....	60
3.6.2 Rasterelektronenmikroskopie .....	61

4	Auswertung der Ergebnisse .....	63
4.1	Eignung von Methylmethacrylat als Festigungsmittel für Holz.....	63
4.2	Verfahrenstechnische Änderungsvorschläge in Bezug auf das Volltränken von Holz mit Methylmethacrylat .....	65
5	Zusammenfassung .....	66
6	DIN-Normen.....	67
7	Literaturverzeichnis .....	68
8	Internet.....	76
9	Anhang.....	77
9.1	Abbildungen.....	79
9.2	Diagramme.....	105



## Abkürzungsverzeichnis

### Abkürzungen im Text

Abb.	Abbildung
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
d.h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
E-Modul	Elastizitätsmodul
EN	Europäische Norm
Kav	Permeabilitätsmittelwert
MMA	Methylmethacrylat
PMMA	Polymethylmethacrylat
REM	Rasterelektronenmikroskop
rF	relative Luftfeuchte
u.a.	unter anderem
Stabw.	Standardabweichung
% Stabw	prozentuale Standardabweichung
u.s.w.	und so weiter
z.B.	zum Beispiel

### Einheit

### Bedeutung

%	Prozent
g	Gramm
h	Stunde
m	Meter
min	Minute
N	Newton
Pa	Pascal
s	Sekunde
D	Darcy

**Formelzeichen**

Symbol	Bedeutung	Einheit
$\Delta P$	Druckdifferenz	[N/m <sup>2</sup> ]
$p_g$	Gaspermeabilität	[D]; [mD]
$V_S$	Gesamtvolumen des Feststoffs	[cm <sup>3</sup> ]
$V_{Ges}$	Gesamtvolumen des Porensystems	[cm <sup>3</sup> ]
$\sigma_{DII}$	Höchstkraft	[N]
$V_H$	Hohlraumvolumen	[cm <sup>3</sup> ]
$m_N$	Masse im Normalklima 20/65 DIN50014	[g]
$F_{max}$	maximale Druckfestigkeit	[N/mm <sup>2</sup> ]
$p_L$	Permeabilität	[D]; [mD]
$\varepsilon$	Porosität	[-]
$\rho_r$	Reindichte	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_N$	Rohdichte im Normalklima 20/65 DIN50014	[g/cm <sup>3</sup> ]
$V_N$	Volumen der im Normalklima 20/65 DIN50014	[cm <sup>3</sup> ]
Q	Volumenstrom des Fluides	[m <sup>3</sup> /s]
$\mu$	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]
A	(Querschnitts-)Fläche	[m <sup>2</sup> ], [mm <sup>2</sup> ]
a	lineares Quellmaß	[%]
b	Breite	[m]; [mm]
E	Elastizitätsmodul	[N/mm <sup>2</sup> ]; [kg/cm <sup>2</sup> ]
e	Porenanteil bezogen auf das Volumen des Holzes (darrtrocken)	[%]
e	Porosität	[%]
$E_B$	Biege-Elastizitätsmodul	[N/mm <sup>2</sup> ]
F	Kraft	[N]
h	Höhe	[m]; [mm]
k	spezifische Permeabilität	[D]; [mD]
L	Länge der Probe in Flussrichtung	[m]; [mm]
l	Länge	[m]; [mm]
M	Biegemoment der Probe	[Nm]
m	Masse	[g]
$M_b$	Biegemoment	[Nm]
$P_D$	Dampfdruck	[kg/m <sup>2</sup> ]
q	differentielle Quellung	[%/%)
Q <sub>g</sub>	Volumenstrom des Gases	[m <sup>3</sup> /s]
T	Temperatur	[C°]; [K]
t	Zeit	[h]; [s]
u	Holzfeuchtigkeitsgehalt	[%]
$u_{gl}$	Gleichgewichtsfeuchte	[%]

Symbol	Bedeutung	Einheit
$V$	Volumen	[cm <sup>3</sup> ]
$W$	Widerstandsmoment der Probe	[Nm]
$W_b$	Widerstandsmoment	[Nm]
$\alpha_{max}$	maximales lineares Quellmaß	[%]
$\alpha_V$	Volumenquellmaß	[%]
$\alpha_w$	Wärmeausdehnungszahl	[m/m K]
$\beta$	lineares Schwindmaß	[%]
$\beta_{max}$	maximales lineares Schwindmaß	[%]
$\beta_N$	Trocknungs-Schwindmaß	[%]
$\beta_V$	Volumenschwindmaß	[%]
$\Delta f$	Kraftdifferenz $\Delta F$ entsprechende Durchbiegung	[mm]
$\Delta l$	Längenänderung	[m]; [mm]
$\varepsilon_D$	Dehnung	[mm/mm]
$\eta$	Viskosität einer Flüssigkeit	[-]
$\rho$	Rohdichte	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\sigma'$	Spannung bei Proportionalitätsgrenze	[N/mm <sup>2</sup> ]; [kg/cm <sup>2</sup> ]
$\sigma$	Spannung	[N/mm <sup>2</sup> ]; [kg/cm <sup>2</sup> ]
$\sigma_B$	Biegefestigkeit	[N/mm <sup>2</sup> ]; [kg/cm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{DII}$	Druckfestigkeit	[N/mm <sup>2</sup> ]; [kg/cm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{max}$	Grenzspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]; [kg/cm <sup>2</sup> ]
$\sigma_{zB}$	Zugfestigkeit	[N/mm <sup>2</sup> ]; [kg/cm <sup>2</sup> ]
$\tau$	Scherfestigkeit	[N/mm <sup>2</sup> ]; [kg/cm <sup>2</sup> ]

## 1 Einleitung

Holz ist ein organisch entstandener Festkörper, in dem chemisch und physikalisch verschiedenartige Bestandteile, teils chemisch aneinander gebunden, teils mechanisch miteinander verbunden sind. Wie alle organischen Materialien unterliegt auch das Holz besonders unter Einwirkung äußerer Einflüsse einem Alterungsprozeß, der bei der Erhaltung von Kunst- und Kulturgut konservierende Maßnahmen erfordert.

Degradiertes Holz zu erhalten, ist ein kompliziertes Problem in der Restaurierung. Bauverordnungen wie die DIN 68800 besagen, daß befallenes Holz durch Rekonstruktion auszutauschen ist. So entstehen in der Praxis, auch in der Denkmalpflege, nach Originalvorbildern neue Fenster, Türen, Decken-, Wandvertäfelungen, Fußböden und Dachstühle.

In der praktischen Denkmalpflege können die Objekte den Umwelteinflüssen meist nicht entzogen werden. Dementsprechend muß eine Konsolidierung höheren mechanischen Beanspruchungen genügen als im musealen Bereich. Teilweise haben bestimmte Bauelemente statische Aufgaben auszuüben. Hierbei muß eine Konsolidierung unterstützend, in manchen Fällen auch vollends entlastend wirken. Hilfskonstruktionen, die zusätzlich eingebracht werden und ins statische Gefüge eingreifen, sind dabei häufig nicht zu umgehen. Diese Maßnahmen sollten den Grundsätzen der Charta von Venedig 1964 vor allen den Artikeln 9, 10 und 12 untergeordnet sein.

Artikel 9: „Wenn es aus ästhetischen oder technischen Gründen notwendig ist, etwas wiederherzustellen, von dem man nicht weiß, wie es ausgesehen hat, wird sich das ergänzende Werk von der bestehenden Komposition abheben und den Stempel unserer Zeit tragen.“

Artikel 10: „Wenn sich die traditionellen Techniken als unzureichend erweisen, können zur Sicherung eines Denkmals alle modernen Konservierungs- und Konstruktionstechniken herangezogen werden, deren Wirksamkeit wissenschaftlich nachgewiesen und durch praktische Erfahrung erprobt sind.“

Artikel 12: „Die Elemente, welche fehlende Teile ersetzen sollen, müssen sich dem Ganzen harmonisch einfügen und vom Originalbestand unterscheidbar sein, damit die Restaurierung den Wert des Denkmals als Kunst- und Geschichtsdokument nicht verfälscht.“

Für die Wahl der Konsolidierungsmaterialien gilt, daß keine Schäden an der Substanz des Denkmals entstehen. Die Festigungsmittel müssen nicht als Biozid wirken, doch darf ein biologischer Befall des Holzes nicht durch das Festigungsmittel begünstigt werden. Die Reversibilität der Methoden ist in jedem Fall anzustreben, doch durch die hohen Anforderungen an das Konsolidierungsmittel ist dies oft nicht gegeben.

Die Möglichkeit, Holz mit einem Konsolidierungsmittel voll zu durchtränken besteht schon seit langem. Die hierfür verwendeten Festigungsmittel haben sich im Laufe der Zeit immer wieder verändert. Vor 1900 wurden zumeist natürliche Festigungsmittel für Holz eingesetzt. Mit der Entwicklung von Kunststoffen in den darauffolgenden Jahrzehnten entstand bis heute eine große Anzahl synthetischer Konsolidierungsmittel für die Konservierung von Holz. Eine aus der Steinkonservierung bekannte Maßnahme zur Festigkeitserhöhung stellt die Acrylharzvolltränkung dar, welche zumeist sehr positive

Ergebnisse erzielt hat und zur Zeit das einzige Mittel zur letztmöglichen Erhaltung in der Steinkonservierung darstellt.

Vorliegende Arbeit soll durch die Volltränkung von nicht degradiertem Eichen-, Kiefern- und Fichtenholz mit MMA mit dem patentierten Kessel-Druck-Verfahren der Firma „IBACH Steinkonservierung“ grundlegende Erkenntnisse für die Möglichkeit der Festigkeitserhöhung von Holz liefern. Es wurde bewusst nicht degradiertes Holz für die Ermittlung von Kennwerten verwendet, da in der Literatur nur unzulängliche oder mitunter keine Angaben zur Volltränkung von Holz mit MMA vorhanden sind. Die Arbeit soll daher eine Prozeßführung zur Festlegung von Kennwerten und Parametern für die Tränkung von Holz mit MMA liefern, welche auch für degradiertes Holz anwendbar wäre.

Weiter wurden zur Auswertung Festigkeitseigenschaften des getränkten Holzes mit MMA untersucht. Hierzu wurde die Biege- und Druckfestigkeit von unbehandeltem sowie ungetrocknet und getrocknet getränktem Holz ermittelt.

Zu Analyse der Tränkergebnisse wurden REM-Aufnahmen der getränkten Hölzer gefertigt. Möglichkeiten zur Übertragung des Volltränkungsverfahrens der Firma „IBACH Steinkonservierung“ auf Holz wurden diskutiert.

## 1.1 Restaurierungsethische Bedenken

Das Acrylharz-Volltränkungs-Verfahren hat von Anbeginn an umfangreiche Diskussionen ausgelöst. Innerhalb der Denkmalpflege führt das Verfahren bis heute zu Kontroversen.

Das Verfahren ist gedacht als letzte Möglichkeit zur Konservierung von erhaltenswerten Objekten, deren zukünftiger Standort weiterhin eine freie Bewitterung bedingt und deren zukünftiger Standort nicht ein Museum sein soll.

Der Einsatz eines Konservierungsmittels, ganz gleich mit welchem Verfahren es an den porösen Baustoff herangebracht wird, stellt immer eine nicht reversible Maßnahme dar. Der Porenraum kann später nicht mehr vom PMMA befreit werden. Der ethische wichtige Anspruch der Reversibilität von Konservierungsstoffen kann bei der Holzfestigung nicht eingehalten werden. Der einmal ins Holz eingebrachte Konservierungsstoff kann unter normalen und heute technischen Möglichkeiten nicht wieder herausgelöst werden ohne das Objekt zu schädigen oder sogar zu zerstören.

Ohne dieses Verfahren gäbe es eine Vielzahl der inzwischen von der Firma „IBACH Steinkonservierung“ konservierten Objekte und Bauteile nicht mehr. Nach Snethlage handelt es sich bei der Acrylharzvolltränkung um ein sicheres Konservierungsverfahren, welches, gegenüber Fehlern, die Restauratoren auch bei herkömmlichen Behandlungen gemacht haben, berechenbar ist.<sup>1</sup>

Das verwendete Konservierungsmittel, oder auch Tränkmittel, ist hierbei eine wichtige Komponente, da PMMA, oder anders Acrylglas oder Plexiglas, ein reiner Kunststoff ist, gegenüber früher und bis heute verwendeten Konservierungsmitteln, von denen die Inhaltsstoffe nicht oder nur zum Teil bekannt sind.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> SNETHLAGE 2005, S. 258.

<sup>2</sup> DE WITTE, EDDY: Die Anwendung moderner Kunststoffe in der Konservierung und Restaurierung : neuere Erkenntnisse. In: *Mitteilungen : Deutscher Restauratorenverband* 1980/81, S.46.

Aus der Sicht der Denkmalpflege gibt es folgende Kriterien, ob ein Objekt durch eine Acrylharzvolltränkung konserviert werden soll:<sup>3</sup>

- „Das Objekt darf kein Denkmal allerersten Ranges sein.
- Es soll einen hohen Schädigungsgrad aufweisen, der nach heutigem Kenntnisstand eine dauerhafte Behandlung mit herkömmlichen Methoden nicht zuläßt.
- Es kann nicht in ein Museum gebracht werden, da es künstlerisch nicht bedeutend genug ist, und auch sonst nirgends in geeigneter Form aufbewahrt und ausgestellt werden kann, weil kein geeigneter Raum vorhanden ist.
- Es erfüllt an seinem Standort eine wichtige Funktion als Teil eines Ensembles oder der Kulturlandschaft.
- Es ist an seinem Standort der Witterung ausgesetzt.
- Da die Acrylharzvolltränkung nicht vor Ort durchgeführt werden kann, muß als weiteres Kriterium erfüllt sein, daß das Objekt transportabel ist.“

Bei den genannten Kriterien handelt es sich um Ansätze für Steindenkmäler, welche aber auch auf Holz übertragbar sind.

Nicht die Verfahrenstechnik allein bestimmt die Holzfestigung, sondern der verantwortliche Restaurator. Er muß Techniken und Materialien wählen, die den jeweiligen Zustand und die kulturelle Bedeutung des Objektes nicht gefährden. So sollen spätere Maßnahmen und Untersuchungen am Objekt durch das Festigungsmittel nicht behindert werden. Ohne eine Substanzfestigung kann das Objekt auf Dauer nicht erhalten werden. Die Materialauthentizität wird durch das Einbringen von Kunststoffen als Festigungsmittel verändert. In der Fachsprache hat sich für diese Kunststoffvollgetränkten Hölzer der Begriff Polymerholz sowie plastifiziertes Holz entwickelt.

---

<sup>3</sup> SNETHLAGE 2005, S. 256.

## 1.2 Dank

Vorliegende Arbeit wurde im Jahr 2006 am Lehrstuhl für Restaurierung, Kunsttechnologie und Konservierungswissenschaften der Technischen Universität München als Diplomarbeit eingereicht.

Mein Dank gilt:

Prof. Dipl. Rest. Erwin Emmerling und der Firma „IBACH Steinkonservierung GmbH & Co. KG“ (Scheßlitz/ Bamberg).

Unterstützt wurde die Arbeit durch:

Frau Angelika Full, Dipl.-Ing. Georg Gaede, Herr Peter Hainzinger (Techniker), Diplom-Holzwirt Fritz Tröger und weiteren Mitarbeitern am Institut für Holzforschung München der Technischen Universität München.

Dr. Jürgen Göske vom Zentrum für Werkstoffanalytik Lauf (ZWL) für die REM-Aufnahmen.

Dr. Achim Unger vom Rathgen- Forschungslabor der Staatlichen Museen zu Berlin danke ich für die Mitwirkung.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Vorbemerkungen

#### 2.1.1 Geschichte der Holzfestigung

Degradiertes Holz zu stabilisieren, spielt in der Literatur eine eher untergeordnete Rolle. Dagegen gibt es zahlreiche Quellen, die belegen, wie das Holz vor Insekten und Pilzbefall geschützt wurde. Viele Hinweise dazu sind noch heute durchaus berechtigte und praktikable Schutzmaßnahmen. Wie jedoch mit geschwächtem Holz umgegangen wurde, ist selten beschrieben.

Konsolidierung bedeutet heute Festigen, Sichern oder Versteifen. Schiessel definiert die Holzfestigung wie folgt: „Holzfestigung oder auch Holzverfestigung ist der gängige Begriff für die festigkeitserhöhende Maßnahme an geschwächten Holz. In der Regel ist damit die tränkende Behandlung des Holzes mit erhärtenden Stoffen gemeint, modern sind dies in der Regel Kunstharze. Unter dem Anspruch der Kulturguterhaltung soll dabei die beschädigte Holzsubstanz möglichst gehalten werden.“<sup>4</sup>

Auf eine detaillierte Darstellung der restauratorischen Geschichte der Holzfestigung wird verzichtet, da diese u. a. von SCHIESEL (1984), SCHIESEL (1989), UNGER (1990), EMMERLING (1993), SCHIESEL (1993) und UNGER (2001) vorliegt. Ein Abriß soll die Entwicklung der Holzfestigung mit den verschiedenen Materialien erläutern.

Eines der ältesten Konservierungsmittel zur Festigung von Holz ist tierischer Leim, der vor allem als Glutinleim von der Holzverklebung abgeleitet ist. Über zwei Jahrhunderte, bis in unsere Zeit, wurde er als Festigungsmittel verwendet und erst nach der Erkenntnis des bioziden Abbaus nicht mehr eingesetzt.<sup>5</sup> Darauf folgten Festigungsmaßnahmen mit trocknenden Ölen, die sich wiederum aus der handwerklichen Verwendung in der Anstrichtechnik herleiteten. Ihr Gebrauch ist ebenso alt, wie der des tierischen Leims.<sup>6</sup>

Diese Festigungsverfahren erhielten am Anfang des 20. Jahrhunderts einen nochmaligen Aufschwung mit modernen trocknenden Ölen, wie z.B. dem chinesischen Holzöl. Aber auch sogenannte modifizierte Öle, die den Übergang zu den Kunststoffen darstellen, wie Alkydharztypen, hielten Einzug in die Holzfestigung, als Mischungen mit trocknenden Ölen.<sup>7, 8</sup>

Ein weiteres wichtiges Festigungsmittel stellen die verschiedenen Wachse dar, welche seit Mitte des 19. Jahrhunderts als Holzkonsolidierungsmittel gelten. Neben Bienenwachs nimmt das Mineralwachs eine wichtige Rolle ein (Abb. 1).<sup>9</sup> Demgegenüber ist die Verwendung von gelösten Naturharzen gering. Sie reicht von den 1880er Jahren bis in unsere Zeit.<sup>10</sup>

---

<sup>4</sup> SCHIESSL, ULRICH: Probleme der Konservierungsstoffe zur Festigkeitserhöhung von degradiertem Holz. In: Bilfinger, Monica; Meili, David (Hrsg.): *Konservierung von Holzbauten*. Bern, Stuttgart 1989, S 93.

<sup>5</sup> UNGER, ACHIM; SCHNIEWIND, ARNO P.; UNGER, WIBKE: *Conservation of Wood Artifacts: with 69 figures and 5 tables*. Natural Science in Archaeology. Berlin 2001, S. 378.

<sup>6</sup> UNGER ET AL. 2001, S. 381.

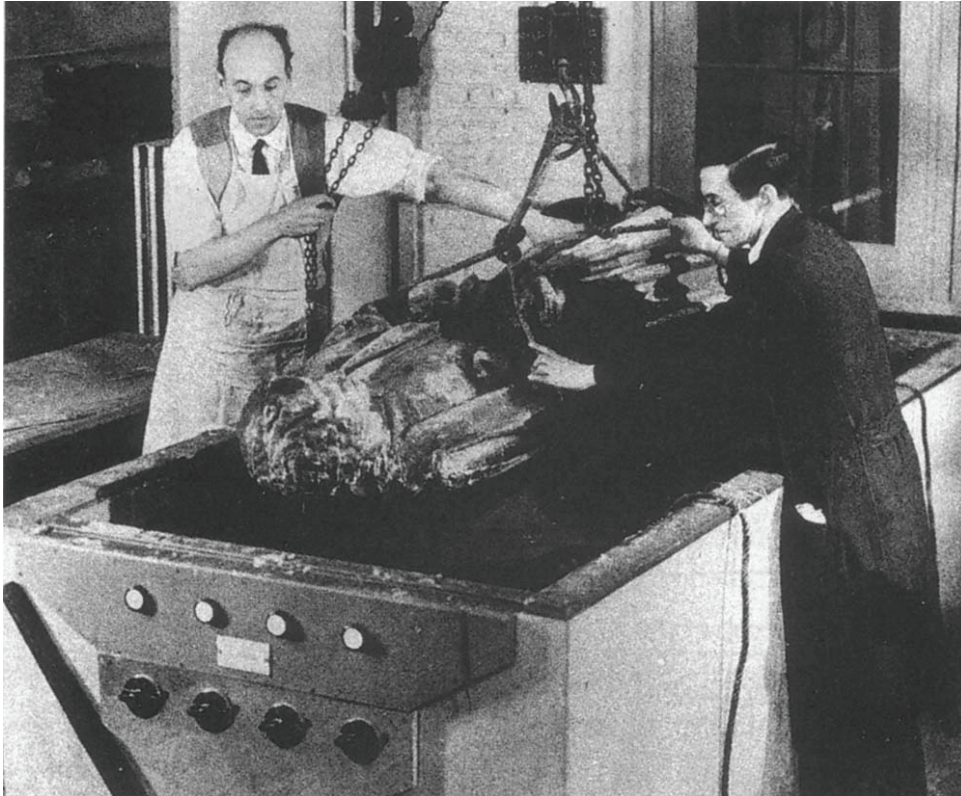
<sup>7</sup> SCHIESSL, ULRICH: Historischer Überblick über die Werkstoffe der schädlingsbekämpfenden und festigkeitserhöhenden Holzkonservierung. In: *Maltechnik-Restaur* 90. Jahrgang (April 1984), S. 28.

<sup>8</sup> UNGER ET AL. 2001, S. 383.

<sup>9</sup> UNGER ET AL. 2001, S. 386, 393.

<sup>10</sup> UNGER ET AL. 2001, S. 394.





**Abb. 1:** Heizbarer Tauchtank mit Bienenwachs und Parafin zur Volltränkung von Holzobjekten aus den fünfziger Jahren. SCHIESEL 1993, S. 16, Abb. 1.

Hundert Jahre ist mittlerweile die Festigung von Holz mittels Kunststoffen bekannt. Sie sind sie in organischen Lösungsmitteln aufbereitet bis heute im Einsatz. Ihr Problem beruht in der physikalischen Trocknung, bei der es zu Volumenreduktionen bei der Verfestigung des Holzes kommt. Ein weiterer Aspekt ist der Einfluß des Lösungsmittels auf das zu festigende Objekt und das Holz selbst.<sup>11</sup>

Seit den dreißiger Jahren des 20. Jahrhunderts wurden sich chemisch verfestigende Harztypen entwickelt. Sie polymerisieren nach der Einbringung in das Holz als Monomer auf katalytischem Weg, durch Wärme- oder Strahlenenergie zu einem Polymer.<sup>12</sup>

Die Zukunft der Holzfestigungsmittel hängt nicht nur von den zur Verfügung stehenden Materialien ab, sondern auch davon, wie der Restaurator sie einsetzt. Denn die Forschung ist im Bereich der festigkeitserhöhenden Verfahren am Holz noch überwiegend jene, der Nutzholzkonservierung. So ist der Restaurator gerade hier oft gezwungen, Stoffe und Applikationswege umzudeuten und gegebenenfalls einzusetzen.

Eine Zeittafel nach UNGER dient zur Übersicht der verwendeten Konsolidierungsmittel. Es ist lediglich der erstmalige Einsatz der jeweiligen Konsolidierungsmittel erwähnt. Die Mittel sind mit anderen Komponenten immer wieder modifiziert worden.

---

<sup>11</sup> UNGER ET AL. 2001, S. 430 ff.

<sup>12</sup> UNGER ET AL. 2001, S. 345 ff.

Zeittafel zur Geschichte der Holzfestigung (nach Unger et al. 2001, S. 363 ff.)

Zeit	Konsolidierungsmittel
1737	Kochen des Holzes in Öl unter Zugabe von Salzen (Emerseon)
1740	Eintauchen des Holzes in Alaun u. Eisenvitriol (Eisen(II)-sulfat)
18./19.Jh	Leimtränkungen zur Holzfestigung
1826	Kochen des Holzes in Leinöl, Eisenvitriol, Grünspan, Arsenik u. Alaun
1844	Holz erst mit Eisenvitriol, dann mit Wasserglas imprägniert
1852/55	Kochsalzlösung und Copallack (Kefermarkter Altar, Österreich)
1888	Carbolineum (Behandlung des Teeröls mit Chlor, Patent Avenarius)
1890	Paraffinwachs in der Konservierungstechnik für Kunstwerke
1892	Zaponlack (Nitrocellulose) erscheint im Handel
1894	sehr zerbrechliche Gegenstände werden in 15 g Dammarharz, 130 g Benzin, 20 g gebleichtes Mohnöl und 150 g Terpentin (-spiritus) getaucht
vor 1900	Objekte werden in Kesseln mit heißem Leinölfirnis gebadet
um 1900	Warmer Leim + fäulnishemmende Substanzen, Zaponlack (Cellulosenitrat), Cellon (Celluloseacetat), Erwähnung holzölhaltiger Tränkmittel
1902	C. Gurlit taucht desolate Objekte in heiße Wachs- Harz- Lösungen
1907	Phenol- Formaldehyd-Harze (Pressmassen Bakelite) Patent Baekeland's
1909/10	warmer Leim, venet. Terpentin und Formalin (40% wassergelöstes Formaldehyd)
um 1910	Phenolharze (Bakelite) dienen als Holzfestiger, härten von Leim mit Thymolkristallen, Thymol + Leim fäulnishemmend
1910	Formalin als Härtungsmittel für Leim (Haut, Knochen, Lederleim)
1916	Gemisch aus Alaun und Glycerol als Tränkung
1918	Harnstoff- Formaldehyd- Harz (UF- Kondensationsprodukte)
1923	Xylamon von (Alkaliwerke Westeregeln) mit Naturharzen und Wirkstoff 1-Chlornaphthalen
1924	wässrige Gelatine zur Festigung (Rathgen), Kolophonium (Rathgen), Copaivabalsam für vergoldete Statuen (Rathgen)
1926	Campheröl mit anderen Substanzen (vgl. Leinöl)
1926	„Puckelin“ kalte Mischung von Harz, Bernsteinlack und Campher
1929	Arsenverbindungen + Dammarfirnis (Kefermarkter Altar); Herstellung der ersten Alkydharze in Deutschland
1931	wässrige Celluloseleime erstmals im Handel
1934	Schellack zur Festigung eines gotischen Flügelaltars
1934/40	Methylcellulose, Alkydal + Kolophonium
1937	Zucker eignet sich zur Konsolidierung (Stamm); Entwicklung der PUR- Produkten durch Otto Bayer
1938	Epoxydharz Patentanmeldung von Castan
1939	Bienenwachs- Mastix- Lösung (Tafelbild)
1940	Tränkung von Kunstwerken mit MF- Harzen (Melamin-Formaldehyd- Harze)
1945	PVAC- Dispersionen und Emulsionen gewinnen zunehmend an Bedeutung als Klebstoff und Bindemittel
um 1950	Celluloseacetat, Polyvinylacetat
1950/55	Imprägnierung mit Polyethylenglycol (Centerwall und Moren)
1956	Schellacklösung (Hochaltar Gurker Dom mit 1500 l); Calcium-caseinat als Oberflächenbehandlungsmittel (Plenderleith); Carbowax (Poly-ethylenglycol) mit wasserlöslichen Phenol- Formaldehyd-Harz (Stamm); Resorcinol- Formaldehyd-Harz, als Anstrichsysteme für Holzoberflächen; UF- Harze als Überzug für Holzoberflächen; Trockenfaules Holz mit Gemisch aus Collodiumwolle und AP-Harz (Ketonharz) in Aceton; Festigung hölzerner Kunstwerke mit PVAC; ungesättigtes Polyesterharz (UP-Harz) wird unter den Festigungsmitteln von Plenderleith erwähnt; Oberflächenbehandlung von Kunstgegenständen mit Epoxydharz
1958	erstes Holz- Plast- Kombination mit Monomeren und strahlen-chemischer Aushärtung (Frejdin und Kenaga); Polyvinylalkohol, Vakuumimprägnierung mit PVAL- Lösung an hölzernem Bildträger; Festigung einer Holztafel mit PVC; Tränkung von Proben alten Holzes mit Epoxydharz- Polyamid-Gemisch

um 1960	PMMA (polymerisierte Acrylverbindungen) in gelöstem Zustand als Festigungsmittel
ab 1960	Epoxidharze als Mittel zur Holzfestigung
1961/62	Polyethylenglycol als Festigungsmittel
1962	Wachs, Terpentin und Lackbenzin unter Zusatz von DDT zur Wachstränkung historischer Objekte
1966	50 g Calaton CA in 50 ml Wasser und 400 ml Methanol (lösen) darauf 400 ml Dichlormethan zum Konsolidieren von Holzplastiken (Mager- Maar)
1967/68	Erste Versuche mit Methylmethacrylat und Gammastrahlen
1968	Xylophen SC + Lindan (Aberle u. Koller); Kolophonium mit Glycerol als Weichmacher
1970	Stabilisierung einer polychromen Holzskulptur mit einem Polyvinylacetal
1971	Tributylzinnoxid TBTO als Zugabe in Gips oder Zement bei Sanierung von pilzbefallenem Holz
1972	Schutz gegen Pilzangriff in feuchten Räumen mit Saran ein PVDC-Harz (Polyvinylidenchlorid)
1973	Verstärkung von Holzbauteilen in Gebäuden mit Isocyanat-Präpolymeren (PU- Technik); Behandlung von Holzbauteilen in Gebäuden mit Thiokol (Trioplaste, Polyethylensulfid, Polysulfid) modifizierten Epoxytharz
1974	Festigung mit Butylmethacrylat (BMA) kleinere Brettchen mit Malschichten
1980	Mlönck empfiehlt Thioplast zum Verkitten von Rissen in Balken von Fachwerkbauten
1981	Stabilisierung von Holzbauteilen historischer Gebäude mit Polyurethan in Japan (Higuchi)
1981/83	TBTO als Biozid in Piaflex LT 30 (Butylmethacrylat)
1982	Besprühen mit Polyethylenglycol, Tränkung kleinerer Objekt mit Polyethylenglycol und anschließender Gefriertrocknung

### 2.1.2 Holzanatomische Merkmale in Bezug auf die Tränkbarkeit

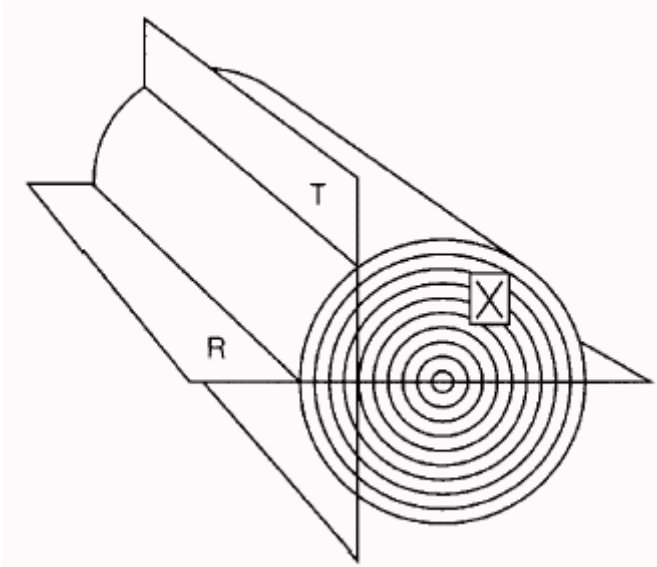
Anhand der Makrostruktur läßt sich der anisotrope Aufbau des Holzes beschreiben. Damit wird die Zuordnung vieler richtungsabhängiger Holzeigenschaften ermöglicht. Die Mikrostruktur liefert die meisten Unterscheidungsmerkmale für die Holzartenbestimmung. Um den Zusammenhang zwischen makroskopischem und submikroskopischem Aufbau nachvollziehen zu können, werden die wichtigsten mikroskopischen Strukturelemente kurz erwähnt. Die Betrachtung der submikroskopischen Struktur des Holzes ist vor allem zum Verständnis des hygroskopischen Verhaltens und der rheologischen Eigenschaften erforderlich.

Als Werkstoff verwendetes Holz ist größtenteils dem entasteten Stamm eines Baumes entnommen, der sich in grober Näherung als Zylinder beschreiben läßt. Durch ihn lassen sich drei aufeinander senkrecht stehende Schnittebenen legen (Abb. 2), die den drei anatomischen Hauptrichtungen des Holzes (tangential, radial und longitudinal bzw. axial) zugeordnet sind. Der Radialschnitt wird durch die Längsachse und den Durchmesser definiert, der Tangentialschnitt entsprechend durch eine Sehne des Stammkreises. Im Rechten Winkel zur Stammachse verläuft der Quer- oder Hirnschnitt.<sup>13</sup> Das Stammdickenwachstum findet im Kambium, in konzentrisch zur Markröhre angeordneten Ringen statt. In den gemäßigten Klimazonen bilden sich, bedingt durch die Unterbrechung der Vegetationszeit, sogenannte Jahrringe (Abb. 3, 4). Im Frühjahr sind es zuerst die großlumigen, dünnwandigen Frühholzzellen, die der Saftleitung dienen. Je nach Holzart gehen diese mehr oder weniger sprunghaft in englumige, dickwandige Spätholzzellen über, die eine größere Dichte und mechanische Widerstandskraft besitzen.<sup>14, 15</sup>

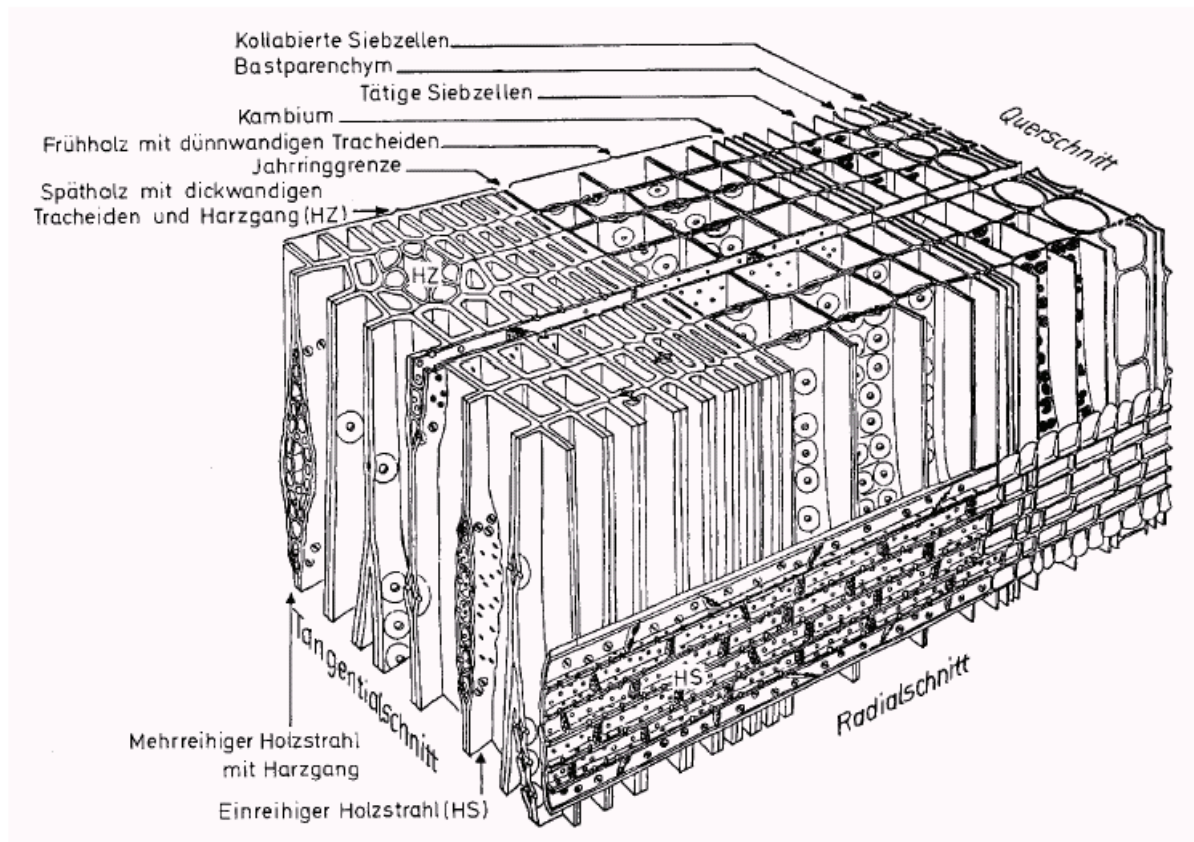
<sup>13</sup> KOLLMANN, FRANZ F. P.: *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Bd. 1. 2. Aufl., Berlin 1951, S.1.

<sup>14</sup> KOLLMANN, Franz F. P.: *Verformung und Bruchgeschehen bei Holz als einem anisotropen, inhomogenen, porigen Festkörper*. VDI-Forschungsheft Nr. 520, Düsseldorf 1967, S. 6-7.

<sup>15</sup> HOADLEY, R. BRUCE: *Holz als Werkstoff*. Ravensburger Holzwerkstatt. Bd. 1., Ravensburg 1990, S. 23.



**Abb. 2:** Die den drei anatomischen Haupttrichtungen zugeordneten Schnittebenen durch einen Holzstamm. Es bedeuten **R**: radial; **T**: tangential; **X**: Querschnitt. HOADLEY 1998, S. 5, Fig. 3.



**Abb. 3** Aufbau von Nadelholz. GROSSER 1977, S. 13, Abb. 6.



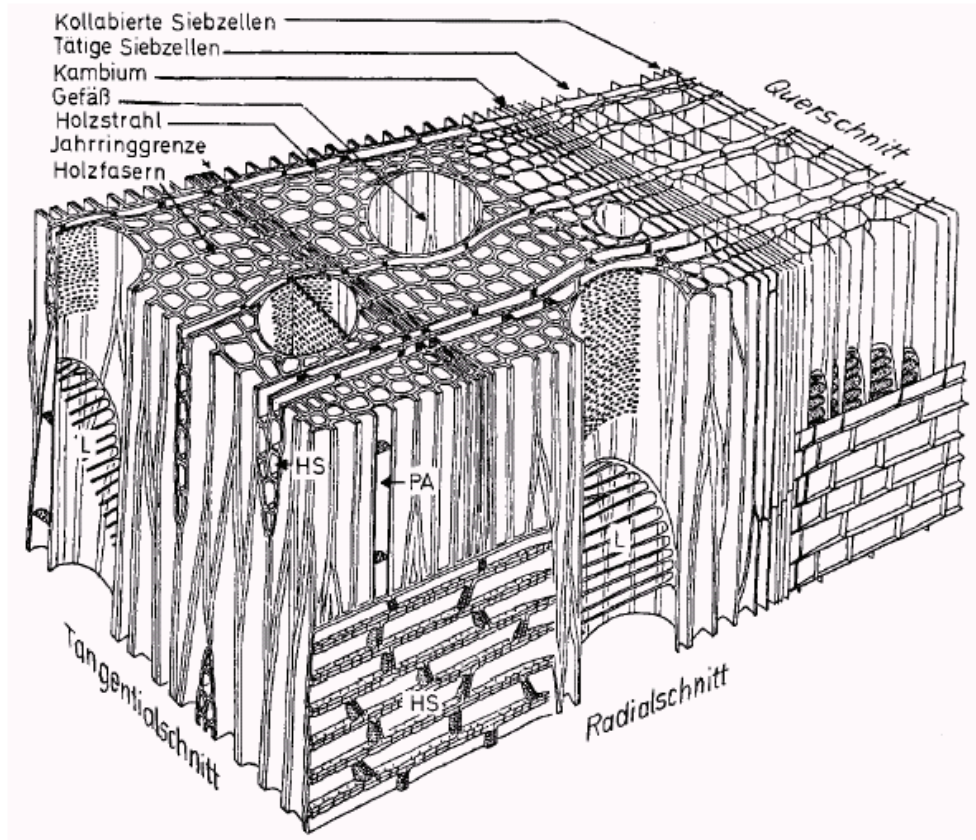


Abb. 4: Aufbau von Laubholz. GROSSER 1977, S. 28, Abb. 15.

Im älter werdenden Stamm werden nur die äußeren Jahrringe für die Wasser- und Nährstoffbeförderung verwendet. Bei manchen Holzarten kommt es im Stamminneren zur Ausbildung von Kernholz, wobei die dort gelegenen Holzzellen durch Einlagerung von Kernstoffen „stillgelegt“ werden. Das äußere, leitfähige Holz bezeichnet man als Splint. Die radial verlaufenden Holzstrahlen dienen der Speicherung von Nährstoffen und bestehen aus Parenchymzellen oder Radial- bzw. Quertracheiden.<sup>16</sup>

Das Holzgewebe ist aus unterschiedlichen Arten von Zellen aufgebaut, die größtenteils langgestreckt in Richtung der Stammachse orientiert sind. Die Laubbäume verfügen über mehr und spezialisiertere Zellarten als die entwicklungsgeschichtlich älteren Nadelbäume.<sup>17</sup> Die wichtigsten Zellarten und ihre Funktionen zeigt sich in folgender Tabelle. Der unterschiedliche Aufbau von Nadel- und Laubholz ist anhand der Abbildungen 3 und 4 ersichtlich.

<sup>16</sup> HOADLEY 1990, S. 23.

<sup>17</sup> SCHWAB, ERNST; KLEIN, PETER: Zum Verständnis des Quell- und Schwindverhaltens von Holz und Holzwerkstoffen. In: Holztechnologie und Holzkonservierung, Möbel und Ausstattungen, Restauratorenblätter Bd. 10. Wien, 1989, S. 15-16.

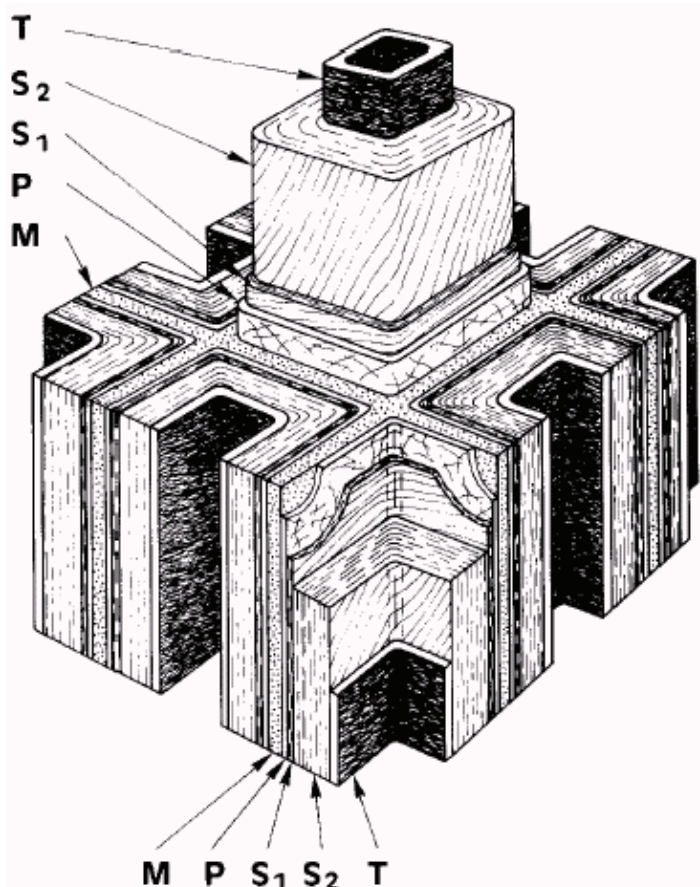
Holzanatomische Merkmale in Bezug auf die Tränkung

Die wichtigsten Zellarten, ihre Funktion und Vorkommen in Laub- bzw. Nadelholz.

Bei Laubhölzern schwankt der Anteil der Zellarten auch innerhalb einer Holzart stark (nach SCHWAB; KLEIN 1998, S. 16, Tab.1 und TRENDELENBURG 1955, S. 152-153.)

Zellenart	Aufgabe	Nadelholz	Laubholz
Tracheiden	Festigung Leitung	89-95% des Holzvolumens	vorhanden
Parenchym (Längs- und Quer-)	Speicherung	vorhanden	ca. 10-45% des Holzvolumens
Fasern	Festigung	-	ca. 30-70% des Holzvolumens
Gefäße	Leitung	-	ca. 7-31% des Holzvolumens

Die einzelnen Zellen sind über Mittellamellen miteinander verbunden. Auf die äußere Schicht der Zelle, der Primärwand, folgen die zwei Schichten S1 und S2 der Sekundärwand. Der innere Zellhohlraum, das Lumen, wird durch die an die S2-Schicht anschließende Tertiärwand begrenzt. Diese Schichten bestehen aus Fibrillen und sind in Abbildung 5 schematisch angedeutet.



**Abb. 5:** Schematischer Aufbau einer verholzten Zellwand.

Es bedeuten **M**: Mittellamelle; **P**: Primärwand; **S1** und **S2**: Sekundärwand; **T**: Tertiärwand (stellenweise auch als S3 bezeichnet). SCHWAB; KLEIN 1989, S. 18, Abb.4.

Den Zellwandaufbau kann man sich als ein Verbundsystem vorstellen.<sup>18</sup> Die zugfeste Cellulose ist in druckfestes, amorphes Lignin und kurzkettige Polyosen (Hemicellulosen) eingebettet. Die überwiegend kristallin strukturierte Cellulose kann dabei mit der Stahl-

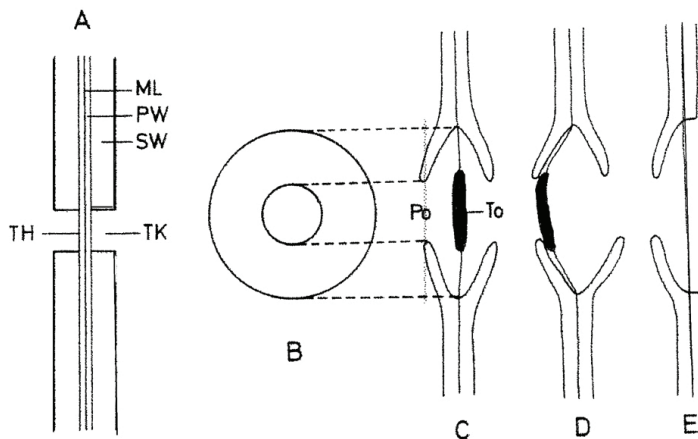
<sup>18</sup> SCHWAB; KLEIN 1989, S. 17.

Bewehrung in einem Stahl- Beton-Verbund verglichen werden. Ihr prozentualer Anteil, bezogen auf die Trockenmasse, beträgt 42 bis 60%, der des Lignins 20 bis 26%.<sup>19</sup> Das Vorkommen und der Anteil an weiteren Inhaltsstoffen, zu denen u. a. Harze und Gerbstoffe gehören, variiert stark nach Holzart.

Die Lumen, als verholzte Hohlräume, sind bei der Volltränkung zu füllen, wobei auch die Zellwände möglichst durchtränkt werden sollten, da sie durch ihren Wassergehalt verantwortlich sind für das Quell- und Schwindverhalten des Holzes.

Die holzanatomisch vorgegebenen Stofftransportwege in axialer, radialer und tangentialer Richtung müssen auch bei der Tränkung von Holz benutzt werden. Hierbei spielen die Verbindungen unter den einzelnen Zellen eine große Rolle. Während aber im Kernholz der Hoftüpfelverschluss, die Thyllenbildung oder andersartige Gefäßverstopfungen die Transportwege verstopfen, sind diese in der Splintholzzone offen.<sup>20</sup>

Die Tüpfel (Abb. 6) sind die Verbindungsöffnungen der einzelnen Zellen untereinander. Durch sie ist ein Stofftransport möglich und kontrollierbar, wobei sie eine Strömungseinstengstelle darstellen. Tüpfel sind für Flüssigkeiten und Gase durchlässiger als normale Zellwände und sind deswegen die Hauptwege für den Stofftransport von Zelle zu Zelle.



**Abb. 6:** Schematische Darstellung von Tüpfeln.

**A:** Einfacher Tüpfel; **ML:** Mittellamelle; **PW:** Primärwand; **SW:** Sekundärwand; **TH:** Tüpfelschliesshaut; **TK:** Tüpfelkanal; **B,C,D:** Hoftüpfel, doppelseitig behoft, zwischen zwei Tracheiden in Flächenansicht (B) und im Längsschnitt (C: mit Normalstellung des Torus, D: mit Stellung des Torus bei einseitigem Sog); **Po:** Porus; **To:** Torus; **E:** einseitig behoftener Tüpfel zwischen einer Tracheide (links) und einer Parenchymzelle. BRAUN 1963, S. 19, Abb. 7

Die Tüpfelgestalt ist für die Durchströmung und Transportprozesse von großer Bedeutung. Es gibt drei Grundtypen von Tüpfeln, die man sowohl in Nadel- als auch in Laubholz finden kann. Den gewöhnlichen Tüpfel, der zwei Parenchymzellen verbindet, den einseitig behoftenen Tüpfel, welcher zwischen den Parenchymzellen und prosenchymatischen Zellen

<sup>19</sup> KOLLMANN 1967, S. 8.

<sup>20</sup> BOSSHARD, HANS HEINRICH: *Holzkunde : Zur Biologie, Physik und Chemie des Holzes*. Bd. 3. 2. Aufl., Basel, Boston, Stuttgart 1984, S. 139.

(Tracheiden, Fasern, Tracheen) vorkommt und den doppelseitig behoften Tüpfel, welcher prosenchymatische Zellen verbindet.<sup>21</sup>

Von diesen Tüpfelarten hat der beidseitig behofte Tüpfel beim Nadelholz, wie Kiefer und Fichte, die größte Bedeutung für die Durchflußeigenschaften, da fast das ganze Gewebe aus prosenchymatischen Zellen besteht.<sup>22</sup>

Die Tüpfel, welche die längs und querleitenden Zellen jeweils untereinander verbinden, heißen Kreuzungsfeldtüpfel. Diese Kreuzungsfeldtüpfel stellen die Verbindung zwischen dem Längs- und Querleitungssystem her und unterscheiden sich ihrer Gestalt nach bei jeder Holzart. Hinsichtlich der Tüpfelung wird bei Nadelhölzern, wie Kiefer und Fichte, von Kreuzungsfeldtüpfeln (Verbindung zwischen Tracheide und Holzstrahlen) und bei Laubhölzern, wie Eiche, von Gefäßtüpfeln (Verbindung zwischen Gefäß und Gefäß) gesprochen.<sup>23</sup>

Um einen verbesserten Stofftransport durch eine größere Durchströmungsfläche zu gewährleisten, befinden sich an den Verbindungsstellen zwischen zwei Längstracheiden immer ganze Tüpfelfelder.

