

Universität für Bodenkultur Wien

University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna

Department für Materialwissenschaften und Prozesstechnik

Institut für Physik und Materialwissenschaft

Leiter: Lichtenegger Helga, Univ. Prof. Mag. Dr.rer.nat.

Ermüdung von Ahorn bis zu sehr hohen Lastspielzahlen

**Masterarbeit
zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur**

eingereicht von:

KILLINGER MATTHIAS GÜNTER

Betreuer:

Mayer Herwig, Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn.

Mitbetreuer:

Teischinger Alfred, Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Dr. h. c

Schönbauer Bernd, Dipl.-Ing. Dr.techn.

Fitzka Michael, Mag. Dr.nat. techn.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Diese schriftliche Arbeit wurde noch an keiner Stelle vorgelegt.

Wien, am _____

Killinger Matthias, B.Eng.

Danksagung

Ich bedanke mich bei allen Beteiligten, die mir während der langen Laborphase und darüber hinaus bei der Recherche sowie der Analyse der Messergebnisse unterstützend zur Seite standen.

Zuerst möchte ich Bernd Schönbauer erwähnen, der mich so tatkräftig im Labor entlastet hat und mir durch sein starkes Interesse am Thema und seiner enormen Ambition vieles ermöglichte und darüber hinaus auch die Dauer der Messungen um ein Vielfaches verkürzt hat.

Zudem auch Herwig Mayer, der mir mit seinem enormen Wissensschatz, seiner wissenschaftlich/ kreativen Art und seinem großen Forscherdrang viel eröffnet und aufgezeigt hat. Auch die langen Gespräche über die Ergebnisanalyse waren für den Abschluss der Masterarbeit essenziell und für mich sehr bereichernd.

Darüber hinaus gilt mein Dank Daniel Irrasch, der trotz der vielen anderen Arbeiten mir immer wieder die Möglichkeit und die Zeit geschenkt hat, um meine Proben anzupassen zu verbessern und zu modifizieren. Zudem gab er mir Feedback und Verbesserungsvorschläge zur richtigen Bearbeitung der Probenoberfläche sowie für das weitere Vorgehen bei praktischen Anwendungen und vieles mehr.

Ich bedanke mich auch nachdrücklich bei Michael Fitzka, Ulrike Karr, Reinhard Schuller und Leon Ploszczanski die sich Zeit nahmen, mir in technischen Belangen, bei Störungen und Reparaturen sowie Geräteeinführungen wie beispielsweise die MTS oder das REM Hilfestellung zu leisten. Zudem haben sie sich auch Zeit genommen, Problemstellungen aus meiner Arbeit anzuhören und Möglichkeiten für Lösungen zu erörtern. Ich bedanke mich beim Institut für Physik und Materialwissenschaften und weiter bei der Universität für Bodenkultur für die Möglichkeit, an einem so spannenden Thema forschen zu können und das mit einem so hilfsbereiten, aktiven und ambitionierten Kollegium.

An dieser Stelle möchte ich auch meiner Familie meinen Freunden und meiner Freundin danken, die mich seelisch unterstützt und in schwierigen Zeiten motiviert haben. Meiner Familie danke ich dafür, dass sie mir nicht nur in Schulzeiten unterstützend zur Seite stand, sondern auch später im Studium emotionalen und finanziellen Rückhalt gaben. So danke ich hier auch meinem Onkel Franz Hansbauer, in dessen Schreinerei ich die ersten Proben für die Vorversuche fertigen durfte, wodurch auch alles seinen Anfang nehmen konnte. Meinen Freunden danke ich für die Ablenkung, die ich durch sie bekommen habe. Ganz speziell meinem Kommilitonen Simon Winter und seiner Freundin Marion Mühlberger. Unsere WG wurde erst relativ spät im Studium gegründet, wird aber für immer die beste bleiben, in der ich je gewesen bin. Ich danke ihnen für Ihre Freundschaft in einer sehr turbulenten Zeit und für ihre Art, die für mich so bereichernd und inspirierend war und in der ich mich geborgen fühlen konnte. Meiner Schwester, Jennifer Killinger, möchte ich danken, weil auch sie in der Wissenschaft zu Hause

ist und sich dadurch an einigen Abenden mit mir zu relevanten Themen aus meiner Arbeit auseinandersetzen konnte. Zu guter Letzt danke ich der Frau in meinem Leben, Veronika Wurth, die sich oft meiner Frustration angenommen hat und es nicht müde wurde, mir auch in diesen Phasen zur Seite zu stehen und mich nachhaltig zu inspirieren und motivieren. Sie gab mir oft die Kraft auch neben dem Beruf nicht den Faden zu verlieren und fokussiert zu bleiben.

Danke!

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt Grundlagenforschung und die Entwicklung einer Methodik zur zyklischen Beanspruchung und Ermüdung von Holz. Holz wird in verschiedenen Belastungsmodi getestet und das experimentell gefundene Ermüdungsverhalten analysiert. Proben aus Bergahorn wurden bei verschiedenen Spannungsamplituden im Bereich hoher („high-cycle-fatigue“, HCF) und sehr hoher Lastspielzahlen („very high cycle fatigue, VHCF) geprüft. Die Versuche wurden unter zyklischer Druckbeanspruchung, zyklischer Zugbeanspruchung und bei Zug-Druckbeanspruchung bei einer Frequenz von 50 Hz durchgeführt. Zudem wurden unter Zug-Druckbeanspruchung Versuche mit der Ultraschall-Resonanzmethode bei einer Prüffrequenz von 20 000 Hz durchgeführt und mit den bei 50 Hz gewonnenen Daten verglichen. Optische Analysen erfolgten mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskops und eines Lichtmikroskops. Die gefundenen Ermüdungseigenschaften und Versagensgrenzen, sowie die Bruchbilder wurden analysiert, und derart das Ermüdungsverhalten von Ahorn charakterisiert.

Schlagwörter: Holz, Ermüdung, Bergahorn, high-cycle-fatigue, 50Hz; 20.000Hz

Abstract

The content of this master thesis is basic research and the development of a methodology for fatigue testing of wood. It's task is to test the cyclic loading of wood with different load modes and to analyse the resulting fatigue behaviour. For this purpose, samples made of great maple were subjected to various stress amplitudes in the high cycle fatigue (HCF) and very high cycle fatigue (VHCF) regime. The resulting mechanical properties, failure limits, measurement data, as well as the created crack images were analysed in order to characterize the fatigue behaviour of wood. Failure of wood under cyclic forces are compared to spontaneous failure mechanism. Cycling frequency of 50 Hz and for comparison at a frequency of about 20 000 Hz was used. Visual analyses were carried out by taking pictures with a scanning electron microscope and with a light microscope.