Die Flüssigkeit, welche durch einen Nadelholzhoftüpfel hindurchströmt, passiert zunächst den zugewandeten Porus (Öffnung) und tritt dann in die Tüpfelkammer ein. Dort trifft die Flüssigkeit auf eine Membran (Margo), die in der Mitte zum sogenannten Torus verdickt ist. Dieser hat keine Öffnung, so daß die Flüssigkeit um ihn herum, durch die äußere Margo bildenden Haltefäden bzw. deren Öffnung strömen muß. So besteht beim Nadelholz die Möglichkeit, die Flüssigkeitsströmung zu blockieren, wenn der in der Tüpfelkammer hängende Torus auf Grund einer Strömung in den Porus gedrückt wird. Man spricht von einem aspirierten Tüpfel.<sup>24</sup>

Ein Tüpfelverschluß kann auch bei der Verkernung von Nadelholz eintreten, wenn wie bei der Trocknung, Luft in die Leitungsbahnen eindringt. Dadurch wird die Tränkbarkeit von Nadelholz deutlich erschwert, wobei die Anzahl der verschlossenen Tüpfel unterhalb der Fasersättigung stark zunimmt.<sup>25</sup> So ist das Porensystem der Zellwände demzufolge im feuchten Zustand für Flüssigkeiten aufnahmefähiger.<sup>26</sup>

Bei den Laubhölzern gibt es keine Tori und die Membranen sind gleichförmig im ganzen Tüpfelhof verteilt, wodurch die Durchströmung in der Regel besser verläuft. Die Tüpfel sind zudem im allgemeinen kleiner als die von Nadelholz und man kann keine Membranöffnung in der Margo erkennen.<sup>27</sup>

Die radial verlaufenden Markstrahlen stellen einen weiteren Transportweg für Tränklösungen dar, wobei der strukturelle Aufbau und der physiologische Zustand für die Tränkbarkeit relevant sind.<sup>28</sup>

Ferner spielen in diesen submikroskopischen Größenordnungsbereichen die Affinität von der Zellwandsubstanz und dem Tränkmittel, die Molekularität und die Oberflächenspannung der einzubringenden Flüssigkeit eine entscheidende Rolle. Allgemeingültig für alle Holzarten ist die Beobachtung, daß Flüssigkeiten über die Querschnittsfläche verhältnismäßig leicht eindringen. Das Verschlußprinzip, das für die

---

<sup>21</sup> STAHL, MARIO: *Das Inkubations-/Dekompressionsverfahren zur Holzentfeuchtung*. München 2000, S. 14.

<sup>22</sup> STAHL 2000, S. 14.

<sup>23</sup> KÜHNEN, RENATE; WAGENFÜHR, RUDI: *Werkstoffkunde Holz für Restauratoren*. Leipzig 2002, S. 40.

<sup>24</sup> STAHL 2000, S. 15.

<sup>25</sup> STAHL 2000, S. 15.

<sup>26</sup> BOSSHARD 1984b, S. 140.

<sup>27</sup> STAHL 2000, S. 15.

<sup>28</sup> BOSSHARD 1984b, S. 139.



axialen Leitbahnen in erster Linie gilt, begrenzt aber die Eindringtiefe, wobei die Querschnittsfläche meist gering ist gegenüber der Gesamtfläche des zu tränkenden Holzkörpers.<sup>29</sup> Der axiale Transportweg stellt nach Bosshard zwar den wichtigsten Transportweg dar. Er ist aber nicht nur über die Querschnittsfläche erreichbar, sondern übernimmt aus den radialen Markstrahlen und Tüpfeln Tränkmittel und führt es weiter. Dies zeigt, daß es geeignete Leitelemente für Tränkmittel im Holz gibt. Aber nicht die Einzelemente machen den Imprägnierweg aus, sondern der gesamte Gewebeverband.<sup>30</sup>

### 2.1.3 Permeabilität von Holz

Permeabilität (lat.: *permeare* „durchlassen“, von lat.: *per* „hindurch“, und lat.: *meare* „passieren“) bezeichnet die Eigenschaft, von Festkörpern Gase und/oder Flüssigkeiten passieren zu lassen.

In der Chemie und der Biologie handelt es sich bei den Festkörpern, deren Permeabilität betrachtet wird, in der Regel um Membranen.

Unterscheidet sich die Durchlässigkeit der Barriere für verschiedene Stoffe (z. B. unterschiedliche Gase, oder gelöste Stoffe und Lösungsmittel), so spricht man von Semipermeabilität bzw. Selektivpermeabilität. Liegt keine Durchlässigkeit vor, so spricht man von Impermeabilität.

In der Geologie wird so die Durchlässigkeit von Gesteinen für Gase oder Flüssigkeiten bezeichnet.

Das Ausmaß des Gas- bzw. Flüssigkeitsmassenstroms durch kapillarporöse Körper kann mit der Permeabilität beschrieben werden. Porosität  $\varepsilon$ , die den Hohlraumanteil eines porösen Körpers erfaßt, errechnet sich wie folgt:<sup>31</sup>

$$\varepsilon = \frac{V_H}{V_{Ges}} = \frac{V_S}{V_H + V_S} = 1 - \frac{V_S}{V_{Gesamt}}$$

$\varepsilon$	Porosität
$V_{Ges}$	Gesamtvolumen des Porensystems
$V_H$	Hohlraumvolumen
$V_S$	Gesamtvolumen des Feststoffs

Beim Holz wird die Porosität auch als prozentualer Porenanteil  $e$  dargestellt und über die Dichteverhältnisse ausgedrückt.<sup>32</sup>

$$e = 100 - \frac{100 * \rho_{dtr}}{\rho_r}$$

$e$	Porenanteil, Volumen sämtlicher Hohlräume des Holzes im darrtrockenen Zustand, bezogen auf das Volumen des Holzes
-----	---

<sup>29</sup> BOSSHARD 1984b, S. 142.

<sup>30</sup> BOSSHARD 1984b, S. 142.

<sup>31</sup> STAHL 2000, S. 6.

<sup>32</sup> STAHL 2000, S. 15, S. 6.

$\rho_{dr}$  Rohdichte

$\rho_r$  Reindichte

Die Permeabilität kann als ein Maß für die Leichtigkeit angesehen werden, mit der eine Flüssigkeit unter dem Einfluß eines Druckgradienten durch ein poröses System fließt. Das bedeutet, daß der Körper eine gewisse Porösität aufweisen muß, im permeabel zu sein. Das heißt aber nicht, daß alle porösen Körper permeabel sind. Dies hängt jeweils davon ab, ob die Poren miteinander verbunden sind oder nicht. Für inkompressible Flüssigkeiten kann man nach der von Darcy 1856 entwickelten Formel schreiben:<sup>33</sup>

$$p_L = \frac{\text{Fluß}}{\text{Gradient}} = \frac{Q/A}{\Delta p/L} = \frac{Q \cdot L}{A \cdot \Delta P}$$

$p_L$  Permeabilität

Q Volumenstrom des Fluides

L Länge der Probe in Flussrichtung

A Querschnittsfläche der Probe senkrecht zur Flussrichtung

$\Delta P$  Druckdifferenz

---

<sup>33</sup> STAHL 2000, S. 7.

Soll diese Gleichung bei Gasströmungen angewendet werden, so muß man sie wegen der Kompressibilität von Gasen modifizieren. Die Darcy-Gleichung in differenzierter Form für Gase lautet dann:<sup>34</sup>

$$p_g = \frac{Q_g * L * \bar{p}}{A * \Delta p * p}$$

$p_g$  Gaspermeabilität

$Q_g$  Volumenstrom des Fluides beim Druck p

p Druck bei dem der Fluß gemessen wird

A Querschnittsfläche der Probe senkrecht zur Flussrichtung

L Länge der Probe in Flussrichtung

$p_2 - p_1 = \Delta p$  Druckdifferenz

$\bar{p} = (p_2 + p_1) / 2$  Arithmetischer mittlerer Druck in der Holzprobe

Die spezifische Permeabilität ergibt sich aus dem Produkt der Permeabilität mit der Viskosität. So ist deren Wert unabhängig von der zu messenden Flüssigkeit und nur eine Funktion der Porenstruktur des zu messenden Körpers. Die Formel der spezifischen Permeabilität, welche auch nur Permeabilität bezeichnet wird, lautet:<sup>35</sup>

$$k_1 = p_1 * \eta \quad \text{bzw.} \quad k_g = p_g * \eta$$

$\eta$  Viskosität der Flüssigkeit

k spezifische Permeabilität

Im Holzschutz ist die Permeabilität maßgebend für die Tränkbarkeit von Hölzern<sup>36</sup>, welche je nach Holzart in Abhängigkeit der Holzstruktur sehr verschieden ist.<sup>37</sup> Hierzu existieren aber keine verwertbaren Daten in der Literatur, welche die Permeabilität verschiedener Holzarten beinhalten. Einzig Angaben über die Tränkbarkeit in axialer, radialer und tangentialer Richtung des Holzes werden gemacht. So ist die Tränkbarkeit in axialer Richtung besser als in radialer. In tangentialer Richtung ist sie am schlechtesten.<sup>38</sup>

#### 2.1.4 Thermisch-Hygrische-Dehnung von Holz

Bei Erwärmen dehnt sich Holz, wie jeder andere Werkstoff, aus und zieht sich bei Abkühlung wieder zusammen.

Thermische Dehnungen entsprechen der hygrischen Quellung, wobei beide von nicht meßbaren inneren Kräften des Holzes verursacht werden und daher als endogene Maßänderungen zu betrachten sind.<sup>39</sup> Vorreiter beschreibt die Schwindung durch

<sup>34</sup> STAHL 2000, S. 7.

<sup>35</sup> STAHL 2000, S. 15, S. 7.

<sup>36</sup> LOHMANN, ULF: *Holzlexikon*. Bd. 2. 4. Aufl., Leinfelden-Echterdingen 2003, S. 171.

<sup>37</sup> LOHMANN 2003b, S. 499.

<sup>38</sup> LOHMANN 2003b, S. 499.

<sup>39</sup> VORREITER, LEOPOLD: *Hygro-, mechano- und thermoelastische Maßänderungen, Kennzahlen und Kräfte der Hölzer*. Mering 1965, S. 43.

Feuchteabnahme oder Trocknung analog zur thermischen Kürzung durch Abkühlung bzw. die Quellung durch Feuchteaufnahme entsprechend zur thermischen Dehnung durch Erwärmen.

Allgemein versteht man unter der Kenngröße der Wärmeausdehnung die Wärmeausdehnungszahl  $\alpha_w$ . Unter der Wärmeausdehnungszahl wird die Längenausdehnung eines 1 m langen Stabes bei einer Temperaturdifferenz von 1 K verstanden.<sup>40</sup>

Zwischen der Wärmeausdehnung und der Temperatur besteht nach Niemz ein linearer Zusammenhang. In gleichem Maße, wie es beim Erwärmen zu einer Längenzunahme kommt, hat das Abkühlen eine Längenabnahme zur Folge.

Die Wärmeausdehnungszahl von Holz wird von der Holzart, der Darrdichte und der Schnittrichtung beeinflusst.<sup>41</sup> Beim organischen inhomogenen und anisotropen Werkstoff Holz ist die Wärmeausdehnung in den drei Hauptrichtungen zur Längsachse verschieden und allen Richtungen sehr klein. Die axiale Ausdehnung ist in diesem Zusammenhang deutlich geringer als die radiale Ausdehnung.<sup>42, 43</sup> Praktisch hat die geringe Wärmeausdehnung des Holzes kaum Bedeutung, weshalb nach DIN 1052 über Entwurf und Berechnung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln für den Hochbau Längenänderungen des Holzes durch Erwärmung oder Abkühlung nicht berücksichtigt zu werden brauchen.

Insgesamt betrachtet, hat die Thermische Ausdehnung im Vergleich zum Quellen und Schwinden des Holzes eine wesentlich geringere Bedeutung, zumal eine Temperaturveränderung eine Änderung des Feuchtegehalts bewirkt und damit Quell- und Schwinderscheinungen auftreten, bzw. sich gegenläufig überlagern.<sup>44</sup> Die Thermische Ausdehnung wird mit abnehmendem Feuchtegehalt größer. Sinkt der Feuchtegehalt um je 1 %, so steigt die Thermische Dehnung um 2 - 3 % in Faserrichtung bzw. um 3 - 5 % senkrecht zur Faserrichtung. Nach Kollmann nimmt die Wärmeausdehnungszahl mit höherem Harzanteil zu.<sup>45</sup>

---

<sup>40</sup> NIEMZ, PETER: *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Leinfelden-Echterdingen 1993, S. 93.

<sup>41</sup> KOLLMANN 1951, S. 103.

<sup>42</sup> BOSSHARD, HANS HEINRICH: *Holzkunde : Zur Biologie, Physik und Chemie des Holzes*. Bd. 2. 2. Aufl., Basel, Boston, Stuttgart 1984, S. 228.

<sup>43</sup> KÖNIG, EWALD: *Holz als Werkstoff : Holz als Baustoff*. Stuttgart 1959, S. 109.

<sup>44</sup> KÜHNEN; WAGENFÜHR 2002, S. 65.

<sup>45</sup> NIEMZ 1993, S. 94.

Vorreiter<sup>46</sup> hat nach Niemz erstmals 1949 Wärmeausdehnungszahlen verschiedener Holzarten ermittelt. Niemz lehnt sich in der folgenden Tabelle für die Holzarten Eiche, Kiefer und Fichte daran an im Vergleich zum PMMA.

Lineare Wärmeausdehnung von trockenem Holz je Längeneinheit und 1 K im Bereich von  $-50\text{ °C} \dots +50\text{ °C}$ . (nach Niemz 1993, S. 93, Tab. 6/5)

Lineare Wärmeausdehnung von PMMA (aus Datenblatt der Kern GmbH, <http://www.kern-gmbh.de>)

Holzart	Wärmeausdehnungszahl ( $\times 10^{-6}$ ) m/m K		
	axial	radial	tangential
Eiche	3,43	28,30	42,30
Kiefer	3,65-4,00	-	63,30-72,60
Fichte	3,15-3,50	23,80-23,90	32,30-34,60
PMMA	80		

Die hygrische Dehnung bzw. das Quell- und Schwindmaß sind eine Zehnerpotenz größer als die thermische Längenänderung.<sup>47</sup> Auf ansteigende Feuchtigkeit reagiert das Holz mit der Einlagerung (Adsorption) von Wasser unter Volumenzunahme (Quellung).<sup>48</sup> Bei der Quellung findet unterhalb des Fasersättigungsbereichs bei Feuchteaufnahme durch Einlagerung der Wassermoleküle in die intermizellaren und interfibrillaren Hohlräume ein Ausdehnen der Zellwand und damit ein Quellen statt.<sup>49</sup> Bei Erreichen des Fasersättigungsbereichs ist dieser Vorgang weitgehendst abgeschlossen. Folgende Tabelle zeigt die maximalen Quellmaße nach Niemz.

Maximales Quellmaß verschiedener Holzarten (nach Niemz 1993, S. 55, Tab. 4/9.)

Holzart	Maximales Quellmaß in %		
	axial	radial	tangential
Eiche	0,3-0,6	4,6	10,9
Kiefer	0,2-0,4	4,2	8,3
Fichte	0,2-0,4	3,7	8,5

<sup>46</sup> VORREITER, LEOPOLD: *Holztechnologisches Handbuch*. Wien 1949, S. 34.

<sup>47</sup> NIEMZ 1993, S. 94.

<sup>48</sup> KÜHNEN; WAGENFÜHR 2002, S. 57.

<sup>49</sup> NIEMZ 1993, S. 54.

## 2.2 Methylmethacrylat

### 2.2.1 Geschichte des Methylmethacrylats

Acryl- und Methacrylsäure und auch einige ihrer Ester wurden als wissenschaftliche Präparate bereits im 19. Jahrhundert hergestellt. Ihre Eigenschaft, sich unter dem Einfluß von Licht und Wärme in klebrige, harzige Massen zu verwandeln, stand ihrer technischen Anwendung aber noch lange Zeit entgegen.<sup>50</sup>

Acrylsäurepolymere wurden das erste Mal 1873 von Caspary und Tollens beschrieben, die Polymere der Methacrylsäure sieben Jahre später durch Kahlbaum.

Bereits ab 1901 hatte Otto Röhm in Deutschland mit der Grundlagenforschung begonnen. Seine Arbeiten wurden zur Grundlage der technischen Entwicklung der Acrylchemie, die ab 1912 intensiv betrieben wurde und gegen Ende der 20er Jahre zu ersten kommerziell verwertbaren Produkten führte. Die entscheidende Wende setzte ein, als 1928 W. Bauer in Deutschland und R. Hill in England unabhängig voneinander die Ester der Methacrylsäure polymerisierten. Sie erhielten eine klare und harte Substanzen. Dieser neue, technologisch wertvolle Kunststoff erfuhr weiter an Bedeutung, als J. W. C. Crawford 1933 eine neue Synthese für Methacrylsäureester aus billigen Rohstoffen entwickelte. Die ICI eröffnete 1934 die erste britische PMMA-Fabrik und brachte das neue Produkt unter dem Namen Perspex auf den Markt. In Deutschland wurde es als Plexiglas vermarktet.

Bis 1945 wurde Perspex fast ausschließlich für Flugzeugkuppeln verwendet. Aber auch Zahnprothesen wurden damals schon aus PMMA hergestellt.<sup>51</sup>

Mit der Entwicklung neuer Verfahren zur Herstellung von Acrylsäure und Acrylsäureestern, etwa um 1953 durch W. Reppe, erlebte die Verwendung von Polyacrylaten für lacktechnische Anwendungsgebiete eine stürmische Entwicklung. 1938 gelang H. Rein die Herstellung erster Acrylat-Fasern, die praktischen Spinnversuche wurden 1942 sowohl bei der IG-Farben als auch bei DuPont aufgenommen. Die Orlon-Faser wurde etwa 1950 am Markt eingeführt. 1957 folgte dann die Einführung der Acrylat-Lacke, und schließlich wurden 1962 die selbstvernetzenden Acrylate in das Lackgebiet eingeführt.<sup>52</sup>

---

<sup>50</sup> KOESLING, VOLKER: Kleiner Exkurs in die Geschichte der Kunststoffe. In: *Arbeitsblätter für Restauratoren*. Heft 1, 1993, S. 128.

<sup>51</sup> KOESLING 1993a, S. 128.

<sup>52</sup> KOESLING 1993a, S. 128.

Als kurze Übersicht zur Geschichte von MMA dient nachstehende Zeittafel.

Zeittafel zur Geschichte des Methylmethacrylats (aus KOESLING 1993b, S. 137-138.)

1872	Labormäßige Herstellung von Acrylsäure durch Linnemann
1873	W. A. Caspary und Tollens beschrieben Polyacrylsäureester
1877	R. Fittig und Paul beschrieben Polymethacrylsäure
1880	Kahlbaums Polymerisation Acrylsäuremethylesters
1894	Moureu beschreibt die Synthese von Polyacrylnitril
1901	Otto Röhm betreibt Grundlagenforschung zur Polymerisation der Acrylsäure-Ester
1928	W. Bauer (Deutschland) und R. Hill (Großbritannien) polymerisieren PMMA als klaren glasähnlichen Kunststoff
1929	In Ludwigshafen gelingt die Synthese von Polyacrylnitril [D.R.P. 580351 und 654989]
1930	Die IG-Farben beginnen mit der Produktion von Polyacrylsäureester und Copolymerisaten
1931	Erste kommerzielle Produktion von Polymethacrylsäuremethylester (PMMA) Perspex, Plexiglas
1933	J. W. C. Crawford findet ein billiges Verfahren zur PMMA-Herstellung
1934	ICI nimmt die PMMA-Produktion in Großbritannien auf
1938	H. Rein erhält erste Acrylfasern
1941/42	Bei den IG-Farben in Wolfen werden Polyacrylnitrilfasern aus DMF-Bädern versponnen
1947	Union Carbide beginnt mit der Produktion von Vinylchlorid/ Acrylnitril-Copolymerisat
1950	Markteinführung der Orlon-Fasern
1957	Markteinführung der Acrylatlacke
1959	Einführung der wasserverdünnbaren Lacke
1962	Einführung der selbstvernetzenden Acrylate im Lacksektor

### 2.2.2 Chemische Grundlagen von Methylmethacrylat (MMA/PMMA)

Acrylharze, zu denen das PMMA zählt, sind Polymere (gr. *poly* „mehrfach“, *mero* „Teilchen“). Diese bestehen aus einem Kollektiv chemisch einheitlich aufgebauter Makromoleküle. Diese Makromoleküle unterscheiden sich in ihrer Kettenlänge und in ihrem Polymerisationsgrad. Polymere entstehen durch Polyreaktionen, Acrylharz durch

Polymerisation. Polymerisationen verlaufen nach einem Kettenwachstumsmechanismus, welcher sich in vier Schritte gliedert:<sup>53</sup>

1. Initiation
2. Kettenstart
3. Wachstumsphase
4. Kettenabbruch

Das Kettenwachstum kann durch Energiezufuhr oder durch Radikale ausgelöst werden. Läßt man verschiedenartige Monomere miteinander reagieren, erhält man Copolymerisate oder Mischpolymerisate. Zu der Gruppe der Polymerisatharze zählen neben den Polyacrylatharzen auch die Polyvinylacetate und die Polyvinylchloride.<sup>54</sup> Das PMMA ist ein homopolymerer Stoff und entsteht durch die Polymerisation von monomeren MMA. Diese Polymerisation nennt sich Blockpolymerisation.

<sup>53</sup> RÖMPP LEXIKON CHEMIE – Version 1.3, Stuttgart/New York 1997

<sup>54</sup> HOPPE, THOMAS: *Acrylmalerei - Die künstlerischen Techniken*. 2. Aufl. Leipzig 2002, S. 13-14.

## Schemata von Kunststoffen:

○-○-○-○-○-○-○-○-○-○-○	Schema eines homopolymeren Kunststoffes
○-■-○-■-○-■-○-■-○-■-○-■	Schema eines copolymeren Kunststoffes je nach Mischungsverhältnis
○○-■-○○-■-○○-■-○○-■-○○-■	

○ – z. B. Acrylat/ Vinylacetat

■ – z. B. Acrylsäureester/ Styrol

Man unterscheidet vier Arten von Polymerisationsverfahren:<sup>55</sup>

- Blockpolymerisation: außer den Monomeren sind keine weiteren Stoffe anwesend
- Lösungspolymerisation: Monomere und entstandenes Polymerisat sind in einem Lösungsmittel gelöst
- Perlpolymerisation: flüssige Monomere werden in Wasser zu Tröpfchen verteilt
- Emulsions-/ Dispersionspolymerisation: Monomere werden in Wasser emulgiert und in dieser Form polymerisiert

Deren Wachstum wird durch die Polymerisationsgeschwindigkeit bestimmt. Alle Stoffe, welche mit „Acryl“ bezeichnet werden, beginnen mit der Acrylsäure ( $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{COOH}$ ), der einfachsten ungesättigten Monocarbonsäure (Propensäure). Acrylate sind die Ester (und Salze) der Acrylsäure. Je nach Alkylrest R heißen die Ester dann:<sup>56</sup>

- Methylacrylat ( $\text{R}=\text{CH}_3$ )
- Ethylacrylat ( $\text{R}=\text{C}_2\text{H}_5$ )
- Propylacrylat ( $\text{R}=\text{C}_3\text{H}_7$ )
- Butylacrylat ( $\text{R}=\text{C}_4\text{H}_9$ )

Die einfachen Methacrylate können durch Veresterung der Methacrylsäure mit den entsprechenden Alkoholen hergestellt werden. Die Methacrylate sind Ester der Methacrylsäure mit der Zusammensetzung ( $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)-\text{COOR}$ ).<sup>57</sup> Die wichtigsten Alkylmethacrylate sind:<sup>58</sup>

- Methylmethacrylat ( $\text{R}=\text{CH}_3$ )
- Ethylmethacrylat ( $\text{R}=\text{C}_2\text{H}_5$ )
- Propylmethacrylat ( $\text{R}=\text{C}_3\text{H}_7$ )
- Butylmethacrylat ( $\text{R}=\text{C}_4\text{H}_9$ )

Acryl- und Methacrylverbindungen sind sich in ihrem chemischen Verhalten sehr ähnlich und werden daher im technischen Sprachgebrauch zusammenfassend als Acrylate bezeichnet (engl.: *acrylics*).<sup>59</sup>

Eine besondere technische Bedeutung haben die Methacrylsäuremethylester (Methylmethacrylat, MMA,  $\text{R}=\text{CH}_3$ ) mit der Summenformel  $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$ .<sup>60</sup>

<sup>55</sup> RÖMPP 1997.

<sup>56</sup> RÖMPP 1997.

<sup>57</sup> R=Alkyl- oder Aryl-Gruppe.

<sup>58</sup> RÖMPP 1997.

<sup>59</sup> RAUCH-PUNTIGAM, HARALD; VÖLKER, THEODOR: *Acryl- und Methacrylverbindungen*. Berlin, Heidelberg, New York 1967, S.2.



Es handelt sich beim MMA um eine farblose und stechend riechende Flüssigkeit, mit folgenden Eigenschaften:<sup>61</sup>

- Dichte 0,944 g/cm<sup>3</sup>
- Schmelzpunkt - 48 °C
- Siedepunkt 100 - 101 °C
- Flammpunkt 8 °C

Die Dämpfe reizen die Augen sowie die Atemwege. Bei einer hohen Dampfkonzentration bzw. Einatmung über einige Zeit, ist eine lähmende Wirkung auf das Zentralnervensystem zu erwarten. Kontakt mit der Flüssigkeit führt zur Reizung der Augen und der Haut. Es besteht die Gefahr der Sensibilisierung. Die maximale Arbeitsplatzkonzentration beträgt MAK 50 ppm bzw. 210 mg/m<sup>3</sup>.<sup>62</sup>

Die Herstellung von Methacrylsäure erfolgt durch Hydrolyse und Dehydratisierung von 2-Hydroxy-2-methylpropionitril mit Schwefelsäure und gleichzeitiger Veresterung mit Methanol. Außer dem Methyl- sind auch noch die Ethyl-, Butyl-, Isobutyl- und 2-Hydroxyethyl-methacrylate von technischer Bedeutung.<sup>63</sup>

Die Methylmethacrylate stellen die Ausgangsprodukte für die technisch wichtigen Polymethacrylate (PMMA) dar. Das Methylmethacrylat wird im Wesentlichen zur Herstellung von Plexiglas®, einem glasklaren Kunststoff mit großer Härte, Bruchsicherheit und chemischer Beständigkeit, verarbeitet. Weiterhin wird es in Copolymerisaten mit vielfältiger Anwendung, wie z.B. als Textilhilfsmittel oder in licht- und wetterbeständigen Anstrichmitteln, eingesetzt. Die weltweite Herstellkapazität für Methylmethacrylat betrug 1985 etwa 1,4 Millionen Tonnen pro Jahr.<sup>64</sup>

Polymethacrylate ist die allgemeine Bezeichnung für aus Estern der Methacrylsäure, durch radikalische Polymerisation hergestellte Polymere.

Polymethylmethacrylate (PMMA) sind die technisch wichtigsten Vertreter der Polymethacrylate und werden technisch durch radikalische Polymerisation von Methacrylsäuremethylestern bei hohen (Initiatoren: Azo-Verbindungen, Peroxide) oder niedrigen (Initiatoren: Redox-Systemen) Temperaturen hergestellt. Diese sogenannte thermische (thermokatalytische) Polymerisation von monomerem MMA zu polymerem PMMA wird durch Einwirkung thermischer Energie ausgelöst und führt zur Polymerisation.<sup>65</sup> Sie wird als Homopolymerisation bezeichnet, weil keine weiteren Inhaltsstoffe außer dem Monomer zur Polymerisation gebracht werden. Eine weitere Form der Homopolymerisation ist die sogenannte strahlenchemische Polymerisation von MMA zu PMMA. Hierzu werden hauptsächlich Gammastrahlen eingesetzt.<sup>66</sup>

---

<sup>60</sup> RÖMPP 1997.

<sup>61</sup> RÖMPP 1997.

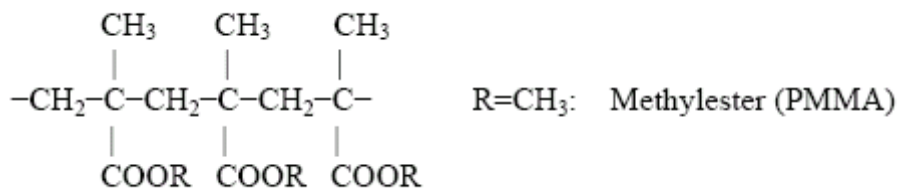
<sup>62</sup> RÖMPP 1997.

<sup>63</sup> RÖMPP 1997.

<sup>64</sup> RÖMPP 1997.

<sup>65</sup> RÖMPP 1997.

<sup>66</sup> BURMESTER, ARNO: Zur Vergütung von Holz durch strahlenpolymerisierte Kunststoff-Monomere. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 25 (1967), S. 11.



Strukturformel von PMMA<sup>67</sup>

Polymethylmethacrylate haben Molmassen von ca. 120000 bzw. ca. 180000 g/mol, die durch Zusatz von Reglersubstanzen während der Polymerisation gesteuert werden können. Polymethylmethacrylate besitzen hohe Härte, Steifheit, Festigkeit und Wärmeformbeständigkeit, gute elektrische und dielektrische Eigenschaften, hohe Witterungsbeständigkeit und haben Glasübergangstemperaturen bzw. Erweichungs- und Anwendungstemperaturen von ca. 105 C° bzw. 78 - 110 C°. Ihre chemische Beständigkeit kann durch Einbau von Acrylnitril (Acrylnitril-Methylmethacrylat-Copolymere, AMMA) verbessert werden.<sup>68</sup>

Polymethylmethacrylate sind hochglänzend, kratzfest und polierbar und besitzen hohe Farblosigkeit und ausgeprägte Transparenz. Gegenstände aus Polymethylmethacrylat können verklebt und verschweißt werden.

Acrylglas (Plexiglas) findet Verwendung in der Fahrzeugindustrie, u. a. zur Herstellung von Verglasungen (auch bei Flugzeugen), von Blink- und Rückleuchten sowie Prismenscheiben für Rückstrahler und Warndreiecke. In der Elektroindustrie dient PMMA zur Herstellung von Bedienungsknöpfen, Schaltteilen, Leuchtwannen und Leuchtabdeckungen. Im Bauwesen wird PMMA für Oberlichter, bruchsichere Verglasungen, sanitäre Installationsteile und durchsichtige Rohrleitungen verwendet. Auch zur Herstellung von Haushaltsgegenständen (Becher, Bestecke und Schüsseln) dient PMMA. In der Optik wird PMMA zur Herstellung von Brillen- und Uhrgläsern, Lupen, Prismen, Linsen und Lichtleitfasern benutzt. Im Modellbau, als Einbettmaterial für Schaustücke, für Sicherheitsabdeckungen an Geräten und als Zahnersatz ist PMMA vielfältig einsetzbar.<sup>69</sup>

In Westeuropa wurden 1988 ca. 220000 t PMMA verbraucht bei einer Produktionskapazität von ca. 1,5 Mio. t/Jahr weltweit.<sup>70</sup>

<sup>67</sup> HORIE, C. V.: *Materials for Conservation - Organic Consolidants, Adhesives and Coatings*. London 1987, S. 103.

<sup>68</sup> RÖMPP 1997.

<sup>69</sup> RÖMPP 1997.

<sup>70</sup> RÖMPP 1997.

## 2.3 Das Volltränkungsverfahren der Firma „IBACH Steinkonservierung“

### 2.3.1 Verfahrenstechnik<sup>71</sup>

Das patentierte Volltränkverfahren der Firma „IBACH Steinkonservierung“ eignet sich im Prinzip für die Tränkung aller porösen Stoffe. Bis heute wurde das Verfahren hauptsächlich zur Konservierung von Natur- und Kunststein eingesetzt. Deshalb bezieht sich die folgende Darstellung des Verfahrensablaufs ausschließlich auf die Tränkung von Stein.

Der erste Schritt innerhalb des Verfahrensablaufs ist die Trocknung des Objektes, welche je nach Gesteinsart bis zu 120 °C betragen kann.<sup>72</sup> Nur so ist eine spätere vollständige Durchdringung und Verfüllung mit MMA möglich. Kapillaren, die noch Wasser enthalten, sind nicht in der Lage, das Konservierungsmittel aufzunehmen. Allein die Trocknung, die ein entscheidender Schritt im Gesamtprozeß ist, ist ein wesentlicher Grund dafür, daß eine Volltränkung vor Ort nicht möglich ist. Vor und nach der Trocknung werden die einzelnen Objekte gewogen.

Das Wiegen gibt Auskunft über den Wassergehalt im Objekt bzw. die abgegebene Wassermenge.

Über 5 mm starke Feuchtefühler, die in das Objekt eingeführt werden, lassen sich die Trocknungswerte und die Temperatur, und damit der Trocknungsverlauf, aufzeichnen.

Der Trocknungsprozeß dauert je nach Gesteinsart, Größe, Verwitterungszustand und Auswirkung vorangegangener Behandlungen des Objektes 50 - 2500 Stunden. Falls erforderlich, wird durch vakuumunterstützte Trocknung der Trocknungszeit um etwa ein Drittel reduziert.

Das für die Durchtränkung getrocknete Objekt wird partiell mit einer Schutzschicht aus Hasenhautleim beschichtet, um ein unerwünschtes Abdampfen und Auslaufen des MMA zu verhindern.

Das Objekt wird in einen großen Tränkbehälter eingelegt, der wiederum in einen Vakuum-Druckkessel eingefahren wird.

Nach einer Vakuum-Phase von mehreren Stunden wird die Tränkflüssigkeit aus den gekühlten Vorratsbehältern in den Tränkbehälter eingefüllt. Der Füllstand ist so hoch, daß das Objekt vollkommen untergetaucht ist.

Für mehrere Stunden wird die Anlage nunmehr mit Druck beaufschlagt.

Wie bei der Trocknung und bei der Vakuum-Phase, hängt auch die Zeitdauer der Vakuum-Druck-Phasen, von ca. 0,75 bar Unterdruck und bis zu 25 bar Überdruck<sup>73</sup>, von der Größe der Objekte, der Gesteinsart und dem Anlieferungszustand ab.

Anschließend erfolgt erneut eine Vakuum-Phase, um auch die letzten Luftblasen aus den Objekten herauszuziehen. Die darauffolgende Druckbeaufschlagung, mit einem Druck bis zu 25 bar, erfolgt mit Schutzgas. Unter Beibehaltung und Nutzung dieses Überdrucks wird die nicht in die Steine eingedrungene Tränkflüssigkeit über eine Filteranlage in die Vorratsbehälter zurückgedrückt.

<sup>71</sup> <http://www.steinkonservierung.de>.

<sup>72</sup> Aussage Firma „IBACH Steinkonservierung“, Herr W. Ibach.

<sup>73</sup> Aussage Firma „IBACH Steinkonservierung“, Herr W. Ibach.

Durch Wärmezufuhr bis ca. 60 °C<sup>74</sup> erfolgt die Aushärtung, die Polymerisation, des in den Kapillaren des Stein befindlichen MMA zu PMMA. Haftvermittler in der Tränklösung garantieren eine gute Verhaftung mit der Porenwandung.

Die Steuerung dieses Aushärteprozesses setzt große Erfahrung voraus. Mit dieser Steuerung wird einerseits die Qualität der Aushärtung, zum anderen die Qualität der Oberflächenbeschaffenheit der zu konservierenden Skulptur bestimmt.

Nach Abschluß des Prozesses erfolgt ein langsames Abkühlen der Objekte, bevor sie aus den Tränkkesseln entnommen werden.

Der letzte Arbeitsschritt innerhalb des Verfahrensablaufs ist das Waschen, das Nachreinigen der Oberfläche. Bei diesem Schritt ist es möglich, individuell auf die Oberflächenbeschaffenheit, die Verschmutzung und Verkrustung einzugehen.

Im Rahmen der Endkontrolle erfolgt eine Ultraschallprüfung mindestens an den vor der Tränkung festgelegten und geprüften Stellen. Durch Gewichtskontrolle und Vergleich der Gewichte vor und nach der Trocknung und nach der Tränkung wird die Gewichtszunahme festgestellt und mit der theoretischen Gewichtszunahme überprüft. Die Aufnahme beträgt:

- 0,5 bis 2,0 Gewichts-% bei kristallinem Marmor
- 5,5 bis 11,0 Gewichts-% bei Sandstein und
- bis zu 30,0 Gewichts-% bei Tuff.

Für jedes Objekt wird eine Tränkungsurkunde angefertigt und dem Auftraggeber für seine Unterlagen zur Verfügung gestellt.

Intern wird ein Prüfprotokoll von jeder Tränkung und jeder Messung angefertigt. Diese konsequente und kontinuierlich verbesserte Protokollierung hat ganz wesentlich dazu beigetragen, daß das Verfahren nachvollziehbar und damit entwicklungsfähig war und ist.

---

<sup>74</sup> SNETHLAGE, ROLF: *Leitfaden Steinkonservierung, Planung von Untersuchungen und Maßnahmen zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein*. 2. Aufl., Stuttgart 2005, S. 257.

Wesentliche Vorteile des Acrylharzvolltränkverfahrens sind:

- Das MMA wird bis in den Kern des Objektes eingebracht. Der Anstieg der Festigkeit erstreckt sich über den gesamten Querschnitt des Objekts, so daß ein gleichmäßiges Festigkeitsprofil entsteht. Die bei anderen Verfahren gefürchtete Schalenbildung ist somit ausgeschaltet.
- Jegliche Wasseraufnahme wird unterbunden. Dem Harz sind Haftvermittler beigegeben. Das Acrylglas verbindet sich deshalb mit der Porenwandung, so daß keine Kapillarkräfte mehr auftreten können.
- Die Elastizität des Polymerisats kann eingestellt werden. Sie ist im Verlaufe der Entwicklung so eingestellt worden, daß das Material nicht zu spröde ist, zugleich aber die Erweichungstemperatur (TG-Punkt) mit 82 - 85° C über dem Wert liegt, die ein dunkler Stein bei Sonnenbestrahlung erreicht.
- Auch nach inzwischen 25 Jahren freier Bewitterung ist keine Veränderung an den konservierten Objekten feststellbar. Die hohe Witterungsbeständigkeit von Acrylglas ist bekannt. Acrylglas vergilbt nicht.
- Eine weitere Verwitterung des Steins ist trotz Volltränkung zu erwarten. Acrylglas baut sich in ganz geringem Maße, über Jahrzehnte kaum messbar, unter UV-Strahlung ab. Die UV-Strahlung erreicht das neue Bindemittel jedoch nur in der äußeren Zone der Kapillare. Die Ergebnisse der Labortests und der Feldversuche lassen erwarten, daß ein außerordentlich verzögerter Abbau von der Oberfläche her eintritt.

### 2.3.2 Tränkflüssigkeit<sup>75</sup>

Das monomere Methylmethacrylat ist das Ausgangsmaterial, aus dem man Acrylglas oder Plexiglas herstellt. Dieses Material hat günstige, seit vielen Jahrzehnten bekannte Eigenschaften.

Gegenüber allen anderen organischen Harzen ist der Vorteil, daß das Monomer thermokatalytisch aushärtbar ist, d. h. es muß kein zusätzliches Lösungsmittel als Trägersubstanz verwendet werden. Die Polymerisation ist dabei ein rein chemischer Vorgang.

Arbeitet man mit monomerem Methylmethacrylat (MMA), so ist das eingedrungene Material zugleich das reaktive und aushärtbare Material.

Es ist allgemein bekannt, daß Acrylglas als Fertigprodukt eine hohe Witterungsbeständigkeit hat. Das ist durch Langzeiterfahrungen seit 70 Jahren belegt.

Ein großer Vorteil des MMA besteht darin, daß dieses Material in seinem TG-Punkt (Glaspunkt), also seiner Erweichungstemperatur, so eingestellt werden kann, daß dieser Punkt über dem Temperaturbereich liegt, den ein Objekt in der freien Bewitterung erreichen kann. Der TG-Punkt liegt bei 82° C.

Die Tränkflüssigkeit wurde in ihren Eigenschaften von der Firma „IBACH Steinkonservierung“ für sämtliche porösen Stoffe entwickelt und sukzessiv in ihren Eigenschaften verbessert. Das Tränkmedium ist so eingestellt, daß es einerseits in die feinen Poren eindringt und sich mit der Porenwand verbindet und andererseits keine

---

<sup>75</sup> <http://www.steinkonservierung.de>.

Materialerleidung bei Temperaturschwankungen erfährt, so daß keine zusätzlichen Spannungen aufgebaut werden.

### **3 Laborarbeiten**

#### **3.1 Versuchsvorbereitung**

##### **3.1.1 Versuchsplanung**

Die Tränkung von Holz mit MMA erfordert eine Reihe von Voruntersuchungen und Untersuchungen nach der Tränkung, um die Materialeigenschaften in Bezug auf die Tränkbarkeit und die Veränderungen nach der Tränkung zu beurteilen. Einen wichtigen Aspekt des Versuchsaufbaus stellt das Tränken von ungetrocknetem und getrocknetem Holz dar, um zu klären, ob die Trocknung der verschiedenen Hölzer Eiche, Kiefer und Fichte einen Einfluß auf die Tränkung hat. Die Trocknung wurde für erforderlich gehalten, weil davon auszugehen ist, daß das hydrophobe MMA ohne diese Vorbehandlung des Holzes nicht in die Zellwände eindringen kann. Weiterhin ist zu beobachten wie sich die anatomischen Eigenheiten der verschiedenen Holzarten auf die Tränkung nach dem Trocknen auswirken. Hierzu wurde das Gewicht der Holzprüfkörper festgehalten.

In Anlehnung an die Materialuntersuchungen der Firma „IBACH Steinkonservierung“ an zu tränkende Steinobjekten, wurde diese Verfahrensweise, da sie allgemein auf poröse Körper ausgelegt ist, auf die Analyse der Materialeigenschaften des Holzes als porösen Werkstoff übertragen.

Demzufolge ist in erster Linie die Ermittlung der Permeabilität erkenntnisbringend, weil sie maßgebend für die Tränkbarkeit ist. Es wurde die Luft- und Flüssigkeitspermeabilität von Probenzylinder in axialer und radialer Wuchsrichtung der verschiedenen Holzarten, wie Eiche, Kiefer und Fichte ermittelt, um Rückschlüsse auf die Tränkbarkeit zu erhalten.

Die Tränkung an sich wurde im patentierten Volltränkungsverfahren der Firma „IBACH Steinkonservierung“ durchgeführt. Die Gewichtskontrolle wurde vor und nach der Trocknung sowie nach der Tränkung ausgeführt, um zu dokumentieren wie viel MMA das Holz aufgenommen hat.

Die vor und nach der Tränkung ermittelte Thermisch-Hygrische-Dehnung der verschiedenen Hölzer dient der Feststellung der aufgrund der veränderten Materialeigenschaften auf äußere Bewitterungseinflüsse.

Abschließend wurden Druck- und Biegefestigkeit unbehandelte, getränkte sowie vor der Tränkung getrocknete Eichen-, Kiefer- und Fichtenprüfkörper im Institut für Holzforschung ermittelt, um Aufschlüsse über die Veränderungen der Festigkeitseigenschaften zu erhalten. Die Messungen erfolgten in Anlehnung an die DIN-Normen DIN 52 186 für die Biegefestigkeit und DIN 52 185 für die Druckfestigkeit.

Zusätzlicher Aufschluß über das Tränkergebnis bzw. dessen Interpretation wurde aus der lichtmikroskopischen und rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung der getränkten Prüfkörper aus Eiche, Kiefer und Fichte gewonnen.

### 3.1.2 Materialauswahl und Dimensionsfestlegung der Holzprüfkörper

Die für die Tränkung herangezogenen Holzarten Eiche, Kiefer und Fichte stellen nur einen geringen Teil der Holzarten dar, aus denen Kunst- und Kulturgut besteht. Sie sind aber besonders für die Denkmalpflege relevant, da aus ihnen viele Bauteile, wie z.B. Fachwerk, Türen, Fenster, Skulpturen, Feldkreuze, Flurdenkmäler, Treppen, Kirchengestühl u. s. w. bestehen. Gerade im Fachwerkbau sind, neben der Tanne, Eiche und Fichte die am häufigsten verwendeten Bauhölzer, falls lokal keine andere Holzart im großen Maße verfügbar war.<sup>76</sup>

Fichte besitzt zudem sehr gute akustische Eigenschaften und wurde daher oft als Kirchengestühl und Konstruktionsholz verbaut.<sup>77</sup> Die Kiefer, als schnellwachsende und in Mitteleuropa verbreitete Baumart, findet man häufig als Konstruktionsholz.<sup>78</sup>

Eichenholz wird und wurde als Konstruktionsholz für mittlere und hohe Beanspruchungen verwendet.<sup>79</sup>

Die Dimensionsfestlegung der Holzprüfkörper orientiert sich in erster Linie an den Vorgaben der DIN-Normen DIN 52 186 für die Biegefestigkeit und DIN 52 185 für die Druckfestigkeit, wobei auch der zur Tränkung verwendete Laborautoklav der Firma „IBACH Steinkonservierung“ keine größeren Querschnitte und Längen zugelassen hätte. Die DIN 52 186 für die Biegefestigkeit gibt eine Holzprüfkörperabmessung wie folgt vor: „Bei der Prüfung von fehlerfreiem Holz sind Proben mit möglichst quadratischem Querschnitt, deren Kantenlänge  $b = h = (20 \pm 1)$  mm beträgt, zu verwenden“. Bei der Längenabmessung verweist die DIN 52 186 auf das 15-fache der Breite bzw. der Höhe. So ergibt sich eine Stützweite von 300 mm. Für den Biegeversuch müssen die Probekörper aber einen Längenüberstand besitzen, so daß eine Länge von 340 mm gewählt wurde.

Da die DIN 52 185 für die Druckfestigkeit ebenso 20 mm für die Kantenlänge des Querschnitts vorgibt, wurden die Druckprüfkörper nach dem Biegeversuch von den Biegeprüfkörpern an unversehrten Partien abgeschnitten. Nach der DIN 52 185 für die Druckfestigkeit ergibt sich eine Länge der Druckprüfkörper von 30 mm.

Die Beschaffenheit der Holzprüfkörper ist in der DIN 52 180 für die Prüfung von Holz formuliert. So müssen fehlerfreie Probekörper, mit definierten geometrischen Formen, sauber und ebenflächig mit scharfen Schneidwerkzeugen bearbeitet sein und verwendet werden. Die benutzten Probekörper sollen astfrei sein und entweder nur aus Kernholz oder nur aus Splintholz bestehen. Bei der Kiefer und Fichte wurde nach der allgemeinen Verwendung Splintholz für jegliche Behandlungen und Untersuchungen ausgewählt. Die Eichenprüfkörper wurden nach dem generellen Einsatz aus Kernholz hergestellt.

Für eine orientierende Aussage über die Prüfungsergebnisse sind nach der DIN 52 180 zur Prüfung von Holz mindestens zehn Proben zu untersuchen.

---

<sup>76</sup> BEDAL, KONRAD: *Fachwerk in Franken*. Hof 1980, S. 63.

<sup>77</sup> KÜHNEN; WAGENFÜHR 2002, S. 167.

<sup>78</sup> KÜHNEN; WAGENFÜHR 2002, S. 168.

<sup>79</sup> KÜHNEN; WAGENFÜHR 2002, S. 174.

Folglich sind die Probennummern der Holzprüfkörper definiert und aufgelistet.

Holzprüfkörper

Probennummern der Holzprüfkörper nach der Holzart und Behandlung

Holzart	Behandlung		
	unbehandelt	ungetrocknet getränkt	getrocknet getränkt
Eiche	101-110	121-130	141-150
Kiefer	201-210	221-230	241-250
Fichte	301-310	321-330	341-350

### 3.2 Vorversuche zur Tränkung der Holzprüfkörper

Die Angaben zum Tränken von Holz, insbesondere der DIN-Normen, beziehen sich ausschließlich auf das Tränken von Holz mit Holzschutzmitteln.

Nach DIN EN 350-2 (1994) werden vier Tränkbarkeitsklassen klassifiziert, wobei eine genaue Tränkbarkeit nicht definiert werden kann. Die Tränkbarkeitsklassen können nicht genau gegeneinander abgegrenzt werden. Besonders die Tränkbarkeitsklassen 2 und 3 zeigen oft eine ungleichmäßige Eindringung.<sup>80</sup>

- |                        |                                |
|------------------------|--------------------------------|
| 1 gut tränkbar         | einfach zu tränken             |
| 2 mäßig tränkbar       | ziemlich einfach zu tränken    |
| 3 schwer tränkbar      | schwierig zu tränken           |
| 4 sehr schwer tränkbar | praktisch unmöglich zu tränken |

Von den in dieser Arbeit getränkten Holzarten ist die Eiche und die Kiefer nach DIN EN 350-2 gut tränkbar. Die Fichte ist schlecht tränkbar, wobei sich diese Angabe der DIN EN 350-2 auf das Splintholz bezieht, wogegen das Kernholz sehr schwer tränkbar ist.

In diesem Zusammenhang sind Vorversuche unabdingbar, weil Holz ein relativ inhomogener und lokal innerlich unterschiedlich strukturierter Werkstoff ist.

#### 3.2.1 Permeabilitätsmessung

Für die Permeabilitätsmessung wurden Probezylinder von Eiche, Kiefer und Fichte auf der Drehbank angefertigt (Abb. 7-15). Die Probezylinder der Holzarten hatten einen Durchmesser von 30 mm und eine Höhe von 50 mm. Die Permeabilitätsmessung wurde mit der Hassler-Zelle mit Luft und MMA im Labor der Firma „IBACH Steinkonservierung“ durchgeführt.

Für die Messungen der Luft- und Flüssigkeitspermeabilität wurden pro Holzart Querschnitte und Radialschnitte im Raumklima verwendet. Die Herstellung von Tangentialschnitten erwies sich in der Zusammenarbeit mit einem Tischler als nicht durchführbar. Die Messung jedes Probenzylinders erfolgte zehnmal, um abschließend einen repräsentativen Mittelwert zu erhalten. Aufgrund der geringen Anzahl der Proben kann keine repräsentative Aussage über die Permeabilität getroffen werden.

<sup>80</sup> DIN EN 350 2 Norm DIN EN 350 2 : 1990-04. *Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz – Teil 2. Leitfaden für die natürliche Dauerhaftigkeit und Tränkbarkeit von ausgewählten Holzarten von besondere Bedeutung in Europa*, S. 4.



Das Prinzip der Hassler-Zelle (Abb. 16) beruht darauf, ein Gas, in diesem Fall Luft, oder eine Flüssigkeit, in diesem Fall unpolares MMA anstatt polares Wasser schon allein wegen dem Quellverhalten des Holzes, durch einen porösen Probenzylinder mit definierten Abmaßen unter einem bestimmten Druck zu leiten. Dabei ergibt sich die Permeabilität aus der Durchflußrate des Gases bzw. der Flüssigkeit durch den porösen Körper, in diesem Fall Holz. Meßbar ist die Durchflußrate am Ende der Apparatur in einem volumenskalierten Glasrohr, in dem eine Seifenlösung Blasen hervorruft. Das Aufsteigen der Blasen ermöglicht eine Messung der Durchflußrate, bezogen auf einen festgelegten Weg, bei dem die Zeit gemessen wird.

Langguth und Voigt geben eine Übersicht (Abb. 17) zur Äquivalenz zwischen Permeabilität (Darcy-Wert) und Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  (m/s) für Süßwasser, um die Durchlässigkeit einstuft zu können.

### 3.2.1.1 Luftpermeabilität

Zur Ermittlung der Luftpermeabilität wurden drei Querschnitte und sechs Radialschnitte der Holzarten Eiche, Kiefer und Fichte gemessen.

Aufgrund der Permeabilitätsergebnisse ist die Eiche in axialer Wuchsrichtung vermutlich aufgrund ihrer größeren Gefäße im Mittel mit 40,10 mD gegenüber der Kiefer mit 21,57 mD und der Fichte mit 26,90 mD für Gase am durchlässigsten. In radialer Richtung besitzt die Fichte im Mittel mit 222,15 mD entgegen der Eiche mit 177,40 mD und der Kiefer mit 77,68 mD die größte Durchlässigkeit für Gase.

In den Diagrammen 1, 3 und 5 läßt sich die Tendenz erkennen, daß die Luftpermeabilität jeder gemessenen Holzart in radialer Richtung größer ist als in axialer. Die Eiche (Diagramm 1) besitzt im Mittelwert eine nahezu viermal so große Luftpermeabilität in radialer Richtung gegenüber der axialen Richtung. Bei Kiefer (Diagramm 3) liegt trotz der sehr auffälligen Streuung der einzelnen Ergebnisse in radialer Richtung eine ähnliche Proportionalität vor wie bei der Eiche. Die Luftpermeabilität der Fichte (Diagramm 5) in radialer Richtung ist gegenüber der axialen Richtung am größten. Sie beträgt annähernd das Siebenfache im Vergleich zur der axialen Richtung.

### 3.2.1.2 Flüssigkeitspermeabilität

Die Flüssigkeitspermeabilität wurde mit dem unpolaren MMA gemessen, um eine Quellung der Holzprobenzylinder durch Wasser, welches als polares Lösungsmittel fungiert, zu vermeiden.

Zwei Querschnitte und Radialschnitte jeder Holzart dienten zur Bestimmung der Flüssigkeitspermeabilität.

Die Kiefer besitzt in axialer Richtung im Mittel mit 17,00 mD gegenüber der Eiche mit 4,50 mD und der Fichte mit 3 mD die größte Durchlässigkeit für MMA. Die geringste Durchlässigkeit von MMA in radialer Richtung besitzt die Eiche im mit 3,50 mD entgegen der Kiefer mit 19,00 mD und der Fichte mit 28,50 mD.

Die Diagramme 2, 4 und 6 zeigen, daß auch hier mit Ausnahme der Eiche die Permeabilität in radialer Richtung größer ist als in axialer. Die Probenzylinder der Eiche besitzen in radialer Richtung eine etwas geringfügigere Flüssigkeitspermeabilität, als in axialer Richtung. Bei der Kiefer ist sie wiederum in radialer Richtung unwesentlich größer. Die Fichte verfügt über eine um annähernd das Sechsfache größere Flüssigkeitspermeabilität in

radialer Richtung gegenüber der axialen Richtung, wobei hier eine starke Streuung der Meßwerte auftritt. Der mögliche Einfluß von Tüpfelverschlüssen könnte die Ursache sein.

Die angegebenen Tendenzen und Proportionalitäten sind in den Diagrammen 7, 8 und 9 nochmals zusammengefaßt, wobei sich für die Kiefer aufgrund ihrer homogenen Durchlässigkeitswerte gegenüber der Fichte, aber besonders der Eiche, eine sehr gute Tränkbarkeit ergibt.

## Luft-Flüssigkeits-Permeabilität Eiche

Probenzylinder <b>EICHE</b> d=30 mm, h=50 mm	Gewicht in g	Dichte in g/cm <sup>3</sup>	Luftpermeabilität		Flüssigkeitspermeabilität (MMA)	
			in mD	Kav =	in mD	Kav =
Querschnitt						
EQ 1	24,90	0,70	32,80	<b>40,10</b>	5,00	<b>4,50</b>
EQ 2	25,00	0,71	39,50			
EQ 3	24,90	0,70	48,00			
Radialschnitt						
ER 1	21,60	0,61	135,70	<b>177,40</b>	4,00	<b>3,50</b>
ER 2	21,10	0,60	194,10			
ER 3	20,90	0,59	163,80			
ER 4	21,90	0,62	246,60			
ER 5	22,30	0,63	148,30			
ER 6	21,30	0,60	175,90			

## Luft-Flüssigkeits-Permeabilität Kiefer

Probenzylinder <b>KIEFER</b> d=30 mm, h=50 mm	Gewicht in g	Dichte in g/cm <sup>3</sup>	Luftpermeabilität		Flüssigkeitspermeabilität (MMA)	
			in mD	Kav =	in mD	Kav =
Querschnitt						
KQ 1	18,90	0,53	25,50	21,57	20,00	17,00
KQ 2	18,40	0,52	23,90			
KQ 3	19,70	0,56	15,30			
Radialschnitt						
KR 1	19,50	0,55	31,70	77,68	12,00	19,00
KR 2	20,70	0,59	23,60			
KR 3	19,90	0,56	199,70			
KR 4	18,90	0,53	94,20			
KR 5	20,10	0,57	45,30			
KR 6	20,00	0,57	71,60			

## Luft-Flüssigkeits-Permeabilität Fichte

Probenzylinder <b>FICHTE</b> d=30 mm, h=50 mm	Gewicht in g	Dichte in g/cm <sup>3</sup>	Luftpermeabilität		Flüssigkeitspermeabilität (MMA)	
			in mD	Kav =	in mD	Kav =
Querschnitt						
FQ 1	15,60	0,44	25,60	<b>26,90</b>	5,00	<b>3,00</b>
FQ 2	16,50	0,47	17,90		1,00	
FQ 3	15,10	0,43	37,20			
Radialschnitt						
FR 1	14,50	0,41	250,80	<b>222,15</b>	10,00	<b>28,50</b>
FR 2	14,90	0,42	267,00			
FR 3	14,60	0,41	265,90			
FR 4	14,60	0,41	182,60			
FR 5	14,00	0,40	215,70			
FR 6	13,80	0,39	150,90			

### 3.3 Tränkung der Holzprüfkörper

Die Tränkung der Holzprüfkörper aus Eiche, Kiefer und Fichte fand im Laborautoklaven (Abb. 18) der Firma „IBACH Steinkonservierung“ statt. Unter Anleitung wurden zuvor die Parameter des Tränkungsablaufes unter Berücksichtigung der Voruntersuchungen festgelegt.

Aufgrund der geringen Querschnittsabmessungen wurden für die Tränkung der Holzprüfkörper zwei zweistündige Schaukelphasen, welche jeweils eine einstündige Vakuumphase bei 0,4 bar Unterdruck und eine einstündige Druckphase mit bis zu 7,4 bar Überdruck beinhalten, festgelegt.

Die Polymerisation des MMA zu PMMA erfordert Erfahrung. Daher übernahm die Firma „IBACH Steinkonservierung“ die komplette Steuerung dieses Vorgangs. Es wurden Temperaturfühler im Holz und in der Tränkflüssigkeit angebracht, um die Polymerisation zu kontrollieren.

#### 3.3.1 Beschickung des Autoklaven

Holz besitzt, wie die nachstehende Tabelle aufzeigt, eine geringere Dichte als MMA, so daß die zu tränkenden Prüfkörper im Tränkbehälter des Autoklaven verkeilt werden mußten, damit sie nicht aufschwammen. Um das Verkleben der Holzprüfkörper nach der Polymerisation zu verhindern, mußten zudem Distanzteile zwischen die einzelnen Probenkörper gelegt werden. Nach Auskunft der Firma „IBACH Steinkonservierung“ eignen sich hierzu besonders Materialien wie Teflon, Polyethylen und Polypropylen, weil sie sich nicht mit dem MMA verbinden. Eine einfache und günstige Lösung war die Verwendung von Angelsehne aus Polyethylen, welche als Distanz zwischen die geschichteten Holzprüfkörper gelegt wurde (Abb. 19).

Dichte der verschiedenen Holzarten und des MMA

Dichte der Hölzer (aus KÜHNEN; WAGENFÜHR 2002, S.167 ff.)

Dichte MMA (aus Datenblatt der Kern GmbH, <http://www.kern-gmbh.de>)

	<b>Eiche</b>	<b>Kiefer</b>	<b>Fichte</b>	<b>MMA</b>
<b>Dichte in g/cm<sup>3</sup></b>	0,69	0,51	0,47	1,19

### 3.3.2 Verfahrensablauf

Der Tränkvorgang beinhaltete eine erste Vakuumphase mit 0,4 bar Unterdruck für eine Stunde. Darauf folgte eine einstündige Druckphase mit 7,4 bar Luftüberdruck. Ein weitere einstündige Vakuumphase, ebenfalls mit 0,4 bar Unterdruck, folgte vor der anschließenden Druckphase mit 6 bar Stickstoffüberdruck. Mittels des Schutzgasüberdrucks des Stickstoffs wurde das überschüssige, nicht in die Holzprüfkörper eingedrungene MMA aus dem Tränkbehälter im geschlossenen Autoklaven gedrückt. Abschließend erfolgte die thermische Polymerisation unter Beibehaltung des Stickstoffüberdruckes über zwölf Stunden. Nach der Polymerisation des MMA zu PMMA und der langsamen Auskühlung des Autoklavs konnten die Holzprüfkörper entnommen werden.

Es wurden zwei Tränkungen vorgenommen, weil der Tränkbehälter des Laborautoklavs jeweils nur 36 Holzprüfkörper faßte. Die Tränkungen verliefen mit den gleichen Parametern.

### 3.4 Untersuchung der getränkten Holzprüfkörper

#### 3.4.1 Gewichtsänderungen

Die Gewichtsveränderungen der Holzprüfkörper Eiche, Kiefer und Fichte durch die Trocknung ist in den folgenden Tabellen festgehalten. Die Holzprüfkörper wurden im Trocknungsraum der Firma „IBACH Steinkonservierung“ bei einem Klima von 30 °C und einer rF von 35 % für zwei Wochen getrocknet.

Trocknung Eiche

Prob. Nr. <b>EICHE</b> l x b x h 340 x 20 x 20 mm	Gewicht vor Trocknung in g	Gewicht nach Trocknung in g	Gewichtsveränderung	
			in g	In %
141	98,30	96,00	2,30	2,34
142	99,30	97,00	2,30	2,32
143	101,30	99,00	2,30	2,27
144	107,30	105,20	2,10	1,96
145	105,20	103,20	2,00	1,90
146	107,40	104,80	2,60	2,42
147	107,80	105,30	2,50	2,32
148	106,90	104,40	2,50	2,34
149	102,90	100,70	2,20	2,14
150	107,20	104,60	2,60	2,43
<b>Mittelwert</b>	<b>104,36</b>	<b>102,02</b>	<b>2,34</b>	<b>2,24</b>
Standardabw.	3,63	3,57	0,21	0,18
% Standardabw.	3,48	3,50	8,83	8,22

Trocknung Kiefer

Prob. Nr. <b>KIEFER</b> l x b x h 340 x 20 x 20 mm	Gewicht vor Trocknung in g	Gewicht nach Trocknung in g	Gewichtsveränderung	
			in g	in %
241	87,50	84,60	2,90	3,31
242	86,50	83,80	2,70	3,12
243	86,70	84,20	2,50	2,88
244	88,40	85,70	2,70	3,10
245	88,60	86,10	2,50	2,82
246	90,00	86,30	3,70	4,11
247	89,50	85,60	3,90	4,36
248	80,00	77,10	2,90	3,63
249	87,90	84,30	3,60	4,10
250	86,90	83,40	3,50	4,03
<b>Mittelwert</b>	<b>87,20</b>	<b>84,11</b>	<b>3,09</b>	<b>3,55</b>
Standardabw.	2,78	2,66	0,53	0,57
% Standardabw.	3,19	3,16	17,16	16,11

## Trocknung Fichte

Prob. Nr. <b>FICHTE</b> l x b x h 340 x 20 x 20 mm	Gewicht vor Trocknung in g	Gewicht nach Trocknung in g	Gewichtsveränderung	
			in g	in %
341	69,00	65,00	4,00	5,80
342	69,30	65,40	3,90	5,63
343	69,80	65,40	4,40	6,30
344	68,70	64,40	4,30	6,26
345	69,50	65,30	4,20	6,04
346	68,50	63,90	4,60	6,72
347	69,30	64,50	4,80	6,93
348	68,90	64,50	4,40	6,40
349	68,30	63,80	4,50	6,60
350	68,40	64,20	4,20	6,14
<b>Mittelwert</b>	<b>68,97</b>	<b>64,64</b>	<b>4,33</b>	<b>6,28</b>
Standardabw.	0,50	0,60	0,27	0,40
<b>% Standardabw.</b>	<b>0,73</b>	<b>0,93</b>	<b>6,26</b>	<b>6,42</b>

Um das Tränkergebnis, d. h. die Aufnahmemenge der Tränkflüssigkeit, zu interpretieren, ist die Gewichtsveränderung vor und direkt nach der Tränkung maßgebend. In den nachfolgenden Tabellen sind die Gewichtsveränderungen sowie deren Mittelwerte, Standardabweichungen und Standardabweichung prozentual vom Mittelwert dokumentiert.

Die Kiefer erfuhr die größte Gewichtszunahme mit durchschnittlich 105,46 % der ungetrockneten und 85 % der getrockneten Prüfkörper, bezogen auf das Ausgangsgewicht direkt vor der Tränkung. Zu bemerken ist, daß die getrockneten Prüfkörper der Kiefer ca. 20 % weniger MMA aufgenommen haben als die ungetrockneten mit einer Standardabweichung von 7,15 % für die getrockneten und 15,76 % für die ungetrockneten. Die Dichte der Kiefer hat in beiden Fällen zugenommen und beträgt im Ergebnis über 1 g/cm<sup>3</sup>. Die auffällig große Gewichtszunahme der Kiefernprobekörper 226 bis 230 ist vermutlich auf die geringe Dichte der Prüfkörper im unbehandelten Zustand zurückzuführen.

## Kiefer getränkt – Gewichtsveränderung

Prob. Nr. <b>KIEFER</b> l x b x h 340 x 20 x 20 mm	Gewicht unbehandelt in g	Dichte unbehandelt in g/cm <sup>3</sup>	Gewicht nach Tränkung in g	Gewichtsveränderung		Dichte nach Tränkung in g/cm <sup>3</sup>
				in g	in %	
221	77,70	<b>0,57</b>	149,20	71,50	<b>92,00</b>	<b>1,10</b>
222	77,40	<b>0,57</b>	147,60	70,20	<b>90,70</b>	<b>1,09</b>
223	79,10	<b>0,58</b>	148,20	69,10	<b>87,40</b>	<b>1,09</b>
224	77,00	<b>0,57</b>	150,50	73,50	<b>95,50</b>	<b>1,10</b>
225	76,60	<b>0,56</b>	148,30	71,70	<b>93,60</b>	<b>1,09</b>
226	75,00	<b>0,55</b>	151,60	76,60	<b>102,10</b>	<b>1,11</b>
227	68,80	<b>0,51</b>	155,50	86,70	<b>126,00</b>	<b>1,14</b>
228	66,80	<b>0,49</b>	154,00	87,20	<b>130,50</b>	<b>1,13</b>
229	67,30	<b>0,49</b>	152,30	85,00	<b>126,30</b>	<b>1,12</b>
230	73,50	<b>0,54</b>	154,70	81,20	<b>110,50</b>	<b>1,14</b>
<b>Mittelwert</b>	<b>73,92</b>	<b>0,54</b>	<b>151,19</b>	<b>77,27</b>	<b>105,46</b>	<b>1,11</b>
Standardabw.	4,62	0,03	2,88	7,14	16,62	0,02
% Standardabw.	6,25	6,32	1,91	9,24	15,76	1,82

## Kiefer getränkt getrocknet – Gewichtsveränderung

Prob. Nr. <b>KIEFER</b> L x B x H 340 x 20 x 20 mm	Gewicht nach Trocknung in g	Dichte nach Trocknung in g/cm <sup>3</sup>	Gewicht nach Tränkung in g	Gewichtsveränderung		Dichte nach Tränkung in g/cm <sup>3</sup>
				in g	in %	
241	84,60	<b>0,62</b>	158,70	74,10	<b>87,60</b>	<b>1,17</b>
242	83,80	<b>0,62</b>	156,00	72,20	<b>86,20</b>	<b>1,15</b>
243	84,20	<b>0,62</b>	155,70	71,50	<b>84,90</b>	<b>1,14</b>
244	85,70	<b>0,63</b>	152,10	66,40	<b>77,50</b>	<b>1,12</b>
245	86,10	<b>0,63</b>	150,60	64,50	<b>74,90</b>	<b>1,11</b>
246	86,30	<b>0,63</b>	159,40	73,10	<b>84,70</b>	<b>1,17</b>
247	85,60	<b>0,63</b>	159,00	73,40	<b>85,70</b>	<b>1,17</b>
248	77,10	<b>0,57</b>	151,60	74,50	<b>96,60</b>	<b>1,11</b>
249	84,30	<b>0,62</b>	156,10	71,80	<b>85,20</b>	<b>1,15</b>
250	83,40	<b>0,61</b>	159,30	75,90	<b>91,00</b>	<b>1,17</b>
<b>Mittelwert</b>	<b>84,11</b>	<b>0,62</b>	<b>155,85</b>	<b>71,74</b>	<b>85,43</b>	<b>1,15</b>
Standardabw.	2,66	0,02	3,37	3,59	6,11	0,03
% Standardabw.	3,16	2,93	2,16	5,01	7,15	2,18

Die Fichte erfuhr im Vergleich zur Kiefer eine geringere Gewichtszunahme. Durchschnittlich nahm das Gewicht der ungetrockneten um 40 % und der getrockneten Fichte um 40,73 % zu. Der Einfluß der Trocknung scheint hierbei ohne Bedeutung zu sein. Die Dichte der Fichtenprüfkörper beträgt nach der Tränkung ca. 0,7 g/cm<sup>3</sup>.

## Fichte getränkt – Gewichtsveränderung

Prob. Nr. <b>FICHTE</b> l x b x h 340 x 20 x 20 mm	Gewicht unbehandelt in g	Dichte unbehandelt in g/cm <sup>3</sup>	Gewicht nach Tränkung in g	Gewichtsveränderung		Dichte nach Tränkung in g/cm <sup>3</sup>
				in g	in %	
321	67,50	<b>0,50</b>	89,90	22,40	<b>33,20</b>	<b>0,66</b>
322	69,20	<b>0,51</b>	107,90	38,70	<b>55,90</b>	<b>0,79</b>
323	68,40	<b>0,50</b>	93,80	25,40	<b>37,10</b>	<b>0,69</b>
324	68,70	<b>0,51</b>	93,30	24,60	<b>35,80</b>	<b>0,69</b>
325	68,50	<b>0,50</b>	87,00	18,50	<b>27,00</b>	<b>0,64</b>
326	66,00	<b>0,49</b>	90,10	24,10	<b>36,50</b>	<b>0,66</b>
327	66,20	<b>0,49</b>	98,90	32,70	<b>49,40</b>	<b>0,73</b>
328	66,80	<b>0,49</b>	86,50	19,70	<b>29,50</b>	<b>0,64</b>
329	66,60	<b>0,49</b>	92,00	25,40	<b>38,10</b>	<b>0,68</b>
330	66,30	<b>0,49</b>	107,60	41,30	<b>62,50</b>	<b>0,79</b>
<b>Mittelwert</b>	<b>67,42</b>	<b>0,50</b>	<b>94,70</b>	<b>27,28</b>	<b>40,50</b>	<b>0,70</b>
Standardabw.	1,19	0,01	7,74	7,74	11,61	0,06
<b>% Standardabw.</b>	<b>1,77</b>	<b>1,66</b>	<b>8,17</b>	<b>28,37</b>	<b>28,66</b>	<b>8,00</b>

## Fichte getränkt getrocknet – Gewichtsveränderung

Prob. Nr. <b>FICHTE</b> l x b x h 340 x 20 x 20 mm	Gewicht nach Trocknung in g	Dichte nach Trocknung in g/cm <sup>3</sup>	Gewicht nach Tränkung in g	Gewichtsveränderung		Dichte nach Tränkung in g/cm <sup>3</sup>
				in g	in %	
341	65,00	<b>0,48</b>	91,70	26,70	<b>41,10</b>	<b>0,67</b>
342	65,40	<b>0,48</b>	99,50	34,10	<b>52,10</b>	<b>0,73</b>
343	65,40	<b>0,48</b>	83,30	17,90	<b>27,40</b>	<b>0,61</b>
344	64,40	<b>0,48</b>	82,70	18,30	<b>28,40</b>	<b>0,61</b>
345	65,30	<b>0,48</b>	84,90	19,60	<b>30,00</b>	<b>0,62</b>
346	63,90	<b>0,47</b>	100,50	36,60	<b>57,30</b>	<b>0,74</b>
347	64,50	<b>0,47</b>	95,80	31,30	<b>48,50</b>	<b>0,70</b>
348	64,50	<b>0,47</b>	92,90	28,40	<b>44,00</b>	<b>0,68</b>
349	63,80	<b>0,47</b>	91,30	27,50	<b>43,10</b>	<b>0,67</b>
350	64,20	<b>0,47</b>	86,90	22,70	<b>35,40</b>	<b>0,64</b>
<b>Mittelwert</b>	<b>64,64</b>	<b>0,48</b>	<b>90,95</b>	<b>26,31</b>	<b>40,73</b>	<b>0,67</b>
Standardabw.	0,60	0,01	6,43	6,59	10,30	0,05
<b>% Standardabw.</b>	<b>0,93</b>	<b>1,11</b>	<b>7,07</b>	<b>25,03</b>	<b>25,28</b>	<b>7,07</b>



Die Gewichtszunahme der Eiche fiel im Vergleich zu den beiden anderen Holzarten am geringsten aus. Sie nahm durchschnittlich 11,56 % bei den ungetrockneten und 11,04 % MMA bei den getrockneten Holzprüfkörpern auf. Auch hier spielt die Trocknung vermutlich keine Rolle. Die Dichte beträgt nach der Tränkung zwischen 0,7 und 0,85 g/cm<sup>3</sup>.

Eiche getränkt – Gewichtsveränderung

Prob. Nr. <b>EICHE</b> l x b x h 340 x 20 x 20 mm	Gewicht unbehandelt in g	Dichte unbehandelt in g/cm <sup>3</sup>	Gewicht nach Tränkung in g	Gewichtsveränderung		Dichte nach Tränkung in g/cm <sup>3</sup>
				in g	in %	
121	90,20	<b>0,66</b>	99,20	9,00	<b>9,80</b>	<b>0,73</b>
122	88,00	<b>0,65</b>	96,40	8,40	<b>9,50</b>	<b>0,71</b>
123	84,00	<b>0,62</b>	90,60	6,60	<b>7,90</b>	<b>0,67</b>
124	81,40	<b>0,60</b>	93,90	12,50	<b>15,40</b>	<b>0,69</b>
125	88,80	<b>0,65</b>	98,30	9,50	<b>10,70</b>	<b>0,72</b>
126	85,40	<b>0,63</b>	102,90	17,50	<b>20,50</b>	<b>0,76</b>
127	86,30	<b>0,63</b>	97,30	11,00	<b>12,80</b>	<b>0,72</b>
128	83,90	<b>0,62</b>	94,80	10,90	<b>13,00</b>	<b>0,70</b>
129	80,00	<b>0,59</b>	89,00	9,00	<b>11,30</b>	<b>0,65</b>
130	89,50	<b>0,66</b>	101,80	12,30	<b>13,70</b>	<b>0,75</b>
<b>Mittelwert</b>	<b>85,75</b>	<b>0,63</b>	<b>96,42</b>	<b>10,67</b>	<b>12,46</b>	<b>0,71</b>
Standardabw.	3,45	0,02	4,48	3,01	3,59	0,03
% Standardabw.	4,02	3,84	4,65	28,20	28,85	4,79

Eiche getrocknet getränkt – Gewichtsveränderung

Prob. Nr. <b>EICHE</b> l x b x h 340 x 20 x 20 mm	Gewicht nach Trocknung in g	Dichte nach Trocknung in g/cm <sup>3</sup>	Gewicht nach Tränkung in g	Gewichtsveränderung		Dichte nach Tränkung in g/cm <sup>3</sup>
				in g	in %	
141	96,00	<b>0,71</b>	101,20	5,20	<b>5,40</b>	<b>0,74</b>
142	97,00	<b>0,71</b>	119,30	22,30	<b>23,00</b>	<b>0,88</b>
143	99,00	<b>0,73</b>	119,70	20,70	<b>20,90</b>	<b>0,88</b>
144	105,20	<b>0,77</b>	111,70	6,50	<b>6,20</b>	<b>0,82</b>
145	103,20	<b>0,76</b>	120,10	16,90	<b>16,40</b>	<b>0,88</b>
146	104,80	<b>0,77</b>	111,90	7,10	<b>6,80</b>	<b>0,82</b>
147	105,30	<b>0,77</b>	113,00	7,70	<b>7,30</b>	<b>0,83</b>
148	104,40	<b>0,77</b>	113,00	8,60	<b>8,20</b>	<b>0,83</b>
149	100,70	<b>0,74</b>	107,30	6,60	<b>6,60</b>	<b>0,79</b>
150	104,60	<b>0,77</b>	114,60	10,00	<b>9,60</b>	<b>0,84</b>
<b>Mittelwert</b>	<b>102,02</b>	<b>0,75</b>	<b>113,18</b>	<b>11,16</b>	<b>11,04</b>	<b>0,83</b>
Standardabw.	3,57	0,03	5,89	6,35	6,55	0,04
% Standardabw.	3,50	3,38	5,20	56,86	59,32	5,30

Auffällig ist die große Streuung der Gewichtszunahme bei den Eichen- und Fichtenprüfkörpern, welche aus der Standardabweichung von 25,28 - 59,32 % ersichtlich ist.

### 3.4.2 Thermisch-Hygrische-Dehnung unbehandelter und getränkter Probenzylinder

Die Thermisch-Hygrische-Dehnung der Probenzylinder, mit dem Durchmesser von 30 mm und der Höhe von 50 mm, wurde im Labor der Firma „IBACH Steinkonservierung“ ermittelt. Hierzu erfolgte eine Auswahl der Probenzylinder von Eiche, Kiefer und Fichte, welche sich an den gemessenen Mittelwerten der Luft- wie auch der Flüssigkeitspermeabilität orientierte. Es wurde pro Holzart je ein Querschnitt und ein Radialschnitt vor wie auch nach der Tränkung auf die Thermisch-Hygrische-Dehnung überprüft, um die materialphysikalischen Veränderungen zu dokumentieren.

Die Anlage zur Messung der Thermisch-Hygrischen-Dehnung der Firma „IBACH Steinkonservierung“ (Abb. 20) verfügt über ein Heiz- und ein Kühlaggregat, mit denen Temperaturen von  $-10\text{ °C}$  bis  $70\text{ °C}$  für die thermische Dehnung simuliert werden können. Da die thermische Dehnung der Querschnitte in axialer Richtung sehr gering und damit vernachlässigbar ist, beschränkte sich die Messung im Temperaturverlauf von  $20\text{ °C}$  auf  $70\text{ °C}$  danach auf  $-10\text{ °C}$  und folgend  $20\text{ °C}$ . Die Radialschnitte durchliefen diesen Temperaturzyklus zweimal, da bei ihnen eine, wie bereits erläutert, stärkere Reaktion zu erwarten war. Um die hygrische Dehnung zu simulieren, wurde jeweils am Ende jeder Messung bei Erreichen der  $20\text{ °C}$  über ein Pumpe Wasser auf die Probenzylinder gegeben. Die Maßänderung der beiden Schnittrichtungen wurden über Meßfühler, wie auch die Temperatur, elektronisch über einen Rechner festgehalten.

In den Diagrammen 10 bis 21 ist die Thermisch-Hygrische-Dehnung der unbehandelten und der getränkten Probenzylinder dargestellt.

Bei der Messung der Querschnitte ist bei allen drei Holzarten deutlich zu erkennen, daß die die hygrische Dehnung nach der Tränkung geringer ist bzw. nicht mehr auftritt (Diagramme 10, 11, 14, 15, 18 und 19)

Die Radialschnitte (Diagramme 12, 13, 16, 17, 20 und 21) weisen hingegen eine stärkere thermische Dehnung nach der Tränkung auf, was auf die größere Wärmeausdehnungszahl von PMMA gegenüber den verschiedenen Holzarten zurückzuführen ist. Der Vergleich der vor der Tränkung gemessenen thermische Dehnung mit der nach der Tränkung zeigt auf, daß die Holzprüfzylinder während des Meßablaufes in eine Trocknungsphase gelangen, welche nach der Tränkung viel geringer ausfällt. Die hygrische Dehnung der Radialschnitte von Eiche, Kiefer und Fichte fällt vermutlich aufgrund der eingebrachten Tränkmenge an MMA, sehr unterschiedlich aus. Die Kiefer zeigt so gut wie keine hygrische Dehnung. Bei der Fichte ist die hygrische Dehnung im Vergleich zur Kiefer nur minimal kleiner geworden. Die getränkte Eiche hingegen zeigt annähernd dieselbe hygrische Dehnung, wie die ungetränkte.

### 3.4.3 Optische Änderung und Änderung der Dimension

Aufgrund der Dimensionsauswahl und dem eigentlichen Ziel dieser Arbeit, lassen sich Aussagen zur optischen Änderung nur anhand des Augenscheins treffen. Die Änderung der Dimension der Holzprüfkörper ist ebenso nicht eindeutig reproduzierbar, da hierzu ein anderer Versuchsaufbau gewählt werden müßte.

Daß sich nach dem Eindringen einer Flüssigkeit bzw. eines Lösungsmittels in Holz der Farbton ändert, ist allgemein bekannt. Auch die getränkten Holzprüfkörper der Holzarten Eiche, Kiefer und Fichte dunkelten gegenüber den unbehandelten leicht nach (Abb. 21, 23,

25). Das Nachdunkeln hielt sich aufgrund des Abdampfens des MMA am Anfang der thermischen Polymerisation jedoch in Grenzen. Die sogenannte Abdampfzone, welche gekennzeichnet ist durch einen helleren Rand, ließ sich aber nur bei der vollgetränkten Kiefer ansehen (Abb. 22, 24, 26).

Die dimensionale Änderung der Holzprüfkörper belief sich vor allem in radialer Richtung auf nur zehntel Millimeter. Die Kiefer verzeichnete nach der thermischen Polymerisation des MMA den größten radialen Schwund. Ein möglicher Zusammenhang besteht vermutlich mit dem leichten Schwund des MMA durch die Polymerisation, was nach den Tränkeergebnissen besonderen Einfluß bei der Kiefer aufgrund der guten Tränkbarkeit zur Folge haben könnte.

### 3.5 Festigkeitseigenschaften der unbehandelten und getränkten Holzprüfkörper

Zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften und Festigkeit von Hölzern lassen sich verschiedene in der Materialforschung übliche Prüfverfahren heranziehen. Um der Anisotropie Rechnung zu tragen, müssen dabei meist drei, auf die anatomischen Hauptrichtungen bezogene Werte berücksichtigt werden.

Für die Ermittlung der Festigkeitseigenschaften der unbehandelten und getränkten Holzprüfkörper wurden die Biegefestigkeit nach DIN 52 186 und die Druckfestigkeit parallel zur Faser nach DIN 52 185 im Institut für Holzforschung München ermittelt.

Hierzu wurden die Holzprüfkörper nach DIN 50 014 dem Normklima bei einer Temperatur von 20 °C und einer rF von 65 % über einen längeren Zeitraum ausgesetzt, bis die Gewichtsveränderung nicht mehr als 1 % innerhalb von 24 Stunden betrug. Bei sämtlichen Prüfkörper wurden direkt nach der Entnahme aus dem Normklima die Rohdichte (Abb. 27) ermittelt und die eigentliche Festigkeitsprüfung durchgeführt.

Die gemessenen Werte sollen Aufschluß über die Festigkeitseigenschaften der mit MMA getränkten Holzprüfkörper geben und die veränderte Materialeigenschaft dokumentieren.

Die Bestimmung der Rohdichte erfolgte nach DIN 52 181 nach folgender Gleichung:<sup>81</sup>

$$\rho_N = \frac{m_N}{V_N} \text{ in g/cm}^3$$

$\rho_N$  Rohdichte im Normklima 20/65-1 DIN50014 klimatisierten Probe in g/cm<sup>3</sup>

$m_N$  Masse (Gewicht) der im Normklima 20/65-1 DIN50014 klimatisierten Probe in g

$V_N$  Volumen der im Normklima 20/65-1 DIN50014 klimatisierten Probe in cm<sup>3</sup>

<sup>81</sup> Norm DIN 52 182 : 1976-09. *Prüfung von Holz – Bestimmung der Rohdichte*, S. 1

### 3.5.1 Biegefestigkeit

Die Norm DIN 52 186 für den Biegeversuch beschreibt ein Verfahren zur Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit von Holz an kleinen, fehlerfreien Proben. Die Norm schränkt dabei ein, daß die ermittelten Werte für die Biegefestigkeit nicht für die Bemessung von Bauteilen verwendet werden darf, da deren Festigkeit von den Abmessungen und Güteeigenschaften des Holzes abhängig ist.<sup>82</sup> Es sollen somit nur Näherungswerte und Tendenzen der Festigkeit erkennbar gemacht werden, welche nicht direkt auf die Bemessung von Bauteilen angewendet werden können.

Die Biegefestigkeit ist der Widerstand von Holz gegen Bruch bei Biegebeanspruchung.<sup>83</sup> Die Biegespannung ist ein wichtiger Materialkennwert für Holz, der wie folgt definiert ist:<sup>84</sup>

$$\sigma_B = \frac{M}{W}$$

$$\sigma_B = \frac{3 * F * l}{2 * b * h^2}$$

$\sigma_B$	Biegespannung
M	Biegemoment der Probe
W	Widerstandsmoment der Probe
F	Kraft in N
h	Probendicke in mm
l	Stützweite in mm
b	Probenbreite in mm

Der Biege-Elastizitätsmodul  $E_B$  ist eine Kerngröße für die Verformungssteifigkeit der Probe im elastischen Bereich und bestimmt sich aus der Durchbiegung der Probe. Er berechnet sich bei einer Beanspruchung für rechteckige Probenquerschnitte wie folgt.<sup>85</sup>

$$E_B = \frac{l^3}{4 * b * h^3} * \frac{\Delta F}{\Delta f}$$

$E_B$	Biege-Elastizitätsmodul
h	Probendicke in mm
l	Stützweite in mm
b	Probenbreite in mm
$\Delta F$	eine beliebige Kraftdifferenz in N im elastischen Verformungsbereich der Probe
$\Delta f$	die der Kraftdifferenz $\Delta F$ entsprechende Durchbiegung in der Probenmitte in mm

<sup>82</sup> Norm DIN 52 186 : 1978-06. *Prüfung von Holz – Biegeversuch*, S. 1.

<sup>83</sup> NIEMZ 1993, S. 160.

<sup>84</sup> Norm DIN 52 186 : 1978-06. *Prüfung von Holz – Biegeversuch*, S. 2.

<sup>85</sup> Norm DIN 52 186 : 1978-06. *Prüfung von Holz – Biegeversuch*, S. 2.

Die Prüfanordnung ist schematisch in der Abbildung 28 und die Biegeprüfeinrichtung im Institut für Holzforschung ist in den Abbildungen 29 und 30 dargestellt. Die Ergebnisse der Prüfung der unbehandelten und getränkten Holzprüfkörper sind in den nachstehenden Tabellen dokumentiert.

Hierbei ist zu der Biegefestigkeit der Eichenholzprüfkörper zu bemerken, daß die mit MMA ungetrocknet getränkten Prüfkörper im Mittel mit  $82,44 \text{ N/mm}^2$  eine geringere Biegefestigkeit aufweisen, als die unbehandelten mit  $101,02 \text{ N/mm}^2$ . Die vor der Tränkung getrockneten Eichenholzprüfkörper besitzen dagegen mit  $119,60 \text{ N/mm}^2$  eine höhere Biegefestigkeit, sowie ein höheres E-Modul als die unbehandelten. Ausgewählte Kraft-Durchbiegungsdiagramme von einzelnen Eichenholzprüfkörpern, deren annähernd dem Mittelwert der gesamten unbehandelten und getränkten Eichenholzprüfkörper entspricht, sind in den Diagrammen 22, 24 und 26 aufgezeigt.

## Biegefestigkeit Eiche

Prob.Nr. EICHE	Rohdichte kg/m <sup>3</sup>	Zeit max. s	Kraft max. N	Festigkeit N/mm <sup>2</sup>	E-Modul N/mm <sup>2</sup>	Gewicht g	Stützweite mm
<b>unbehandelt</b>							
101	654	84	1937	100,39	8727	93,92	300
102	679	75	1902	98,05	8982	97,64	300
103	670	72	2080	107,52	10937	96,53	300
104	655	76	2005	103,89	10421	94,22	300
105	665	73	1756	90,88	8366	95,54	300
106	679	84	1907	98,81	8433	97,43	300
107	678	74	2312	119,42	12994	97,62	300
108	672	70	2151	111,27	12121	96,72	300
109	663	74	1866	96,95	9220	94,92	300
110	647	65	1598	82,98	8215	92,88	300
<b>Mw.</b>	<b>666</b>	<b>75</b>	<b>1951</b>	<b>101,02</b>	<b>9842</b>	<b>95,74</b>	
Stabw.	11,4	5,8	201	10,29	1695	1,70	
% Stabw.	1,7	7,8	10,3	10,2	17,2	1,8	
<b>ungetrocknet getränkt</b>							
121	687	71	1782	91,75	8718	99,12	300
122	670	78	1829	94,33	8688	96,73	300
123	629	65	1579	81,70	8297	90,44	300
124	636	50	1073	54,50	6093	92,45	300
125	673	54	1501	76,78	8621	97,33	300
126	698	77	1604	81,85	7075	101,13	300
127	662	60	1589	81,48	8611	95,78	300
128	640	74	1660	85,04	7708	92,67	300
129	602	66	1505	76,61	7559	87,69	300
130	697	80	1958	100,35	9208	100,77	300
<b>Mw.</b>	<b>659</b>	<b>68</b>	<b>1608</b>	<b>82,44</b>	<b>8058</b>	<b>95,41</b>	
Stabw.	31,8	10,4	239	12,49	945	4,49	
% Stabw.	4,8	15,3	14,9	15,2	11,7	4,7	
<b>getrocknet getränkt</b>							
141	693	74	2152	110,70	11819	100,21	300
142	807	81	1863	95,44	8266	116,92	300
143	811	76	1927	98,43	8698	117,71	300
144	760	75	2666	135,75	14168	110,57	300
145	813	81	2072	105,86	9502	117,97	300
146	768	78	2731	140,11	14483	111,06	300
147	774	66	2678	137,55	15230	111,98	300
148	772	59	2311	118,10	13812	111,95	300
149	733	69	2407	122,83	13070	106,33	300
150	779	71	2586	131,26	13537	113,36	300
<b>Mw.</b>	<b>771</b>	<b>73</b>	<b>2339</b>	<b>119,60</b>	<b>12259</b>	<b>111,81</b>	
Stabw.	37,1	6,9	324	16,51	2550	5,46	
% Stabw.	4,8	9,5	13,8	13,8	20,8	4,9	

Bei der Biegefestigkeit der Kiefernprüfkörper zeigt sich, daß die unbehandelten Prüfkörper im Mittel mit 108 N/mm<sup>2</sup> die geringste Biegefestigkeit aufweisen und die vor der Tränkung getrockneten mit 191 N/mm<sup>2</sup> die größte Biegefestigkeit besitzen. Trotz der Mehraufnahme an MMA der ungetrockneten Kiefernprüfkörper, ist dessen Biegefestigkeit im Mittel mit 151,1 N/mm<sup>2</sup> geringer als die der vor der Tränkung getrockneten. Der E-Modul der vor der

Tränkung getrockneten Prüfkörper ist größer gegenüber den unbehandelten und vor der Tränkung nicht getrockneten. Die beiden zuletzt genannten Prüfkörpergruppen besitzen zudem annähernd den gleichen E-Modul. Ausgesuchte Darstellungen der Kraft-Durchbiegungsdiagramme der Kiefernholzprüfkörper sind in den Diagrammen 28, 30 und 32 aufgezeigt.

## Biegefestigkeit Kiefer

Prob.Nr. KIEFER	Rohdichte kg/m <sup>3</sup>	Zeit max. s	Kraft max. N	Festigkeit N/mm <sup>2</sup>	E-Modul N/mm <sup>2</sup>	Gewicht g	Stützweite mm
<b>unbehandelt</b>							
201	560	81	1863	95,58	11512	80,98	300
202	574	72	2045	105,76	13298	82,59	300
203	568	87	2006	103,05	14973	82,59	300
204	562	69	1976	101,97	13054	80,93	300
205	575	70	2183	112,27	14621	83,16	300
206	566	78	2009	104,55	12779	81,15	300
207	577	78	2267	117,49	14927	82,89	300
208	587	83	2321	120,85	15234	84,02	300
209	588	83	2245	117,01	15235	84,18	300
210	581	84	1968	101,42	15497	84,37	300
<b>Mw.</b>	<b>574</b>	<b>79</b>	<b>2088</b>	<b>108,00</b>	<b>14113</b>	<b>82,69</b>	
Stabw.	9,8	6,3	154	8,37	1351	1,31	
% Stabw.	1,7	8,0	7,4	7,7	9,6	1,6	
<b>ungetrocknet getränkt</b>							
221	1090	119	2686	150,90	13967	149,78	300
222	1081	94	2587	144,29	13242	148,15	300
223	1075	94	2499	138,79	12903	148,76	300
224	1096	100	2572	143,37	13041	151,11	300
225	1086	107	2281	128,10	12410	148,88	300
226	1105	83	2417	134,86	12964	152,21	300
227	1148	112	2932	165,63	14271	155,86	300
228	1122	112	2914	161,60	13718	154,44	300
229	1119	115	2964	166,06	13985	152,8	300
230	1142	103	3134	177,36	15802	155,23	300
<b>Mw.</b>	<b>1106</b>	<b>104</b>	<b>2699</b>	<b>151,10</b>	<b>13630</b>	<b>151,72</b>	
Stabw.	25,4	11,3	275	15,93	962	2,83	
% Stabw.	2,3	10,8	10,2	10,5	7,1	1,9	
<b>getrocknet getränkt</b>							
241	1174	100	3483	200,22	19554	159,18	300
242	1147	89	3111	174,65	17666	156,51	300
243	1129	103	3334	184,69	18550	156,21	300
244	1113	83	3190	178,19	18745	152,46	300
245	1101	106	3511	194,04	19030	150,87	300
246	1157	100	3604	199,90	19670	160,07	300
247	1177	90	3567	203,04	19892	159,74	300
248	1102	111	3049	168,72	14147	152,43	300
249	1157	98	3697	208,43	19931	156,8	300
250	1161	98	3575	198,16	19394	159,85	300
<b>Mw.</b>	<b>1142</b>	<b>98</b>	<b>3412</b>	<b>191,00</b>	<b>18658</b>	<b>156,41</b>	
Stabw.	28,6	8,4	226	13,50	1732	3,44	
% Stabw.	2,5	8,6	6,6	7,1	9,3	2,2	

Die Biegefestigkeit der Fichtenprüfkörper im unbehandelten Zustand ist im Mittel mit  $82,75 \text{ N/mm}^2$  gegenüber den getränkten kleiner. Es zeigt sich auch ein Unterschied zwischen den vor der Tränkung getrockneten Prüfkörpern, deren Biegefestigkeit im Mittel mit  $109,39 \text{ N/mm}^2$  größer ist als die vor der Tränkung nicht getrockneten, welche eine Biegefestigkeit von  $107,63 \text{ N/mm}^2$  aufweisen. Der E-Modul der unbehandelten Fichtenprüfkörper ist entgegen den beiden getränkten Prüfkörpergruppen, bei denen der E-Modul nahezu identisch ist, kleiner. In den Diagrammen 34, 36 und 38 sind annähernd der Mittelwerte gemessenen Biegefestigkeit aller drei Prüfkörpergruppen der Fichte Kraft-Durchbiegungsdiagramme dargestellt.



## Biegefestigkeit Fichte

Prob.Nr. FICHTE	Rohdichte kg/m <sup>3</sup>	Zeit max. s	Kraft max. N	Festigkeit N/mm <sup>2</sup>	E-Modul N/mm <sup>2</sup>	Gewicht g	Stützweite mm
<b>unbehandelt</b>							
301	489	95	1699	89,46	13106	69,66	300
302	487	84	1506	79,40	11348	69,1	300
303	486	96	1712	89,34	12481	69,63	300
304	491	55	1132	59,45	10799	69,86	300
305	496	88	1715	92,25	13783	69,56	300
306	495	65	1493	79,08	12362	70,17	300
307	495	90	1617	84,52	13388	70,7	300
308	497	104	1539	81,06	11541	70,72	300
309	490	92	1693	89,74	13597	69,46	300
310	500	77	1570	83,18	11174	70,86	300
<b>Mw.</b>	<b>493</b>	<b>85</b>	<b>1568</b>	<b>82,75</b>	<b>12358</b>	<b>69,97</b>	
Stabw.	4,6	15,0	176	9,44	1091	0,61	
% Stabw.	0,9	17,7	11,2	11,4	8,8	0,9	
<b>ungetrocknet getränkt</b>							
321	643	95	2126	114,08	14491	90,42	300
322	775	99	2559	137,86	14731	108,29	300
323	660	99	2069	108,76	13084	94,23	300
324	664	85	1851	98,84	14442	93,72	300
325	608	91	1889	98,29	13879	87,22	300
326	642	75	1909	101,59	13275	90,73	300
327	710	74	2018	109,78	13520	99,38	300
328	613	95	2130	113,38	14289	86,81	300
329	661	59	1648	89,33	13377	92,5	300
330	775	69	1919	104,36	12317	108,11	300
<b>Mw.</b>	<b>675</b>	<b>84</b>	<b>2012</b>	<b>107,63</b>	<b>13741</b>	<b>95,14</b>	
Stabw.	59,8	14,0	241	13,09	761	7,77	
% Stabw.	8,9	16,7	12,0	12,2	5,5	8,2	
<b>getrocknet getränkt</b>							
341	640	92	1985	102,53	13070	91,88	300
342	704	99	1874	99,04	12402	99,91	300
343	594	94	1947	104,17	13786	83,52	300
344	584	91	1842	96,73	12579	83,18	300
345	604	97	1840	98,04	13756	85,37	300
346	729	97	2179	119,15	14357	101,42	300
347	691	103	2277	123,34	14402	96,59	300
348	665	106	2306	123,65	14105	93,72	300
349	661	86	2095	114,07	13792	92,16	300
350	619	88	2134	113,20	13832	87,69	300
<b>Mw.</b>	<b>649</b>	<b>95</b>	<b>2048</b>	<b>109,39</b>	<b>13608</b>	<b>91,54</b>	
Stabw.	49,3	6,4	175	10,54	698	6,54	
% Stabw.	7,6	6,7	8,5	9,6	5,1	7,1	

### 3.5.2 Druckfestigkeit

Die Norm DIN 52 185 zur Bestimmung der Druckfestigkeit ist ein Verfahren zur Ermittlung dieser von Holz parallel zur Faser an kleinen fehlerfreien Proben. Auch die nach dieser Norm ermittelten Werte für die Druckfestigkeit können nicht ohne weiteres auf Bauteile übertragen werden, da deren Festigkeit von den Abmessungen und Güte des Holzes abhängig ist.<sup>86</sup> Es sollen somit nur Näherungswerte und Tendenzen der Festigkeit erkennbar gemacht werden, welche nicht direkt auf die Bemessung von Bauteilen angewendet werden können.

Der Widerstand von Holz gegen Bruch bei Druckbeanspruchung parallel zur Faserrichtung ergibt sich nach folgender Definition:<sup>87</sup>

$$\sigma_{DII} = \frac{F_{\max}}{A} = \frac{F_{\max}}{a * b} \text{ in N/mm}^2$$

$F_{\max}$  Druckfestigkeit in der Probe in N/mm<sup>2</sup>

$\sigma_{DII}$  Höchstkraft in N

A Querschnittsfläche der Probe vor Beginn des Druckversuches in mm<sup>2</sup>

a, b Querschnittsabmessung

Zur Bestimmung der Druckfestigkeit der unbehandelten Holzprüfkörper diente die mechanische Druckprüfeinrichtung des Institutes für Holzforschung (Abb. 31). Bei der Ermittlung der Druckfestigkeit der getränkten Prüfkörper aller drei Holzarten, mußte aufgrund der zu erwartenden hohen Kräfte eine stärkere hydraulische Druckprüfeinrichtung (Abb. 32) des Instituts für Holzforschung München verwendet werden.