Keywords: cyclic, wood, fatigue, great maple, high-cycle-fatigue, 50Hz; 20.000Hz

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	2
Danksagung	3
Kurzfassung	5
Abstract	6
Inhaltsverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	10
1 Einleitung	12
2 Theoretische Grundlagen	14
2.1 Aufbau des Holzes	14
2.1.1 Holzstrukturmerkmale im makroskopischen Bereich.....	14
2.1.2 Holzstrukturmerkmale im mikroskopischen Bereich.....	15
2.1.3 Holzstrukturmerkmale im sub-mikroskopischen Bereich.....	16
2.1.4 Holz als Mikro-/Nanoverbundpolymer	17
2.2 Rohdichte von Holz	18
2.2.1 Früh und Spätholzanteile	19
2.3 Feuchtegehalt von Holz	20
2.4 Festigkeitseigenschaften & -orientierung	21
2.4.1 Abweichungen in der Holzstruktur	21
2.4.2 Einfluss des Faserverlaufs	23
2.4.3 Einfluss der Belastungsrichtung	23
2.4.4 Einfluss der Temperatur.....	25
2.4.5 Einfluss der Feuchtigkeit.....	25
2.5 Rheologische Eigenschaften & Ermüdung von Holz.....	26
2.5.1 Spannungsrelaxation	26
2.5.2 Kriechen.....	26
2.5.3 Beschreibung der Viskoelastizität von Holz	27
2.6 Ermüdung von Holz.....	29
2.6.1 Definition der Ermüdung	29
2.6.2 Versagensmodell einer Ermüdung.....	29
2.6.3 Dauerfestigkeit	32
2.6.4 Ermüdungsbemessung nach Eurocode 5, Teil 2	37
2.6.5 Geometrischer Einfluss der Probengröße auf die Dauerfestigkeit ...	38
2.6.6 Einfluss von Kerben auf die Ermüdungsfestigkeit.....	38

2.7	Methodik zu Ermüdungsversuchen	38
	Wöhlerkurve	41
3	Material & Methodik	43
3.1	Struktur & Aufbau von Bergahorn	43
3.1.1	Erkennungsmerkmale	43
3.1.2	Physikalisch Eigenschaften.....	43
3.1.3	Mechanische Eigenschaften	45
3.2	Verwendete Prüfgeräte	45
3.2.1	High-Cycle-Fatigue mit Material-Testing-System (MTS 810)	45
3.2.2	Ultraschall-Ermüdungsprüfung.....	47
3.3	Verwendete Analysegeräte	48
3.3.1	Dehnmessstreifen mit Messbrücke	48
3.3.2	Lichtmikroskopie Keyence VHX 5000	48
3.3.3	Rasterelektronenmikroskopie.....	49
3.4	Prüfmethode	49
4	Versuchsdurchführung & Ergebnisse.....	50
4.1	Probenvorbereitung.....	50
4.1.1	Herstellung.....	51
4.1.2	Lagerung.....	51
4.1.3	Modifikation der Probe für den Zug- und Wechselbereich	51
4.1.4	Ermittlung des Elastizitätsmoduls für Ultraschallmessung	53
4.1.5	Dichtermittlung des Prüfbereichs	54
4.2	Anpassung der Versuchsdurchführung.....	55
4.2.1	Kühlung des Aufbaus	55
4.3	Versuchsdurchführung	56
4.3.1	Programmablauf des Versuchs.....	56
4.3.2	Rechnerische Ermittlung des Spannungsniveaus.....	57
4.3.3	Gewichtete Spannungsschwingbreite	58
4.4	Prüfung bei zyklischer Druckbeanspruchung, $R=10$	59
4.5	Prüfung bei zyklischer Zugbeanspruchung, $R=0.1$	60
4.6	Prüfung bei zyklischer Wechselbeanspruchung, $R=-1$	62
4.7	Ultraschall- Ermüdungsversuche, $R=-1$	63
4.7.1	Messdaten im Ultraschallbereich	63
4.8	Vergleichbarkeit zwischen konventionellen und Ultraschall- Ermüdungsversuchen	65
4.8.1	Statistischer Vergleich der Messergebnisse	66
4.8.2	Berechnung des Varianzkoeffizienten.....	66
4.8.3	Graphische Auswertung des Varianzkoeffizienten	67

4.8.4	Temperaturen während der Ultraschallermüdung.....	68
4.9	Kriechen bei zyklischer Ermüdung.....	69
4.10	Fazit zur Ermüdungsprüfung.....	70
4.11	Bruchanalyse	70
4.11.1	Bruchmodus 1	70
4.11.2	Bruchmodus 2.....	71
4.11.3	Bruchmodus 3.....	71
4.11.4	Validierung des Bruchmodus für den Druckschwellbereich bei R=10 72	
4.11.5	Validierung des Bruchmodus für den Zugschwellbereich, R=0,1	73
4.11.6	Validierung des Bruchmodus für Zug- Druckbelastung bei 50 Hz und R=-1	74
4.11.7	Validierung des Bruchmodus für Zug-Druckbelastung bei 20 kHz und R= -1	75
4.12	Validierung der mikroskopischen Bruchfläche im Wechsel- & Ultraschallbereich	76
4.13	Fazit zur Bruchanalyse.....	77
5	Abschließendes Fazit	78
6	Ausblick.....	80
	Abbildungsverzeichnis.....	81
	Tabellenverzeichnis.....	86
	Literaturverzeichnis.....	88
	Anhang.....	92

Abkürzungsverzeichnis

A	Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung von Holz
AD	Accumulated Deformation (kumulierte Verformung)
CML	Mittellamelle der mikroskopischen Holzstruktur
DIN	Deutsche-Industrie-Norm
EN	Europäische Norm
E_i	Biege-Elastizitätsmodul [N/mm ²]
E-Modul	Elastizitätsmodul [N/mm ²]
HCF	High Cycle Fatigue (Ermüdung bei hohen Zykluszahlen)
LCF	Low Cycle Fatigue (Ermüdung bei niedrigen Zykluszahlen)
LVL	Laminated Veneer Lumber (Furnierschichtholz)
MFV	Micro-Fibrillen-Winkel
MTS	Material Testing System (Material-Test-System)
N	Lastspielzahl bei Bruch
n	Lastspielzahl
P	Primärwand der mikroskopischen Holzstruktur
PF	Probenform
R_{krit}	kritischer Verhältniswert der zyklischen Belastung
R	Spannungsverhältnis
REM	Raster-Elektronen-Mikroskop
S	Spannungsniveau [%]
S 1-3	Sekundärwände 1 bis 3 der mikroskopischen Holzstruktur
S1	äußere Sekundärwand
S2	zentrale Sekundärwand
S3	innere Sekundärwand
u	Holzfeuchtigkeit [%]
VHCF	Very High Cycle Fatigue (Ermüdung bei sehr hohen Zykluszahlen)

Kennzahlen:

ϵ	Dehnung
$\epsilon(t)$	Dehnung unter variabler Zeiteinwirkung - Kriechdehnung
f_t	Zeitabhängige Durchbiegung [N/mm ²]
$f_{t,c}$	Zugfestigkeit von feuchtem Holz unter tangentialer Belastung
$f_{c,c}$	Druckfestigkeit von feuchtem Holz unter tangentialer Belastung
f_{t0}	Zugfestigkeit [N/mm ²]
f_{c0}	Druckfestigkeit [N/mm ²]
f_0	elastische Durchbiegung
$H_{B,0}$	Brinellhärte bei 0° zur Faserrichtung [N/mm ²]
$H_{B,90}$	Brinellhärte bei 90° zur Faserrichtung [N/mm ²]
l_{max}	longitudinales maximales Schwindmaß
K	Bemessungsschwingbreite
q_r	radiales Schwindmaß
q_t	tangentiales Schwindmaß
r_{max}	radiales maximales Schwindmaß
σ	Spannung [N/mm ² bzw. MPa]
$\sigma_{b,w}$	Biegeermüdungsfestigkeit
$\sigma_{z,d,w}$	Zug-, Druck- Ermüdungsfestigkeit
σ_m	Mittelspannung
σ_a	Spannungsamplitude
σ_o	Oberspannung
σ_u	Unterspannung
$\Delta\sigma$	Spannungsschwingbreite
t_{max}	tangentiales maximales Schwindmaß
φ	Kriechzahl
GFK	Glas-Faserverstärkter Kunststoff
GLARE	Glas-Faserverstärkte Aluminiumlaminat