Die Messwerte der Eichenprüfkörper zeigen, daß die Druckfestigkeit durch die Tränkung nur minimal angestiegen ist. Wie bei der Biegefestigkeit liegen die Werte der Druckfestigkeit bei den vor der Tränkung nicht getrockneten Prüfkörper unter denen der unbehandelten. Wogegen die Druckfestigkeit der vor der Tränkung getrockneten Eichenprüfkörper geringfügig größer ist. In den Diagrammen 23, 25 und 27 sind zur Anschauung Kraft-Zeitdiagramme die annähernd an den Mittelwert der jeweiligen Eichenholzprüfkörpergruppen die Druckfestigkeiten dargestellt.

<sup>86</sup> Norm DIN 52 185 : 1976-09. *Prüfung von Holz – Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser*, S. 1.

<sup>87</sup> Norm DIN 52 185 : 1976-09. *Prüfung von Holz – Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser*, S. 2.

## Druckfestigkeit Eiche

Prob. Nr. EICHE	Rohdichte kg/m <sup>3</sup>	Zeit max. s	Kraft max. N	Festigkeit N/mm <sup>2</sup>	Gewicht g
<b>unbehandelt</b>					
101	617	91	19961	47,02	7,90
102	689	90	22815	53,91	8,75
103	685	84	24957	59,17	8,66
104	644	84	23216	54,76	8,19
105	671	92	22189	52,59	8,48
106	676	92	22086	52,21	8,57
107	678	88	27360	64,61	8,61
108	665	81	25533	60,34	8,44
109	688	88	23910	56,54	8,72
110	640	92	21229	50,39	8,09
<b>Mw.</b>	<b>665</b>	<b>88</b>	<b>23326</b>	<b>55,15</b>	<b>8,44</b>
Stabw.	24,0	4,0	2185	5,17	0,29
% Stabw.	3,6	4,5	9,4	9,4	3,4
<b>ungetrocknet getränkt</b>					
121	659	61	22366	52,86	8,36
122	720	79	23574	55,18	9,23
123	642	77	20998	49,53	8,16
124	644	78	19438	45,44	8,29
125	671	62	22419	52,80	8,55
126	682	79	20217	46,89	8,82
127	649	62	20908	48,94	8,33
128	628	63	19360	45,21	8,07
129	630	60	19737	46,11	8,09
130	715	69	22768	53,42	9,15
<b>Mw.</b>	<b>664</b>	<b>69</b>	<b>21179</b>	<b>49,64</b>	<b>8,51</b>
Stabw.	32,8	8,3	1515	3,70	0,42
% Stabw.	4,9	12,1	7,2	7,5	5,0
<b>getrocknet getränkt</b>					
141	702	61	24430	57,43	8,94
142	792	80	22859	53,49	10,16
143	802	75	24114	56,12	10,34
144	769	63	30346	70,89	9,88
145	785	76	25046	58,64	10,07
146	769	64	30250	70,58	9,90
147	776	62	30796	72,08	9,95
148	760	62	30784	71,79	9,76
149	716	62	28142	65,88	9,16
150	780	63	30133	70,37	10,02
<b>Mw.</b>	<b>765</b>	<b>67</b>	<b>27690</b>	<b>64,73</b>	<b>9,82</b>
Stabw.	32,1	7,2	3210	7,45	0,44
% Stabw.	4,2	10,8	11,6	11,5	4,5

Auch die Druckfestigkeit der Kiefernprüfkörper zeigt sich die gleiche Tendenz wie bei der Biegefestigkeit. Hierbei besitzen die unbehandelten Prüfkörper die geringste Druckfestigkeit gegenüber den getränkten. Es ergibt sich wiederum eine höhere Druckfestigkeit der vor der Tränkung getrockneten Kiefernprüfkörper entgegengesetzt der

vor der Tränkung nicht getrockneten Prüfkörper. Ausgesuchte Kraft-Zeitdiagramme zeigen in den Diagrammen 29, 31 und 33 anhand des annähernden Mittelwerts der Druckfestigkeit der Kiefernholzprüfkörper.

## Druckfestigkeit Kiefer

Prob. Nr. KIEFER	Rohdichte kg/m <sup>3</sup>	Zeit max. s	Kraft max. N	Festigkeit N/mm <sup>2</sup>	Gewicht g
<b>unbehandelt</b>					
201	539	76	19499	46,09	6,84
202	584	83	27040	63,84	7,41
203	567	83	26932	62,92	7,30
204	571	93	26235	62,09	7,24
205	569	88	25021	59,28	7,21
206	568	78	24073	57,14	7,18
207	569	87	25907	61,53	7,19
208	573	90	26829	63,04	7,31
209	574	87	25665	60,94	7,25
210	583	82	25004	58,51	7,48
<b>Mw.</b>	<b>570</b>	<b>85</b>	<b>25221</b>	<b>59,54</b>	<b>7,24</b>
Stabw.	12,3	5,3	2228	5,19	0,17
% Stabw.	2,2	6,2	8,8	8,7	2,4
<b>ungetrocknet getränkt</b>					
221	1095	89	38598	95,41	13,27
222	1033	90	35314	85,70	12,74
223	1081	89	38174	94,03	13,21
224	1081	85	35860	89,26	13,05
225	1106	63	32784	81,71	13,30
226	1107	88	38945	95,88	13,48
227	1148	141	42140	104,41	13,91
228	1132	140	39993	100,31	13,52
229	1125	115	38639	96,07	13,57
230	1163	88	38234	97,86	13,63
<b>Mw.</b>	<b>1107</b>	<b>99</b>	<b>37868</b>	<b>94,06</b>	<b>13,37</b>
Stabw.	37,6	25,2	2618	6,79	0,33
% Stabw.	3,4	25,5	6,9	7,2	2,5
<b>getrocknet getränkt</b>					
241	1156	115	45077	114,47	14,15
242	1129	88	39413	96,09	13,89
243	1129	114	43192	106,30	13,77
244	1063	63	34515	83,53	13,18
245	1094	88	41581	101,48	13,44
246	1145	115	45389	111,17	14,02
247	1174	115	45920	113,34	14,25
248	1103	89	40041	97,61	13,57
249	1123	91	43340	106,35	13,72
250	1152	113	44026	107,16	14,18
<b>Mw.</b>	<b>1127</b>	<b>99</b>	<b>42249</b>	<b>103,75</b>	<b>13,82</b>
Stabw.	33,0	17,9	3492	9,41	0,35
% Stabw.	2,9	18,1	8,3	9,1	2,5

Bei der Fichte ergibt sich eine geringere Druckfestigkeit der unbehandelten gegenüber den getränkten Prüfkörpern, wobei wiederum die vor der Tränkung getrockneten Fichtenprüfkörper die größte Druckfestigkeit beweisen. Ausgewählte Kraft-Zeitdiagramme, die dem Mittelwert der Druckfestigkeit der Fichtenprüfkörper entsprechen, sind in den Diagrammen 35, 37 und 39 dargestellt.

## Druckfestigkeit Fichte

Prob. Nr. FICHTE	Rohdichte kg/m <sup>3</sup>	Zeit max. s	Kraft max. N	Festigkeit N/mm <sup>2</sup>	Gewicht g
<b>unbehandelt</b>					
301	480	75	19365	46,32	6,03
302	467	73	18604	44,51	5,86
303	470	67	14747	35,03	5,94
304	487	79	19948	47,85	6,09
305	499	79	21025	50,93	6,18
306	480	74	20090	48,72	5,94
307	494	77	20290	48,49	6,20
308	486	76	20741	50,05	6,04
309	489	78	20835	50,53	6,05
310	493	76	21624	52,47	6,10
<b>Mw.</b>	<b>485</b>	<b>75</b>	<b>19727</b>	<b>47,49</b>	<b>6,04</b>
Stabw.	10,3	3,6	1950	4,95	0,11
% Stabw.	2,1	4,7	9,9	10,4	1,8
<b>ungetrocknet getränkt</b>					
321	647	64	24483	60,23	7,90
322	772	99	25650	62,94	9,44
323	667	55	24367	58,98	8,27
324	702	58	25857	63,34	8,60
325	611	62	23573	56,13	7,70
326	630	58	23207	55,72	7,87
327	780	98	27258	68,17	9,36
328	624	58	23138	55,49	7,81
329	665	57	24873	60,89	8,15
330	808	98	26934	67,51	9,68
<b>Mw.</b>	<b>691</b>	<b>71</b>	<b>24934</b>	<b>60,94</b>	<b>8,48</b>
Stabw.	71,6	19,2	1466	4,59	0,75
% Stabw.	10,4	27,2	5,9	7,5	8,9
<b>getrocknet getränkt</b>					
341	714	62	25421	61,45	8,86
342	723	59	25255	61,61	8,89
343	653	66	23929	58,22	8,05
344	670	62	24141	58,47	8,30
345	665	78	25443	62,30	8,16
346	692	67	24067	58,65	8,52
347	743	78	26347	64,84	9,05
348	693	63	25229	61,00	8,60
349	673	69	25511	62,29	8,28
350	612	68	23972	57,72	7,63
<b>Mw.</b>	<b>684</b>	<b>67</b>	<b>24932</b>	<b>60,66</b>	<b>8,43</b>
Stabw.	37,8	6,5	839	2,31	0,44
% Stabw.	5,5	9,6	3,4	3,8	5,2

### 3.5.3 Feuchtigkeitsgehalt

Die Bestimmung des Holzfeuchtigkeitsgehalts ist nach den DIN-Normen DIN 52 186 für den Biegeversuch und DIN 52 185 zur Bestimmung der Druckfestigkeit im Prüfbericht der jeweiligen Normen vorgeschrieben. Die Ermittlung des Holzfeuchtigkeitsgehalts nach DIN 52 183 bestimmt zusätzlich wesentliche physikalische und technologische Eigenschaften des Holzes.<sup>88</sup>

Hierzu wurden von jeder Holzart je fünf unbehandelte, ungetrocknet mit MMA getränkte und vor der Tränkung mit MMA getränkte Holzprüfkörper gedarrt.

Dabei ist der Holzfeuchtigkeitsgehalt  $u$  jeder Probe auf 0,1 Holzfeuchtigkeitsprozent nach folgender Formel berechnet:

$$u = \frac{m_u - m_o}{m_o} * 100 \text{ in } \%$$

$m_u$  Masse der feuchten Holzprobe in g

$m_o$  Masse der wasserfreien (darrtrockenen) Probe in g

Die Ergebnisse in den folgenden Tabellen zeigen neben dem prozentualen Holzfeuchtigkeitsgehalt im Normalklima 20/65 auch die Gewichtsveränderungen der drei Holzarten vom Normalklima gegenüber dem Darrzustand.

Zu dem Feuchtegehalt der Eiche ist wie bei den Holzarten Kiefer und Fichte zu bemerken, daß die Holzfeuchte im Normalklima der getränkten Holzprüfkörper geringer ist als bei den unbehandelten. Besonders die vollgetränkte Kiefer zeigt einen um die Hälfte verminderten Holzfeuchtigkeitsgehalt im Normalklima entgegen der unbehandelten Kiefernprüfkörper. Die mit MMA getränkten Fichtenprüfkörper zeigen eine um ca. 4 % geringe Holzfeuchte auf gegenüber den unbehandelten Prüfkörpern. Mit 1 % geringerer Holzfeuchte der getränkten Eichenprüfkörper entgegen den unbehandelten zeigt sich bei der Eiche die geringe Aufnahme an MMA durch die Tränkung. Somit ist die Feuchtigkeitsaufnahme von mit MMA getränkten Holz geringer als die von unbehandeltem Holz, wie schon in ähnlicher Form bei der hygrischen Dehnung gezeigt wurde. Der Holzfeuchtigkeitsgehalt zeigt somit eine Proportionalität zwischen der durch die Tränkung aufgenommene Menge an MMA oder anders der Dichte gegenüber der Holzfeuchte bzw. dem Feuchtigkeitsaufnahmevermögen von unbehandeltem und mit MMA getränkten Holz auf.

---

<sup>88</sup> Norm DIN 52 183 : 1977-11. *Prüfung von Holz – Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes*, S. 1.

## Feuchtigkeitsgehalt von Eiche

Prob. Nr. EICHE	Gewicht-1 20/65 g	Gewicht-2 darr g	Feuchte 20/65 %	Volumen darr cm <sup>3</sup>	Rohdichte darr g/cm <sup>3</sup>
<b>unbehandelt</b>					
<b>101</b>	7,90	7,15	10,49	12,05	0,593
<b>103</b>	8,52	7,74	10,08	12,00	0,645
<b>105</b>	8,51	7,70	10,52	12,03	0,640
<b>107</b>	8,60	7,83	9,83	12,07	0,649
<b>109</b>	8,64	7,82	10,49	12,03	0,650
<b>Mw.</b>	<b>8,43</b>	<b>7,65</b>	<b>10,28</b>	<b>12,04</b>	<b>0,635</b>
Stabw.	0,30	0,28	0,31	0,03	0,024
% Stabw.	3,6	3,7	3,0	0,2	3,8
<b>ungetrocknet getränkt</b>					
<b>121</b>	8,65	7,92	9,22	12,23	0,648
<b>123</b>	8,25	7,55	9,27	12,24	0,617
<b>125</b>	8,62	7,89	9,25	12,28	0,643
<b>127</b>	8,04	7,36	9,24	12,26	0,600
<b>129</b>	7,62	6,98	9,17	12,29	0,568
<b>Mw.</b>	<b>8,24</b>	<b>7,54</b>	<b>9,23</b>	<b>12,26</b>	<b>0,615</b>
Stabw.	0,43	0,39	0,04	0,03	0,033
% Stabw.	5,2	5,2	0,4	0,2	5,3
<b>getrocknet getränkt</b>					
<b>141</b>	8,94	8,16	9,56	12,16	0,671
<b>143</b>	9,91	9,06	9,38	12,46	0,727
<b>145</b>	9,79	8,94	9,51	12,41	0,720
<b>147</b>	9,74	8,87	9,81	12,10	0,733
<b>149</b>	9,35	8,56	9,23	12,21	0,701
<b>Mw.</b>	<b>9,55</b>	<b>8,72</b>	<b>9,50</b>	<b>12,27</b>	<b>0,710</b>
Stabw.	0,40	0,36	0,22	0,16	0,025
% Stabw.	4,2	4,2	2,3	1,3	3,5

## Feuchtigkeitsgehalt von Kiefer

Prob. Nr. KIEFER	Gewicht-1 20/65 g	Gewicht-2 darr g	Feuchte 20/65 %	Volumen darr cm <sup>3</sup>	Rohdichte darr g/cm <sup>3</sup>
<b>unbehandelt</b>					
201	7,11	6,45	10,23	11,97	0,539
203	7,28	6,57	10,81	12,13	0,542
205	7,14	6,45	10,70	11,99	0,538
207	7,23	6,53	10,72	11,96	0,546
209	7,18	6,48	10,80	11,98	0,541
<b>Mw.</b>	<b>7,19</b>	<b>6,50</b>	<b>10,65</b>	<b>12,01</b>	<b>0,541</b>
Stabw.	0,07	0,05	0,24	0,07	0,003
% Stabw.	1,0	0,8	2,3	0,6	0,6
<b>ungetrocknet getränkt</b>					
221	13,24	12,57	5,33	11,77	1,068
223	13,10	12,39	5,73	11,87	1,044
225	13,18	12,63	4,35	11,89	1,106
227	13,90	13,36	4,04	11,78	1,135
229	13,65	13,15	3,80	11,46	1,148
<b>Mw.</b>	<b>13,41</b>	<b>12,82</b>	<b>4,65</b>	<b>11,75</b>	<b>1,100</b>
Stabw.	0,34	0,41	0,84	0,17	0,044
% Stabw.	2,6	3,2	18,0	1,5	4,0
<b>getrocknet getränkt</b>					
241	14,26	13,60	4,85	11,59	1,174
243	13,76	13,06	5,36	11,73	1,113
245	13,32	12,50	6,56	11,88	1,053
247	14,20	13,68	3,80	11,54	1,185
249	13,90	13,29	4,59	11,50	1,156
<b>Mw.</b>	<b>13,89</b>	<b>13,23</b>	<b>5,03</b>	<b>11,65</b>	<b>1,136</b>
Stabw.	0,38	0,48	1,02	0,16	0,054
% Stabw.	2,7	3,6	20,3	1,3	4,8



## Feuchtigkeitsgehalt von Fichte

Prob. Nr. FICHTE	Gewicht-1 20/65 g	Gewicht-2 darr g	Feuchte 20/65 %	Volumen darr cm <sup>3</sup>	Rohdichte darr g/cm <sup>3</sup>
<b>unbehandelt</b>					
<b>301</b>	6,01	5,35	12,34	11,64	0,460
<b>303</b>	6,56	5,86	11,95	11,75	0,499
<b>305</b>	6,21	5,55	11,89	11,46	0,484
<b>307</b>	6,19	5,50	12,55	11,59	0,475
<b>309</b>	6,13	5,48	11,86	11,49	0,477
<b>Mw.</b>	<b>6,22</b>	<b>5,55</b>	<b>12,12</b>	<b>11,59</b>	<b>0,479</b>
Stabw.	0,21	0,19	0,31	0,12	0,014
% Stabw.	3,3	3,4	2,6	1,0	3,0
<b>ungetrocknet getränkt</b>					
<b>321</b>	8,28	7,69	7,67	11,65	0,660
<b>323</b>	8,83	8,24	7,16	11,70	0,704
<b>325</b>	8,21	7,62	7,74	11,83	0,644
<b>327</b>	8,62	8,06	6,95	11,53	0,699
<b>329</b>	8,61	8,06	6,82	11,67	0,690
<b>Mw.</b>	<b>8,51</b>	<b>7,93</b>	<b>7,27</b>	<b>11,68</b>	<b>0,679</b>
Stabw.	0,26	0,27	0,42	0,11	0,026
% Stabw.	3,0	3,4	5,7	0,9	3,8
<b>getrocknet getränkt</b>					
<b>341</b>	8,10	7,51	7,86	11,80	0,366
<b>343</b>	7,27	6,69	8,67	11,65	0,574
<b>345</b>	7,42	6,88	7,85	11,67	0,590
<b>347</b>	8,50	7,94	7,05	11,66	0,681
<b>349</b>	8,13	7,60	6,97	11,69	0,650
<b>Mw.</b>	<b>7,88</b>	<b>7,32</b>	<b>7,68</b>	<b>11,69</b>	<b>0,572</b>
Stabw.	0,52	0,52	0,70	0,06	0,123
% Stabw.	6,6	7,1	9,1	0,5	21,5

### 3.6 Mikroskopische Untersuchung der unbehandelten und getränkten Holzprüfkörper

#### 3.6.1 Lichtmikroskopie

Die Lichtmikroskopie als bildgebendes Verfahren diene nur bedingt für die holzanatomische Analysierung der Tränkergebnisse. Das in das Holz Eindringene MMA konnte auf diese Weise nicht sichtbar gemacht werden.

Exemplarisch sind in den Abbildungen 33 bis 38 Dünnschnitte, welche mit dem Mikrotom des Institutes für Holzforschung hergestellt wurden, der Fichte im Querschnitt, Radialschnitt und Tangentialschnitt dargestellt. Sie zeigen die holzanatomischen Merkmale einer unbehandelten und einer mit MMA getränkten Fichte.

Zu bemerken ist, daß sich die Anatomie der getränkten Holzarten durch die physikalischen Einflüsse während der Tränkung nicht verändert haben. So sind sämtliche Holzzellen durch die Tränkung intakt geblieben. Daher wurde auf die Darstellung der anatomischen Merkmale der Eiche und Kiefer verzichtet.

Bei der Herstellung der Mikrotomschnitte war bei Kiefer aufgrund der vollständig Durchtränkung mit MMA und sich der daraus resultierenden Materialhärte kein Querschnitt machbar.

Aufgrund der bedingten Auswertbarkeit der lichtmikroskopischen Aufnahmen wurde das Thema nicht weiter behandelt.

### 3.6.2 Rasterelektronenmikroskopie

Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen der Holzarten Eiche, Kiefer und Fichte im unbehandelten und mit MMA getränkten Zustand wurde im Zentrum für Werkstoffanalytik in Lauf durchgeführt.

Die Rasterelektronenmikroskopie stellt gegenüber der Lichtmikroskopie für die Darstellung der Tränkergebnisse ein weitaus besseres bildgebendes Verfahren dar. Hierzu wurden vergleichend unbehandelte und mit MMA getränkte Proben der Holzarten Eiche, Kiefer und Fichte analysiert. Die REM-Aufnahmen zeigen jeweils einen Querschnittsbruch der Holzproben. Durch aufdampfen von Kohlenstoff wurden die Holzproben präpariert.

Nach Aussagen von Dr. Unger ist der Vergleich der mit MMA getränkten Holzarten aufgrund der verschiedenen MMA-Aufnahme nicht möglich. Daher können nur allgemeine Rückschlüsse für jede einzelne Holzart getroffen werden.

Die Abbildungen 39 bis 44 sind REM-Aufnahmen einer unbehandelten und mit MMA getränkten Eichenholzprobe dargestellt. Wie schon vorweg erwähnt ist die Tränkung von Eichenkernholz schwierig. Dies zeigt sich in der Gewichtsveränderung nach der Tränkung mit MMA und läßt sich in den REM-Abbildungen 42 und 44 erkennen. Die Gefäße der Eiche sind nicht vollständig mit MMA gefüllt. Nur die Gefäßwände zeigen durch ihre Verdickung und in der Struktur dieser, daß sich dort das MMA angelagert hat. Ein Grund dafür kann möglicherweise, auch nach Angaben Dr. Ungers, das fehlen starker Kapillarkräfte aufgrund der großen Gefäßdurchmesser sein, welche zum Herauslaufen des MMAs aus dem Eichenholz vor der Polymerisation geführt haben. Aber auch der schlechte Stofftransport im Eichenkernholz kann dieses Phänomen hervorgerufen haben.

Die mit MMA getränkten Kiefernproben hingegen zeigt in den REM-Abbildungen 45 bis 50 wie erwartend vergleichend zu den unbehandelten Proben, daß die Lumen der Holzzellen vollständig mit MMA gefüllt sind. Die vor allem in Abbildung 50 zu erkennenden Vakuolen zeigen den Volumenschwund des MMAs während der Polymerisation. Diese Phänomen wird auch bei der Steintränkung erwähnt.<sup>89</sup> Aus der Abbildung 50 ist gegenüber der Abbildung 49 zu erkennen, daß das MMA aufgrund der guten Tränkbarkeit sogar in die Zellwände eingedrungen ist. Sie zeigen sich im MMA getränkten Zustand verdickt und weisen entgegen der unbehandelten Probe eine andere Oberflächenstruktur auf.

In den REM-Abbildungen 51 bis 56 ist der Vergleich zwischen unbehandelten und mit MMA getränkten Fichtenholz dargestellt. In der Abbildung 52 ist ersichtlich, daß nicht alle Lumen der Fichtenholzzellen mit MMA gefüllt sind, was die Gewichtsveränderung durch das Tränken mit MMA bestätigt. Zudem zeigen besonders die Abbildungen 54 und 56, daß sich das MMA zum größte Teil nicht mit den Zellwänden des Fichtenholzes verbunden hat. Das erklärt auch das Fehlen der typischen Vakuolen im polymerisierten MMA. Dies kann

---

<sup>89</sup> SNETHLAGE, ROLF; WIHR, ROLF: Kolloquium über das Acrylharz-Volltränkungsverfahren. In: Steinkonservierung. *Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege* Bd. 4. München, 1979, S. 28

nach Angaben Dr. Ungers mit Abstoßeffekten der Fichtenzellwände aufgrund der Holzinhaltsstoffe zu tun haben.

Weiterhin haben die Zellvolumen und die Zelloberflächen im allgemeinen bei allen Holzarten, nach Angaben Dr. Ungers, Einfluß auf die Tränkung und im speziellen auf die Anlagerung des MMAs in den Lumen bzw. Gefäßen. Dafür kann nach Angaben Dr. Ungers, der Holzinhaltsstoff Lignin, der inhibierend wirkt verantwortlich sein.

## 4 Auswertung der Ergebnisse

### 4.1 Eignung von Methylmethacrylat als Festigungsmittel für Holz

Acrylmonomere werden seit den sechziger Jahren des 20. Jahrhunderts zur Festigung von degradiertem und gesundem Nutzholz zu dessen Dimensionsstabilisierung eingesetzt. Nach Aussage Dr. Ungers wurde das Verfahren der Acrylharzvolltränkung erstmals in den sechziger Jahren im großen Rahmen für den Holzfußboden des Helsinkier Flughafens im Nutzholzbereich angewendet.

Die geringe Viskosität und die Niedermolekularität des MMAs führt bei der Volltränkung von Holz zu einer sehr guten Eindringtiefe, welche durch das Vakuum-Druckverfahren im Autoklaven der Firma „IBACH Steinkonservierung“ nochmals verbessert wird. Wobei die unterschiedliche Aufnahme des MMAs von den Holzarten Eiche, Kiefer und Fichte auf die holzanatomischen Merkmale der jeweiligen Proben zurückzuführen ist und berücksichtigt werden sollte. Hierzu würde ein umfassenderer Versuchsaufbau in Bezug auf die Probenmenge weitere Aufschlüsse bringen, um nicht von Tendenzen sprechen zu müssen.

Die Feststellung der thermisch-hygrischen-Dehnung zeigt einmal mehr die Veränderung der Materialeigenschaften der mit MMA vollgetränkten Holzprüfkörper. Wichtig hierbei ist zu beachten, daß sich durch das Einbringen von MMA die thermische Dehnung relativ stark erhöht hat. So dehnt sich mit MMA getränktes Holz unter Wärmeeinfluß stärker aus als unbehandeltes. Diese Parameter sollten unbedingt bei der Anwendung einer Acrylharzvolltränkung in jedem einzelnen Fall berücksichtigt werden.

Ein wichtiger und positiver Aspekt ist die Verringerung der hygrischen Dehnung (Quellen) von mit MMA getränktem Holz. Aber auch hier spielt die Aufnahme an MMA eine bedeutende Rolle. Die MMA am geringsten aufgenommene Holzart Eiche zeigt in radialer Richtung eine größere hygrische Dehnung gegenüber der Kiefer und Fichte, welche wiederum mehr MMA aufgenommen haben. So sind die eingebrachten Mengen an MMA in das Holz evident für die sich daraus ergebenden Eigenschaften des Materials.

Ein weiteres Ergebnis der Volltränkung von Holz mit MMA stellt die Farbtonveränderung dar. Das Holz dunkelt durch das Einbringen des Festigungsmittels nach. Durch längeres Abdampfen des MMAs aus dem Holz vor der prozeßgesteuerten Polymerisation könnte diese Verdunkeln gemindert werden. Die Randzonen des Holzes wäre so aber nicht vollständig gefestigt.

Ein Festigungsmittel von Holz sollte aber nicht nur eine kurzfristige Konsolidierung darstellen. MMA oder Acrylglas (Plexiglas) ist der Kunststoff mit der größten Langzeiterfahrung und weist eine gute Alterungsbeständigkeit auf. Acrylglas ist nach heutigen technischen Maßstäben photochemisch sehr resistent und besitzt eine sehr gute Bioresistenz, wie nachfolgende Tabelle aufzeigt. Dies sind vor allem Kriterien die bei freier Bewitterung eine große Rolle spielen. MMA ist somit einer der wenigen geeigneten Festigungsmittel für Holz in der Denkmalpflege.

Bioresistenz von Polymeren (aus UNGER 1995, S. 378.)

<b>Polymer</b>	<b>Kurzbeschreibung</b>	<b>Biologische Beständigkeit</b>
Polyethylen	PE	2
Polypropylen	PP	1- 2
Polyvinylacetat	PVAC	2- 3
Polyvinylalkohol	PVAL	3- 4
Polyvinylchlorid (Hart)	Hart- PVC	1- 2
Polyvinylchlorid (Weich)	Weich- PVC	3-4
Polymethylmethacrylat	PMMA	1
Polystyren	PS	1- 2
Polyethylenterephthalat	PETP	1- 2
Polyester, glasfaserverstärkt	UP	1- 2
Phenol- Formaldehyd- Harze	PF	2- 3
Harnstoff- Formaldehyd- Harze	UF	2- 3
Melamin- Formaldehyd- Harze	MF	3
Polyamid	PA	2- 3
Polyurethane	PUR	2- 4
Epoxidharze	EP	1- 2
Polypeptide	-	4
Cellulosederivate	CA, CAB, CN, MC, CMC	3- 4
Legende: 1= sehr gut beständig 2= gut beständig 3= durchschnittlich beständig 4= wenig beständig		

## **4.2 Verfahrenstechnische Änderungsvorschläge in Bezug auf das Volltränken von Holz mit Methylmethacrylat**

Die Verwendung von MMA zur Volltränkung von Holz ist bis heute immer nur auf einzelne Objekte angewendet worden ohne eine allgemein gültige Prozeßführung zu definieren.

Die Prozeßführung der durchgeführten MMA-Volltränkung resultieren aus den Vorversuche zur Tränkung von Holz mit MMA. Da diese Parameter aber erstmals durch die Versuche ermittelt wurden konnte der Tränk- und Polymerisationsprozeß nur annähernd aus den Permeabilitätsmessungen hergeleitet werden.

Für eine Prozeßoptimierung sollte zudem jede Holzart einzeln untersucht werden, um holzanatomische Besonderheiten mit einfließen zu lassen. Die Verlängerung der Druck-Vakuumphasen, besonders bei der Eiche und Fichte, könnte zur besseren MMA-Aufnahme beitragen.

Ein wichtiger Punkt für die Tränkbarkeit von Holz stellt die vorherige Trocknung dar. Sie verhindert die Tränkbarkeit ersichtlich aus den Ergebnissen. Trotzdem ist das zelleigene Wasser nicht durch das MMA zu ersetzen. Es müßte diesbezüglich darüber nachgedacht werden einen Austausch des Wassers z.B. mit Aceton vor der Tränkung mit MMA durchzuführen.

Insgesamt muß auf dem Gebiet der Volltränkung von Holz mit MMA noch sehr viel geforscht werden um die einzelnen Mechanismen, die in der Steinkonservierung vorhanden sind, zu verstehen. Bis dahin ist eine optimale Prozeßführung für die Tränkung von spezifischen Holzarten mit MMA nicht vorhanden.

## 5 Zusammenfassung

Die Tränkung von Holz mit MMA unter Verwendung des Volltränkverfahrens der Firma „IBACH Steinkonservierung“ stellt eine beispielhafte Konsolidierung dar. Dabei wird das Holz mit monomeren MMA getränkt, das vollständig ins Holz eindringen kann. Durch Wärme wird die Polymerisierung zu PMMA im Innern des Holzes ausgelöst. Das Holz ist sozusagen plastifiziert. Es entsteht ein vollkommen neues Material mit erheblich anderen Eigenschaften.

Die Volltränkung von Holz mit MMA führt zu einer sehr guten Eindringtiefe, welche durch das Vakuum-Druckverfahren im Autoklaven der Firma „IBACH Steinkonservierung“ nochmals verbessert wird. Wobei die unterschiedliche Aufnahme des MMA von den Holzarten Eiche, Kiefer und Fichte auf die holzanatomischen Merkmale der jeweiligen Proben zurückzuführen ist.

Die Feststellung der thermisch-hygrischen-Dehnung zeigt einmal mehr die Veränderung der Materialeigenschaften der mit MMA vollgetränkten Holzprüfkörper. Wichtig hierbei ist zu beachten, daß sich durch das Einbringen von MMA in das Holzgefüge völlige andere physikalische Parameter in Bezug auf das Materialverhalten ergeben.

Ein weiteres Ergebnis der Volltränkung von Holz mit MMA stellt die Farbtonveränderung dar. Das Holz dunkelt durch das Einbringen des Festigungsmittels nach. Diese Verdunkelung des Holzes muß nach der Tränkung berücksichtigt werden.

Das Festigungsmittel MMA/PMMA ist nach heutigen technischen Maßstäben ein sehr alterungsbeständiger Werkstoff. Dies sind vor allem Kriterien die bei freier Bewitterung eine große Rolle spielen. MMA ist somit einer der wenigen geeigneten Festigungsmittel für Holz in der Denkmalpflege.

Insgesamt muß auf dem Gebiet der Volltränkung von Holz mit MMA noch sehr viel geforscht werden, um die einzelnen Mechanismen die in der Steinkonservierung vorhanden sind, auf die Tränkung von Holz mit MMA mit dem patentierten Verfahren der Firma „IBACH Steinkonservierung“ zu übertragen. Bis dahin ist eine optimale Prozeßführung für die Tränkung von spezifischen Holzarten mit MMA nicht vorhanden. Hierzu würde ein umfassenderer Versuchsaufbau in Bezug auf die Probenmenge weiter Aufschlüsse bringen, um nicht von Tendenzen sprechen zu müssen und eine absolute Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Letztendlich stellt dieses Volltränkungsverfahren für die Anwendung auf Holz ein großes Potential dar, ist aber in der Form nicht direkt übertragbar.

## 6 DIN-Normen

DIN 1052	Norm DIN 1052 : 2004-08. <i>Entwurf und Berechnung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln für den Hochbau</i>
DIN 1422-1	Norm DIN 1422-1 : 1983-02. <i>Veröffentlichungen aus Wissenschaft, Technik, Wirtschaft und Verwaltung – Gestaltung von Manuskripten und Typoskripten</i>
DIN 1505-2	Norm DIN 1505-2 : 1984-01. <i>Titelangaben von Dokumenten – Zitierregeln</i>
DIN 50 014	Norm DIN 50 014 : 1985-07. <i>Klimate und ihre technische Anwendung – Normalklimate</i>
DIN 50 015	Norm DIN 50 015 : 1975-08. <i>Klimate und ihre technische Anwendung – Konstante Prüfkimate</i>
DIN 52 180	Norm DIN 52 180 : 1977-11. <i>Prüfung von Holz Probenahme – Grundlagen</i>
DIN 52 181	Norm DIN 52 181 : 1975-08. <i>Bestimmung von Wuchseigenschaften von Nadelschnittholz</i>
DIN 52 182	Norm DIN 52 182 : 1976-09. <i>Prüfung von Holz – Bestimmung der Rohdichte</i>
DIN 52 183	Norm DIN 52 183 : 1977-11. <i>Prüfung von Holz – Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes</i>
DIN 52 184	Norm DIN 52 184 : 1979-03. <i>Prüfung von Holz – Bestimmung der Quellung und Schwindung</i>
DIN 52 185	Norm DIN 52 185 : 1976-09. <i>Prüfung von Holz – Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser</i>
DIN 52 186	Norm DIN 52 186 : 1978-06. <i>Prüfung von Holz – Biegeversuch</i>
DIN 52 187	Norm DIN 52 187 : 1979-05. <i>Prüfung von Holz – Bestimmung der Scherfestigkeit in Faserrichtung</i>
DIN 52 188	Norm DIN 52 188 : 1979-05. <i>Prüfung von Holz – Bestimmung der Zugfestigkeit parallel zur Faser</i>
DIN 52 189	Norm DIN 52 189 : 1981-12. <i>Prüfung von Holz – Schlagbiegeversuch</i>
DIN 52 192	Norm DIN 52 192 : 1979-05. <i>Prüfung von Holz – Druckversuch quer zur Faserrichtung</i>
DIN 68 364	Norm DIN 68 364 : 2003-05. <i>Kennwerte von Holzarten – Rohdichte, Elastizitätsmodul und Festigkeiten</i>
DIN 68 800-3	Norm DIN 68 800-3 : 1990-04. <i>Holzschutz – Vorbeugender chemischer Holzschutz</i>
DIN EN 1193	Norm DIN EN 1193 : 1998-06. <i>Holzbauwerke – Bestimmung der Scherfestigkeit und der mechanischen Eigenschaften rechtwinklig zur Faserrichtung</i>
DIN EN 350-2	Norm DIN EN 350 2 : 1990-04. <i>Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz – Teil 2. Leitfaden für die natürliche Dauerhaftigkeit und Tränkbarkeit von ausgewählten Holzarten von besondere Bedeutung in Europa</i>
DIN EN 351-1	Norm DIN EN 351-1 : 1995-08. <i>Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Mit Holzschutzmitteln behandeltes Vollholz – Teil 1. Klassifizierung der Schutzmitteleindringung und -aufnahme</i>



## 7 Literaturverzeichnis

Die Zitierweise orientiert sich an DIN 1505-2.

- ABERLE; KOLLER 1989 ABERLE, BRIGITTE; KOLLER, MANFRED: Restauratorische Holzfestigung und die Infusionstränkung. In: Holztechnologie und Holzkonservierung – Möbel und Ausstattungen. *Restauratorenblätter* Bd. 10. Wien, 1989, S. 73-78
- BAUCH ET AL. 1970 BAUCH, JOSEF; LIESE, WALTER; BERNDT, HEIDE: Biological investigations for the improvement of the permeability of softwoods. In: *Holzforschung* 24 (1970), S. 199-205
- BAUCH ET AL. 1973 BAUCH, JOSEF; LIESE, WALTER; ADOLF, PETER: Untersuchung über die Tränkbarkeit von Fichtenholz. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 31 (1973), S. 115-120
- BEDAL 1980 BEDAL, KONRAD: *Fachwerk in Franken*. Hof : Oberfränkische Verlagsanstalt und Druckerei, 1980
- BELLMANN 1952 BELLMANN, HEINZ: Versuche zur Tränkfähigkeit verblauten Kiefernspiltholzes : Erste Mitteilung: Tränkung mit öligen Imprägniermitteln. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 10 (1952), S. 456-463
- BELLMANN 1974a BELLMANN, HEINZ: Kesseldrucktränkungen mit wäßrigen Lösungen : 1. Mitteilung: Die Entwicklung seit 1945 – künftige Tendenzen. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 32 (1974), S. 135-143
- BELLMANN 1974b BELLMANN, HEINZ: Kesseldrucktränkungen mit wäßrigen Lösungen : 2. Mitteilung: Technologie der Porenraumsättigung – Tränkung nach dem Rüping- und Lowry-Verfahren. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 32 (1974), S. 340-352
- BOSSHARD 1968 BOSSHARD, HANS HEINRICH: Imprägnierung von Fichtenholz (*Picea abies* L.) mit Steinkohlenteeröl. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 26 (1968), S. 462-469
- BOSSHARD 1984a BOSSHARD, HANS HEINRICH: *Holzkunde : Zur Biologie, Physik und Chemie des Holzes*. Bd. 2. 2. Aufl. Basel, Boston, Stuttgart : Birkhäuser, 1984
- BOSSHARD 1984b BOSSHARD, HANS HEINRICH: *Holzkunde : Zur Biologie, Physik und Chemie des Holzes*. Bd. 3. 2. Aufl. Basel, Boston, Stuttgart : Birkhäuser, 1984
- BRAUN ET AL. 1963 BRAUN, HELMUT J.; OZENDA, PAUL G.; LINSBAUER, KARL; ZIMMERMANN, WALTER; CARLQUIST, SHERWIN: *Handbuch der Pflanzenanatomie*. Bd. 2 2. Aufl. Berlin, Stuttgart : Borntraeger, 1963
- BURMESTER 1967 BURMESTER, ARNO: Zur Vergütung von Holz durch strahlenpolymerisierte Kunststoff-Monomere. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 25 (1967), S. 11-25

- CLAUSNITZER 1990 CLAUSNITZER, KLAUS-DIETER: *Historischer Holzschutz. Zur Geschichte der Holzschutzmaßnahmen von der Steinzeit bis in das 20. Jahrhundert*. Freiburg : Ökobuch, 1990
- CLAYDEN ET AL. 2000 CLAYDEN, JONATHAN; GREEVES, NICK; WARREN, STUART; WOTHERS, PETER: *Organic Chemistry*. Oxford : Oxford University Press, 2000
- COURTOIS 1964a COURTOIS, H.: Untersuchungen über die Tränkbarkeit Fichtenholz verschiedener Herkunft. *Holzforschung und Holzverwertung* 16 (1964), S. 21-29
- COURTOIS 1964b COURTOIS, H.: Über den Einfluß einiger holzanatomischer Unterschiede auf die Tränkbarkeit von Mittelgebirgs- und Küstenfichtenholz. *Holzforschung und Holzverwertung* 16 (1964), S. 61-66
- CUANY ET AL. 1989 CUANY, FRANÇOISE; SCHAIBLE, VOLKER; SCHIESSL, ULRICH: Studien zur Festigung biologisch geschwächten Nadelholzes: Eindringvermögen, Stabilitätserhöhung, feuchtphysikalisches Verhalten. In: *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung* 3 (1989), S. 249-292
- DE WITTE 1981 DE WITTE, EDDY: Die Anwendung moderner Kunststoffe in der Konservierung und Restaurierung : neuere Erkenntnisse. In: *Mitteilungen : Deutscher Restauratorenverband* 1980/81, S.46-48
- DEPPE; RÜHL 1993 DEPPE, H.-J.; RÜHL, H.: Zur Beurteilung alter Bauhölzer : 1. Rohdichte und Druckfestigkeit. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 51 (1993), S. 379-383
- DIN 1998 *DIN- Taschenbuch* 132 : Holzschutz. 4. Aufl. Berlin, Wien, Zürich : Beuth, 1998
- DIN 1998 *DIN- Taschenbuch* 31. Berlin, Wien, Zürich : Beuth, 1998
- EISBEIN ET AL. 2000 EISBEIN, MANFRIED; MICHEL, ANNEGRET; PÖNICKER, INGOLF; BÖTTCHER, HORST; TREPTE, JÖRG G.: Siliciumdioxide-Sole : Neue Produkte für viele Anwendungsbereiche?. In: *Restauro* 3/2000, S. 168-172
- ELIAS 1990 ELIAS, HANS-GEORG: *Makromoleküle, Grundlagen: Struktur – Synthese – Eigenschaften*. Bd. 1. 5. Aufl. Basel, Heidelberg, New York : Hüthig & Wepf, 1990
- EMMERLING 1993 EMMERLING, ERWIN: Festigungs- und Ergänzungsarbeiten an Holzbildwerken. In: Petzet, Michael (Hrsg.): Holzschutz, Holzfestigung, Holzergänzung. *Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege* Bd. 73. München : Lipp, 1993, S. 29-47
- ERLER 2004 ERLER, K.: *Alte Holzbauwerke : Beurteilen und Sanieren*. 3.Aufl. Berlin : Bauwesen, 2004
- GÖRLACHER 1991 GÖRLACHER, RAINER: Untersuchung von altem Konstruktionsholz : Bestimmung des Elastizitätsmoduls. In: *Bauen mit Holz* 93 (1991), S. 582-587

- GROSSER 1977 GROSSER, DIETGER: *Die Hölzer Mitteleuropas : Ein mikrophotographischer Lehratlas*. Berlin : Springer, 1977
- HACKBARTH 1975 HACKBARTH, WERNER: Untersuchungen über einige Grundlagen der Kesseldruck-Imprägnierung von Fichtenholz. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 33 (1975), S. 97-99
- HACKBARTH; LIESE 1975 HACKBARTH, WERNER; LIESE, WALTER: Einfluß von holzanatomischen Eigenschaften und Tränklösungs-Faktoren auf die Kesseldruck-Tränkung von Fichte. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 33 (1975), S. 451-455
- HENRIKSSON 1954 HENRIKSSON, STEFAN T.: Holztränkung nach der Wechseldruckmethode. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 12 (1954), S. 233-241
- HOADLEY 1990 HOADLEY, R. BRUCE: *Holz als Werkstoff*. Ravensburger Holzwerkstatt. Bd. 1. Ravensburg : Maier, 1990
- HOADLEY 1998 HOADLEY, R. BRUCE: Wood as a Physical Surface for Paint Application. In: *Painted wood : history & conservation*. Los Angeles : Getty Conservation Institute, 1998, S. 2-16
- HOFFMANN 2004 HOFFMANN, PER: Die Wahrheit über den Zellkern – Zum Stand der Holzkonservierung. In: *Restauro* 8/2004, S. 532-535
- HOLZ 1981 HOLZ, DIETRICH: Zum Alterungsverhalten des Werkstoffes Holz – einige Ansichten, Untersuchungen, Ergebnisse. In: *Holztechnologie* 22 (1981), S. 80-85
- HOPPE 2002 HOPPE, THOMAS: *Acrylmalerei - Die künstlerischen Techniken*. 2. Aufl. Leipzig : Seemann, 2002
- HORIE 1987 HORIE, C. V.: *Materials for Conservation - Organic Consolidants, Adhesives and Coatings*. London : Butterworth, 1987
- IBACH; SINNER 1994 IBACH, HERMANN WOLF; SINNER, PAULUS: Das Eindringverhalten von Konservierungsmitteln in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit der Natursteine. In: *Arbeitsblätter für Restauratoren*. Heft 1, 1994, S. 302-306
- JACOB 1992 JACOB, DIRK: *Die Holzkonservierung und Rekonstruktion eines stark anobienzerstörten Kreuzifixes aus Ziesar*. Dresden : Hochschule für bildende Künste Dresden, Diplomarbeit, 1992
- KOESLING 1993a KOESLING, VOLKER: Kleiner Exkurs in die Geschichte der Kunststoffe. In: *Arbeitsblätter für Restauratoren*. Heft 1, 1993, S. 122-132
- KOESLING 1993b KOESLING, VOLKER: Zeittafel zur Kunststoffgeschichte. In: *Arbeitsblätter für Restauratoren*. Heft 2, 1993, S. 133-140
- KOLJO 1953 KOLJO, BORIS: Die Abhängigkeit der Tränkmittelaufnahme von verschiedenen Faktoren unter besonderer Berücksichtigung von Kiefer und Fichte. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 11 (1953), S. 303-311

- KOLJO 1954 KOLJO, BORIS: Einfluß der Tränkverfahren auf die Tränkstoffaufnahme in der Holzimprägnierung. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 12 (1954), S. 7-16
- KOLLMANN 1951 KOLLMANN, FRANZ F. P.: *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Bd. 1. 2. Aufl. Berlin : Springer, 1951
- KOLLMANN 1955a KOLLMANN, FRANZ F. P.: *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Bd. 2. 2. Aufl. Berlin : Springer, 1955
- KOLLMANN 1955b KOLLMANN, FRANZ F. P.: *Verformung und Bruchgeschehen bei Holz als einem anisotropen, inhomogenen, porigen Festkörper*. VDI-Forschungsheft Nr. 520, Düsseldorf : VDI-Verlag, 1967
- KOLLMANN 1959 KOLLMANN, FRANZ F. P.: *Die Eigenschaftsänderung von Grubenholz nach Schutzsalzimprägnierung*. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 698, Köln, Opladen : Westdeutscher Verlag, 1959
- KOLLMANN 1967 KOLLMANN, FRANZ F. P.: *Verformung und Bruchgeschehen bei Holz als einem anisotropen, inhomogenen, porigen Festkörper*. VDI-Forschungsheft Nr. 520, Düsseldorf : VDI-Verlag, 1967
- KÖNIG 1959 KÖNIG, EWALD: Holz als Werkstoff : *Holz als Baustoff*. Stuttgart : Holz-Zentralblatt Verlag, 1959
- KRIEGER 2003 KRIEGER, EBBA: Die Überprüfung des Eindringverhaltens ausgewählter Kunstharze bei insektengeschädigtem Holz mit Hilfe der Computertomografie. In: *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung* 17 (2003), S. 265-275
- KÜHN 2001 KÜHN, HERMANN: *Erhaltung und Pflege von Kunstwerken, Material und Technik, Konservierung und Restaurierung*. 3. Aufl. München : Klinkhardt & Biermann, 2001
- KÜHNEN; WAGENFÜHR 2002 KÜHNEN, RENATE; WAGENFÜHR, RUDI: *Werkstoffkunde Holz für Restauratoren*. Leipzig : Seemann, 2002
- LANGGUTH, VOIGT 2004 LANGGUTH, HORST-ROBERT; VOIGT RUDOLF: *Hydrogeologische Methoden*. 2. Aufl. Berlin : Springer, 2004
- LANGWIG ET AL. 1969 LANGWIG, J. E.; MEYER, J. A.; DAVIDSON, R. W.: New monomers used in making wood plastics. In: *Forest Products Journal* Vol. 19 (1969), S. 57-61
- LEHMANN 1984 LEHMANN, JIRINA: Kriterien für die Auswahl von Harzen und Lösungsmitteln zur Festigung holzwurmgeschädigten Holzes. In: *Arbeitsblätter für Restauratoren*. Heft 2, 1984, S. 112-121
- LEHMANN ET AL. 2001 LEHMANN, EBERHARD; VONTOBEL, PETER; SCHERRER, PAUL; NIEMZ, PETER: Anwendung der Methode der Neutronenradiographie zur Analyse von Holzeigenschaften. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 59 (2001), S. 463-471

- LEHMANN ET AL. 2005 LEHMANN, EBERHARD; VONTOBEL, PETER; HARTMANN, STEFAN; WYER, PETER: Maßnahmen zur Holzfestigkeitserhöhungen, Neutronenradiographie als Nachweis des Eindringverhaltens von Harzen. In: *Restauro* 3/2005, S. 194-199
- LEIBE 1992 LEIBE, BERNHARD: *Holzschutzmittel im Einsatz : Bestandteile, Anwendungen, Umweltbelastungen*. Wiesbaden, Berlin : Bauverlag, 1992
- LIESE 1951 LIESE, WALTER: Über das Eindringung von öligen Schutzmitteln in Fichtenholz. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 9 (1951), S. 374-378
- LOHMANN 2003a LOHMANN, ULF: *Holzlexikon*. Bd. 1. 4. Aufl. Leinfelden-Echterdingen : DRW-Verlag, 2003
- LOHMANN 2003b LOHMANN, ULF: *Holzlexikon*. Bd. 2. 4. Aufl. Leinfelden-Echterdingen : DRW-Verlag, 2003
- LOOS ET AL. 1967 LOOS, W. E.; WALTERS, R. E.; KENT, J. A.: Impregnation of wood with vinyl monomers. In: *Forest Products Journal* Vol. 17 (1967), S. 40-50
- MUNNIKENDAMM ET AL. 1969 MUNNIKENDAMM, R. A.; WOLSCHRIJN, T. J.: Further remarks on impregnation of porous materials with monomers. In: *Studies in Conservation*. Vol. 28 (1983), S. 132-135
- MÜHLETHALER 1970 MÜHLETHALER, B.: Die Altersbeständigkeit von Kunststoffen. In: *Arbeitsblätter für Restauratoren*. Heft 2, 1970, S. 22-34
- NIEMZ 1993 NIEMZ, PETER: *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Leinfelden-Echterdingen : DRW-Verlag, 1993
- PETZET 1993 PETZET, MICHAEL: Denkmalpflege heute. In: *Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege* Bd. 60. München : Lipp, 1993
- PFESTORF; KADNER 1997 PFESTORF, ROLAND; KADNER, HEINZ: *Chemie - Ein Lehrbuch für Fachhochschulen*. 6. Aufl. Thun, Frankfurt am Main : Harri Deutsch, 1997
- RAUCH-PUNTIGAM; VÖLKER 1967 RAUCH-PUNTIGAM, HARALD; VÖLKER, THEODOR: *Acryl- und Methacrylverbindungen*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 1967
- RÖMPP 1997 RÖMPP LEXIKON CHEMIE – *Version 1.3*, Stuttgart/New York : Georg Thieme Verlag, 1997
- RUG; SEEMANN 1989 RUG, WOLFGANG; SEEMANN, AXEL: Ermittlung von Festigkeitskennwerten an alten Holzkonstruktionen. In: *Holztechnologie* 30 (1989), S. 69-73
- SANDERMANN; JONAS 1952 SANDERMANN, WILHELM; JONAS, GERD-ZENO: Über die Imprägnierung von Hölzern mit öligen Schutzmitteln, unter besonderer Berücksichtigung der Fichte. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 10 (1952), S. 305-311
- SANDNER ET AL. 1990 SANDNER, INGO; BÜNSCHE, BERND; SCHRAMM, HANS-PETER; MEIER, GISELA; VOSS, JOHANNES: *Konservieren von Gemälden und Holzskulpturen*. Berlin : Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1990

- SCHAFFER 1971 SCHAFFER, ERIKA: Consolidation of softwood artifacts. In: *Studies in Conservation*. Vol. 16 (August 1971), S. 110-113
- SCHAFFER 1974 SCHAFFER, ERIKA: Consolidation of painted wooden artifacts. In: *Studies in Conservation*. Vol. 19 (November 1974), S. 212-221
- SCHAFFER; BRISEBOIS 1974 SCHAFFER, ERIKA; BRISEBOIS, FERN: Inexpensive Home-Made Vacuum Chamber for Impregnation. In: *Studies in Conservation*. Vol. 19 (May 1974), S. 91-96
- SCHAUDY 1989 SCHAUDY, RUDOLF: Zum Stand der strahlenchemischen Konservierung archäologischer Holzfundstücke. In: Holztechnologie und Holzkonservierung – Möbel und Ausstattungen, *Restauratorenblätter* Bd. 10. Wien, 1989, S. 64-72
- SCHIESSL 1984 SCHIESSL, ULRICH: Historischer Überblick über die Werkstoffe der schädlingsbekämpfenden und festigkeitserhöhenden Holzkonservierung. In: *Maltechnik-Restaur* 90. Jahrgang (April 1984), S. 9-40
- SCHIESSL 1989 SCHIESSL, ULRICH: Probleme der Konservierungsstoffe zur Festigkeitserhöhung von degradiertem Holz. In: Bilfinger, Monica; Meili, David (Hrsg.): *Konservierung von Holzbauten*. Bern, Stuttgart : Paul Haupt, 1989, S. 91-114
- SCHIESSL 1993 SCHIESSL, ULRICH: Festigkeitserhöhende Konservierung von Holz. In: Petzet, Michael (Hrsg.): Holzschutz, Holzfestigung, Holzergänzung. *Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege* Bd. 73. München : Lipp, 1993, S. 15-27
- SCHNEIDER; WAGNER 1974 SCHNEIDER, ADOLF; WAGNER, LUDWIG: Bestimmung der Porengrößenverteilung in Holz mit der Quecksilber-Perosimeter. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 32 (1974), S. 216-224
- SCHRÖTER; BAUER 1964 SCHRÖTER, HEINZ; BAUER, DIETER: Versuche zur Volltränkung von Normklötzchen aus Kiefernspiltholz und ihre statistische Auswertung. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 22 (1964), S. 73-77
- SCHULTZE-DEWITZ 1966 SCHULTZE-DEWITZ, GÜNTER: Beziehungen zwischen der Elastizität und der statischen sowie dynamischen Biegefestigkeit von Kiefernholz nach dem Angriff durch echte holzerstörende Pilze. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 24 (1966), S. 506-512
- SCHWAB; KLEIN 1989 SCHWAB, ERNST; KLEIN, PETER: Zum Verständnis des Quell- und Schwindverhaltens von Holz und Holzwerkstoffen. In: Holztechnologie und Holzkonservierung – Möbel und Ausstattungen, *Restauratorenblätter* Bd. 10. Wien, 1989, S. 15-28
- SELL 1978 SELL, J.: Physikalische Vorgänge in wetterbeanspruchten Holzbauteilen : 1. Mitteilung: Ausgangssituation, Ziel, Grundlagen und Methodik einer langfristigen Untersuchung. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 36 (1978), S. 461-466

- SELL, MEIERHOFER 1979a SELL, J.; MEIERHOFER, U.: Physikalische Vorgänge in wetterbeanspruchten Holzbauteilen : 2. Mitteilung: Tragende Holzbauteile im Freien unter Dach. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 37 (1979), S. 227-234
- SELL; MEIERHOFER 1979b SELL, J.; MEIERHOFER, U.: Physikalische Vorgänge in wetterbeanspruchten Holzbauteilen : 3. Mitteilung: Träger mit direkter Wetterbeanspruchung. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 37 (1979), S. 447-454
- SIAU; MEYER 1978 SIAU, JOHN F.; MEYER, JOHN A.: Wood-polymer composites : New materials with unique physical properties, In: *Conservation of wood in painting and the decorative arts* (Preprints of the Contributions to the Oxford Congress, 17-23 September 1978). London : International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, 1978, S. 11-14
- ŠIMŮNKOVÁ ET AL. 1983 ŠIMŮNKOVÁ, E.; ŠMEJKALOVÁ, Z.; ZELINGER, J.: Consolidation of wood by the method of monomer polymerization in the object. In: *Studies in Conservation*. Vol. 28 (August 1983), S. 133-144
- SNETHLAGE 2005 SNETHLAGE, ROLF: *Leitfaden Steinkonservierung, Planung von Untersuchungen und Maßnahmen zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein*. 2. Aufl. Stuttgart : IRB Verlag, 2005
- SNETHLAGE; WIHR 1979 SNETHLAGE, ROLF; WIHR, ROLF: Kolloquium über das Acrylharz-Volltränkungsverfahren. In: *Steinkonservierung. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege* Bd. 4. München, 1979, S. 26-34
- STAHL 2000 STAHL, MARIO: *Das Inkubations-/Dekompressionsverfahren zur Holzentfeuchtung*. München : TU München, Diss., 2000
- STAMM 1963 STAMM, ALFRED J.: Permeability of wood to fluids. In: *Forest Products Journal* Vol. 18 (1963), S. 503-507
- STREITWIESER ET AL. 1995 STREITWIESER, ANDREW; HEATHCOCK, CLAYTON H.; KOSOWER, EDWARD M.: *Organische Chemie*. 2. Aufl. Basel : Willey VCH, 1995
- TRENDELENBURG 1939 TRENDELENBURG, REINHARD: Über Fasersättigungsfeuchte, Schwindmaß und Raumdichtezahl wichtiger Holzarten. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 2 (1939), S. 12-17
- TRENDELENBURG 1955 TRENDELENBURG, REINHARD: *Das Holz als Rohstoff*. 2. Aufl. München : Hanser, 1955
- UNGER ET AL. 1982 UNGER, ACHIM; REICHEL, LOTHAR; BÄR, MANFRED; REINHARDT, JÜRGEN; NISSEL, DIETER: Erfahrungen bei der strahlenchemischen Konservierung von Holz mit Methylmethacrylat. In: *Neue Museumskunde* 25 (1982), S. 202-206
- UNGER 1990 UNGER, ACHIM: *Holzkonservierung, Schutz und Festigung von Holzobjekten*. 2. Aufl. München : Callwey, 1990

- UNGER 1995 UNGER, ACHIM; UNGER, WIBKE: Die biologische Korrosion von Konsolidierungsmitteln für Kunst- und Kulturgut aus Holz. In: *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung* 8 (1995), S. 147-149
- UNGER ET AL. 2001 UNGER, ACHIM; SCHNIEWIND, ARNO P.; UNGER, WIBKE: *Conservation of Wood Artifacts: with 69 figures and 5 tables*. Natural Science in Archaeology. Berlin : Springer, 2001
- V. HALÁSZ; SCHEER 1986 V. HALÁSZ, R.; SCHEER, C.: *Holzbau-Taschenbuch, Architekturtechnik*. Berlin : Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1986
- V. KRUEDENER 1964 V. KRUEDENER, HANS JOACHIM FREIHERR: Untersuchung des Kesseldruckverfahrens bei Anwendung wäßriger Lösungen. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 22 (1964), S. 68-72
- VORREITER 1949 VORREITER, LEOPOLD: *Holztechnologisches Handbuch*. Wien : Fromme, 1949
- VORREITER 1965 VORREITER, LEOPOLD: *Hygro-, mechano- und thermoelastische Maßänderungen, Kennzahlen und Kräfte der Hölzer*. Mering : Holzverlag, 1965
- WAGENFÜHR 1999 WAGENFÜHR, RUDI: *Anatomie des Holzes : Strukturanalytik – Identifizierung – Nomenklatur – Mikrotechnologie*. 5. Aufl. Leinfelden-Echterdingen : DRW-Verlag, 1999
- WALTER 1998 WALTER, WOLFGANG: *Lehrbuch der Organischen Chemie*. 23. Aufl. Stuttgart, Leipzig : Hirzel, 1998
- WALTER; FRANCKE 2004 WALTER, WOLFGANG; FRANCKE, WITTKO; BAYER – WALTER : *Lehrbuch der organischen Chemie*. Stuttgart : Hirzel, 2004
- WIHR 1979a WIHR, ROLF: Kieselsäureester und Methylmethacrylat – zwei wichtige Steinkonservierungsmittel In: *Maltechnik-Restaura* 3. Jahrgang (Juli 1979), S. 204-208
- WIHR 1979b WIHR, ROLF: Kieselsäureester und Methylmethacrylat – zwei wichtige Steinkonservierungsmittel In: *Arbeitsblätter für Restauratoren*. Heft 1, 1979, S. 120-129
- WIHR 1985 WIHR, ROLF: 6 Jahre Erfahrung mit der Acrylharzvolltränkung. In: *Arbeitsblätter für Restauratoren*. Heft 1, 1985, S. 177-183
- WIHR 1995 WIHR, ROLF: 15 Jahre Erfahrungen mit der Acrylharzvolltränkung (AVT). In: *Arbeitsblätter für Restauratoren*. Heft 1, 1995, S. 323-332
- YOUNG; MEYER 1968 YOUNG, R. A.; MEYER, J.A.: Heartwood and sapwood impregnations with vinyl monomers. In: *Forest Products Journal* Vol. 18 (1968), S. 66-68



## **8 Internet**

<http://mhph58.mw.tu-dresden.de> (14.01.2006)

Datenbank Holzeigenschaften, Technische Universität Dresden, Institut für Holz- und Papiertechnik, Lehrstuhl für Holz- und Faserwerkstofftechnik (HFT)

<http://www.holz.wzw.tum.de>

Holzforschung München (HFM)

<http://www.steinkonservierung.de> (10.04.2006)

IBACH Steinkonservierung GmbH & Co KG

<http://www.kern-gmbh.de> (23.01.2006)

Kern GmbH, Technische Kunststoffteile

<http://www.werkstoffanalytik.de> (12.03.2006)

Zentrum für Werkstoffanalytik Lauf (ZWL)

## 9 Anhang

Bei den Herkunftsangaben der Abbildungen bezeichnet „Aus“ die unveränderte Übernahme, während „Nach“ Veränderungen gegenüber dem Original kennzeichnet.

### 9.1 Abbildungen

Abbildung 7: Eichenprüfzylinder, Querschnittsansicht .....	79
Abbildung 8: Eichenprüfzylinder, Tangentialansicht .....	79
Abbildung 9: Eichenprüfzylinder, Radialansicht.....	80
Abbildung 10: Kiefernprüfzylinder, Querschnittsansicht.....	80
Abbildung 11: Kiefernprüfzylinder, Tangentialansicht .....	81
Abbildung 12: Kiefernprüfzylinder, Radialansicht.....	81
Abbildung 13: Fichtenprüfzylinder, Querschnittsansicht .....	82
Abbildung 14: Fichtenprüfzylinder, Tangentialansicht .....	82
Abbildung 15: Fichtenprüfzylinder, Radialansicht.....	83
Abbildung 16: Hassler-Zelle zur Messung der Luftpermeabilität .....	84
Abbildung 17: Äquivalenz zwischen Permeabilität (Darcy-Wert) und Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$ (m/s) für Süßwasser bei 15 °C.....	84
Abbildung 18: Laborautoklav .....	85
Abbildung 19: Beschickung des Tränkbehälters für den Laborautoklaven.....	85
Abbildung 20: Messapparatur zur Thermisch-Hygrischen-Dehnung.....	86
Abbildung 21: Eichenprüfkörper .....	87
Abbildung 22: Eichenprüfkörper, Querschnitt.....	87
Abbildung 23: Kiefernprüfkörper .....	88
Abbildung 24: Kiefernprüfkörper, Querschnitt .....	88
Abbildung 25: Fichtenprüfkörper .....	89
Abbildung 26: Fichtenprüfkörper, Querschnitt.....	89
Abbildung 27: Meßgerät Haidenhain, zur Ermittlung des Volumens und der Rohdichte von Holzprüfkörpern.....	90
Abbildung 28: Versuchsanordnung für die Biegeprüfung bei mittigem Kraftangriff nach DIN 52 186. ....	90
Abbildung 29: Biegeprüfeinrichtung .....	91
Abbildung 30: Biegeprüfeinrichtung, Biegeversuch .....	91
Abbildung 31: Druckprüfeinrichtung – mechanisch, Druckversuch .....	92
Abbildung 32: Druckprüfeinrichtung – hydraulisch, Druckversuch .....	92
Abbildung 33: Lichtmikroskopische Aufnahme eines unbehandelten Fichtenholzquerschnittes (Vergrößerung 50fach) .....	93
Abbildung 34: Lichtmikroskopische Aufnahme eines mit MMA getränkten Fichtenholzquerschnittes (Vergrößerung 50fach) .....	93
Abbildung 35: Lichtmikroskopische Aufnahme eines unbehandelten Fichtenholzradialschnittes (Vergrößerung 50fach) .....	94
Abbildung 36: Lichtmikroskopische Aufnahme eines mit MMA getränkten Fichtenholzradialschnittes (Vergrößerung 50fach) .....	94

Abbildung 37: Lichtmikroskopische Aufnahme eines unbehandelten Fichtenholztangentialschnittes (Vergrößerung 50fach).....	95
Abbildung 38: Lichtmikroskopische Aufnahme eines mit MMA getränkten Fichtenholztangentialschnittes (Vergrößerung 50fach).....	95
Abbildung 39: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines unbehandelten Eichenquerschnittes (Vergrößerung 100fach) .....	96
Abbildung 40: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines mit MMA getränkten Eichenquerschnittes (Vergrößerung 100fach) .....	96
Abbildung 41: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines unbehandelten Eichenquerschnittes (Vergrößerung 500fach) .....	97
Abbildung 42: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines mit MMA getränkten Eichenquerschnittes (Vergrößerung 500fach) .....	97
Abbildung 43: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines unbehandelten Eichenquerschnittes (Vergrößerung 2000fach) .....	98
Abbildung 44: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines mit MMA getränkten Eichenquerschnittes (Vergrößerung 2000fach) .....	98
Abbildung 45: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines unbehandelten Kiefernquerschnittes (Vergrößerung 100fach) .....	99
Abbildung 46: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines mit MMA getränkten Kiefernquerschnittes (Vergrößerung 100fach) .....	99
Abbildung 47: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines unbehandelten Kiefernquerschnittes (Vergrößerung 500fach) .....	100
Abbildung 48: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines mit MMA getränkten Kiefernquerschnittes (Vergrößerung 500fach) .....	100
Abbildung 49: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines unbehandelten Kiefernquerschnittes (Vergrößerung 2000fach) .....	101
Abbildung 50: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines mit MMA getränkten Kiefernquerschnittes (Vergrößerung 2000fach) .....	101
Abbildung 51: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines unbehandelten Fichtenquerschnittes (Vergrößerung 100fach) .....	102
Abbildung 52: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines mit MMA getränkten Fichtenquerschnittes (Vergrößerung 100fach) .....	102
Abbildung 53: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines unbehandelten Fichtenquerschnittes (Vergrößerung 500fach) .....	103
Abbildung 54: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines mit MMA getränkten Fichtenquerschnittes (Vergrößerung 500fach) .....	103
Abbildung 55: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines unbehandelten Fichtenquerschnittes (Vergrößerung 2000fach) .....	104
Abbildung 56: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines mit MMA getränkten Fichtenquerschnittes (Vergrößerung 2000fach) .....	104



**Abb.7:** Eichenprüfzylinder, Querschnittsansicht  
Links unbehandelt, Rechts mit MMA getränkt



**Abb. 1:** Eichenprüfzylinder, Tangentialansicht  
Links mit MMA getränkt, Rechts unbehandelt



**Abb. 2:** Eichenprüfzylinder, Radialansicht  
Links mit MMA getränkt, Rechts unbehandelt



**Abb. 3:** Kiefernprüfzylinder, Querschnittsansicht  
Links unbehandelt, Rechts mit MMA getränkt





**Abb. 4:** Kiefernprüfzylinder, Tangentialansicht  
Links mit MMA getränkt, Rechts unbehandelt



**Abb. 5:** Kiefernprüfzylinder, Radialansicht  
Links mit MMA getränkt, Rechts unbehandelt



**Abb. 6:** Fichtenprüfzylinder, Querschnittsansicht  
Links unbehandelt, Rechts mit MMA getränkt



**Abb. 7:** Fichtenprüfzylinder, Tangentialansicht  
Links unbehandelt, Rechts mit MMA getränkt

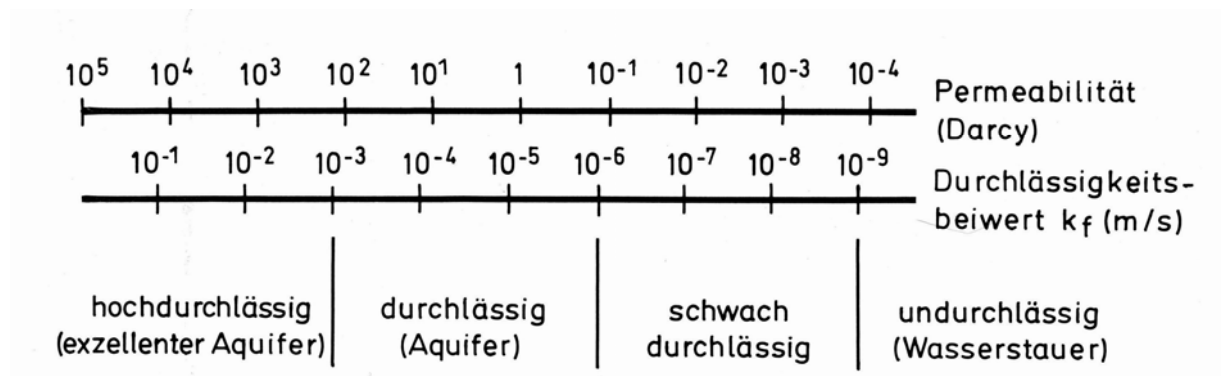


**Abb. 8:** Fichtenprüfzylinder, Radialansicht  
Links unbehandelt, Rechts mit MMA getränkt





**Abb. 9:** Hassler-Zelle zur Messung der Luftpermeabilität (Firma „IBACH Steinkonservierung“)



**Abb. 10:** Äquivalenz zwischen Permeabilität (Darcy-Wert) und Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  (m/s) für Süßwasser bei 15 °C. LANGGUTH; VOIGT 2004, S. 34, Abb. 2-8



**Abb. 11:** Laborautoklav  
(Firma „IBACH Steinkonservierung“)



**Abb. 12:** Beschickung des Tränkbehälters für den Laborautoklaven  
(Firma „IBACH Steinkonservierung“)



**Abb. 13:** Messapparatur zur Thermisch-Hygrischen-Dehnung (Firma „IBACH Steinkonservierung“)





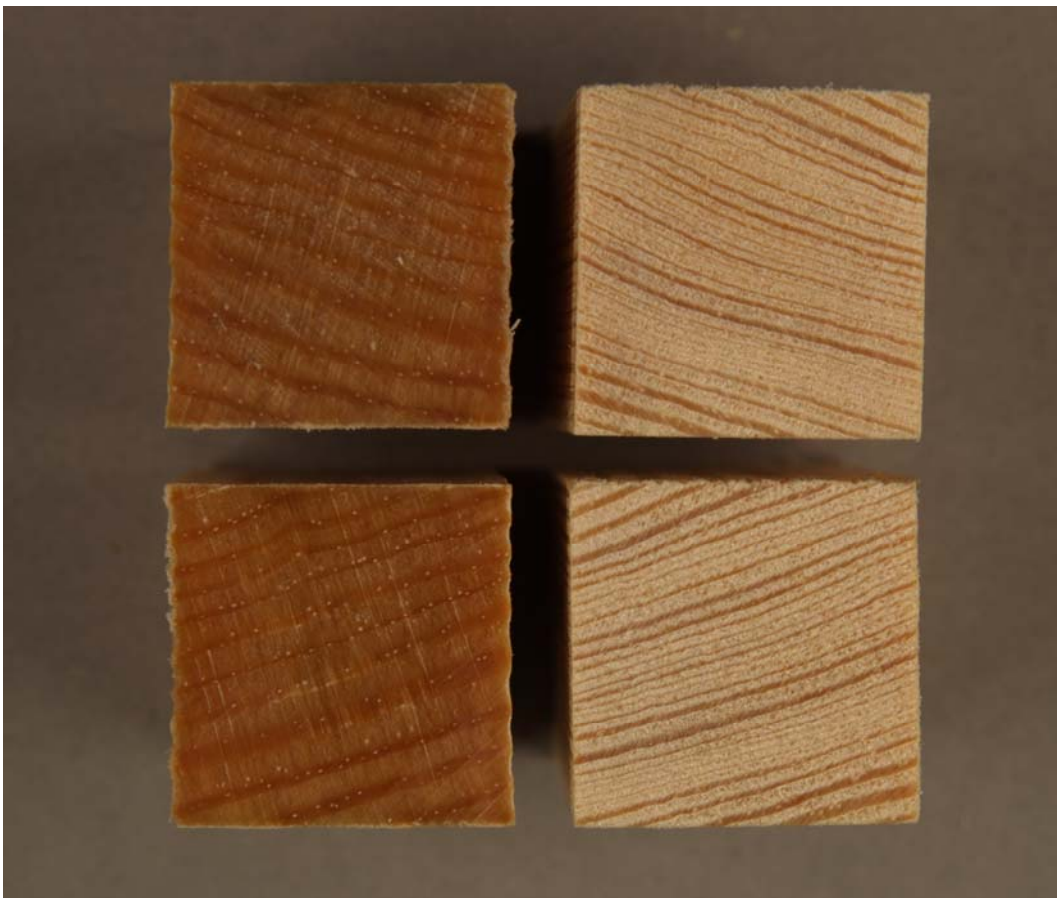
**Abb. 14:** Eichenprüfkörper  
Links unbehandelte, Rechts mit MMA getränkte



**Abb. 15:** Eichenprüfkörper, Querschnitt  
Links mit MMA getränkt, Rechts unbehandelt



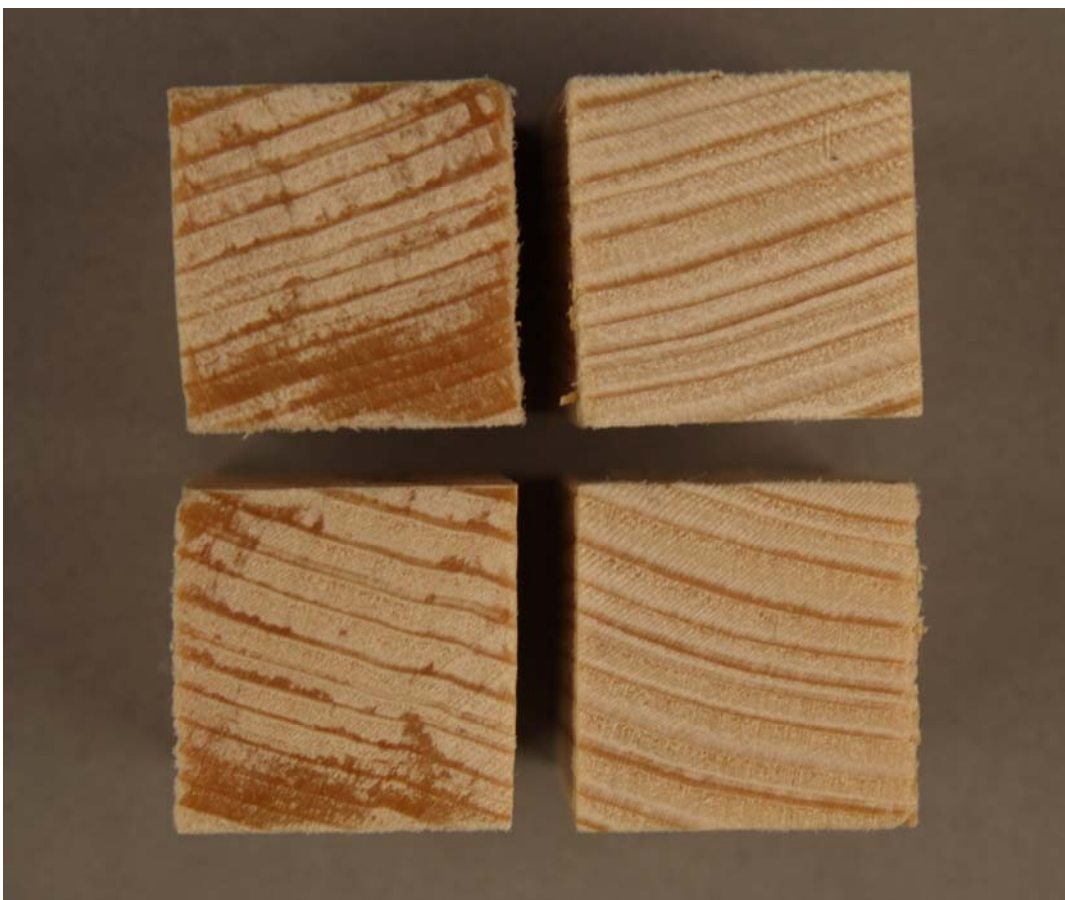
**Abb. 16:** Kiefernprüfkörper  
Links unbehandelte, Rechts mit MMA getränkte



**Abb. 17:** Kiefernprüfkörper, Querschnitt  
Links mit MMA getränkt, Rechts unbehandelt



**Abb. 18:** Fichtenprüfkörper  
Links unbehandelte, Rechts mit MMA getränkte

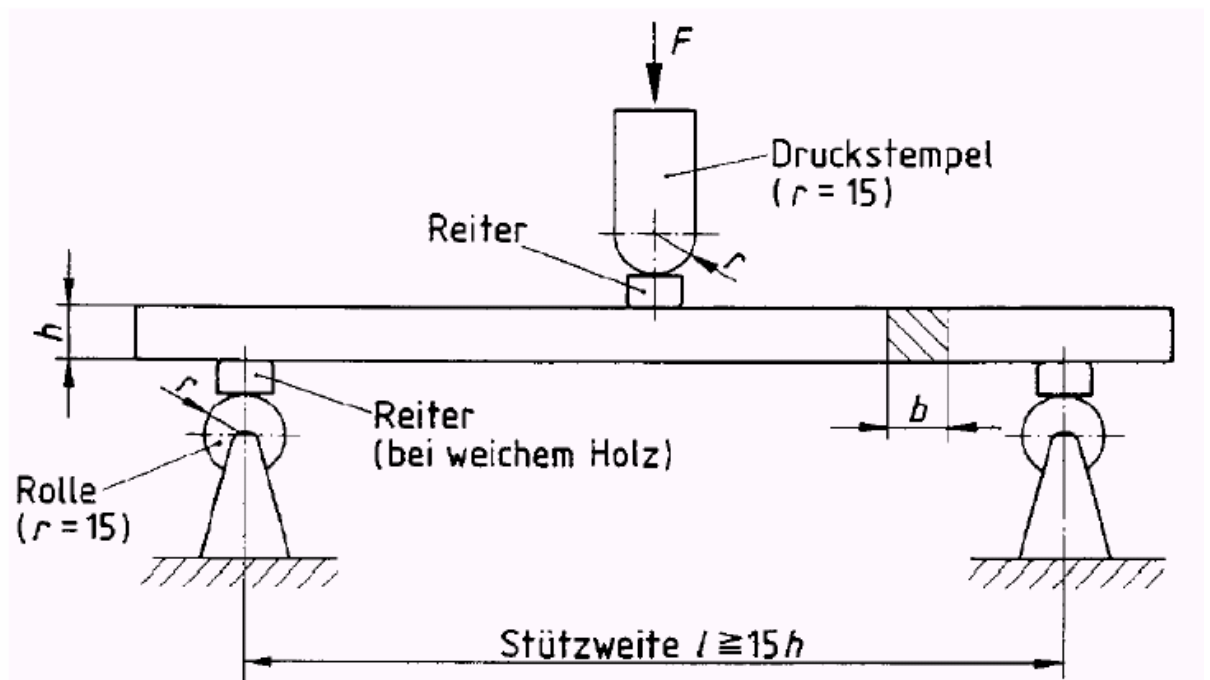


**Abb. 19:** Fichtenprüfkörper, Querschnitt  
Links mit MMA getränkt, Rechts unbehandelt





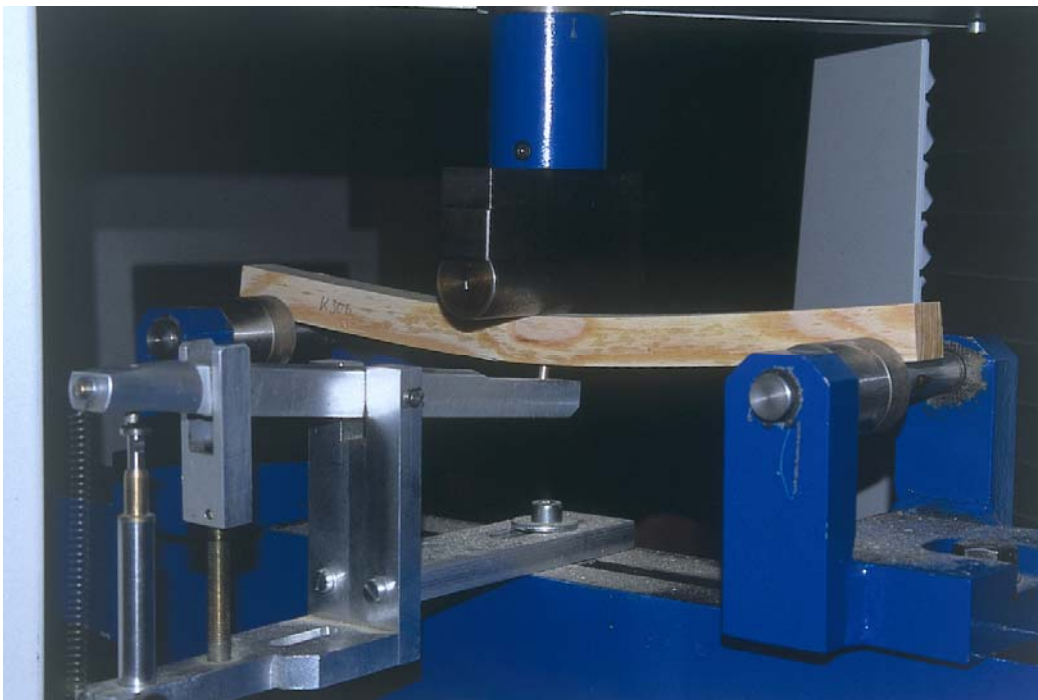
**Abb. 20:** Meßgerät Haidenhain, zur Ermittlung des Volumens und der Rohdichte von Holzprüfkörpern  
(Institut für Holzforschung München)



**Abb. 21:** Versuchsanordnung für die Biegeprüfung bei mittigem Kraftangriff nach DIN 52 186. DIN 52 186 S. 1, Bild 1.



**Abb. 22:** Biegeprüfeinrichtung  
(Institut für Holzforschung München)

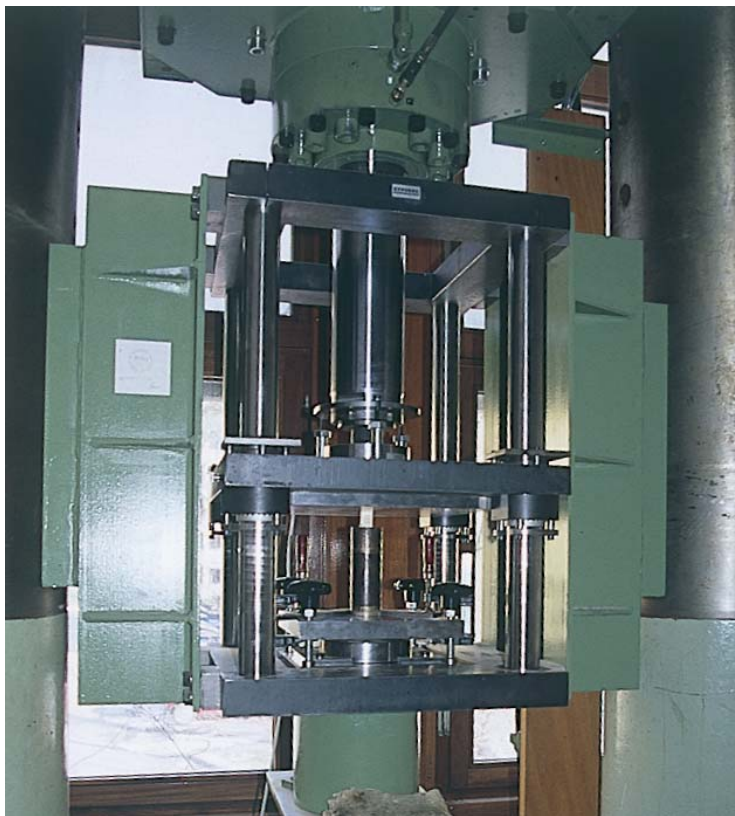


**Abb. 23:** Biegeprüfeinrichtung, Biegeversuch  
(Institut für Holzforschung München)

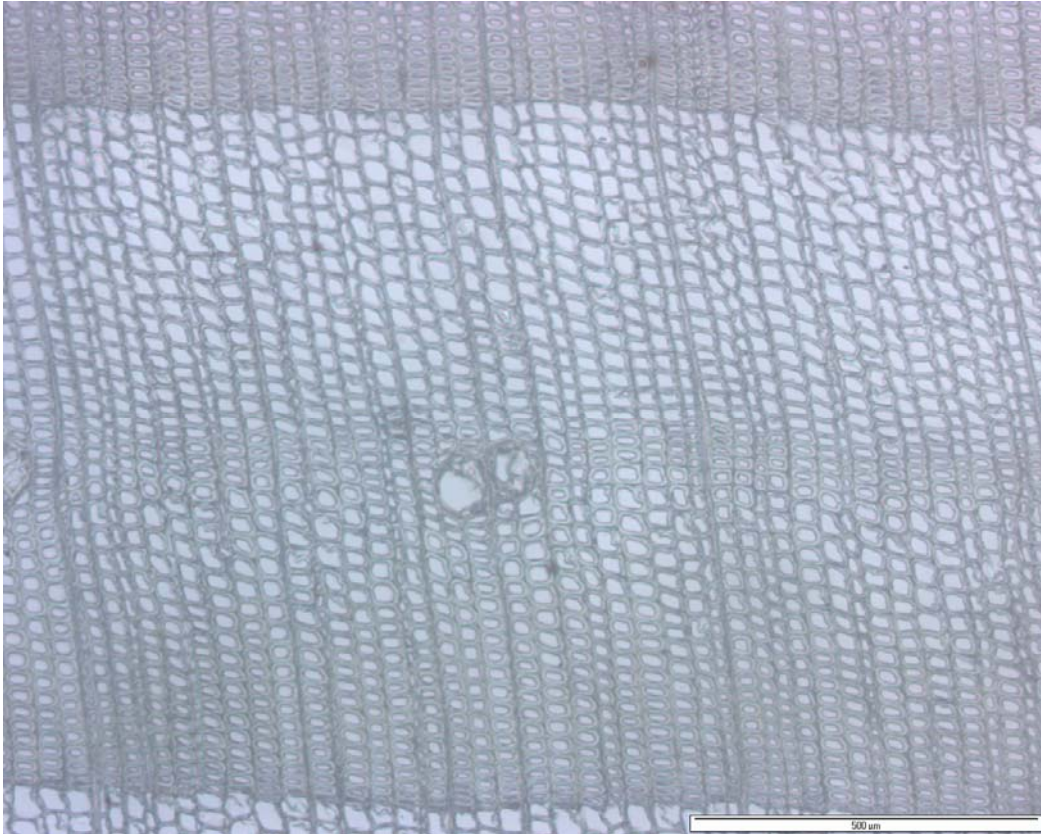




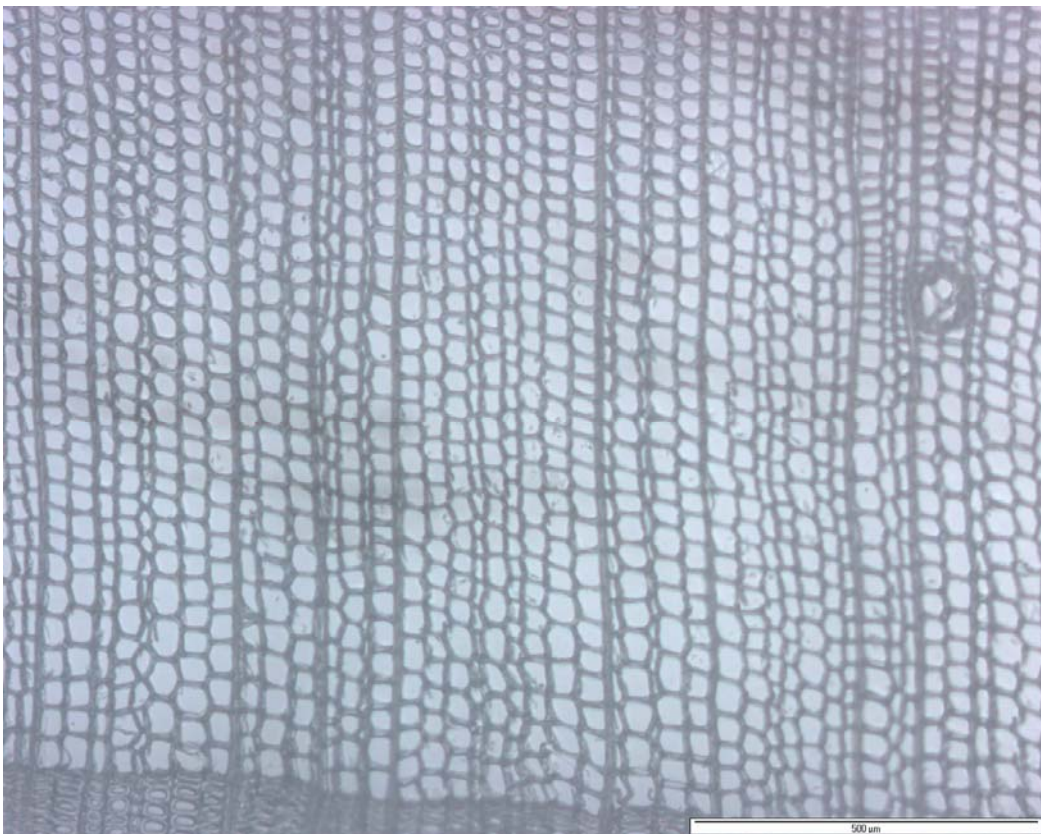
**Abb. 24:** Druckprüfeinrichtung – mechanisch, Druckversuch  
(Institut für Holzforschung München)



**Abb. 25:** Druckprüfeinrichtung – hydraulisch, Druckversuch  
(Institut für Holzforschung München)

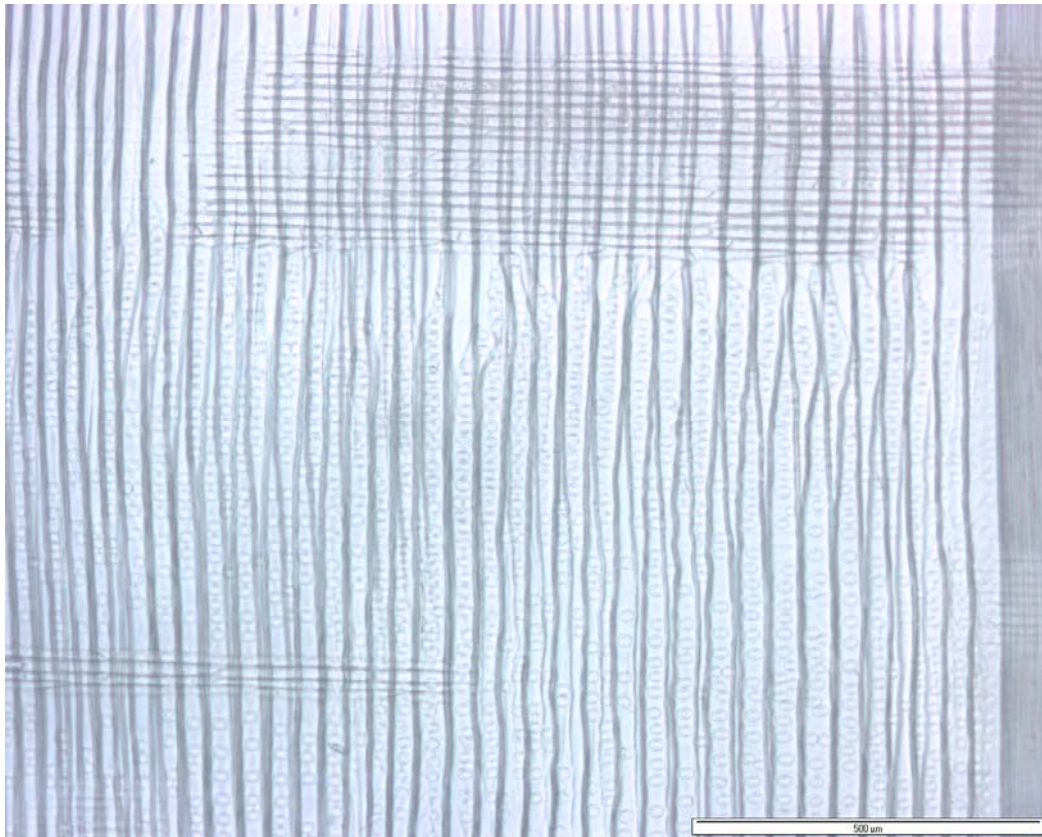


**Abb. 26:** Lichtmikroskopische Aufnahme eines unbehandelten Fichtenholzquerschnittes (Vergrößerung 50fach)

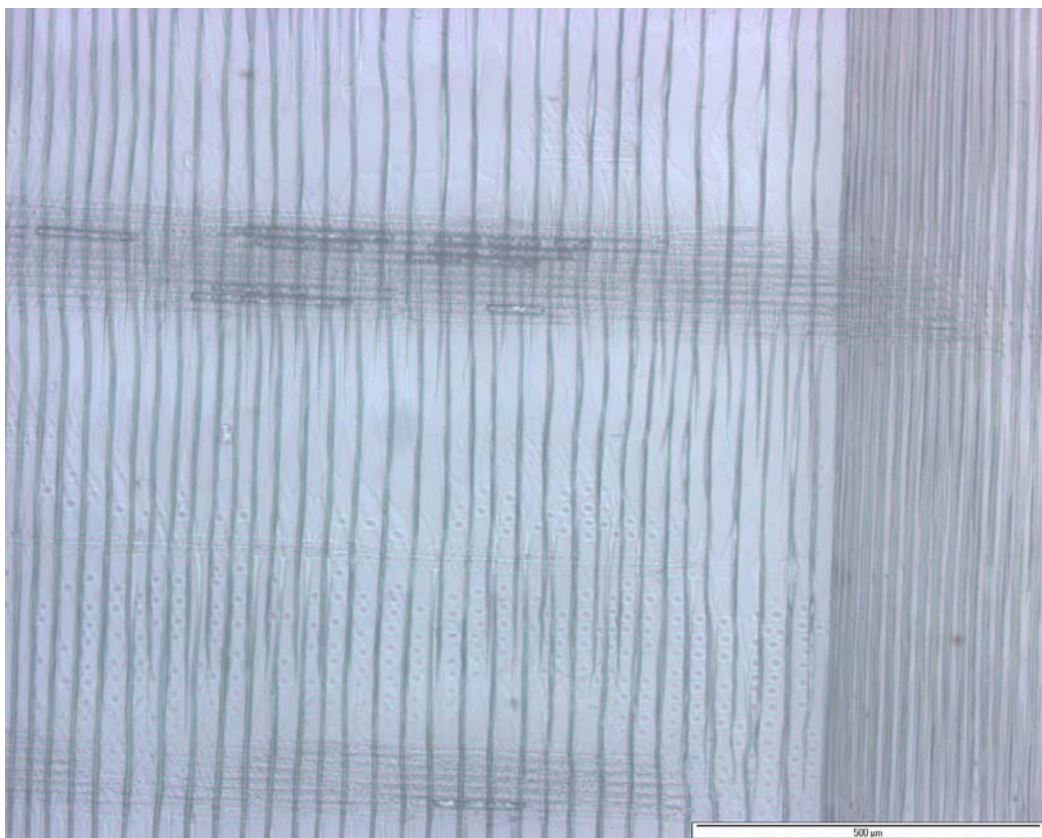


**Abb. 27:** Lichtmikroskopische Aufnahme eines mit MMA getränkten Fichtenholzquerschnittes (Vergrößerung 50fach)

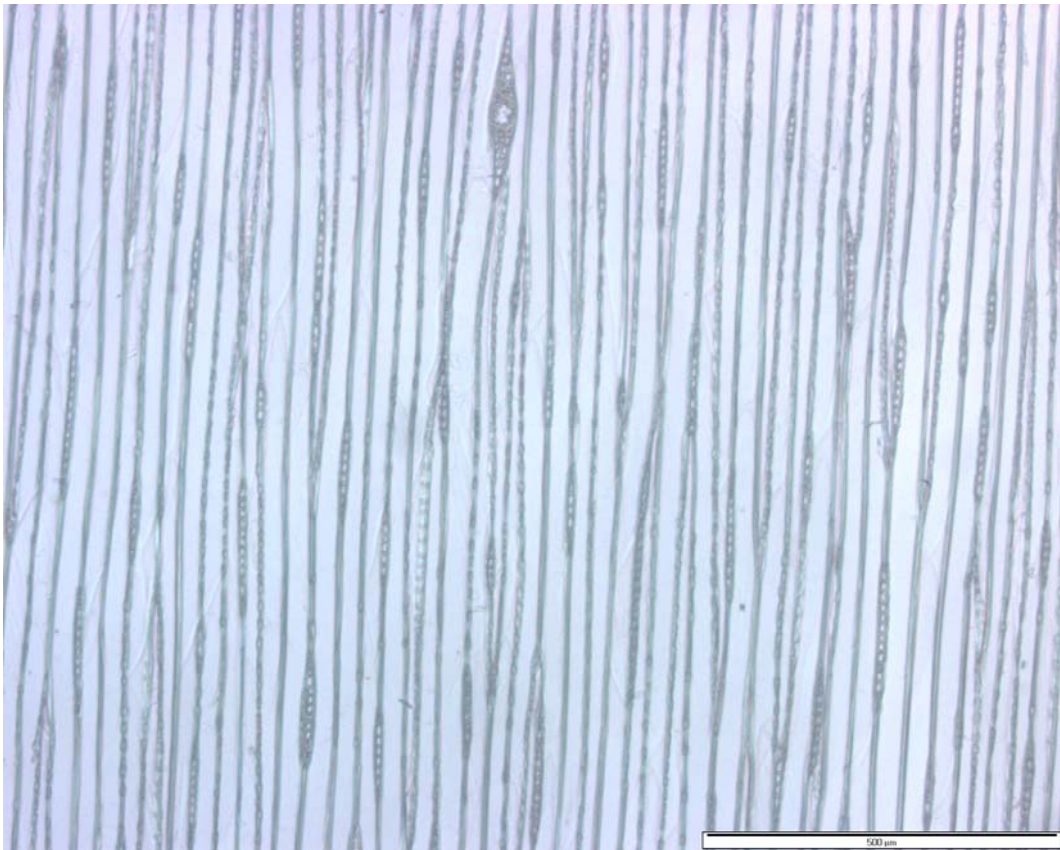




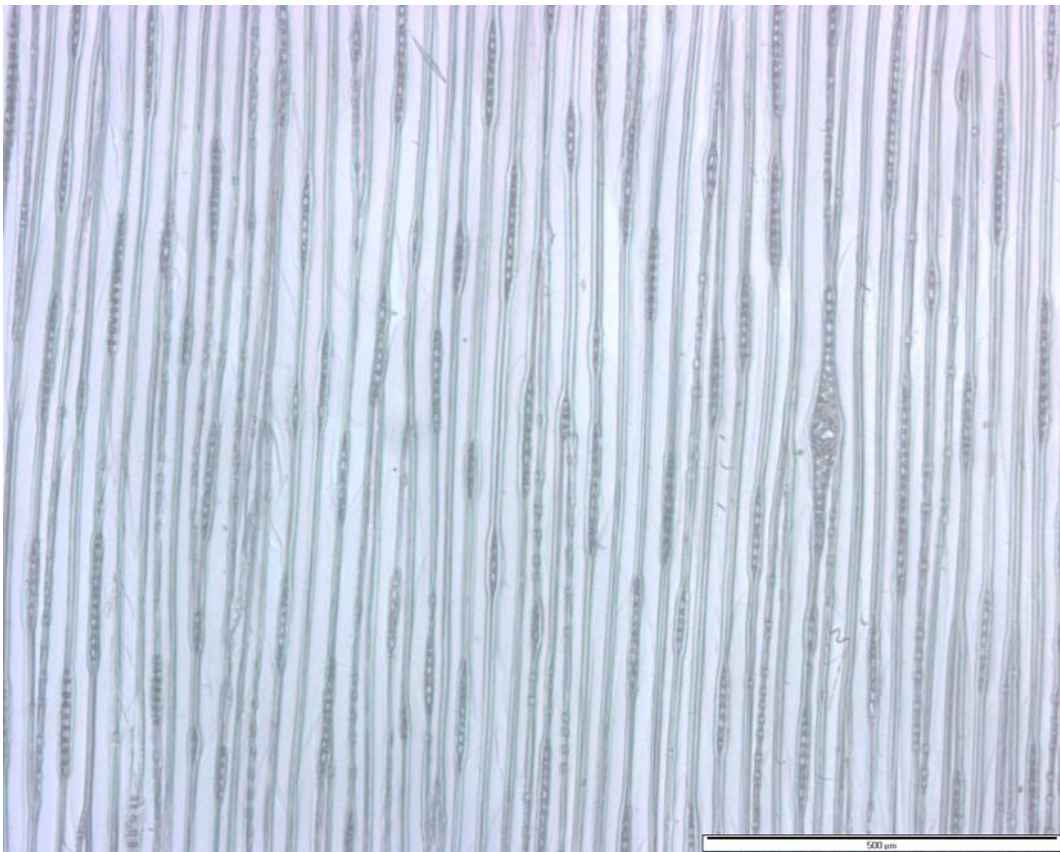
**Abb. 28:** Lichtmikroskopische Aufnahme eines unbehandelten Fichtenholzradialschnittes (Vergrößerung 50fach)