1 Einleitung

Bei Verwendung von Holz als Werkstoff für Brücken, Achterbahnen, Rotorblätter oder bei Bauten, die wechselnden Windverhältnissen ausgesetzt sind, ist das Ermüdungsverhalten von Bedeutung. Ermüdung ist eine Materialschädigung, die durch vielfache Wiederholung von kleinen Belastungen, (weit) unter den statisch kritischen Werten zurück zu führen ist. Wiederkehrende Belastungen führen zu mikroskopischer Schädigung, zur Bildung von Anrissen, zum Wachstum der Risse und letztendlich zum Bruch des Bauteils.

Die hohe Leistungsfähigkeit von Holz bei Ermüdungsbeanspruchung wurde bereits seit dem 19.Jhd. durch Bauwerke wie Eisenbahnbrücken und später im Flugzeugbau eindrucksvoll bewiesen. Neuerdings wird auch im Hochhausbau wieder auf Holz gesetzt. Plattenförmige Bauteile aus Holz sind für die Anwendung in hohen Türmen für die Bauindustrie interessant. (Aicher & Zachary , 2015) Ein Beispiel ist das HOHO (Holz-Hochhaus) in Wien. Wind ist eine Ursache für wechselnde Belastungen, die potenziell zu einer Ermüdung der eingesetzten Bauteile führen kann. Diese Beispiele zeigen, dass bei vielen Anwendungen von Holz die Ermüdungseigenschaften von großer technischer Bedeutung sind.

Die ersten systemischen Untersuchungen zur Materialermüdung wurden im 18 Jahrhundert von August Wöhler durchgeführt. Er untersuchte den Bruch von Radwellen bei Eisenbahnen, welche obwohl unterhalb der statischen Festigkeit belastet, dennoch brachen. Wöhler war damit der erste, der Materialermüdung als Ursache für Bruch erkannte. Versagt ein Bauteil, so kann dies auf zwei verschiedene Arten geschehen. Zum einen führt eine zu hohe statische Belastung zu Knicken, Brechen oder Fließen. Zum anderen kann eine oftmals wiederkehrende Be- und Entlastung eine Ermüdung des Werkstoffes bewirken, die schlussendlich zum Versagen des Bauteils führt.

Wegen der Materialermüdung muss die Auslegung bei schwingend beanspruchten Bauteilen deutlich unter der statischen Festigkeit des verwendeten Werkstoffes liegen. Der Prozess der Ermüdung hängt neben dem Werkstoff auch noch von Faktoren wie Bauteilgeometrie (Kerben), Spannungsart (Beanspruchungstyp), Oberflächengüte, Verfestigung durch Wärmebehandlung bzw. Oberflächenverfestigung und von chemischen Einflüssen auf die Oberfläche (z.B. Korrosion) ab. Wegen der vielen Einflussfaktoren ist die Bestimmung der maximal erlaubten Be- und Entlastungen bei schwingender Beanspruchung oft aufwendig. Eine einmalige Be- und Entlastung wird als Lastspiel bezeichnet. Je nach auftretender Zahl an Lastspielen auf das Bauteil liegt dessen Belastung im low cycle

fatigue (LCF, bis 10^4 Lastspiele), high cycle fatigue (HCF, $10^4 - 10^7$ Lastspiele) oder im very high cycle fatigue Bereich (VHCF, oberhalb 10^7 Lastspiele). Die Beurteilung der Ermüdungsbelastung erfolgt auf Basis der Spannungsamplituden und der Mittelspannung. (Radaj & Vormwald, 2007) (Schijve, 2009)

Materialermüdung ist als besonders sicherheitsrelevant anzusehen. Zum einen, weil es dadurch bei wesentlich niedrigerer Belastung zum Versagenseintritt kommt als bei statischer Belastung und zum anderen, da die Methoden zur Dimensionierung von Bauteilen bei statischer Belastung wesentlich besser dargelegt und vollständiger sind, als jene der dynamischen Belastung durch Ermüdung. Zudem wird die Bemessung dadurch erschwert, dass vorhandene Messdaten meist statischer Natur sind. Die Streubereiche der Ermüdungseigenschaften sind groß und zusätzlich von vielen Faktoren, wie oben erwähnt, beeinflusst. Insgesamt kann bei ca. 30% aller technischen Versagensfälle von Ermüdung als Ursache ausgegangen werden. (Schijve, 2009)

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Aufbau des Holzes

Holz ist ein heterogener Rohstoff, der entsprechend seiner Gattung (Laubholz/ Nadelholz) und vieler anderer Faktoren wie:

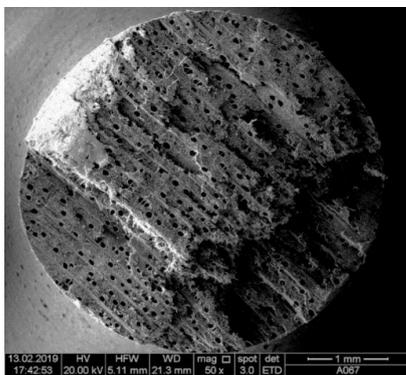
- Standort,
- Klima,
- Besonnung,
- Bestandsdichte
- Bodenbeschaffenheit,
- Grundwasserstand und
- Windrichtung

unterschiedliche Eigenschaften physikalischer und mechanischer Natur ausprägen wird. (Rug & Mönck, 2015)

2.1.1 Holzstrukturmerkmale im makroskopischen Bereich

Die drei Hauptfunktionen der Strukturmerkmale bei Holz sind die Wasserleitung, die Stoffspeicherung und Festigung. Entsprechend dieser Funktionen im lebenden Baum werden 3 Gewebearten unterschieden. Das Leit-, Speicher- und Festigungsgewebe. Neben den Hauptgewebearten werden noch 2 Nebenarten unterschieden. Das Sondergewebe, wie zum Beispiel für Reaktionsholz und das Exkretgewebe, welches für die Bildung von Harzkanälen zuständig ist. Die Darstellung dieser Gewebe wird in 3 Hauptschnittrichtungen gemacht. Diese sind Querschnitt, Tangentialschnitt und Radialschnitt. Somit sind Größe, Form, Anordnung und Aufbau gut erkennbar. Die Markröhre oder auch das Mark des Holzes befindet sich in der Mitte des Holzes. Splintholz dient dem lebenden Baum als Wassertransportweg. Zudem enthält es Reservestoffe wie Zucker. Das macht es anfälliger für holzerstörende Bakterien und Pilze und ist daher nicht so dauerhaft. Innerhalb des Splints sind lebende Zellen vorhanden. Diese gehen radial gesehen von außen nach innen zu. Kernholz wird aufgrund seines Feuchtegehalts und der Färbung vom restlichen Holzquerschnitt unterschieden. Ahorn zum Beispiel zählt zu den Baumarten, die einen fakultativen Falschkern bilden. Vergleicht man nun Splint- und Kernholz, so weist das Kernholz keine lebenden Zellen auf. Jahrringe bestehen aus Früh- und Spätholz. Sie setzen sich aus Zuwachsschichten zusammen, die sich je nach Jahreszeit ausbilden. Vergleicht man Früh- und Spätholz der Jahrringe, so unterscheiden sich diese deutlich. So bilden Holzzellen je nach Jahreszeit eine Holzstruktur, die in Anzahl, Art und