**Abb. 29:** Lichtmikroskopische Aufnahme eines mit MMA getränkten Fichtenholzradialschnittes (Vergrößerung 50fach)

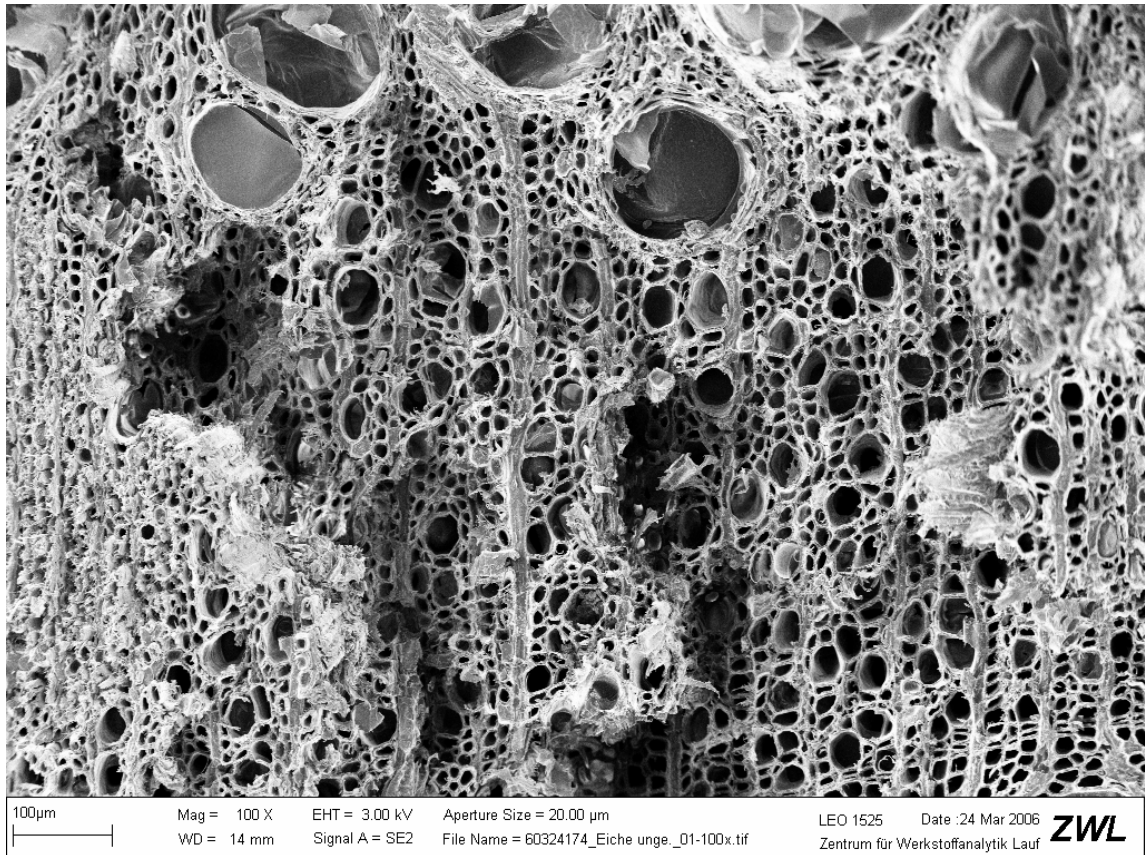


**Abb. 30:** Lichtmikroskopische Aufnahme eines unbehandelten Fichtenholztangentialschnittes (Vergrößerung 50fach)

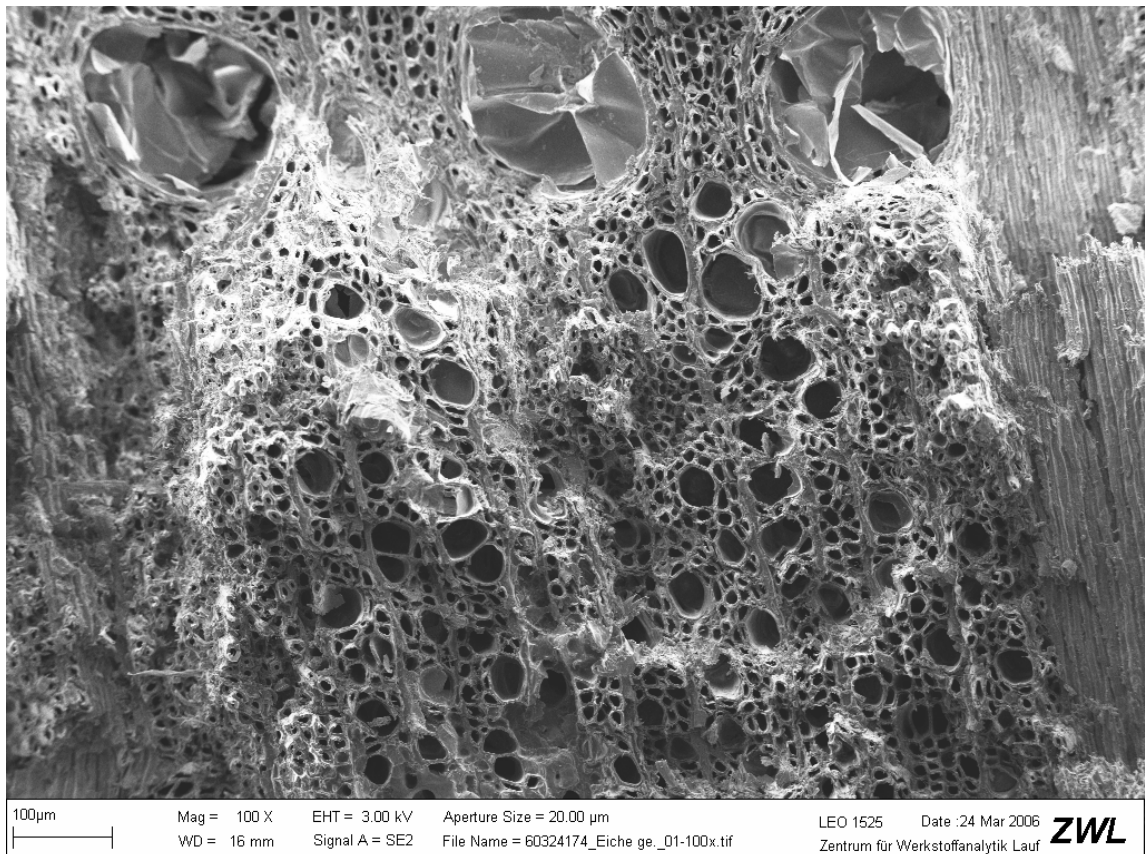


**Abb. 31:** Lichtmikroskopische Aufnahme eines mit MMA getränkten Fichtenholztangentialschnittes (Vergrößerung 50fach)

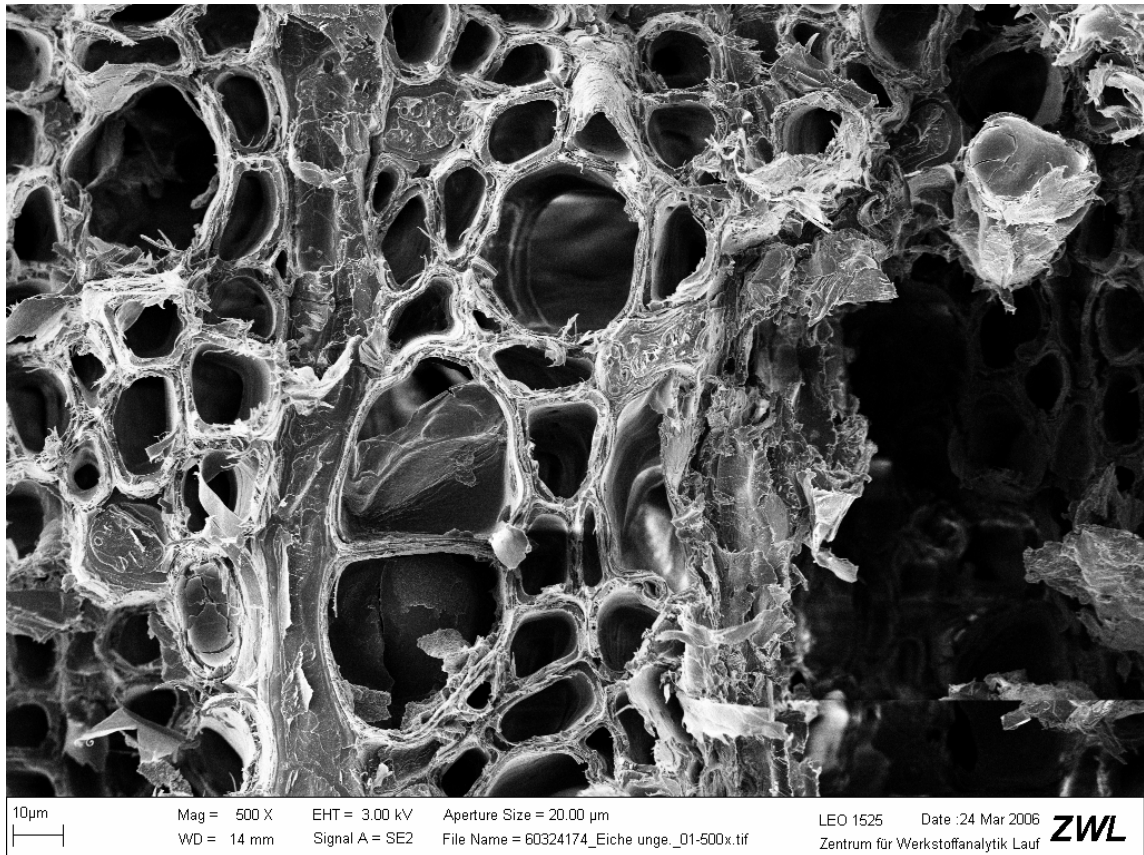




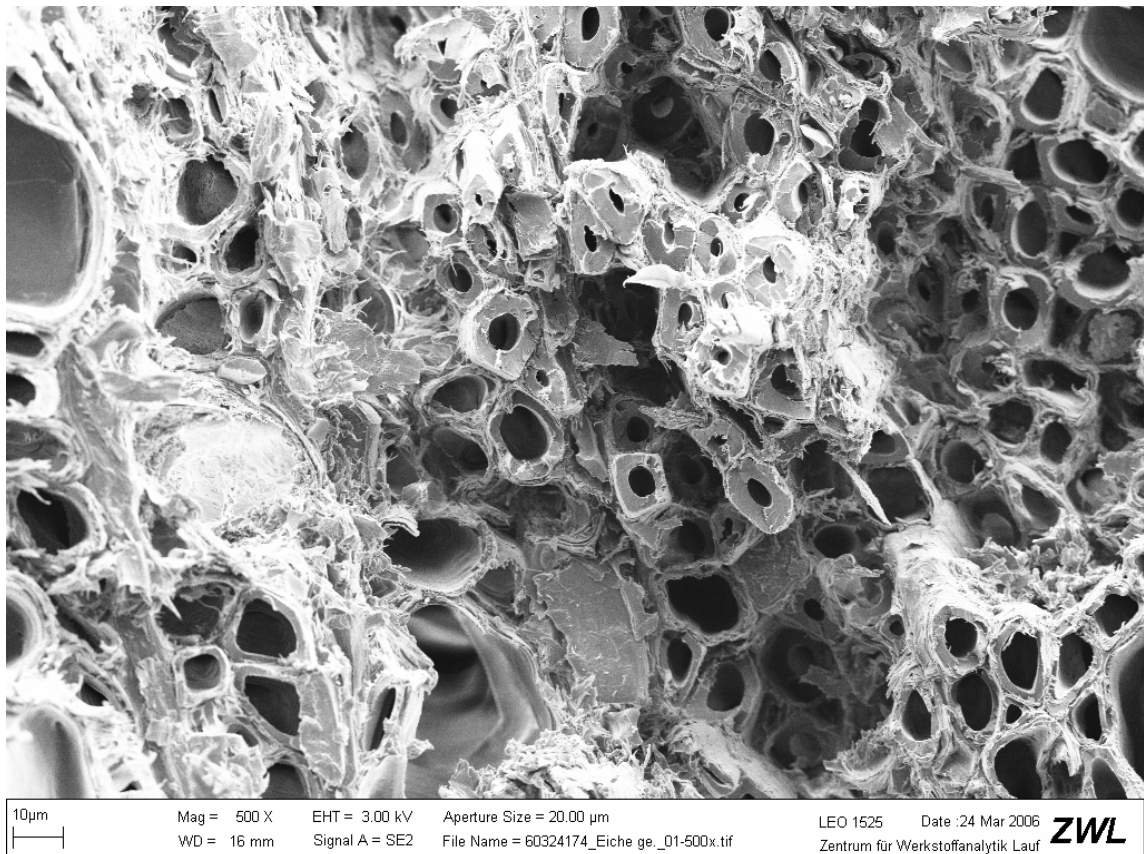
**Abb. 32:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines unbehandelten Eichenquerschnittes (Vergrößerung 100fach)



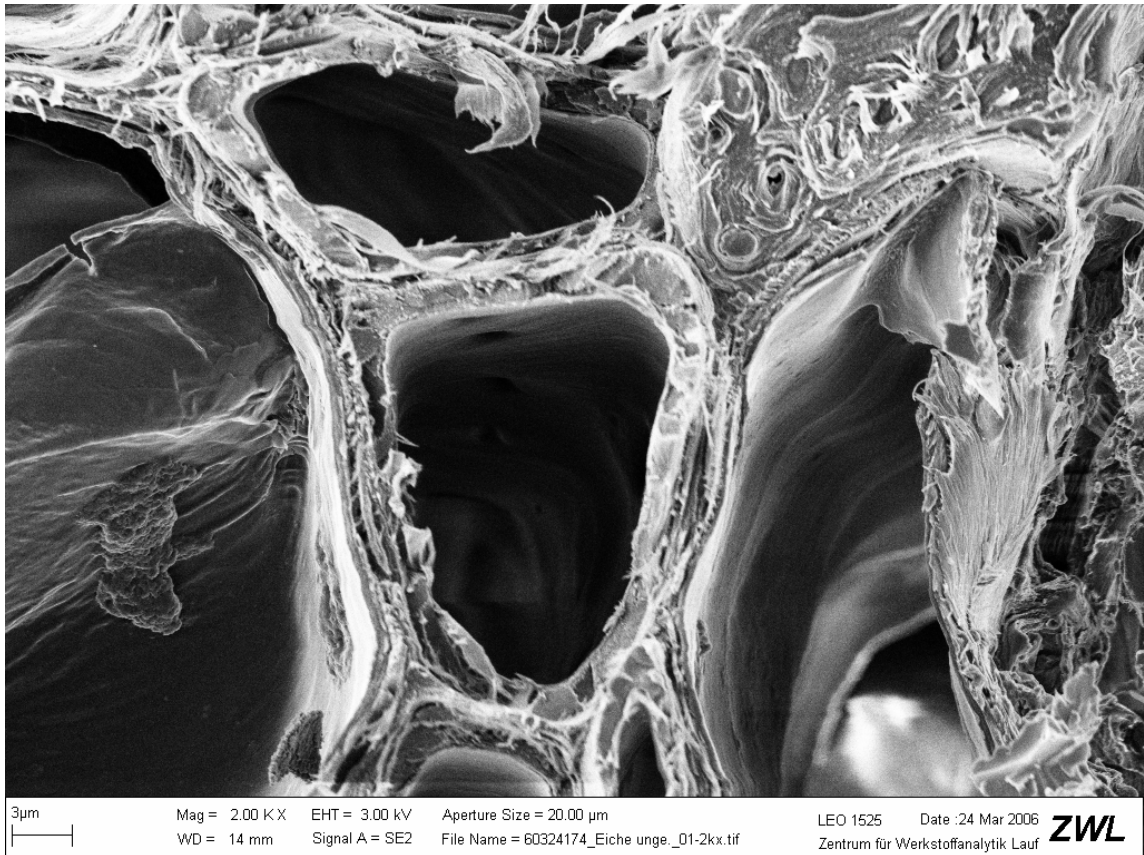
**Abb. 33:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines mit MMA getränkten Eichenquerschnittes (Vergrößerung 100fach)



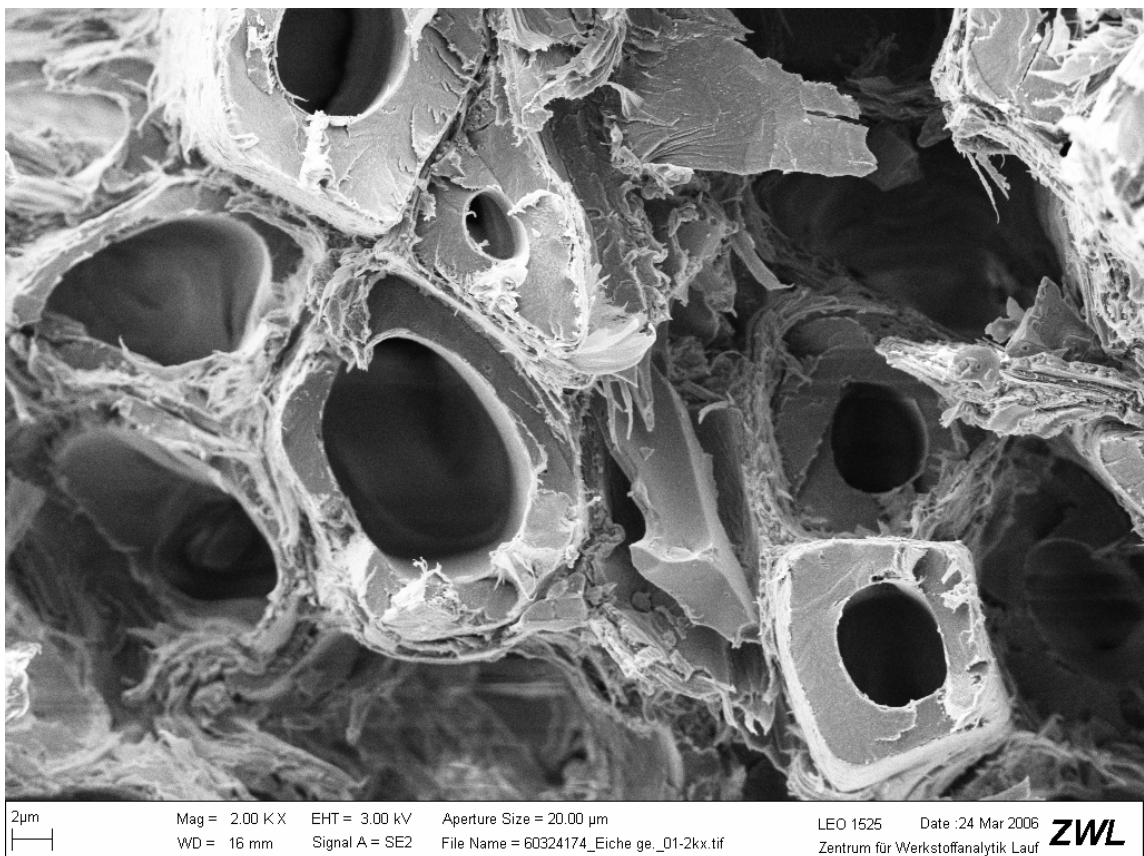
**Abb. 34:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines unbehandelten Eichenquerschnittes (Vergrößerung 500fach)



**Abb. 35:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines mit MMA getränkten Eichenquerschnittes (Vergrößerung 500fach)

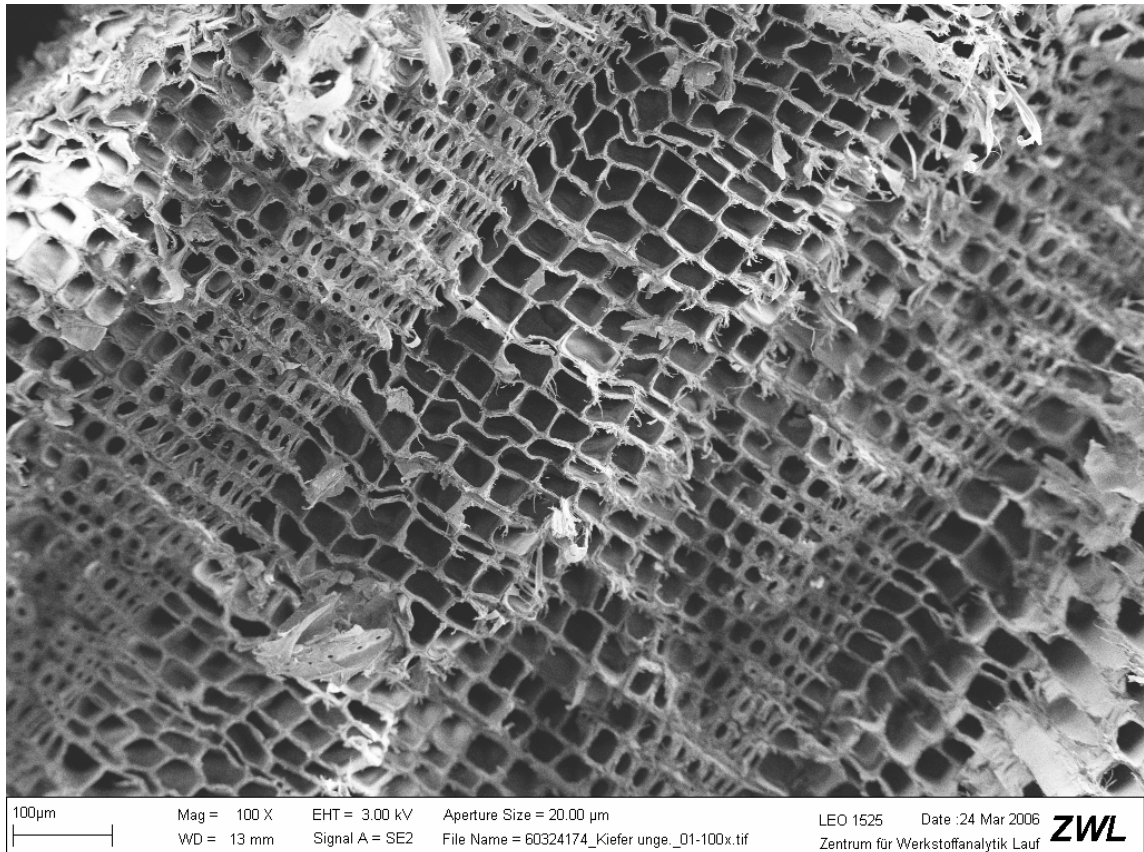


**Abb. 36:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines unbehandelten Eichenquerschnittes (Vergrößerung 2000fach)

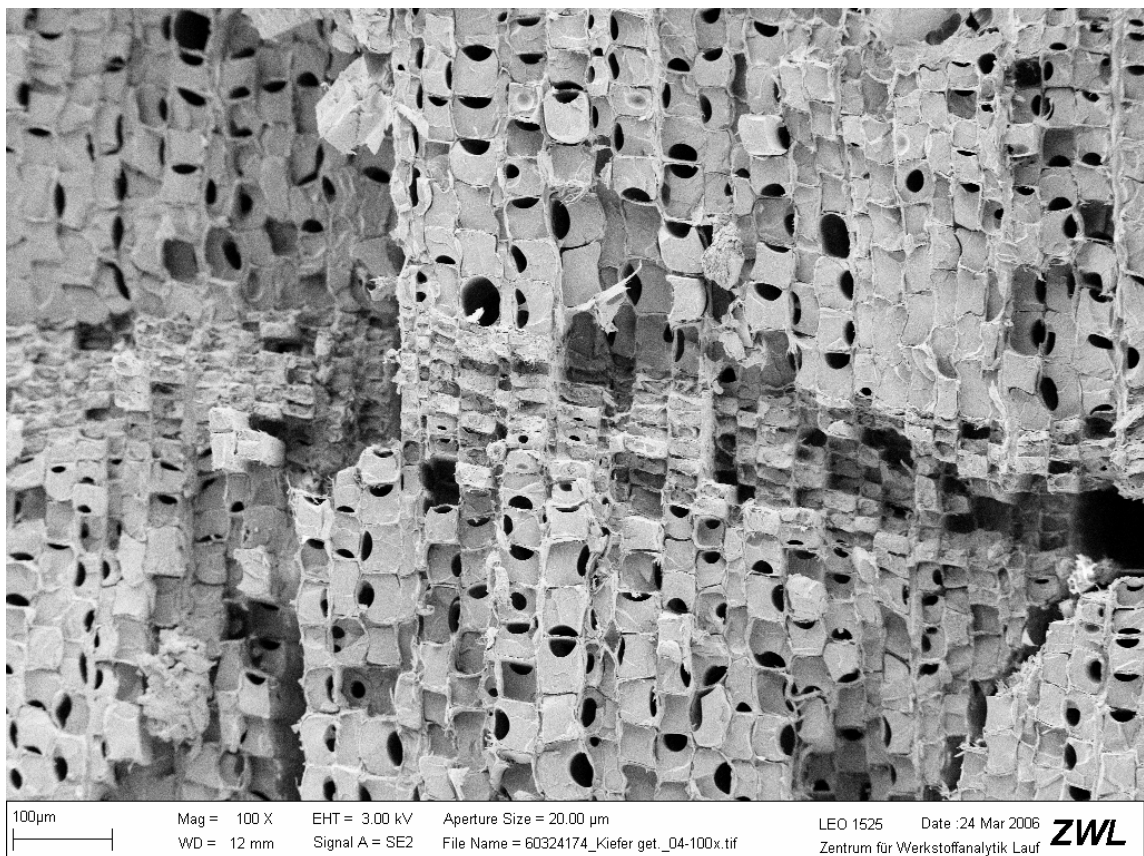


**Abb. 37:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines mit MMA getränkten Eichenquerschnittes (Vergrößerung 2000fach)



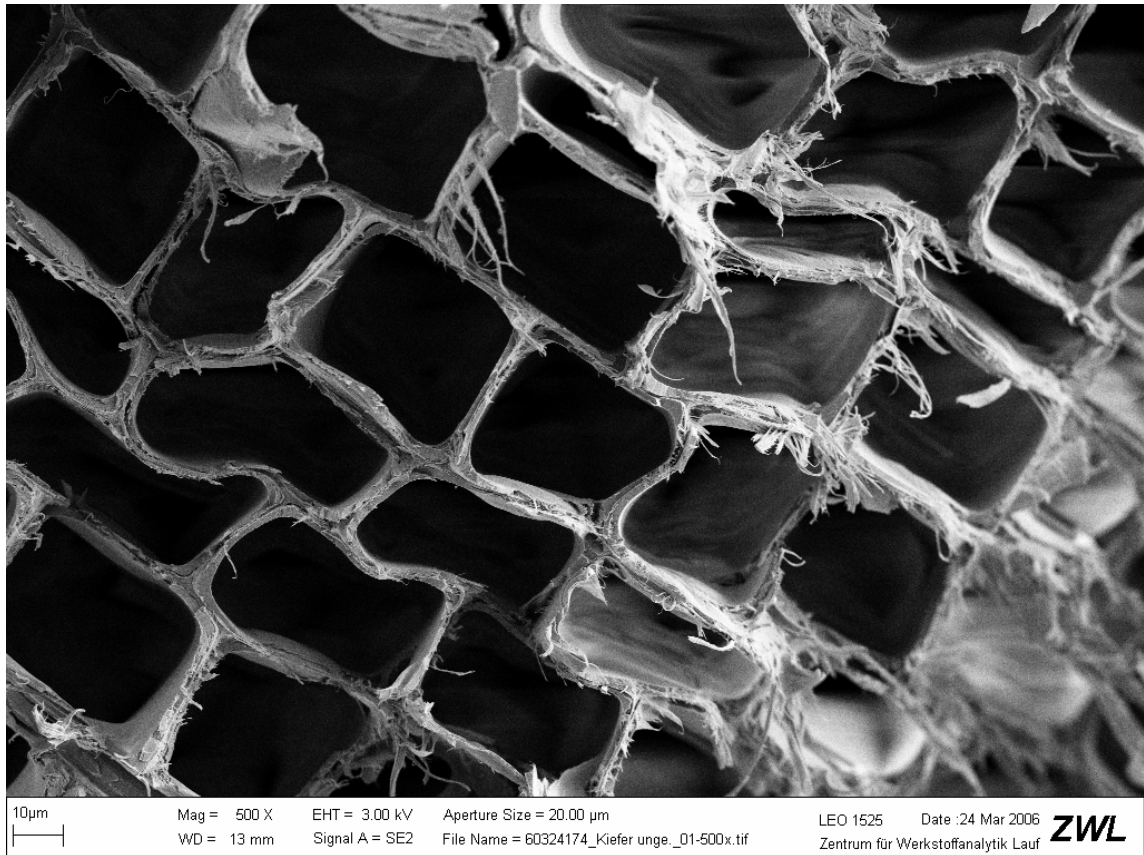


**Abb. 38:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines unbehandelten Kiefernquerschnittes (Vergrößerung 100fach)

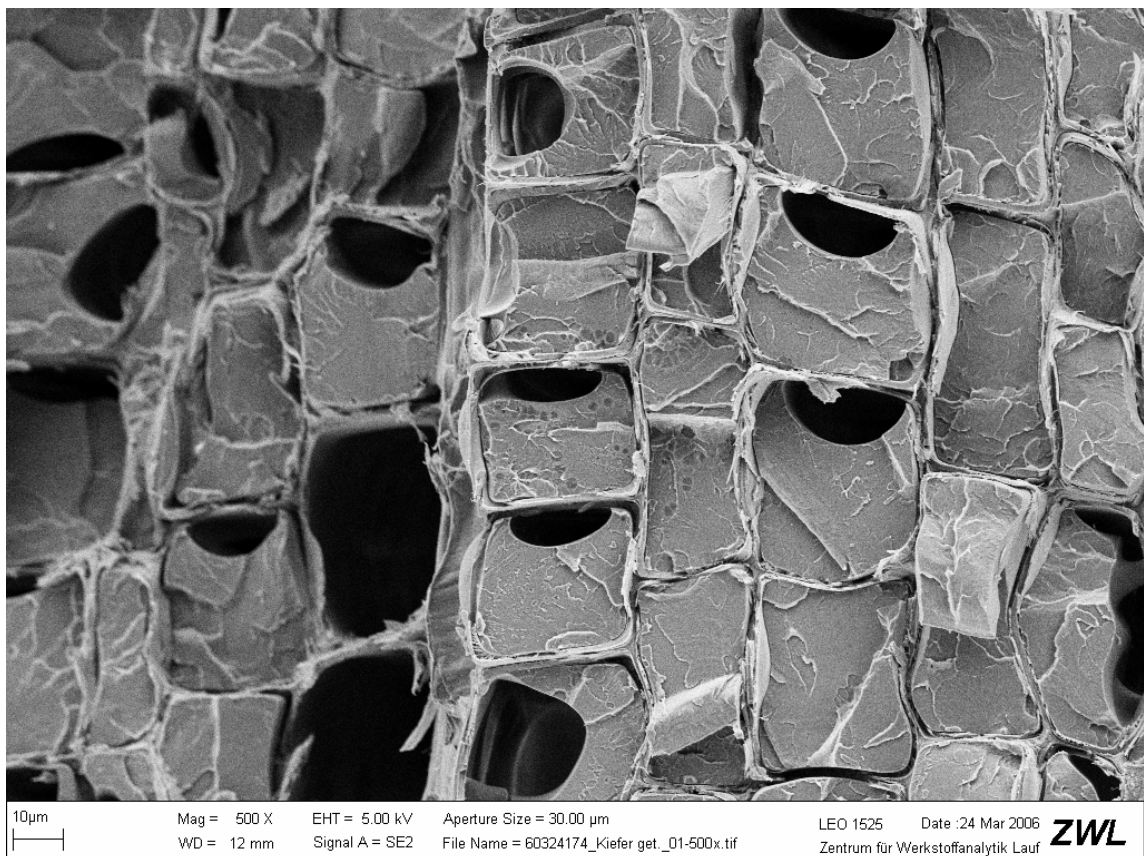


**Abb. 39:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines mit MMA getränkten Kiefernquerschnittes (Vergrößerung 100fach)

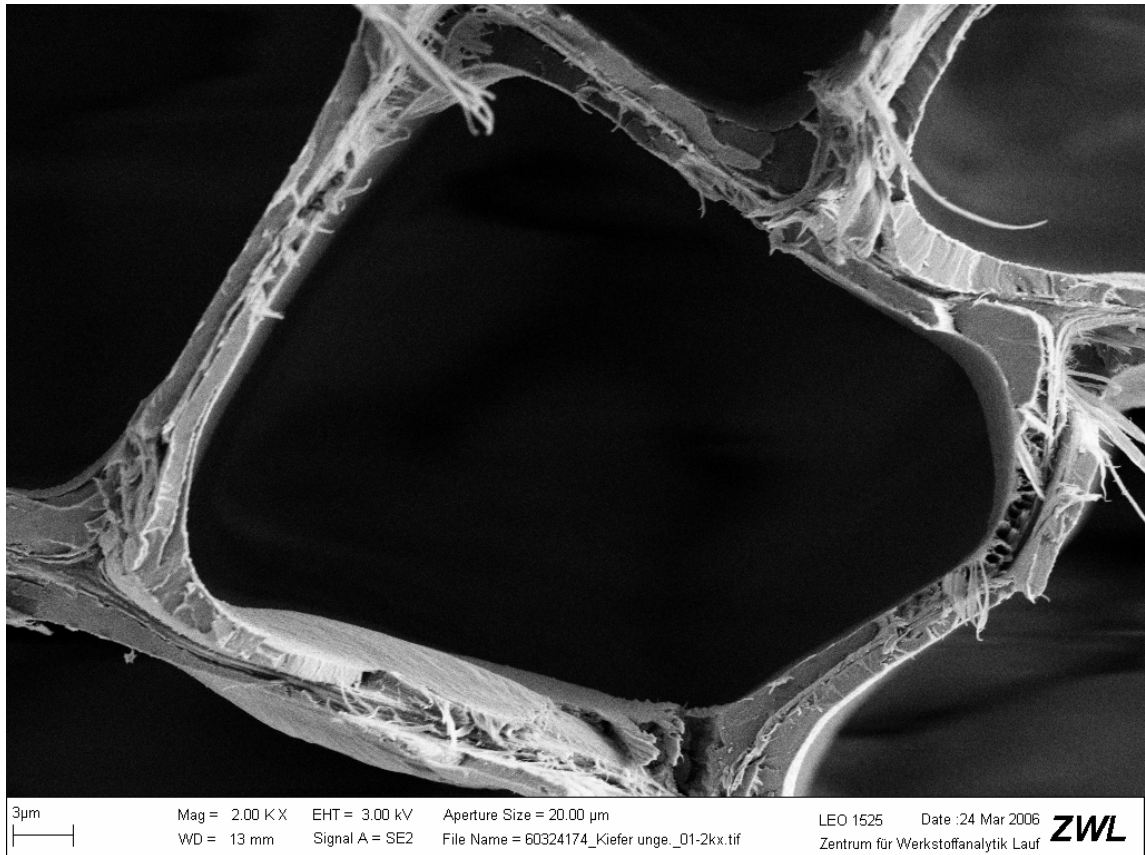




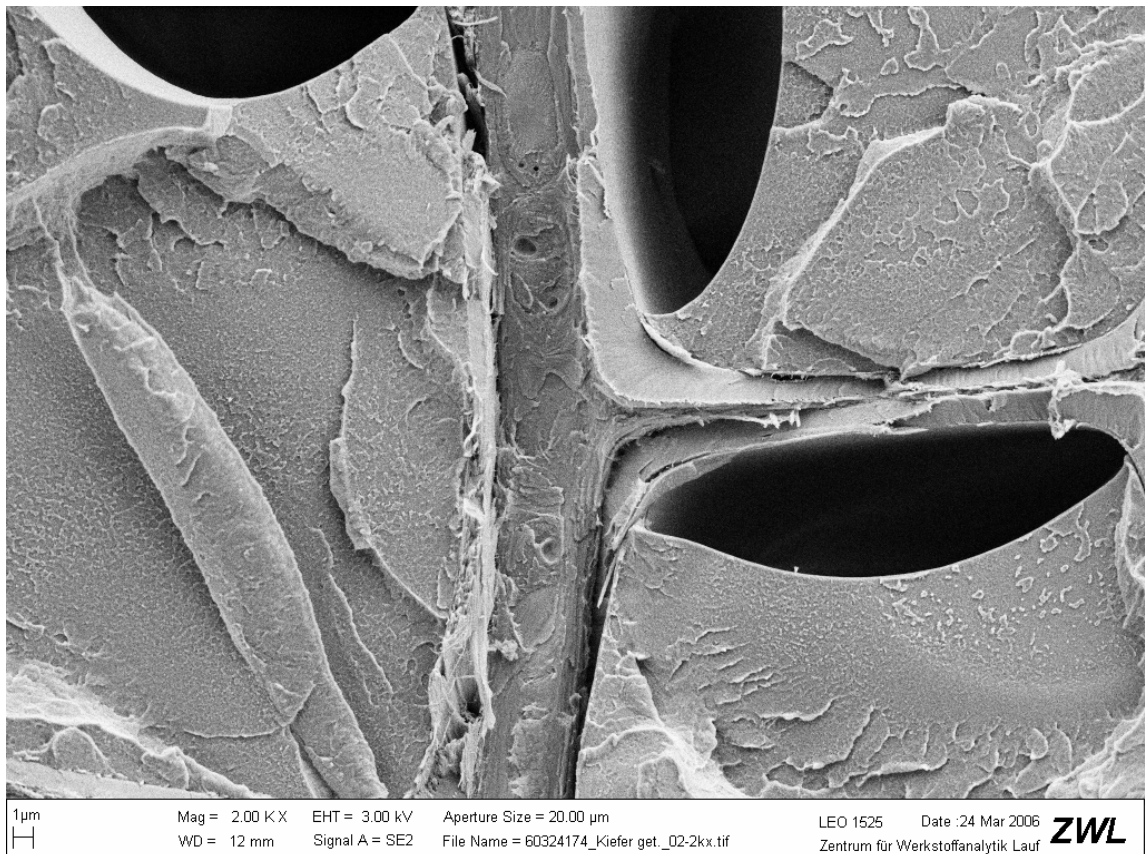
**Abb. 40:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines unbehandelten Kiefernquerschnittes (Vergrößerung 500fach)



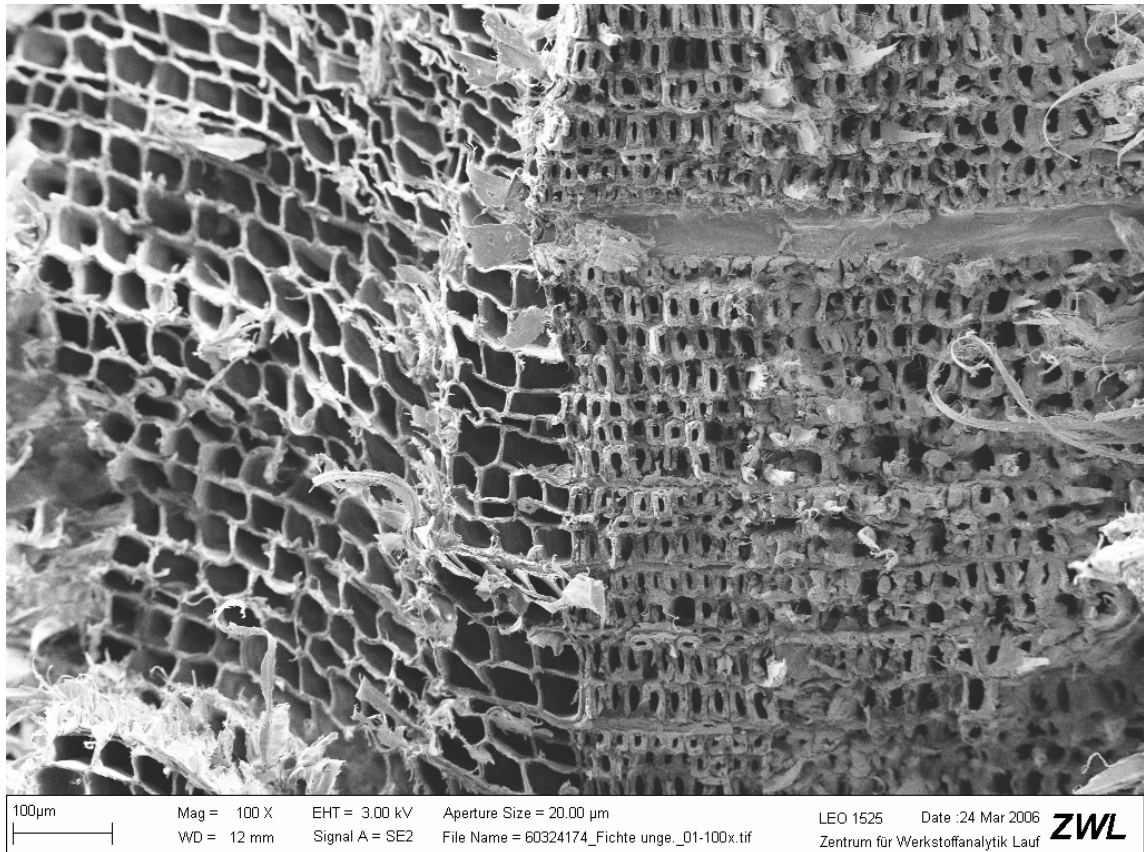
**Abb. 41:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines mit MMA getränkten Kiefernquerschnittes (Vergrößerung 500fach)



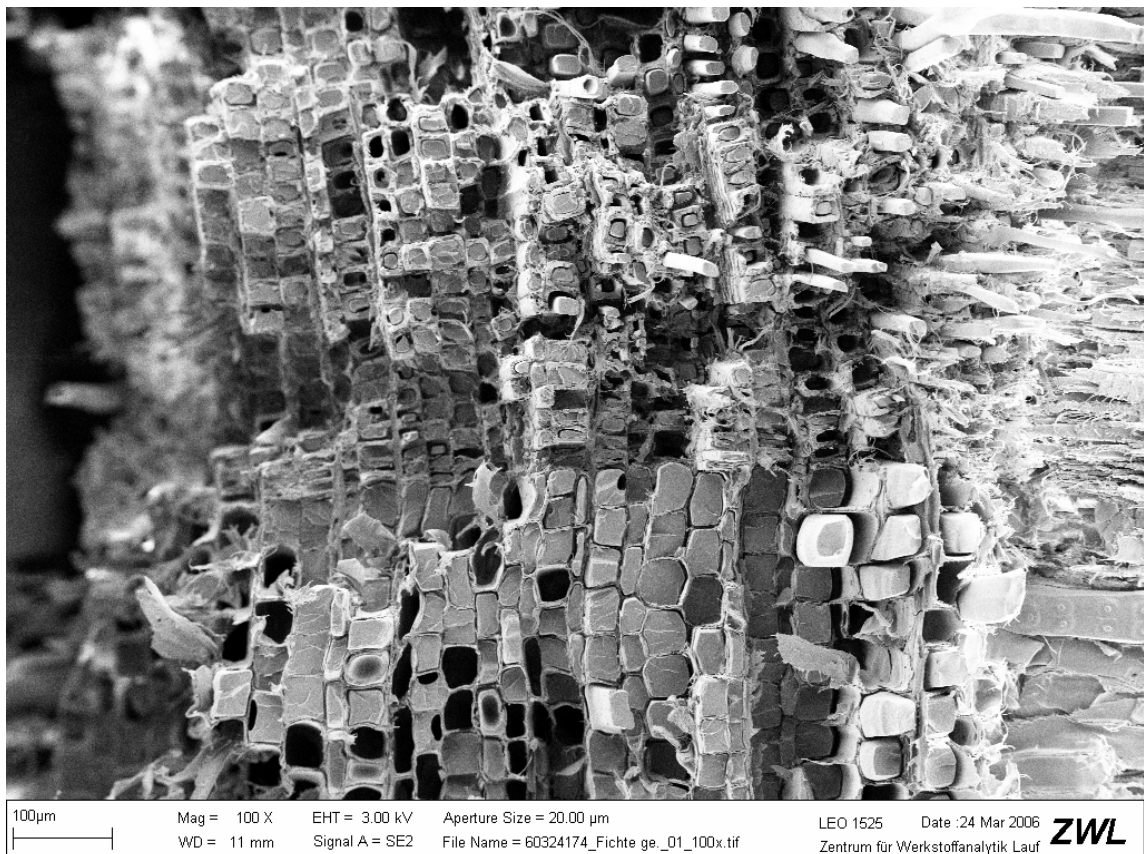
**Abb. 42:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines unbehandelten Kiefernquerschnittes (Vergrößerung 2000fach)



**Abb. 43:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines mit MMA getränkten Kiefernquerschnittes (Vergrößerung 2000fach)

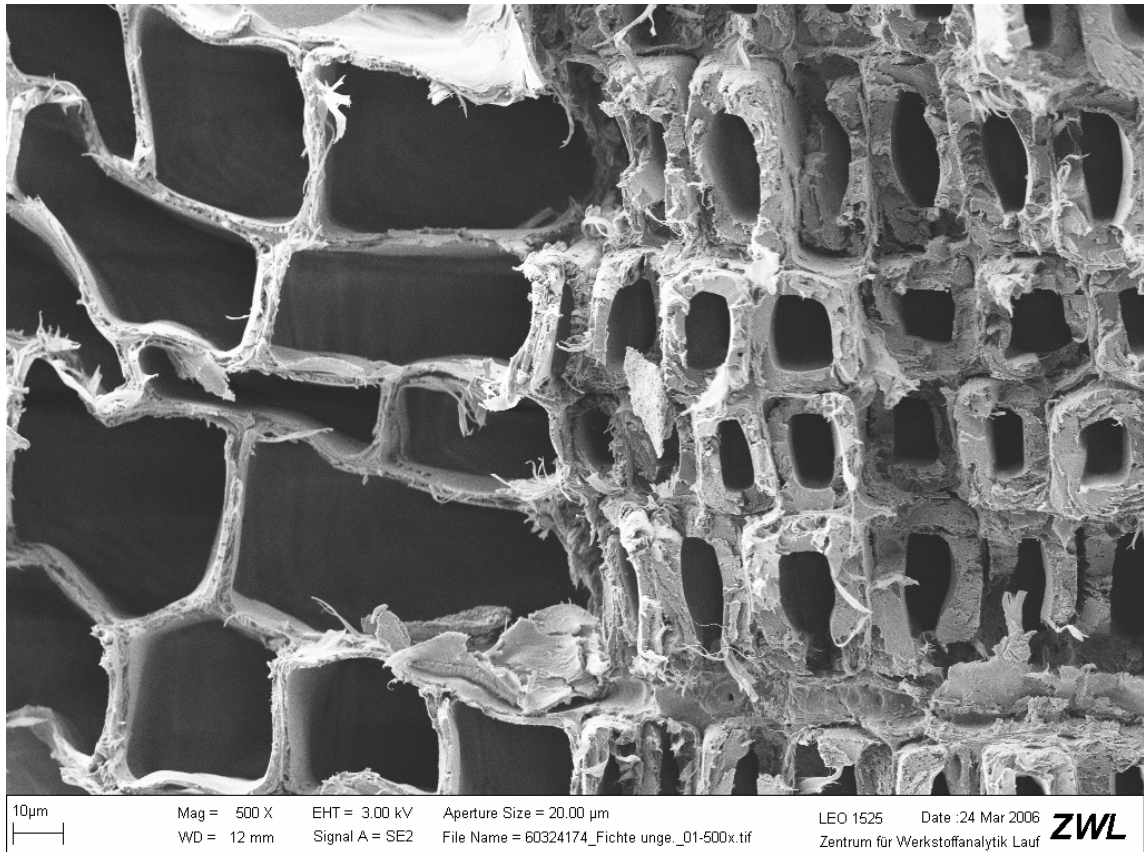


**Abb. 44:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines unbehandelten Fichtenquerschnittes (Vergrößerung 100fach)

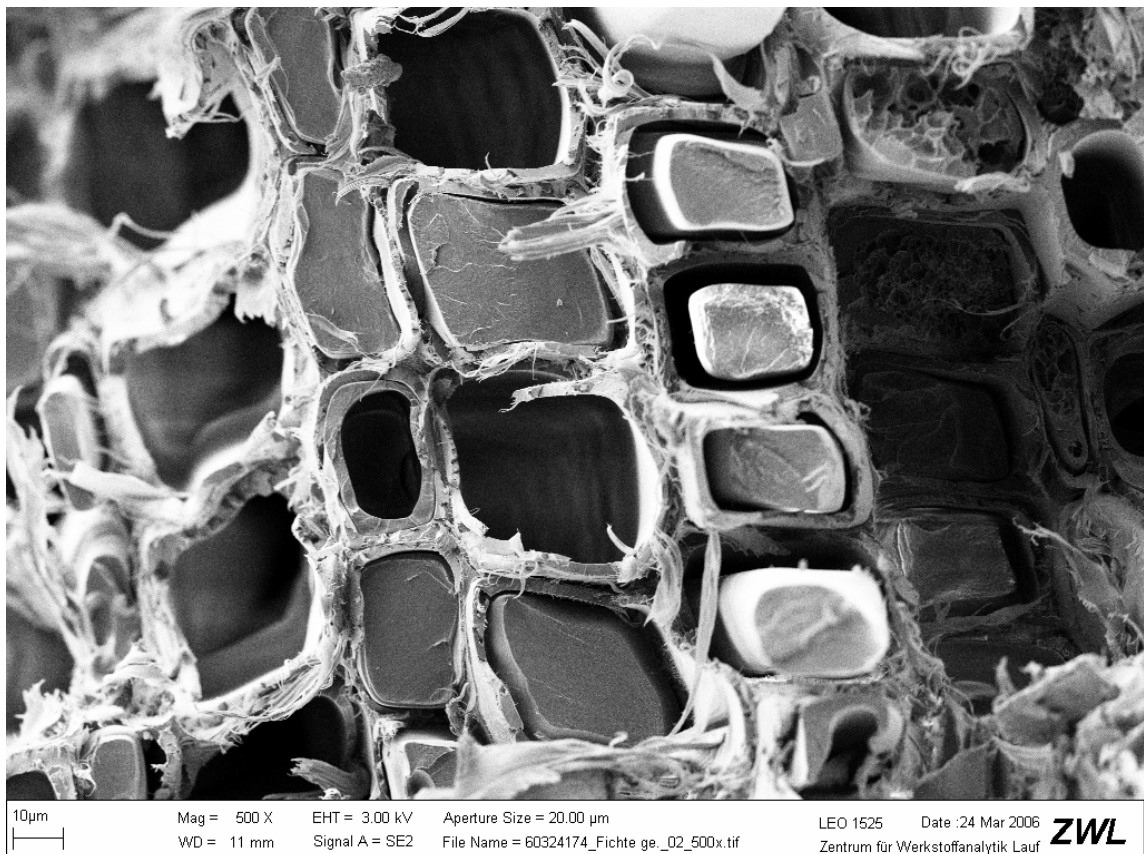


**Abb. 45:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines mit MMA getränkten Fichtenquerschnittes (Vergrößerung 100fach)

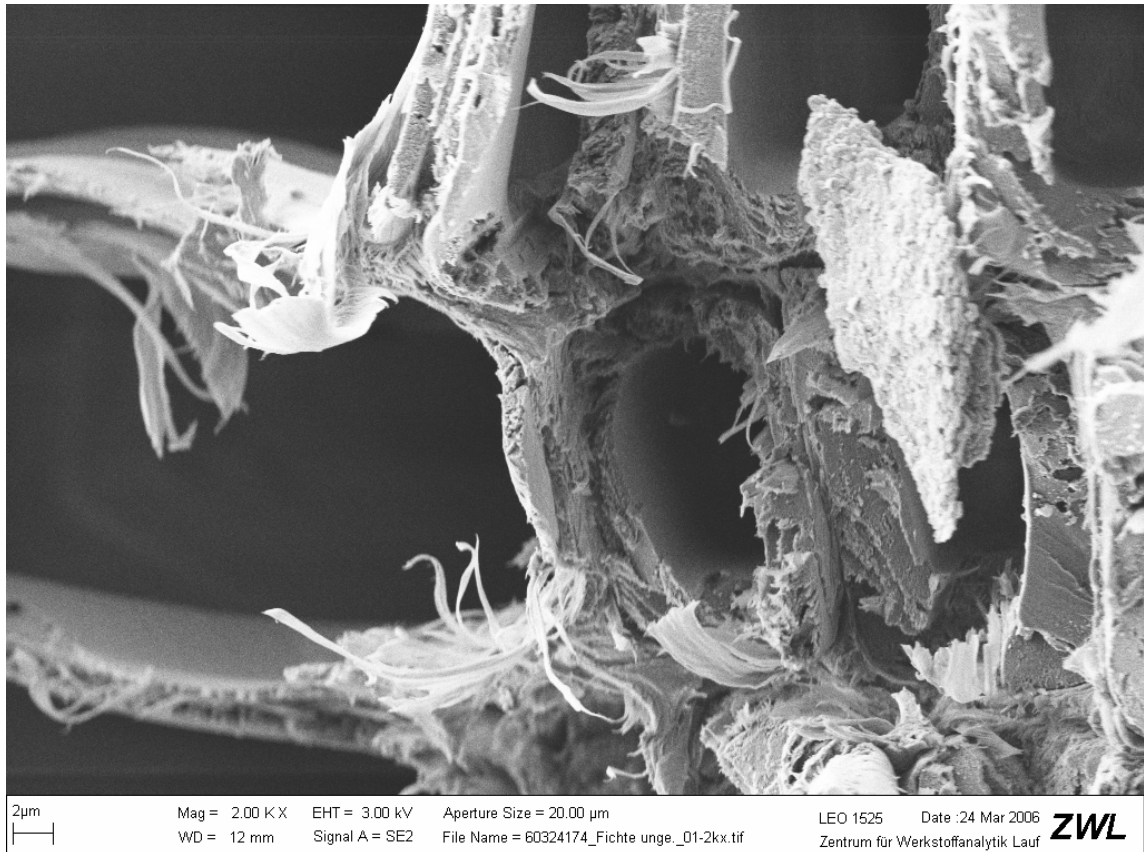




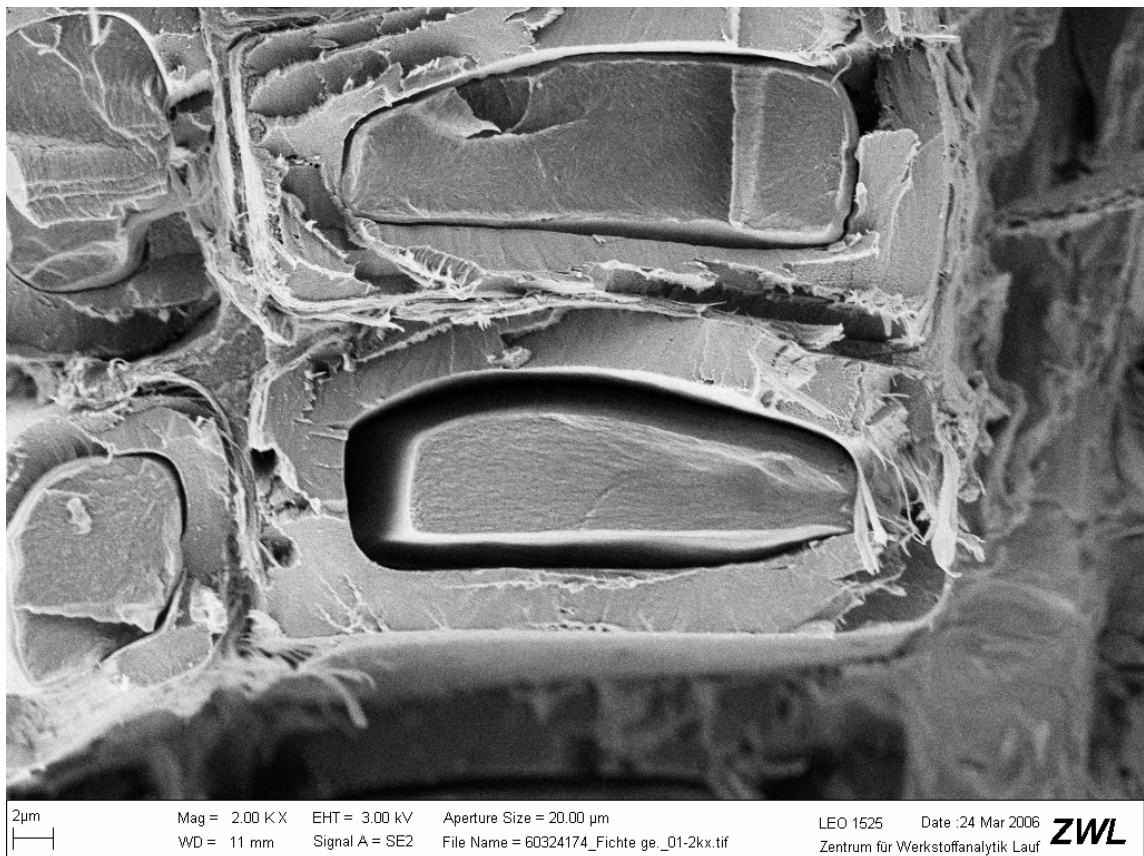
**Abb. 46:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines unbehandelten Fichtenquerschnittes (Vergrößerung 500fach)



**Abb. 47:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines mit MMA getränkten Fichtenquerschnittes (Vergrößerung 500fach)



**Abb. 48:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines unbehandelten Fichtenquerschnittes (Vergrößerung 2000fach)



**Abb. 49:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines mit MMA getränkten Fichtenquerschnittes (Vergrößerung 2000fach)

## 9.2 Diagramme

Diagramm 1: Luftpermeabilität Eiche .....	106
Diagramm 2: Flüssigkeitspermeabilität Eiche .....	106
Diagramm 3: Luftpermeabilität Kiefer .....	107
Diagramm 4: Flüssigkeitspermeabilität Kiefer .....	107
Diagramm 5: Luftpermeabilität Fichte .....	108
Diagramm 6: Flüssigkeitspermeabilität Fichte .....	108
Diagramm 7: Luft-Flüssigkeits-Permeabilität Mittelwert Eiche .....	109
Diagramm 8: Luft-Flüssigkeits-Permeabilität Mittelwert Kiefer .....	109
Diagramm 9: Luft-Flüssigkeits-Permeabilität Mittelwert Fichte.....	110
Diagramm 10: Thermisch-Hygrische-Dehnung Eiche Querschnitt (axial) unbehandelt....	111
Diagramm 11: Thermisch-Hygrische-Dehnung Eiche Querschnitt (axial) getränkt .....	111
Diagramm 12: Thermisch-Hygrische-Dehnung Eiche Radialschnitt unbehandelt.....	112
Diagramm 13: Thermisch-Hygrische-Dehnung Eiche Radialschnitt getränkt .....	112
Diagramm 14: Thermisch-Hygrische-Dehnung Kiefer Querschnitt (axial) unbehandelt...	113
Diagramm 15: Thermisch-Hygrische-Dehnung Kiefer Querschnitt (axial) getränkt .....	113
Diagramm 16: Thermisch-Hygrische-Dehnung Kiefer Radialschnitt unbehandelt.....	114
Diagramm 17: Thermisch-Hygrische-Dehnung Kiefer Radialschnitt getränkt .....	114
Diagramm 18: Thermisch-Hygrische-Dehnung Fichte Querschnitt (axial) unbehandelt...	115
Diagramm 19: Thermisch-Hygrische-Dehnung Fichte Querschnitt (axial) getränkt .....	115
Diagramm 20: Thermisch-Hygrische-Dehnung Fichte Radialschnitt unbehandelt.....	116
Diagramm 21: Thermisch-Hygrische-Dehnung Fichte Radialschnitt getränkt .....	116
Diagramm 22: Biegefestigkeit Eiche unbehandelt.....	117
Diagramm 23: Druckfestigkeit Eiche unbehandelt .....	117
Diagramm 24: Biegefestigkeit Eiche getränkt .....	118
Diagramm 25: Druckfestigkeit Eiche getränkt .....	118
Diagramm 26: Biegefestigkeit Eiche getrocknet getränkt .....	119
Diagramm 27: Druckfestigkeit Eiche getrocknet getränkt .....	119
Diagramm 28: Biegefestigkeit Kiefer unbehandelt .....	120
Diagramm 29: Druckfestigkeit Kiefer unbehandelt.....	120
Diagramm 30: Biegefestigkeit Kiefer getränkt.....	121
Diagramm 31: Druckfestigkeit Kiefer getränkt .....	121
Diagramm 32: Biegefestigkeit Kiefer getrocknet getränkt .....	122
Diagramm 33: Druckfestigkeit Kiefer getrocknet getränkt .....	122
Diagramm 34: Biegefestigkeit Fichte unbehandelt.....	123
Diagramm 35: Druckfestigkeit Fichte unbehandelt .....	123
Diagramm 36: Biegefestigkeit Fichte getränkt .....	124
Diagramm 37: Druckfestigkeit Fichte getränkt .....	124
Diagramm 38: Biegefestigkeit Fichte getrocknet getränkt .....	125
Diagramm 39: Druckfestigkeit Fichte getrocknet getränkt.....	125

## Permeabilitätsmessungen

Luftpermeabilität: Eiche

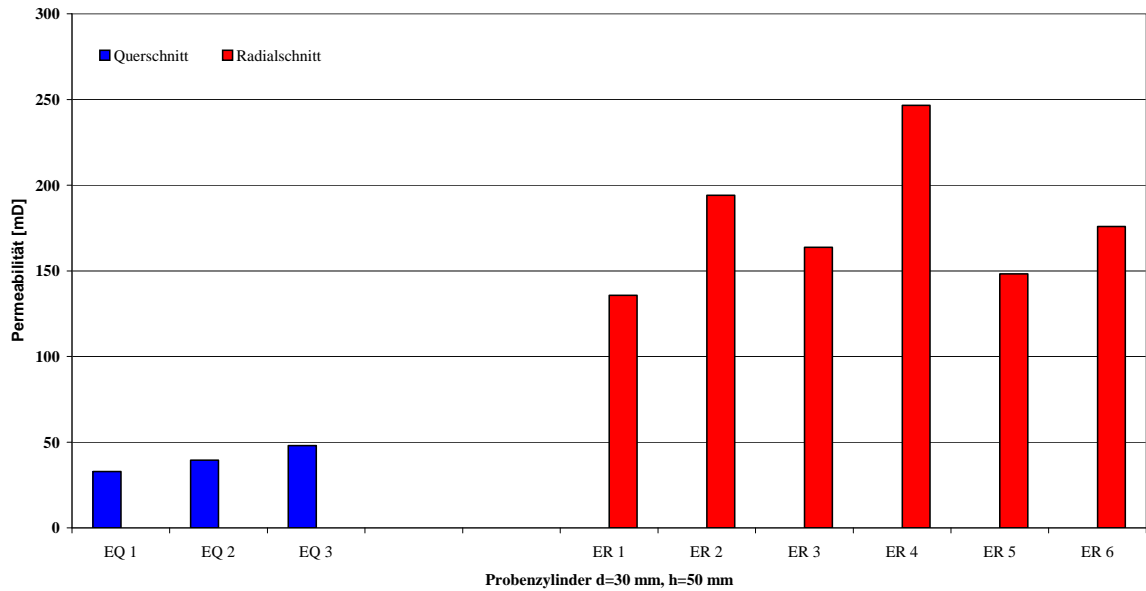


Diagramm 1: Luftpermeabilität Eiche

Flüssigkeitspermeabilität : Eiche

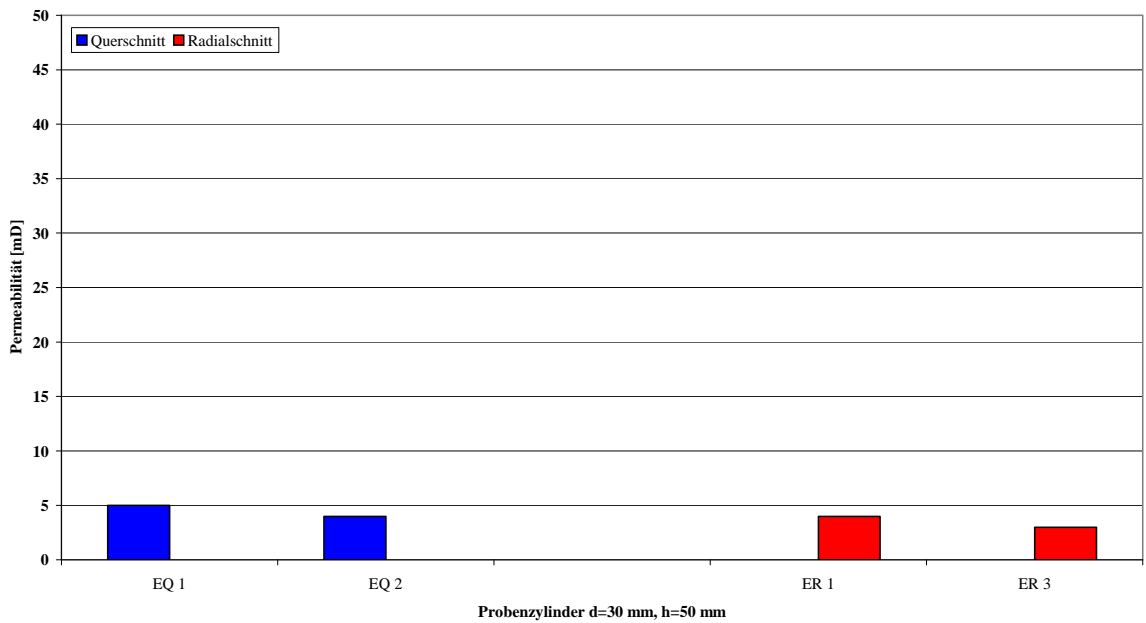
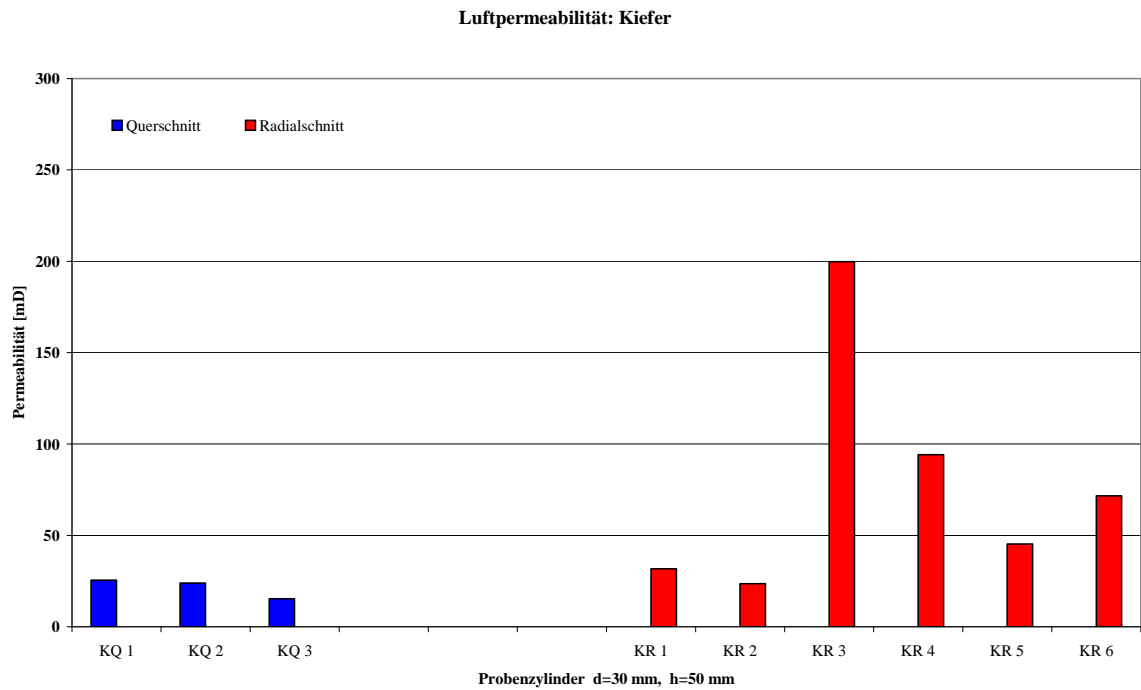
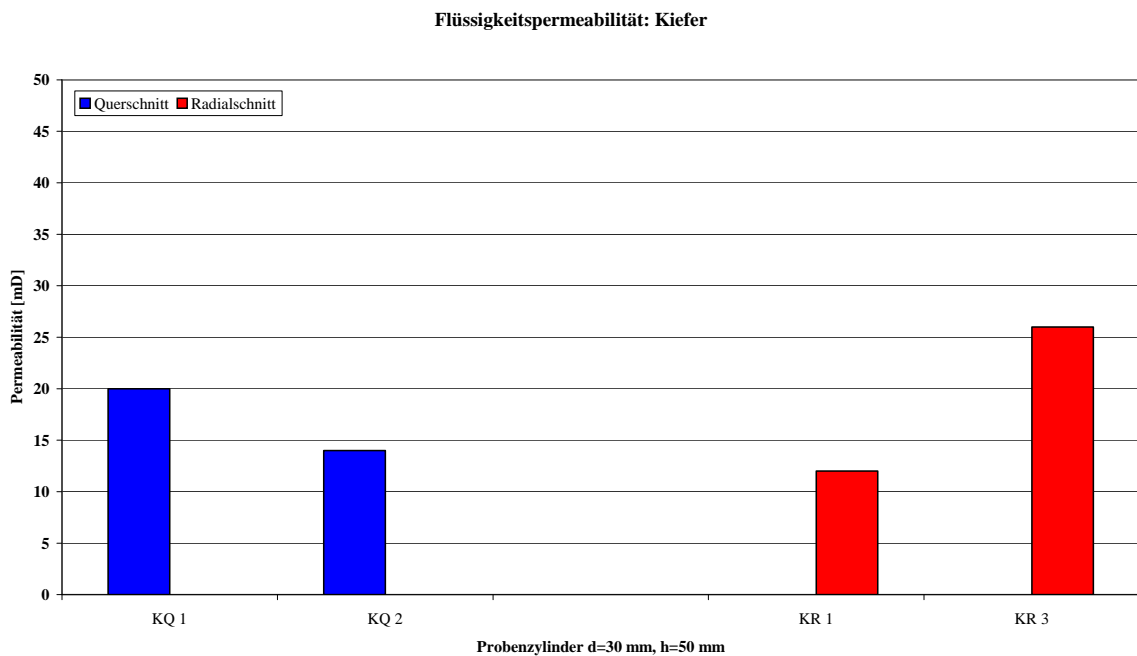


Diagramm 2: Flüssigkeitspermeabilität Eiche

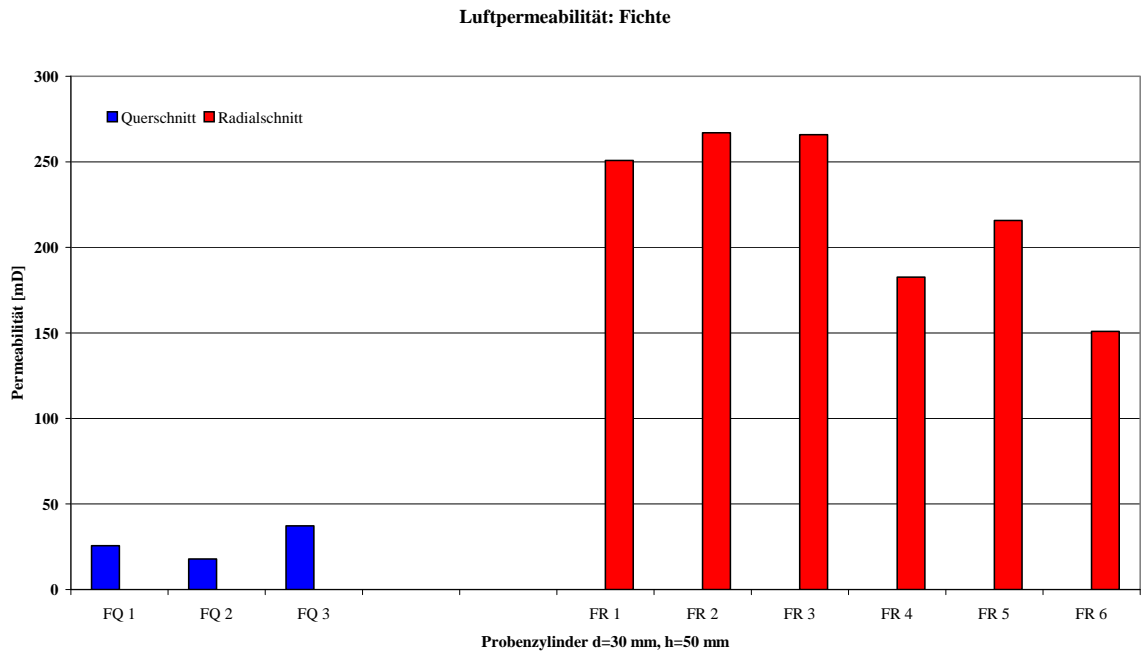


**Diagramm 3:** Luftpermeabilität Kiefer

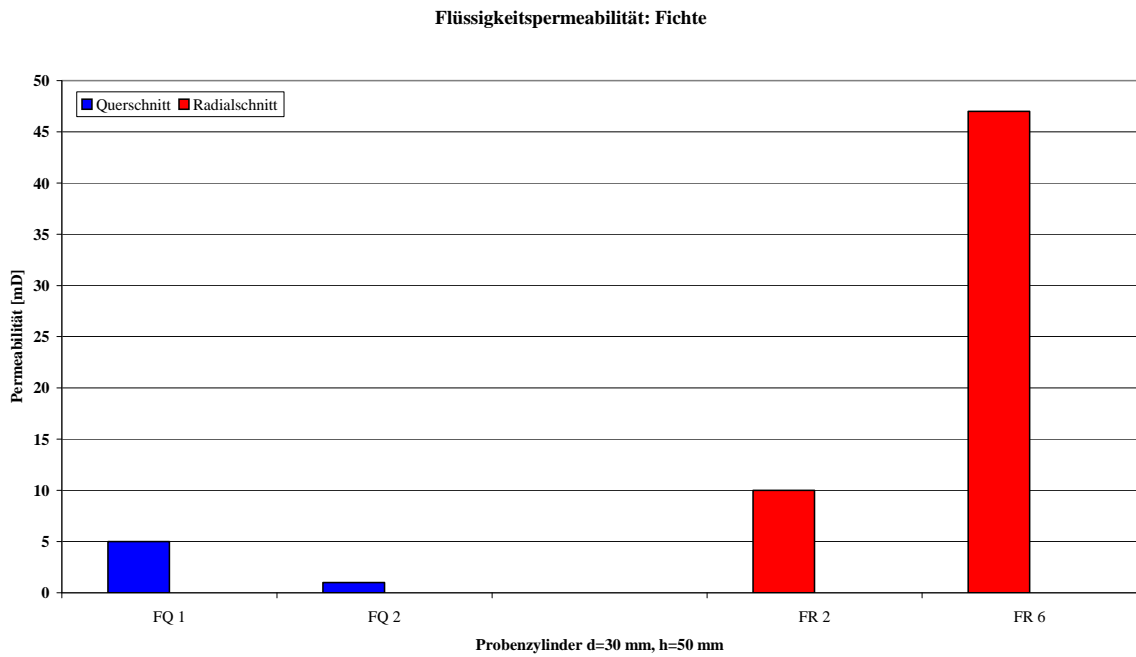


**Diagramm 4:** Flüssigkeitspermeabilität Kiefer





**Diagramm 5:** Luftpermeabilität Fichte



**Diagramm 6:** Flüssigkeitspermeabilität Fichte

Luft-Flüssigkeits-Permeabilität: Eiche

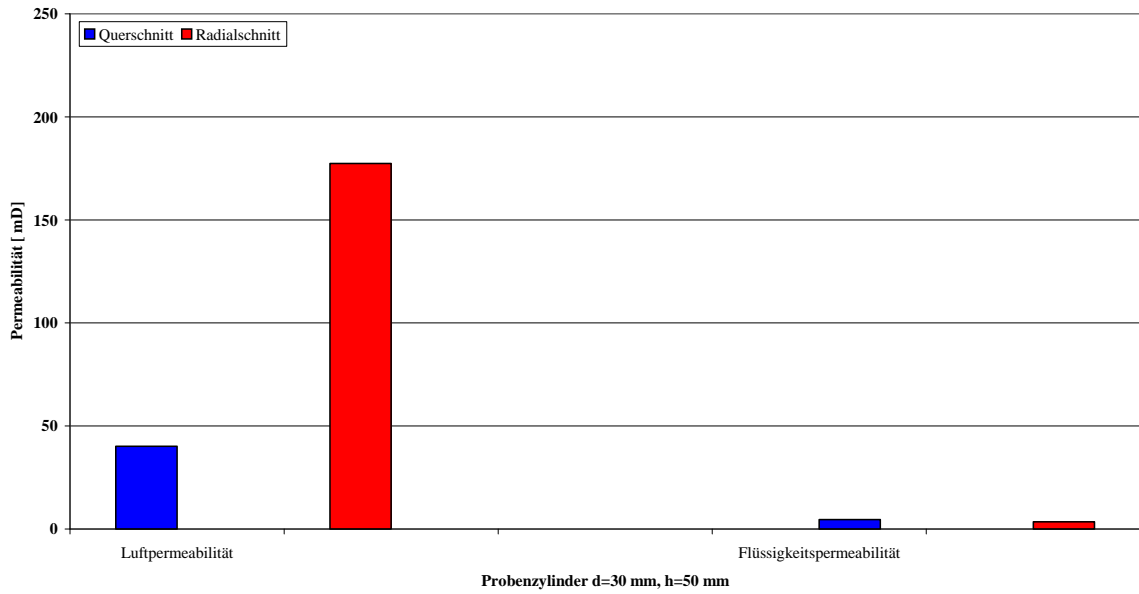


Diagramm 7: Luft-Flüssigkeits-Permeabilität Mittelwert Eiche

Luft-Flüssigkeits-Permeabilität: Kiefer

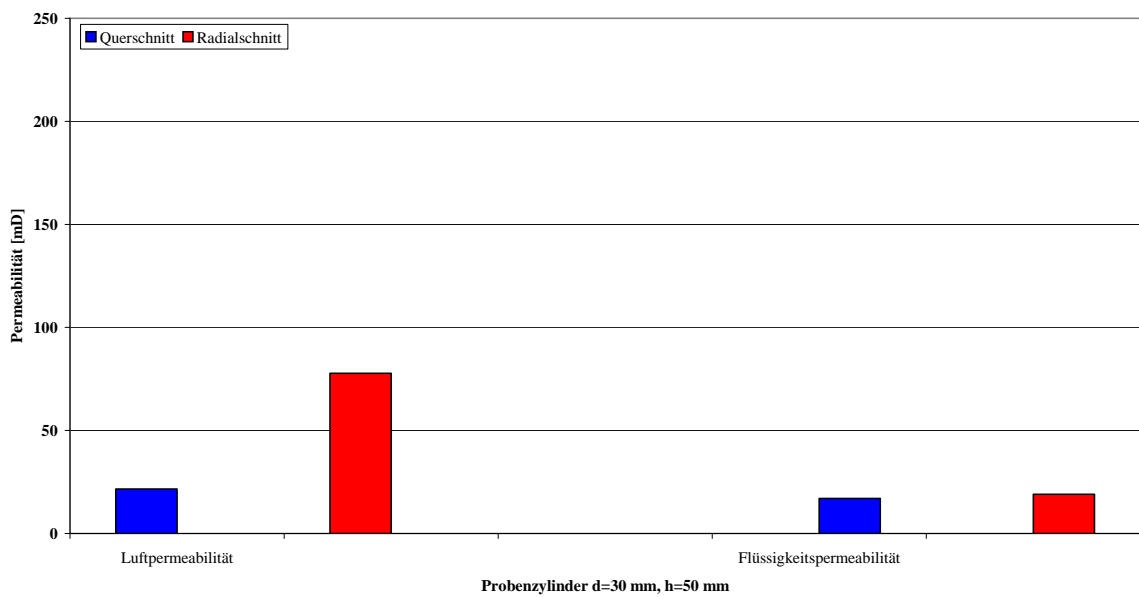
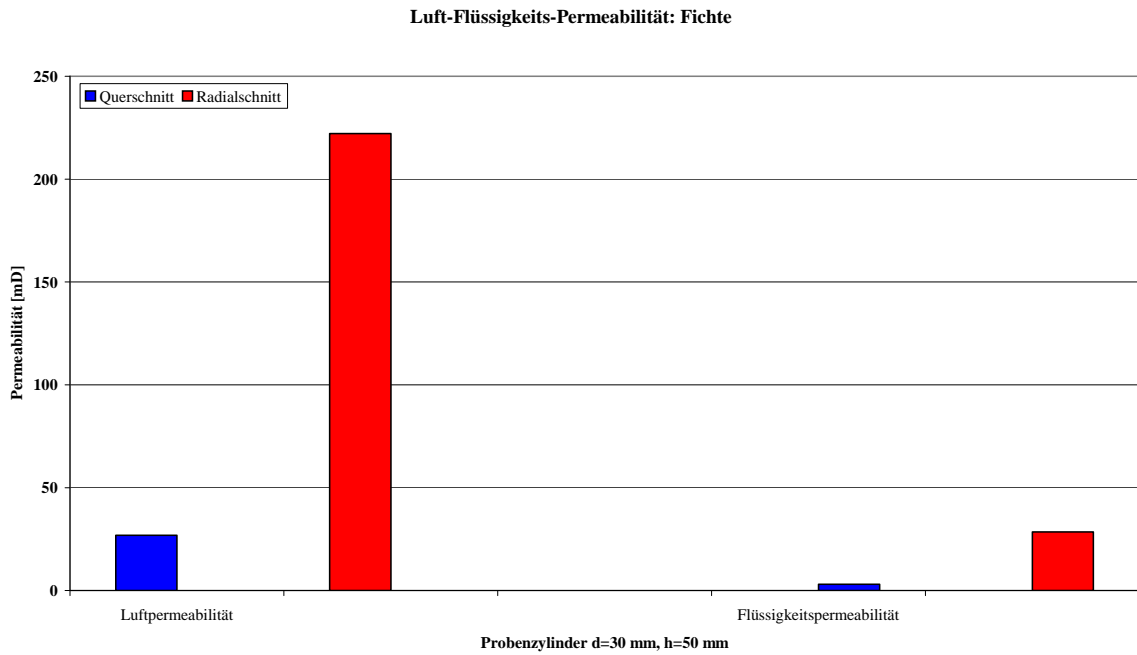


Diagramm 8: Luft-Flüssigkeits-Permeabilität Mittelwert Kiefer



**Diagramm 9:** Luft-Flüssigkeits-Permeabilität Mittelwert Fichte

### Thermisch-Hygrische-Dehnung

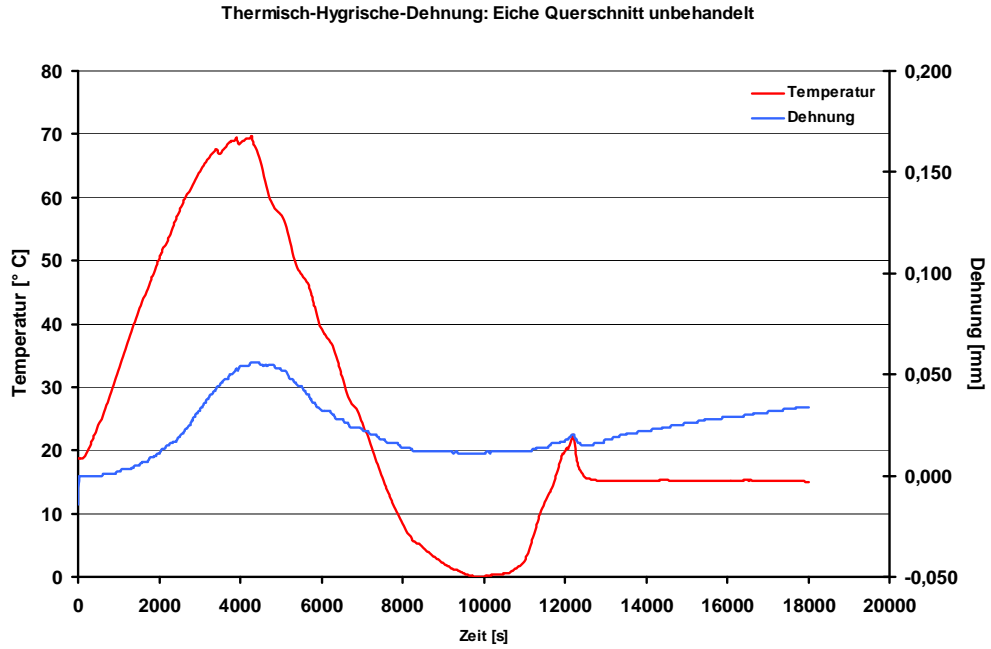


Diagramm 10: Thermisch-Hygrische-Dehnung Eiche Querschnitt (axial) unbehandelt

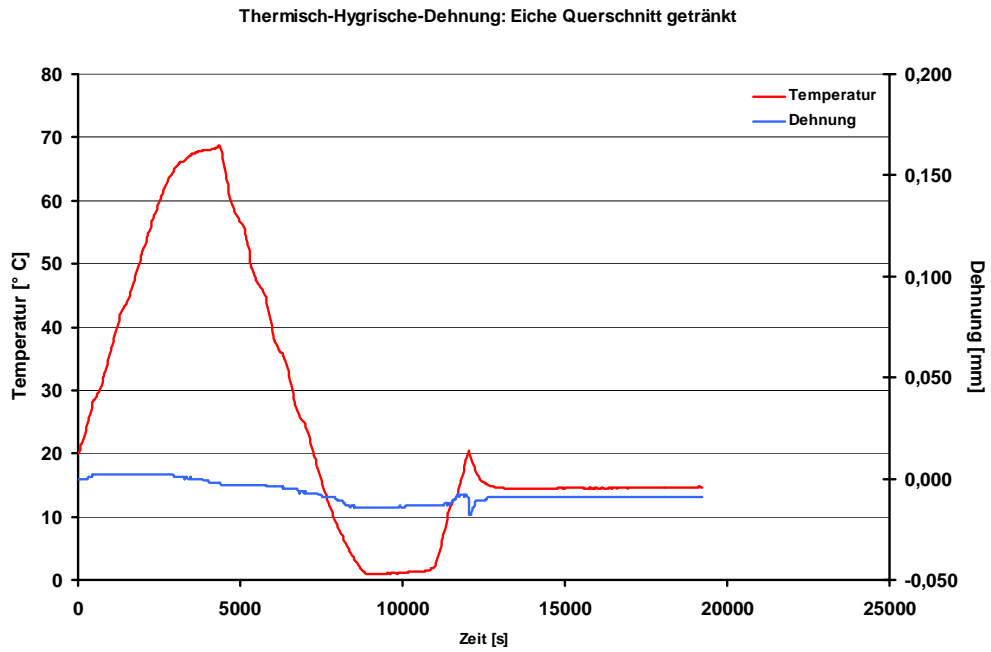
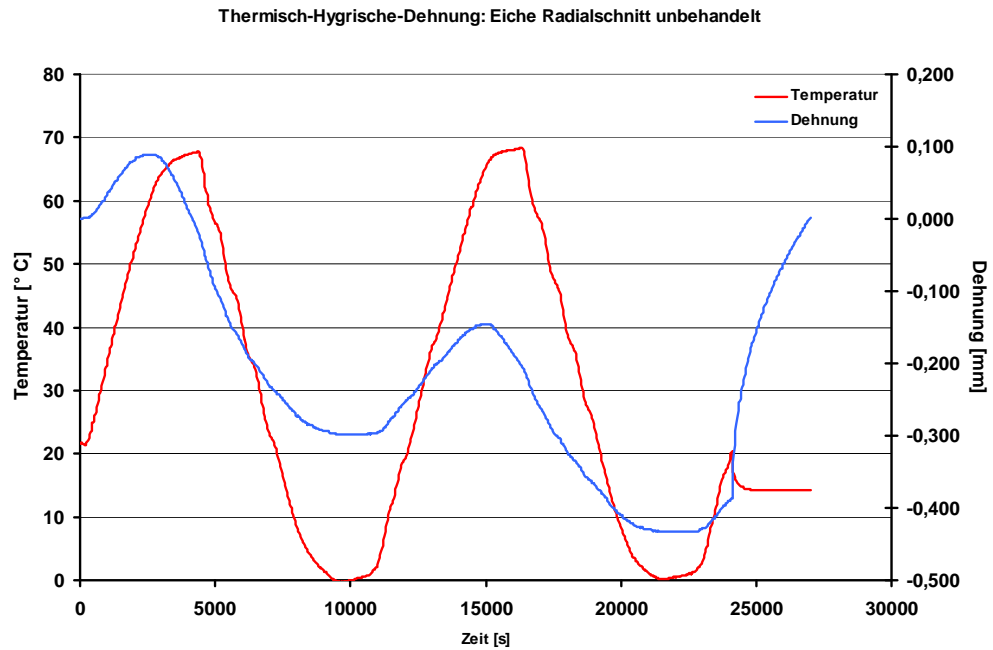
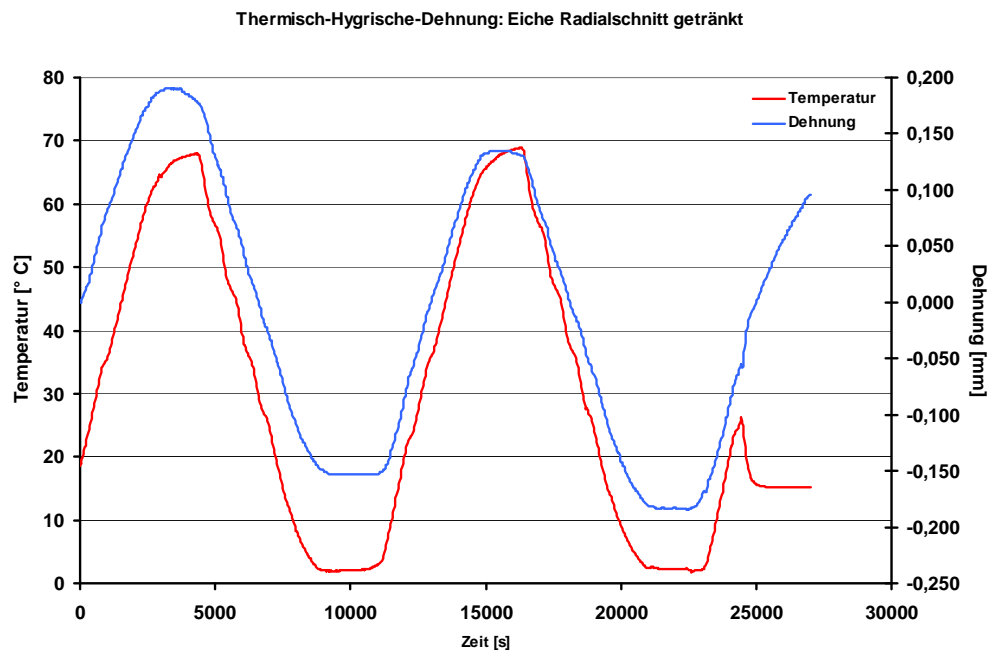


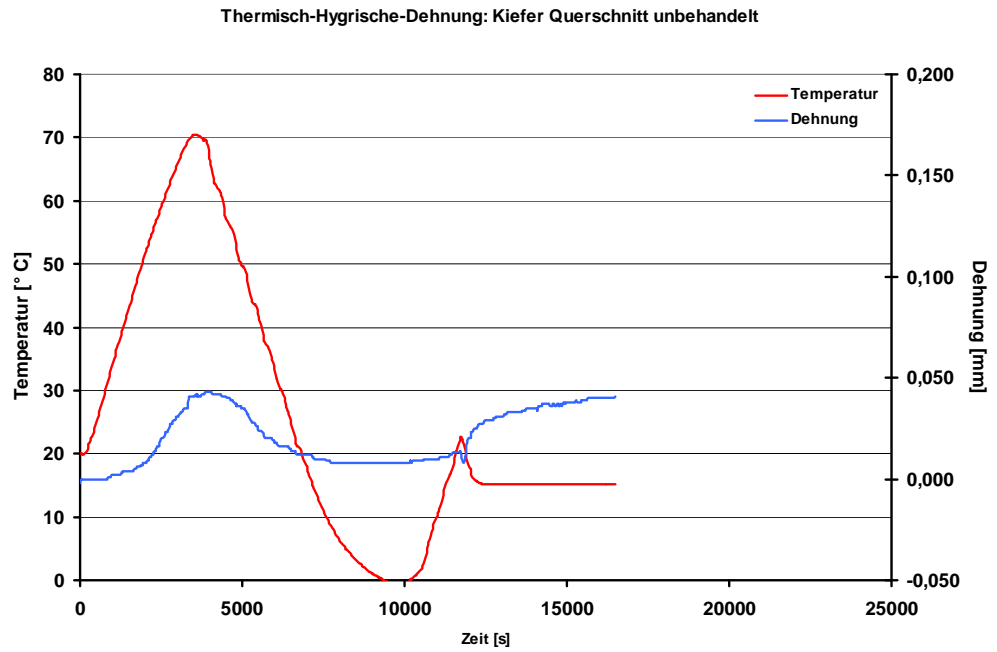
Diagramm 11: Thermisch-Hygrische-Dehnung Eiche Querschnitt (axial) getränkt



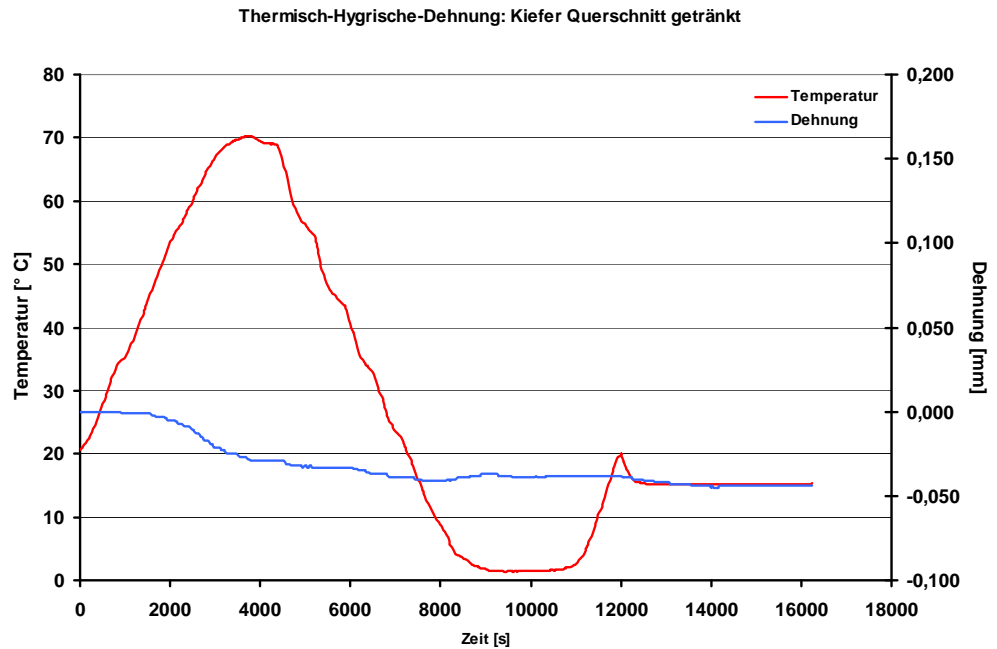
**Diagramm 12:** Thermisch-Hygrische-Dehnung Eiche Radialschnitt unbehandelt



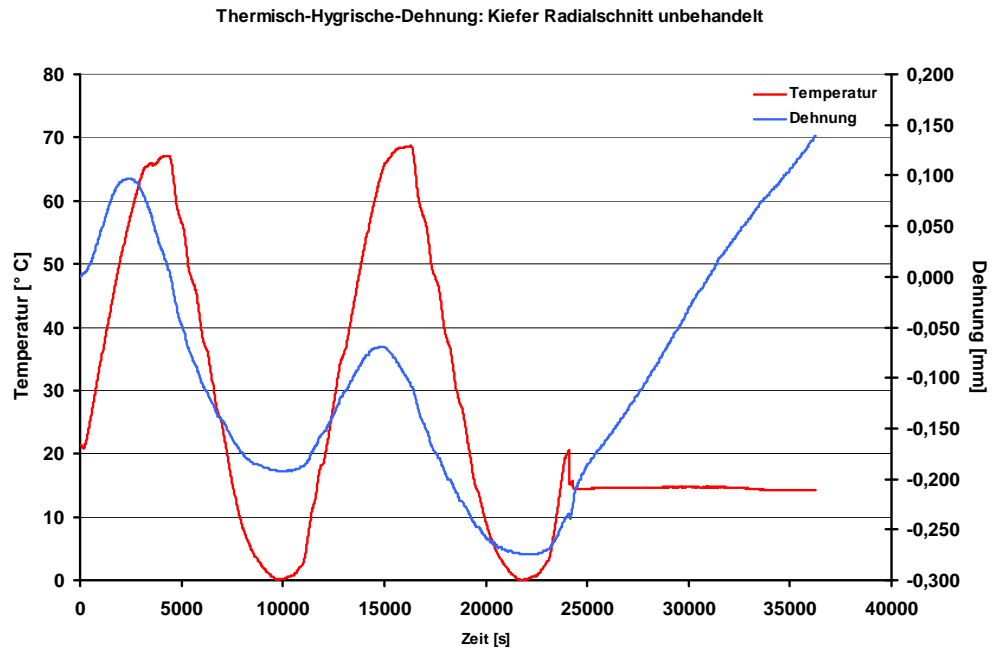
**Diagramm 13:** Thermisch-Hygrische-Dehnung Eiche Radialschnitt getränkt