Größe sowie der Verteilung unterschieden werden können. Beispielsweise bei Ahorn erfolgt der strukturelle Wechsel zwischen Früh- und Spätholz allmählich. Dabei ist Frühholz, welches zu Beginn der Wachstumsperiode gebildet wird, meist weitleumig und dünnwandig. Spätholz hingegen, welches zum Ende der Wachstumsperiode aufgebaut wird, ist wiederum meist englumig und dickwandig in ihrer Zellbeschaffenheit. Sie werden zur Festigung des Baumes hergestellt. *Abbildung 2.1 Bruchfläche der Probe A067 aus Bergahorn.* Die Rohdichte ist bei Spätholz höher als bei Frühholz, und das Quellen und Schwinden ist im Spätholz ebenfalls stärker ausgebildet. Wie die Spät- und Frühholz zonen im Baum ausgebildet werden, bzw. welchen flächenmäßigen Anteil die Zonen im Querschnitt ausbilden, ist wiederum von vielen Faktoren abhängig. Dabei kommt es auf die



Holzart, das Klima, den Boden, sowie das Baumalter und äußerliche Schädigungen an. Mit dem Verhältnis von Früh- zu Spätholz gehen die meisten physikalisch-mechanischen Eigenschaften eines Baumes einher. Bergahorn gehört zu den zerstreutporigen Hölzern. Das bedeutet, dass über den gesamten Querschnitt ähnlich große Gefäße verteilt sind. (Fellner, Teischinger, & Zschokke, 2006; Emmeler, et al., 2012)

Abbildung 2.1 Bruchfläche der Probe A067 aus Bergahorn

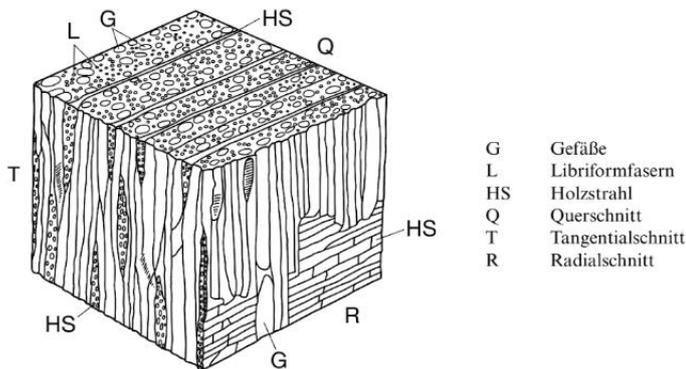
2.1.2 Holzstrukturmerkmale im mikroskopischen Bereich

Laubholz ist vom entwicklungsgeschichtlichen Standpunkt her jünger als Nadelholz. Die Zelltypen mit entsprechenden Funktionen können aus Tabelle 2.1 entnommen werden und sind schematisch in der Abbildung 2.2 dargestellt.

Zelltyp	Anordnung	Form	Funktion
Gefäße/ Tracheen	Axial	Langgestreckt	Wasserleitung
Librifasern	Axial	Langgestreckt	Festigung
Tracheiden Gefäßnähe	Axial	Langgestreckt	Wasserleitung
Fasertracheiden	Axial	Langgestreckt	Festigung
Holzstrahlparenchym	Radial	Prismatisch	Speicherung
Längsparenchym	Axial	Prismatisch	Speicherung

Tabelle 2-1 Anordnung, Form und Funktion der Laubholzzellen (einheimische Holzarten) (Kühen & Wagenführ, 2002) (Wagenführ, 1989)

Der für die Stabilität maßgebliche Anteil an Fasern beträgt 50-60%. Die Form der

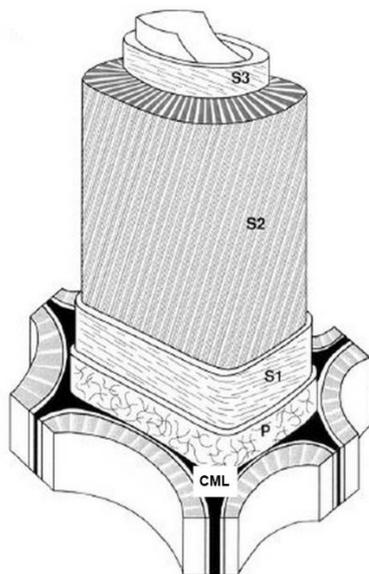


Faser ist mehrheitlich polygonal und die Wanddicken variieren von dünn- zu dickwandig. Die Faserlängen von Laubholz betragen im Durchschnitt etwa 1000-1500 µm. Eine Sonderform der Fasern ist die sogenannte "gelatinöse Faser" (Zugholzfaser)

Abbildung 2.2 Laubholzwürfel schematisch (Wagenführ, 1989)

2.1.3 Holzstrukturmerkmale im sub-mikroskopischen Bereich

Eine Holzzelle beziehungsweise ihre Zellwand setzt sich aus Schichten zusammen. Diese Schichten sind wiederum aus Cellulose, Hemicellulose und Lignin aufgebaut. Je nach Schicht der Holzzelle ist die Zusammensetzung der 3 Haupt-



bestandteile unterschiedlich. Dabei setzen sich lange Cellulose-Kettenmoleküle zu langen Fibrillen zusammen. Diese weisen eine teilkristalline Struktur auf und sind hauptverantwortlich für die Längszugfestigkeit von Holz. Die Fibrillen wiederum sind in eine Matrix aus Lignin gebettet. *Abbildung 2.3 Zellwandmodell nach Sell/ Zimmermann.* Lignin ist für die Druckfestigkeit von Holz wichtig. Hemicellulose erfüllt lediglich die Funktion als Bindeglied zwischen dem hydrophoben Lignin und der hydrophilen Cellulose, damit die physikalischen und mechanischen Eigenschaften der beiden Bestandteile als Komplex wirken (Emmler, et al., 2012)

Abbildung 2.3 Zellwandmodell nach Sell/ Zimmermann (Kühen & Wagenführ,

2002)

Beschreibung der Zellwandschichten:

CML - Mittellamelle	<ul style="list-style-type: none">○ Verbindet angrenzende Zellen○ Aus Pektin und Lignin (Kittsubstanz)○ Bildet zusammen mit Primärwand die sogenannte Mittelschicht
P – Primärwand	<ul style="list-style-type: none">○ Dünne Schicht○ Zerstreute Fibrillenorientierung○ Hoher Ligninanteil○ Wenig Cellulose
S1-3 - Sekundärwand	<ul style="list-style-type: none">○ Parallele Fibrillenorientierung○ Lamellarer Schichtenaufbau○ Hoher Cellulosemikrofibrillen-Anteil○ Geringer Ligninanteil
S1 (äußere Sekundärwand)	<ul style="list-style-type: none">○ Übergangslamelle○ Sehr dünn
S2 (zentrale Sekundärwand)	<ul style="list-style-type: none">○ Hauptteil der Zellwand○ Hohe Bedeutung für physikalisch-mechanische Eigenschaften von Holz
S3 (innere Sekundärwand)	<ul style="list-style-type: none">○ Grenzt an den Zellhohlraum an○ Sehr dünn○ Parallele Fibrillenorientierung

Tabelle 2-2 Beschreibung der Zellschichten von außen nach innen (Fellner, Teischinger, & Zschokke, 2006)

Die Fibrillen in der eben beschriebenen Zellwand sind parallel-spiralig angeordnet. Die Mikrofibrillenwinkel (MFW) der einzelnen Zellwände betragen bei S1 60-80°, bei S2 10-30° und bei S3 60-90°. Als Gesamtkonstrukt sind es diese Eigenschaften und der sandwichartige Aufbau, die dem Holz seine sehr hohe Festigkeit verleihen. (Fellner, Teischinger, & Zschokke, 2006)

2.1.4 Holz als Mikro-/Nanoverbundpolymer

Holz ist ein Faserverbundwerkstoff. Das Zusammenwirken seiner Bestandteile führt in vielerlei Hinsicht zu sehr guten Werkstoffeigenschaften. Betrachtet man Holz auf mikroskopischer Ebene, so ist es ein Mikro- bzw. Nanoverbundwerkstoff. Chemisch betrachtet ist die Zellwand von Holz ein Bioverbundpolymer. Diese Begrifflichkeit verweist auf den polymeren Charakter und den biologischen Ursprung der elektronenmikroskopisch sichtbaren Strukturen in der Zellwand.

Zusammengesetzt ist die Zellwand aus Cellulose, Hemicellulosen und Ligninen. *Abbildung 2.4 Verteilung von Zellulose, Hemizellulose und Lignin im makroskopischen Holzaufbau (Balodis & Balodis, 1977).* Diese haben je nach Baumart und Zellwandschicht unterschiedliche Zusammensetzungen. Lignine und Hemicellulosen habe eine hohe Vielfalt. Der enge Verbund von hydrophoben Ligninen und

hydrophilen Cellulosen und Hemicellulosen bringt Holz die Bezeichnung der Lignocellulose ein. Dieser Verbund liegt als filigranes Gefüge vor (Emmler, et al., 2012)

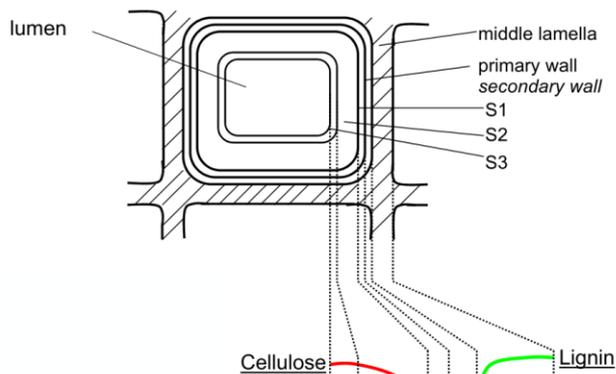
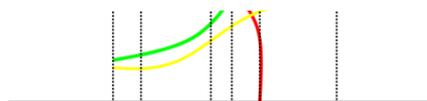


Abbildung 2.4 Verteilung von Zellulose, Hemizellulose und Lignin im makroskopischen Holzaufbau (Balodis & Balodis, 1977)



Holz

2.2 Rohdichte von

Da es sich bei Holz um einen porösen Werkstoff handelt, ist die Rohdichte bei Untersuchungen der Struktur und Eigenschaften als besonders wichtig zu erachten. Die Rohdichte ist der Quotient von Masse m zu Volumen V des Holzes. Dabei erhöht sich die Festigkeit des Holzes mit zunehmender Dichte. (Emmler, et al., 2012)

Holz unterliegt Schwankungen in der Rohdichte, bedingt durch Wachstumszyklen, die sich je nach Jahreszeit verändern. Das Wachstum des Holzes unterscheidet sich je nach Klima sowie der Holzart und Gattung.

Die Rohdichte beeinflusst alle Eigenschaften von Holz in physikalischer wie in mechanischer Hinsicht. Je nach Dichte von Holz verändert sich auch die Quellung, sowie Wärmeleitfähigkeit und Festigkeit. *Abbildung 2.5 Zusammenhang zwischen Rohdichte und Biegefestigkeit und Biege-E-Modul in Abhängigkeit von der Ästigkeit, ermittelt von [Glos/Gamm 1987] an 280 Balken aus Fichtenholz (a =Ästigkeit in % nach DIN 4074-1)Früh und Spätholanteile.* Dabei variiert die Dichte je nach Holzart zwischen Balsaholz mit 100kg/m^3 und Pockholz welches eine Dichte von 1200kg/m^3 aufweist. (Emmler, et al., 2012)

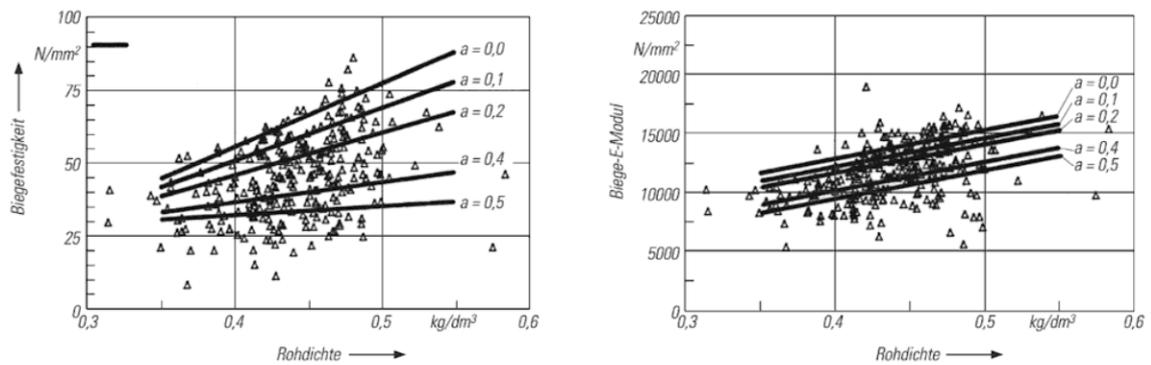


Abbildung 2.5 Zusammenhang zwischen Rohdichte und Biegefestigkeit und Biege-E-Modul in Abhängigkeit von der Ästigkeit, ermittelt von [Glos/Gamm 1987] an 280 Balken aus Fichtenholz (a =Ästigkeit in % nach DIN 4074-1) (Rug & Mönck, 2015)Früh und Spätholanteile

2.2.1 Früh und Spätholzanteile

Der Frühholz- besitzt im Vergleich zum Spätholzanteil einen anderen strukturellen Aufbau, eine geringere Dichte sowie andere physikalische und mechanische Eigenschaften. (Rug & Mönck, 2015) Dabei bildet das sogenannte Spätholz, dickere Zellwände mit einem geringeren Lumen aus. Die Dichte nimmt dadurch im Spätholzanteil zu. Im Vergleich sind Druck-, Zug- sowie Biegefestigkeiten im Frühholz geringer als im Spätholz. *Abbildung 2.6 Dichteverteilung über den Jahrringquerschnitt.*

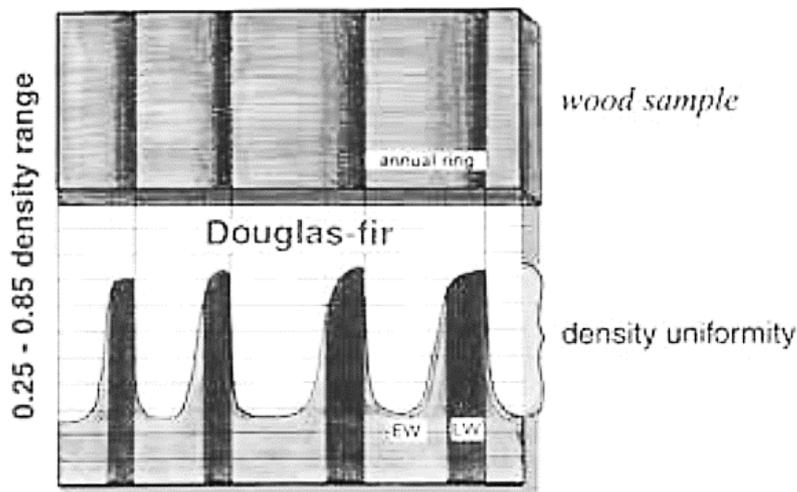


Abbildung 2.6 Dichteverteilung über den Jahrringquerschnitt (Wimmer , 2002)

2.3 Feuchtegehalt von Holz

Holz als poriges Gefüge verfügt über verschiedene Hohlgebilde. Diese werden in Zellhohlräume und Saft führende Gefäße aufgeteilt. Diese Zellen haben die Aufgaben:

- Leiten von Wasser und Säften (Saft führende Zellen)
- Speichern von Nährstoffen (speichernde Zellen)
- Festigkeit gebend (stützende Zellen)

Haben Zellgruppen die gleiche Aufgabe und sind sie von derselben Art so werden sie als Gewebe bezeichnet. Diese unterscheidet man in:

- Leitgewebe,
- Speichergewebe und
- Festigungsgewebe.

Der „Saft“ (überwiegend aus Wasser bestehend) wird von Holträumen, auch Lumen genannt, sowie den Gefäßen transportiert oder gespeichert. Diesen Anteil nennt man „freies Wasser“. Der Anteil an Wasser in den Zellwänden ist chemisch gebunden. Wird Holz getrocknet, so verdunstet zuerst das „freie Wasser“ und anschließend das in den Zellen gebundene Wasser. Die Holz Trocknung beginnt, sobald die umgebende Luft nicht mit Wasserdampf gesättigt ist (wenn man von der gleichen Temperatur des Umgebungsmediums zur Kerntemperatur des Holzwerkstoffes ausgeht). Ist das freie Wasser verdampft, beträgt die Holzfeuchtigkeit, je nach Holzart 22 bis 36%. Dieser Zustand wird „Fasersättigungspunkt“ genannt.

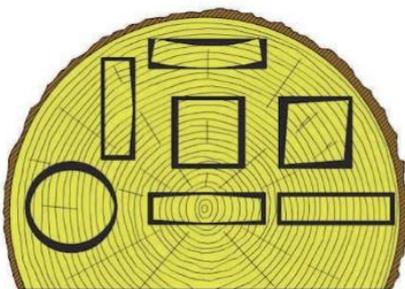


Abbildung 2.7 Verformung des Schnittholzes entsprechend seiner Lage im Stamm (übertrieben dargestellt) (Rug & Mönck, 2015)

Somit ist kein „freies Wasser“ mehr in den Gefäßen und Hohlräumen vorhanden. Wird nun weiter getrocknet, so reduziert sich zuerst der Anteil des physikalisch gebundenen und anschließend der des chemisch gebundenen Wassers in den Zellwänden. Das Holz beginnt währenddessen, durch den Volumenverlust an Wasser in der Holzstruktur, zu schwinden. *Abbildung 2.7 Verformung des Schnittholzes entsprechend seiner Lage im Stamm (übertrieben dargestellt).* Zudem

verändern sich nun die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Holzes. Letzten Endes wird das Holz im Gebrauchszustand eine sogenannte „Ausgleichsfeuchte“ oder „Gleichgewichtsfeuchte“ mit der umgebenden Atmosphäre bilden. Diese ist von der Temperatur und der daraus resultierenden relativen Luftfeuchte abhängig. Wird dem Holz nun umgekehrt wieder Feuchte zugegeben so beginnt es zu Quellen. Das Schwinden und Quellen von Holz zieht, je nach Lage im Baumquerschnitt, verschiedene Formänderungen nach sich. (Rug & Mönck, 2015)

Holzfeuchte wird in % immer auf den darrtrockenen Zustand der Holzmasse, also bei 0% Holzfeuchte, bezogen (DIN EN 13183-1). Die Holzfeuchte in % ist der

Quotient aus Masse an Wasser durch Masse des darrtrockenen Holzes mal 100.
(Rug & Mönck, 2015)

2.4 Festigkeitseigenschaften & -orientierung

Der Werkstoff Holz wird mit den strukturellen Eigenschaften anisotrop, inhomogen und organisch gewachsen sowie porös bezeichnet. Dabei hängen die Festigkeitseigenschaften von Holz entsprechend der Art der Belastung auf die Matrix aus Cellulose, Hemicellulose und Lignin ab. *Abbildung 2.8 Skizze: Dr. Dietger Grosser, München (Struktureller Aufbau von Laubhölzern)* Cellulose ist richtungsorientiert und verfügt daher im Verbund mit anderen Cellulose-Ketten über unterschiedliche mechanische Eigenschaften. (Rug & Mönck, 2015) In der Skizze ist der strukturelle Aufbau von Hartholz ersichtlich:

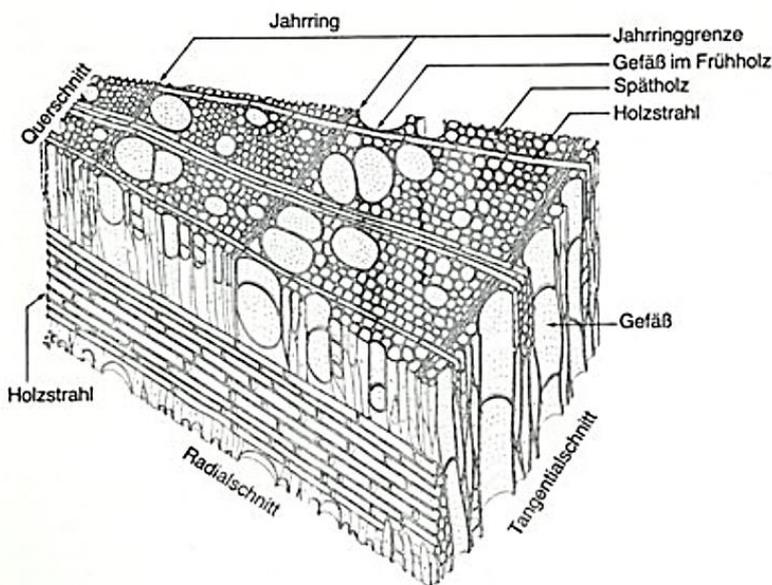


Abbildung 2.8 Skizze: Dr. Dietger Grosser, München (Struktureller Aufbau von Laubhölzern) (Rug & Mönck, 2015)