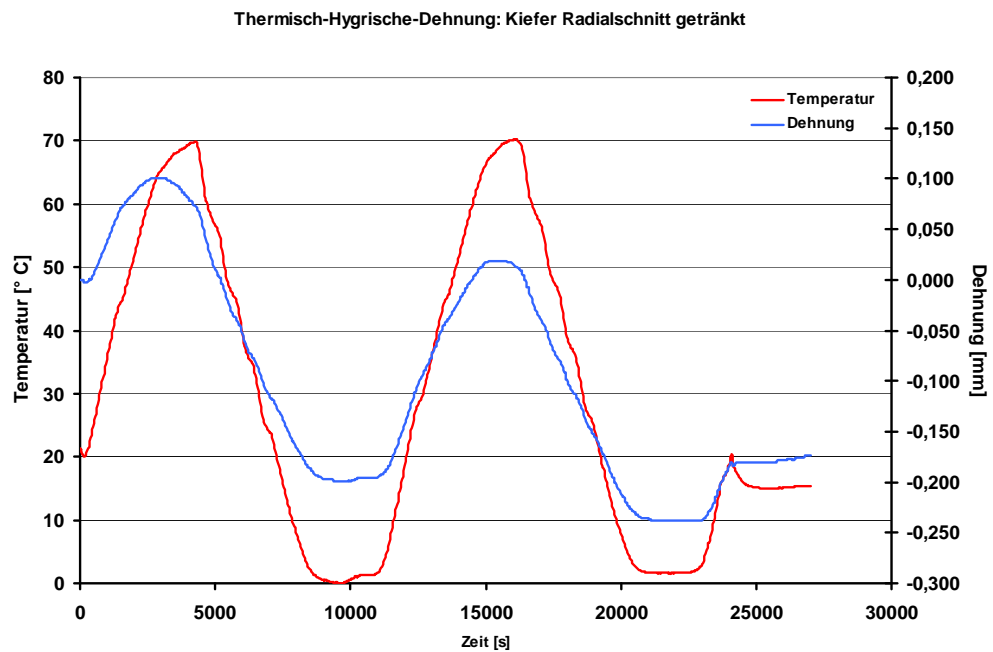
**Diagramm 14:** Thermisch-Hygrische-Dehnung Kiefer Querschnitt (axial) unbehandelt



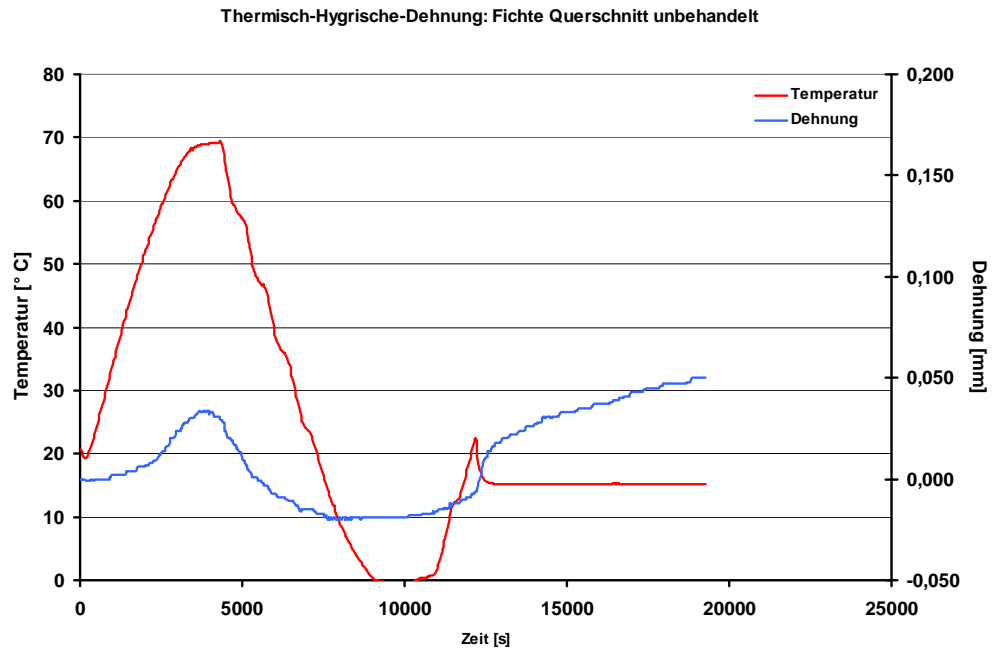
**Diagramm 15:** Thermisch-Hygrische-Dehnung Kiefer Querschnitt (axial) getränkt



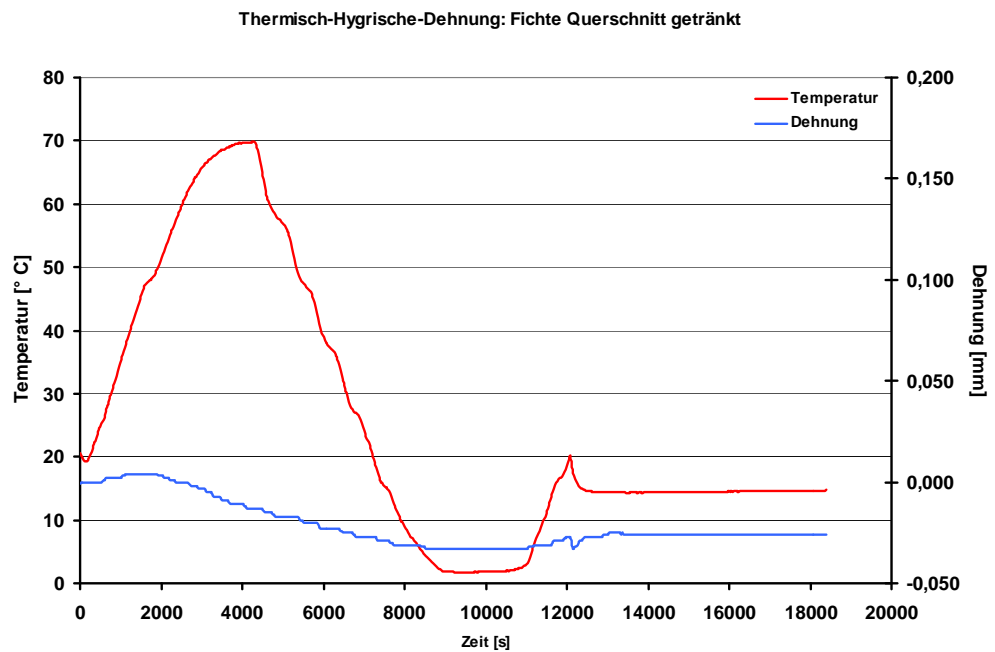
**Diagramm 16:** Thermisch-Hygrische-Dehnung Kiefer Radialschnitt unbehandelt



**Diagramm 17:** Thermisch-Hygrische-Dehnung Kiefer Radialschnitt getränkt

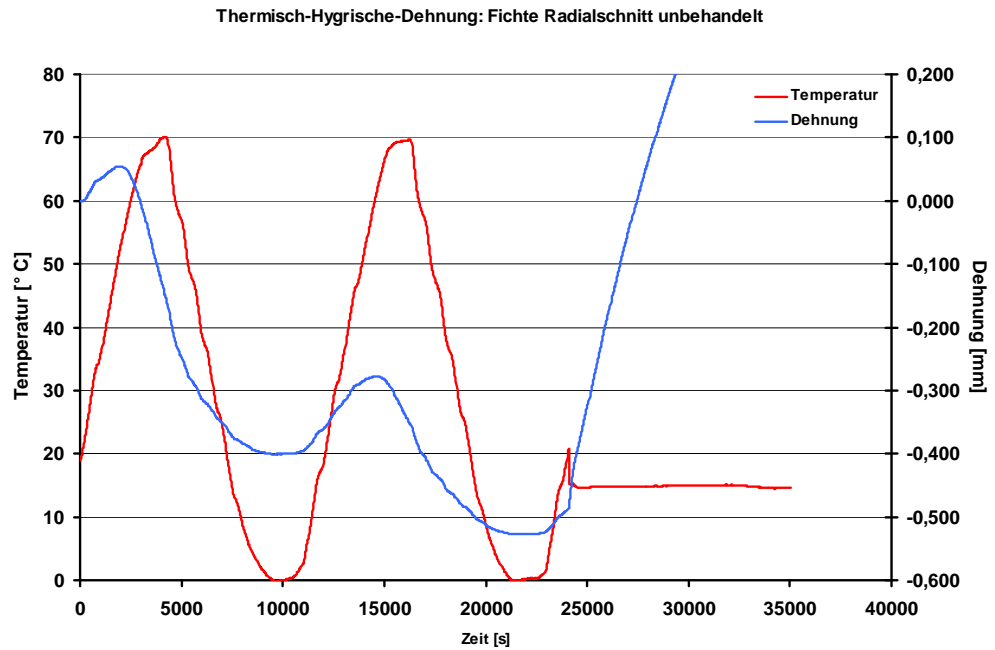


**Diagramm 18:** Thermisch-Hygrische-Dehnung Fichte Querschnitt (axial) unbehandelt

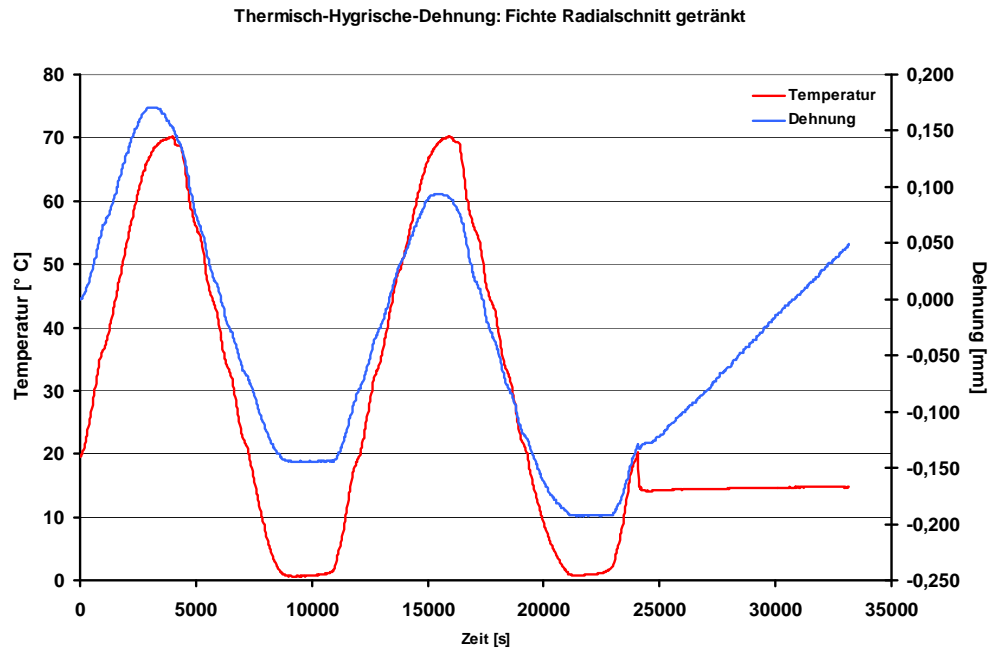


**Diagramm 19:** Thermisch-Hygrische-Dehnung Fichte Querschnitt (axial) getränkt



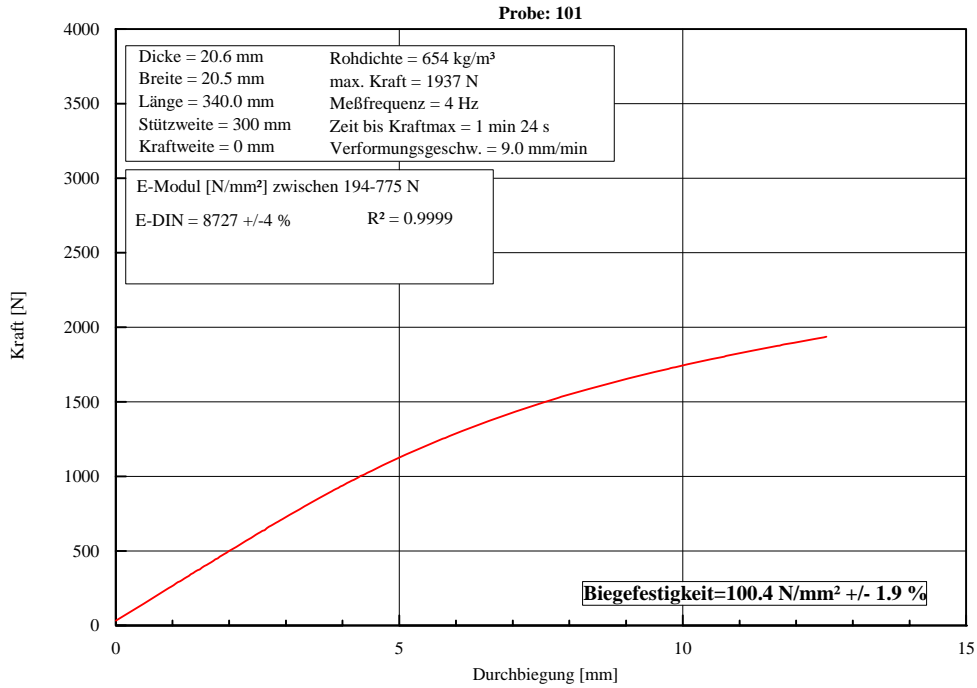


**Diagramm 20:** Thermisch-Hygrische-Dehnung Fichte Radialschnitt unbehandelt

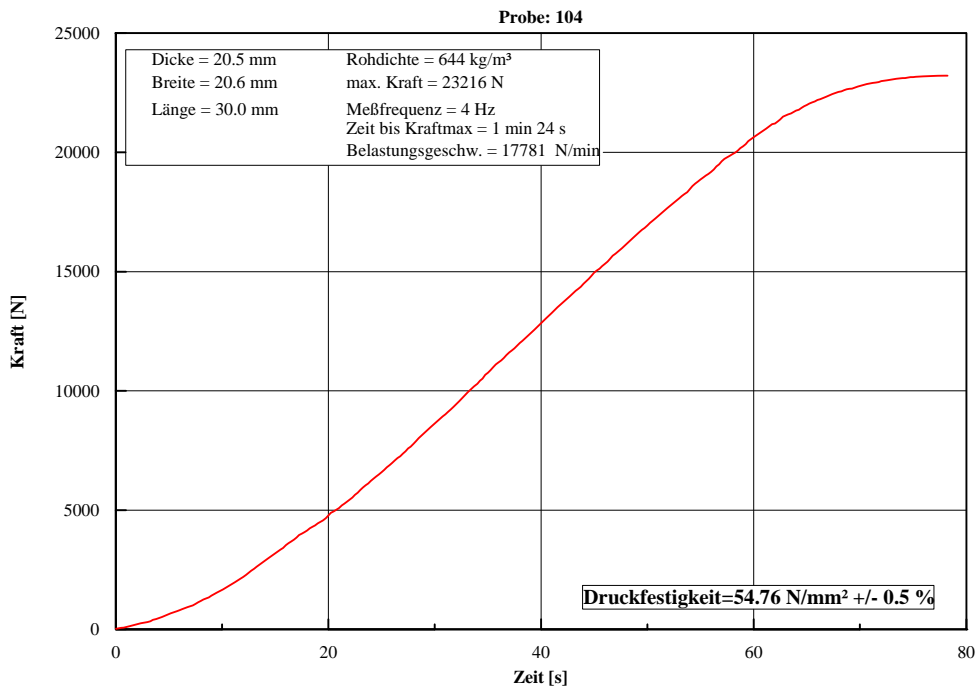


**Diagramm 21:** Thermisch-Hygrische-Dehnung Fichte Radialschnitt getränkt

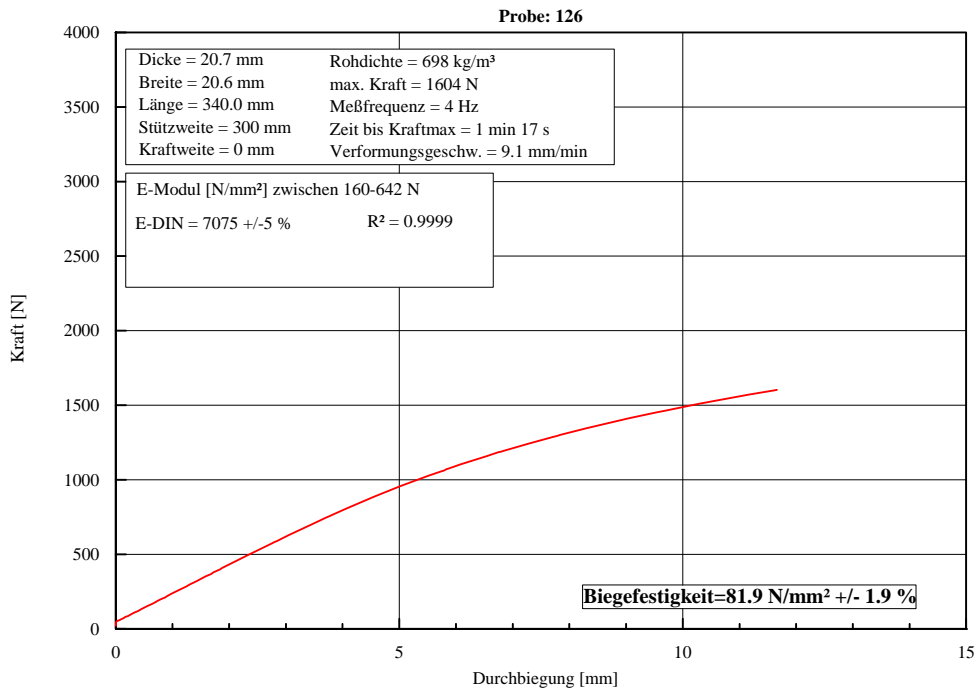
### Biegefestigkeit / Druckfestigkeit



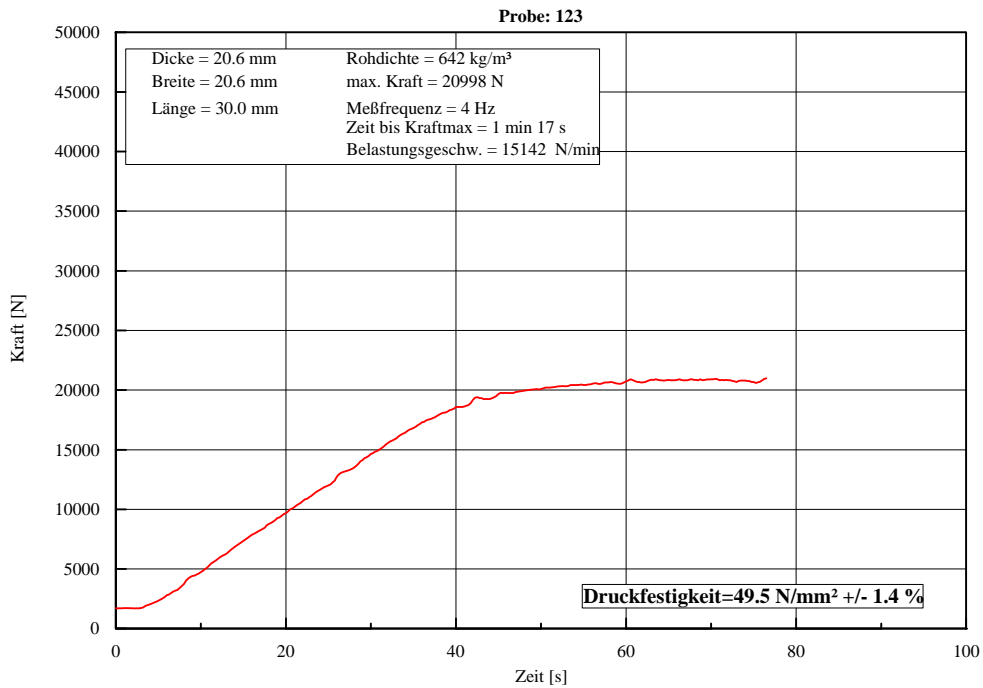
**Diagramm 22:** Biegefestigkeit Eiche unbehandelt



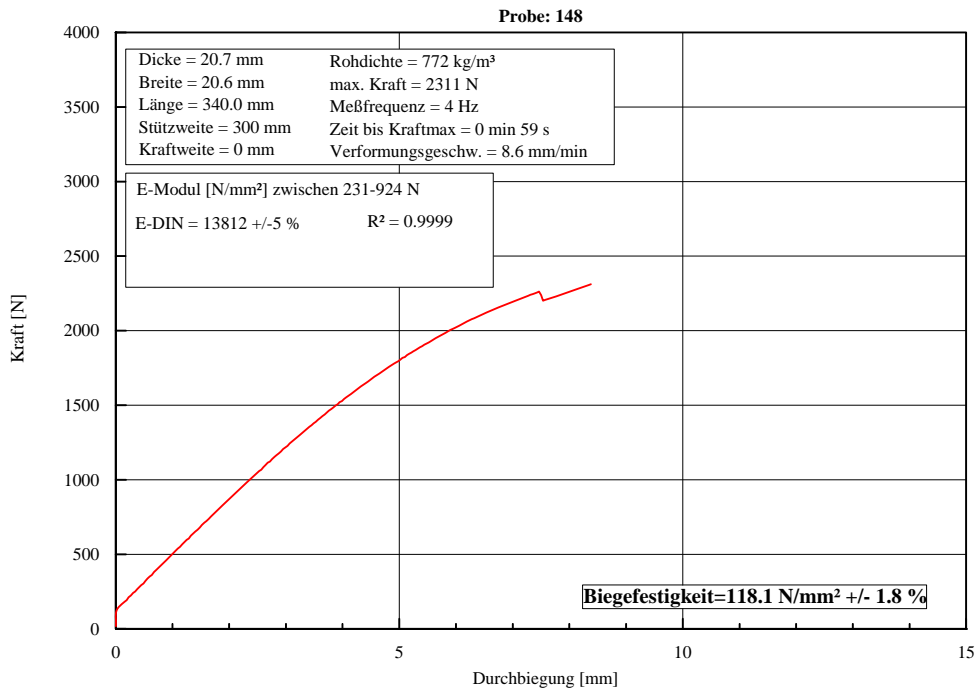
**Diagramm 23:** Druckfestigkeit Eiche unbehandelt



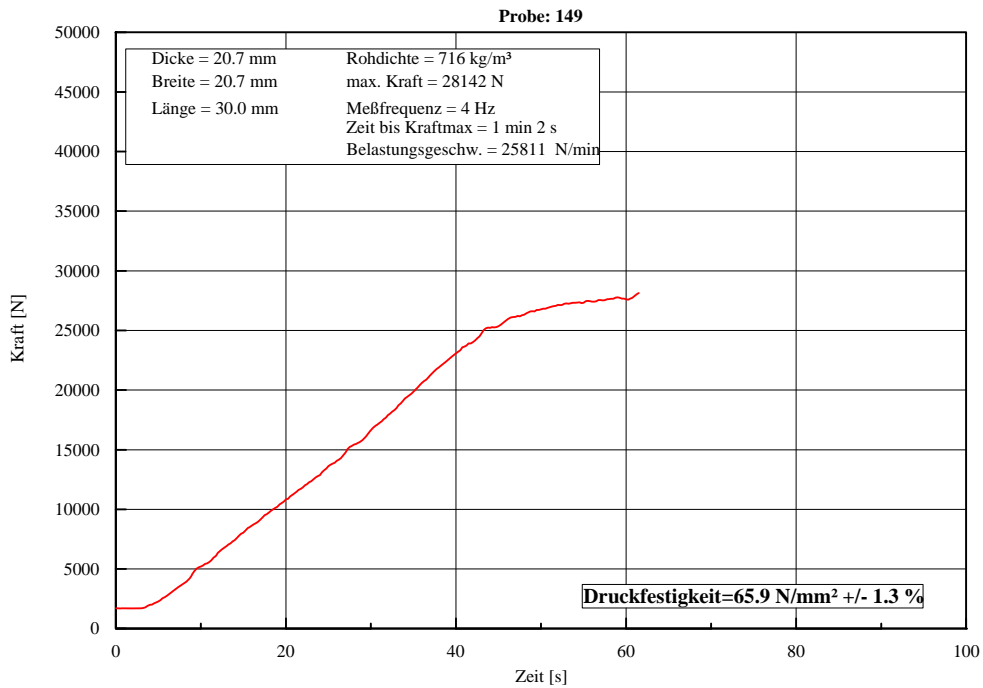
**Diagramm 24:** Biegefestigkeit Eiche getränkt



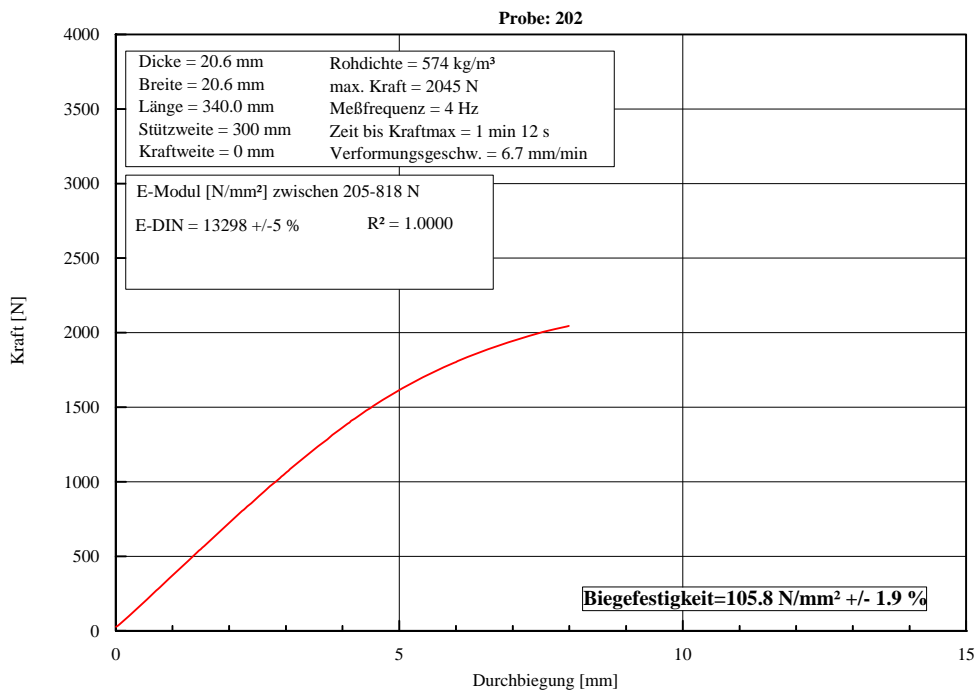
**Diagramm 25:** Druckfestigkeit Eiche getränkt



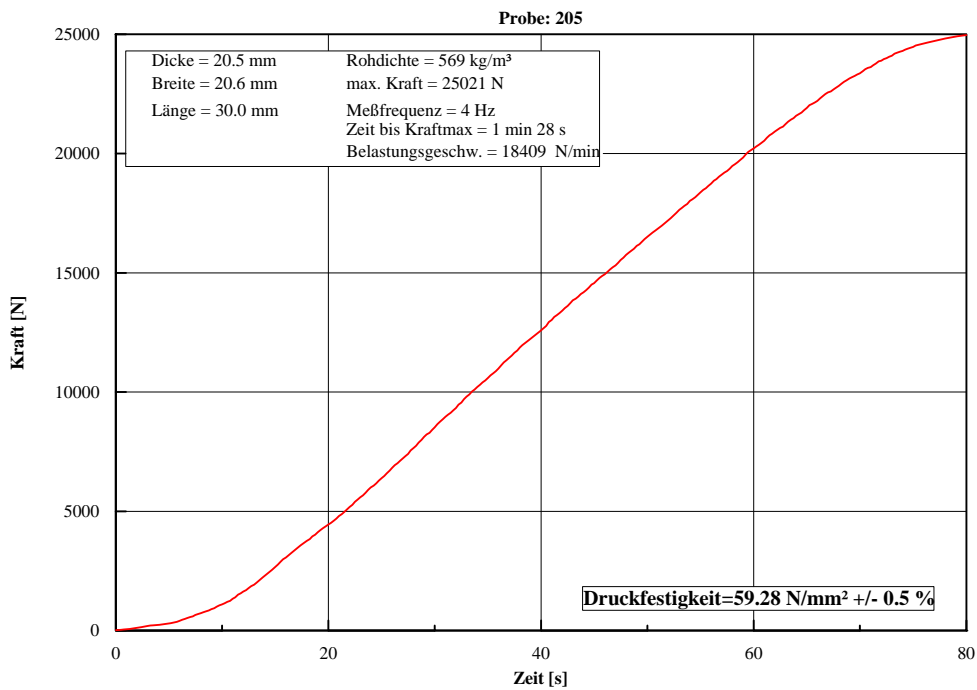
**Diagramm 26:** Biegefestigkeit Eiche getrocknet getränkt



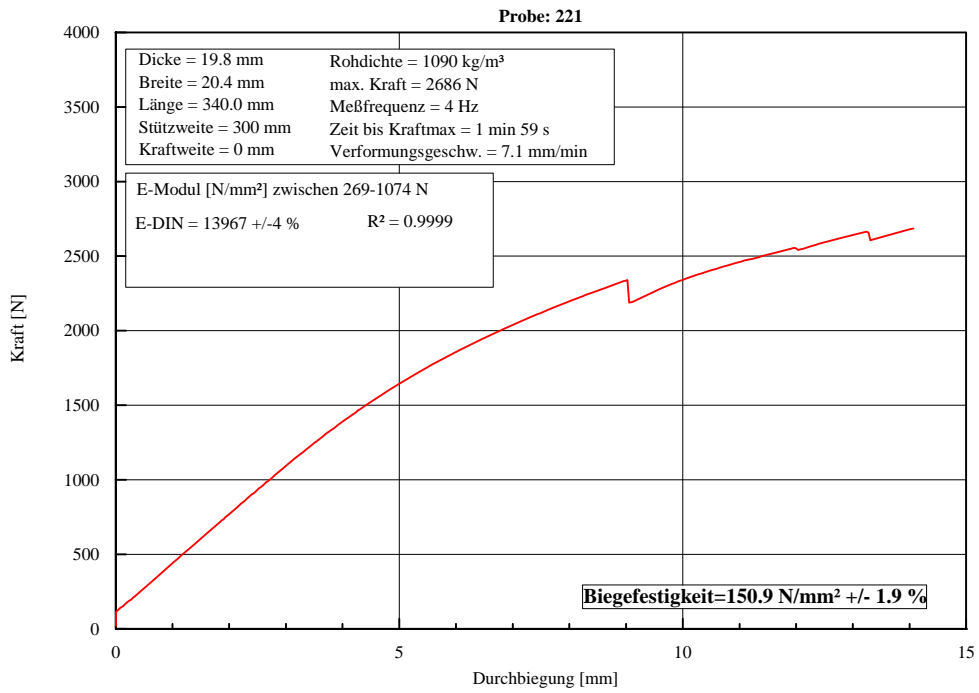
**Diagramm 27:** Druckfestigkeit Eiche getrocknet getränkt



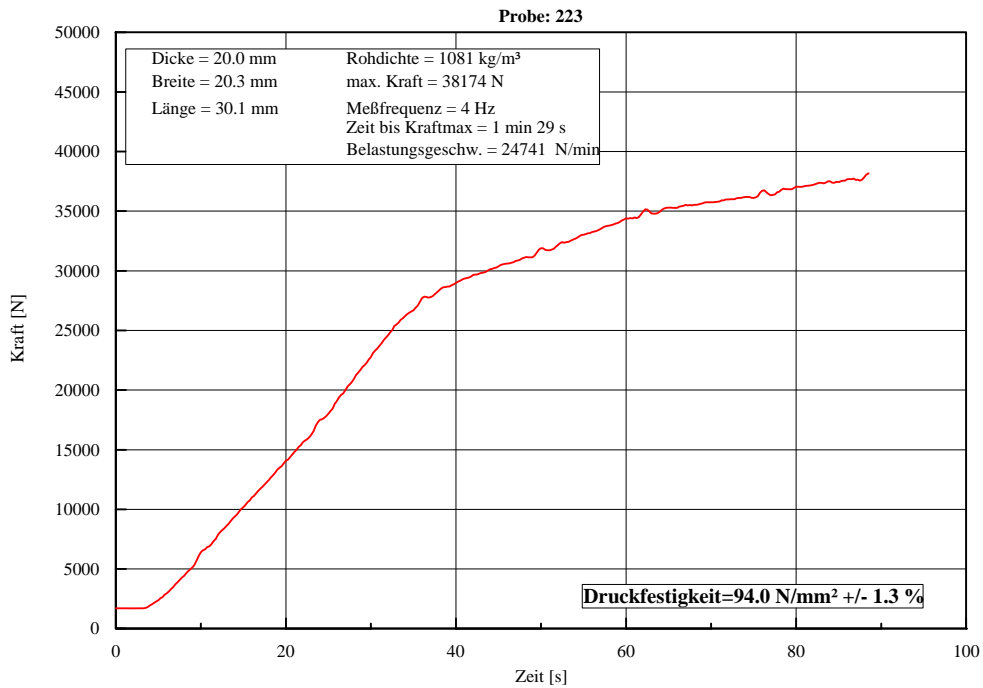
**Diagramm 28:** Biegefestigkeit Kiefer unbehandelt



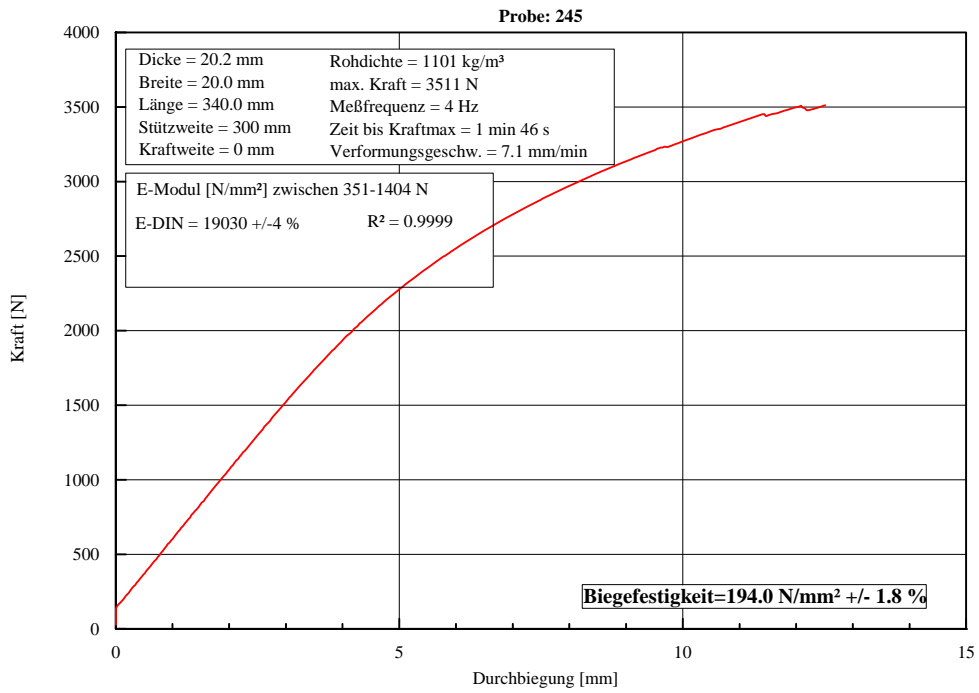
**Diagramm 29:** Druckfestigkeit Kiefer unbehandelt



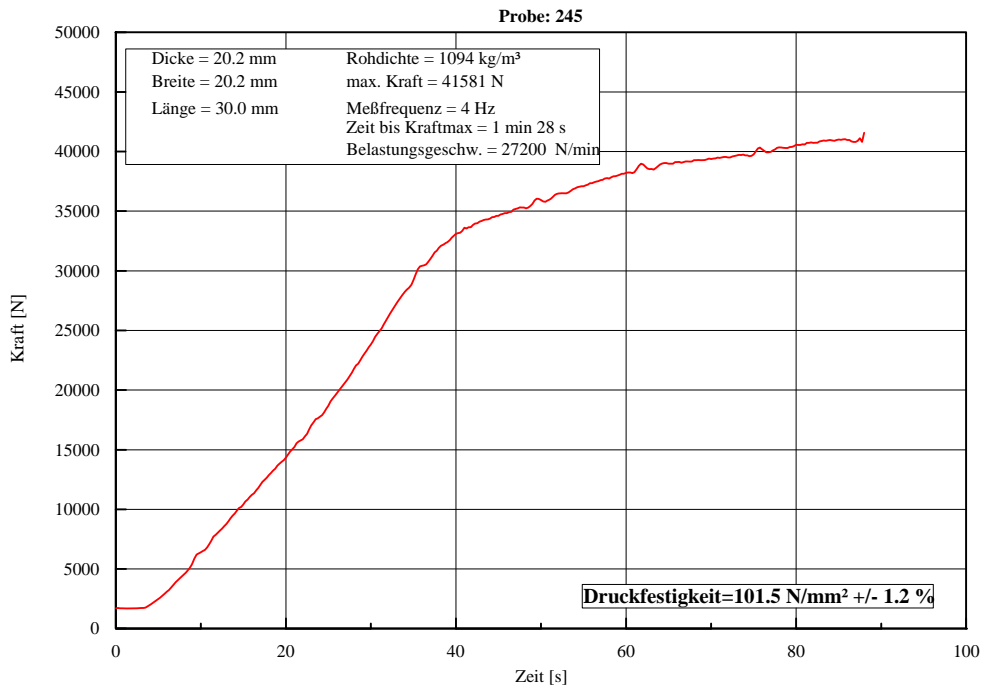
**Diagramm 30:** Biegefestigkeit Kiefer getränkt



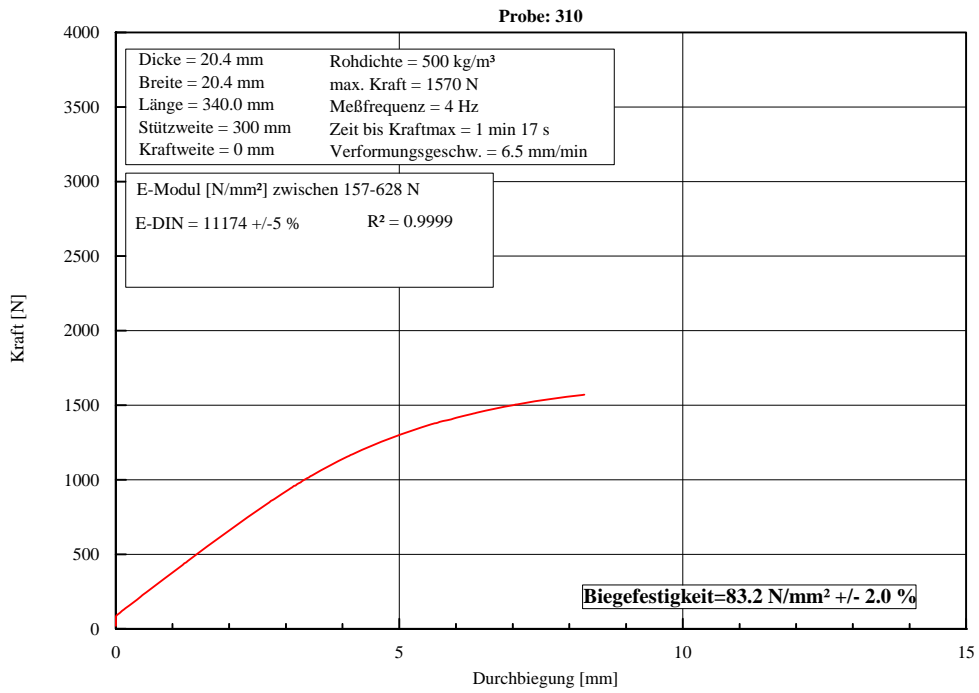
**Diagramm 31:** Druckfestigkeit Kiefer getränkt



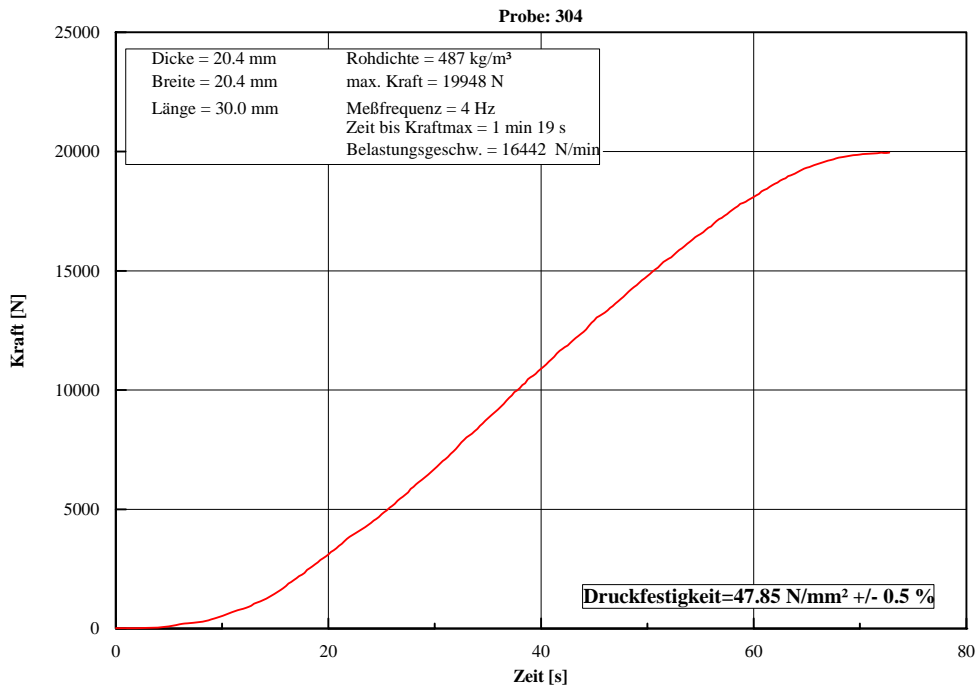
**Diagramm 32:** Biegefestigkeit Kiefer getrocknet getränkt



**Diagramm 33:** Druckfestigkeit Kiefer getrocknet getränkt

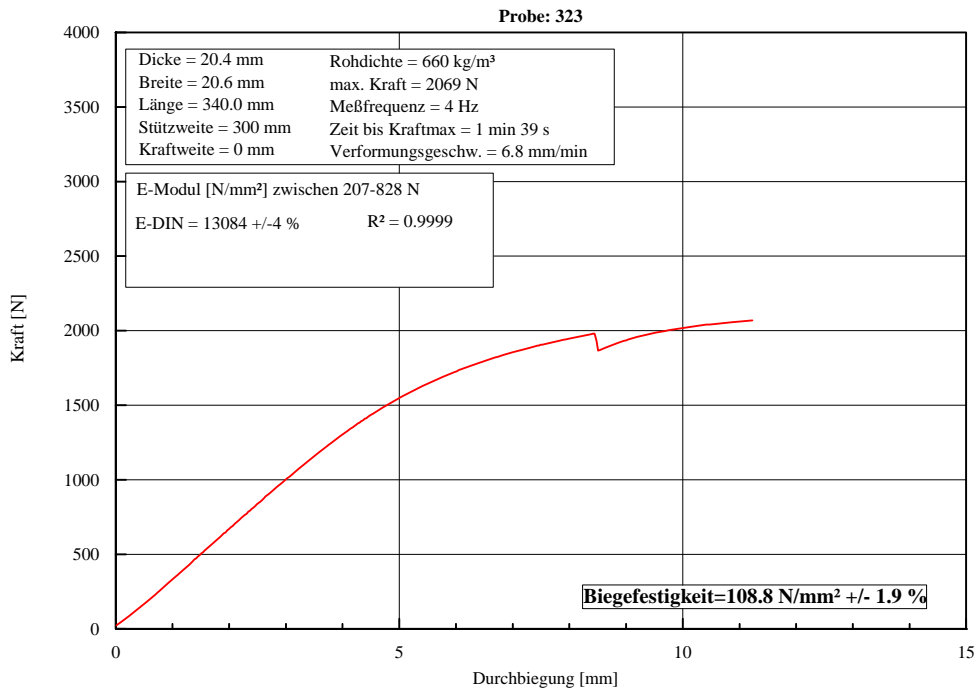


**Diagramm 34:** Biegefestigkeit Fichte unbehandelt

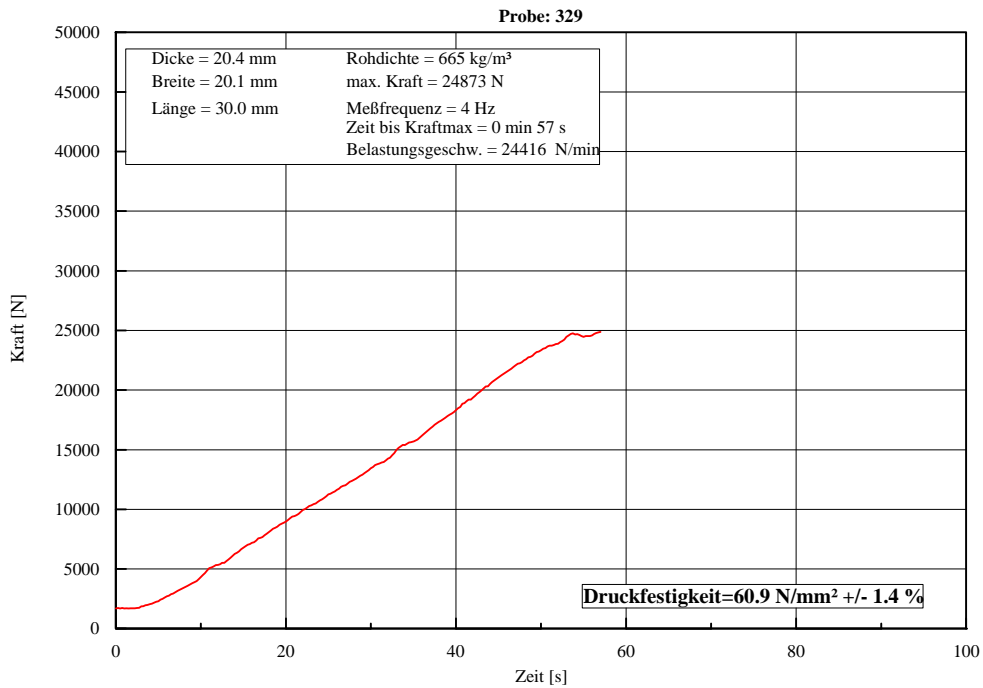


**Diagramm 35:** Druckfestigkeit Fichte unbehandelt

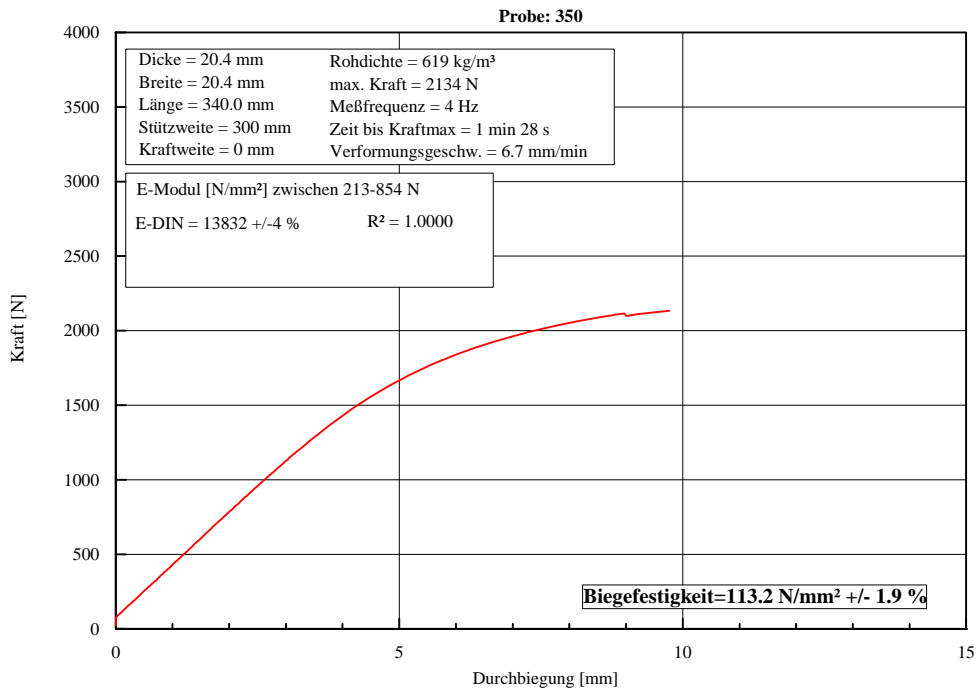




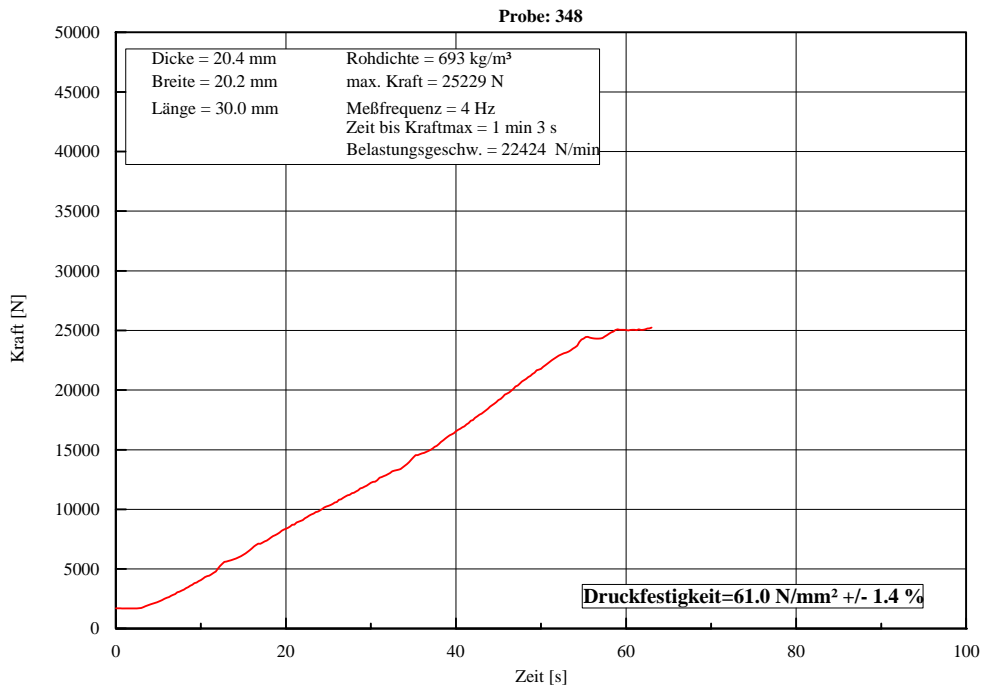
**Diagramm 36:** Biegefestigkeit Fichte getränkt



**Diagramm 37:** Druckfestigkeit Fichte getränkt



**Diagramm 38:** Biegefestigkeit Fichte getrocknet getränkt



**Diagramm 39:** Druckfestigkeit Fichte getrocknet getränkt