2.4.1 Abweichungen in der Holzstruktur

Als Holzmerkmal wird eine Abweichung von den Eigenschaften des jeweiligen Holzes bezeichnet. Dabei wird Bezug auf die Eigenschaften des normal gewachsenen Holzes genommen. (Rug & Mönck, 2015) *Tabelle 2-3 Holzfehlerarten*

Die folgenden Arten von Holzfehlern wurden festgelegt:

- Wuchsfehler (s.a. DIN 52181, DIN 4074-1 und DIN 4074-5)
- Klima- und technische Schädigungen,

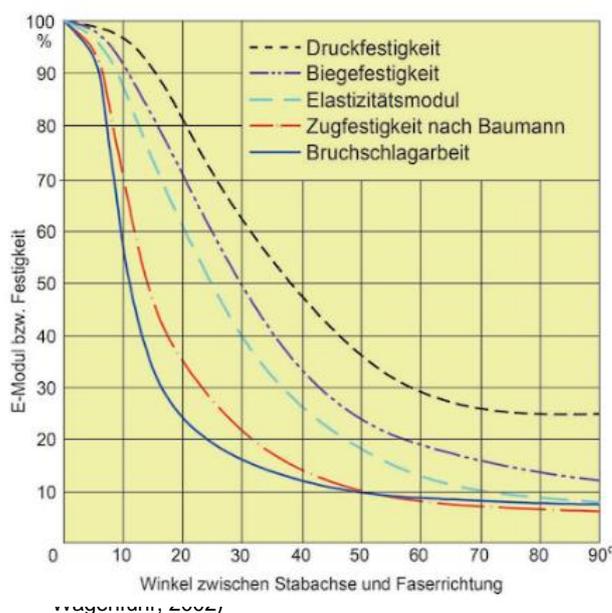
- Schädigungen durch Organismen (s.a. [Lißner/ Rug 2015], DIN 68800-3 und -4 und DIN EN 519 und DIN 335. S. auch DIN 18334, DIN EN 518, DIN EN 519 und DIN 68365

Holzfehlerarten	Beispiele
Formmissbildungen	starke Abholzigkeit, Krummwüchsigkeit, Unrundheit, Zwiesel, Wustholzbildung
Strukturfehler	Ästigkeit, Faserabweichungen, unregelmäßige ringförmige Zonen, Kernverlagerungen, Drehwuchs, Farbfehler (Blaufäule, oxidative Vorgänge),
mechanisch verursachte Fehler	Risse durch Wuchsspannungen, Schwindrisse, Ringrisse (Schalenrisse), Frostrisse, Blitzrisse, Kernrisse
Biologisch – zerstörende Beeinträchtigungen	Stammfäule (Kiefernbaumschwamm am lebenden Baum) Verstockungen (z.B. Buche), holzschädigende Pilze und Insekten, Weißfäule, Rotfäule

Tabelle 2-3 Holzfehlerarten (Rug & Mönck, 2015)

Holzfeuchten >30% sind zur wirtschaftlichen Verarbeitung von Holz ebenfalls als Fehler zu erachten, da die Bearbeitung des Holzes erschwert und der Befall von holzerstörenden Organismen gefördert wird. (Rug & Mönck, 2015)

2.4.2 Einfluss des Faserverlaufs



Abweichungen des Faserverlaufs im Holz von der Längsausrichtung, wie zum Beispiel durch Drehwuchs, Schrägfaser oder der Bereich von Ästen, beeinflussen die mechanischen und physikalischen Eigenschaften von Holz. (Rug & Mönck, 2015) *Abbildung 2.9 Prozentualer Abfall der statischen und dynamischen Festigkeit mit veränderlichem Winkel zwischen Faserrichtung und Stabachse nach Ghelmeziu* Steifigkeiten und

Festigkeiten im Holz werden vom Faserverlauf beeinflusst und vermindern sich stark bei Abweichung der Lastrichtung von der Längsachse (parallel zur Faser= 0°), wie im Diagramm ersichtlich. Zur Bestimmung von Festigkeitswerten ist es daher sinnvoll, eher homogene Holzarten ohne Fehlstellen auszuwählen und unter Berücksichtigung des durchschnittlichen Faserverlaufs Messungen durchzuführen.

2.4.3 Einfluss der Belastungsrichtung

Sieht man Holz als einen polymeren Faserverbundwerkstoff, so wird klar, dass wie bei anderen Werkstoffen dieser Art die Belastungsrichtung eine erhebliche Rolle spielt. *Abbildung 2.11 Einfluss der Belastungsrichtung - Spannungsinteraktion & -transformation*. Das ist auch der Grund dafür warum bei Holz 3 Belastungsrichtungen unterschieden werden. Das Schaubild zeigt eindrucksvoll, wie bereits geringe Abweichungen vom Winkel zwischen der Faserrichtung und der einwirkenden Krafrichtung die Festigkeiten von Holz abnehmen.

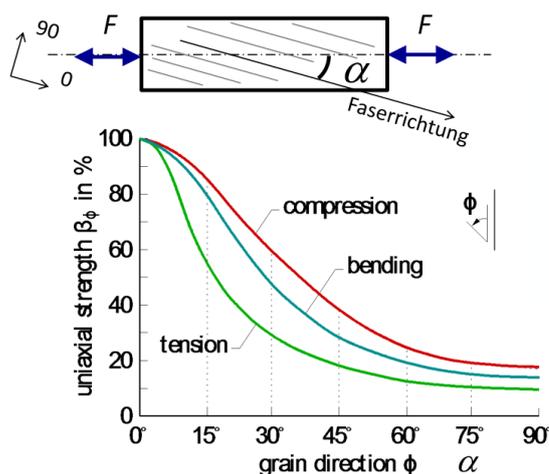


Abbildung 2.10 Festigkeit - Einfluss der Belastungsrichtung (Hochreiner & Schweigler, 2017)

Der Winkel α zwischen Kraft- und Faserrichtung ist aufgrund der großen Anisotropie des Holzes von entscheidender Bedeutung für die Festigkeit. Das erkennt man sehr gut an der Versuchsauswertung von Belastungen eines Stabes unter verschiedenen Winkeln zur Faserrichtung. (siehe Abbildung 2.11). Besonders stark betroffen von dieser Winkelabweichung ist die Zugfestigkeit, sie nimmt bereits bei einem Winkel von ca. 15° auf die Hälfte ab. Die Schubfestigkeit sinkt auf den halben Wert bei ca. 30° Abweichung. Am wenigsten empfindlich reagiert Holz auf Druckbelastung. Hierbei führt eine Abweichung von 40° zu einer Verminderung auf die halbe Festigkeit. (Hochreiner & Schweigler, 2017)

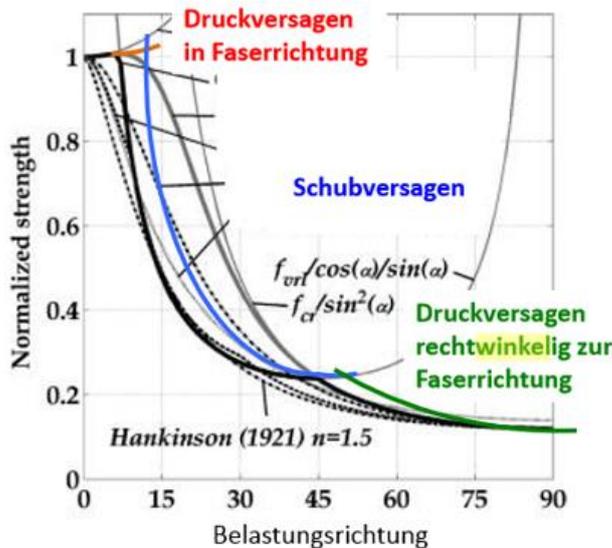


Abbildung 2.11 Einfluss der Belastungsrichtung - Spannungsinteraktion & -transformation (Hochreiner & Schweigler, 2017)

Betrachtet man die Belastungsrichtungen der Holzfaser so fällt auf, dass sich die Art der Belastung verändert. Dies nennt man Spannungsinteraktion. So wird aus einem Versagen durch Druckeinwirkung in Faserrichtung unter 10° , wiederum ein Versagen unter Schubeinwirkung, wenn der einwirkende Winkel auf 30° ansteigt. Weiter wird dasselbe Schubversagen wieder ein Druckversagen rechtwinklig zur Faser bei 70° Lasteinleitung in die Faser, wie in Abbildung 2.11 dargestellt. Die Wirkung einer aufgebrachten Spannung erklärt sich durch die Richtung und Art der anliegenden Spannung relativ zur Faserorientierung. (Hochreiner & Schweigler, 2017)

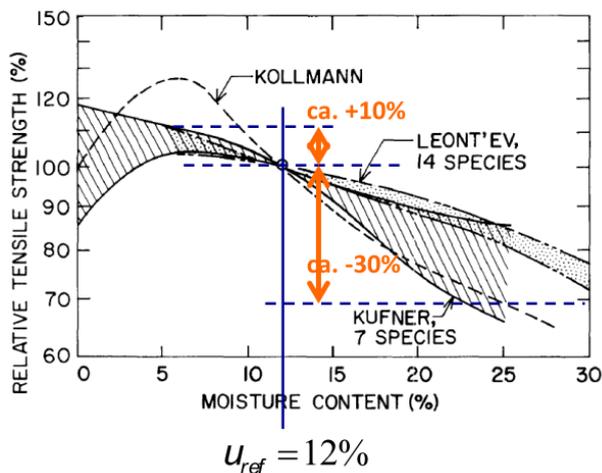
2.4.4 Einfluss der Temperatur

Wird die Temperatur des Holzes erhöht, dann reduziert das die Festigkeit. Erhöhte Temperaturen haben einen wesentlich größeren Einfluss auf die Biege- und Druckfestigkeit als auf die Zugfestigkeit. (Rug & Mönck, 2015)

2.4.5 Einfluss der Feuchtigkeit

Die Druckfestigkeit nimmt bei relativen Holzfeuchten (r.F.) oberhalb von 12% rapide ab. *Abbildung 2.12* Dabei können bis zu 60% der Druckfestigkeit eingebüßt werden. Ist die r.F. kleiner als 12% so kann die Druckfestigkeit wiederum bis zu 60% zunehmen. Bei der Zugfestigkeit ist ebenfalls die Konzentration von Feuchte im Holz ausschlaggebend. Hier kann Holz bei unter 12% r.F. bis zu ca. 10% seine Zugfestigkeit erhöhen und bei über 12% bis zu 30% der Festigkeit verringern.

Zugfestigkeit $f_{t,L}$



Druckfestigkeit $f_{c,L}$

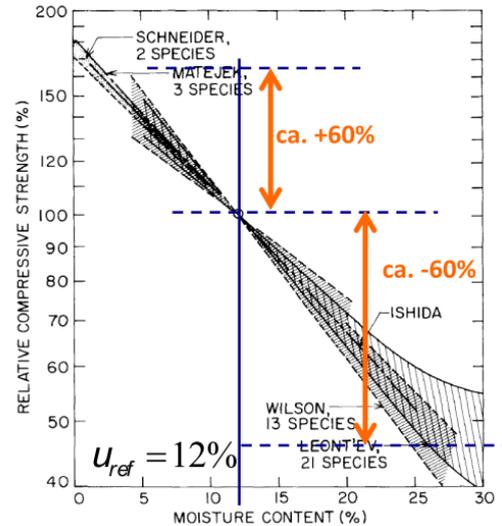


Abbildung 2.12 (Hochreiner & Schweigler, 2017)

Weiters wirkt sich die Holzfeuchte auf dem Elastizitätsmodul sowie die Schubfestigkeit innerhalb des Holzquerschnitts aus. Kriechen wird ebenfalls stark von der Holzfeuchte beeinflusst.

2.5 Rheologische Eigenschaften & Ermüdung von Holz

Holz ist ein viskoelastisches Material. Das bedeutet, dass die Dehnung neben der Spannung auch von der Dauer der Belastung abhängt. Die Festigkeit ist abhängig von der Dehnrates, also unterschiedlich, ob eine Last schnell oder langsam aufgebracht wird.

Bei Belastung von Holz kommt es zu Kriechen. Wird eine bestimmte Verformung aufgebracht, dann kommt es mit der Zeit zu einer Verminderung der Spannung, zu einer Spannungsrelaxation. (Emmler, et al., 2012) Um das rheologische Verhalten von Holz zu beschreiben, werden Ersatzmodelle herangezogen. Diese bestehen aus Feder - Dämpfer Systemen. Diese werden in verschiedenen Variationen kombiniert, um den rheologischen Eigenschaften bei bestimmten Bedingungen zu entsprechen.

2.5.1 Spannungsrelaxation

Unter der Spannungsrelaxation von Holz wird das abnehmen einer Kraft verstanden, die notwendig ist, um eine Probe konstant zu verformen. Wird also Holz verformt und bleibt die Verformung konstant, so sinkt die für die Verformung notwendige Kraft ab. Dieses Phänomen ist bei vorgespannten Bauwerken wie

Brücken zu beobachten und von besonderer Wichtigkeit. Die Spannungsrelaxation ist eine Folge des Kriechens von Holz. (Emmler, et al., 2012)

2.5.2 Kriechen

Verändert Holz unter einer konstanten Last mit der Zeit seine Form, so nennt man diesen Vorgang Kriechen. Während dieser Zeit treten die Phasen des Primärkriechens, des Sekundärkriechens und des Tertiärkriechens auf. Die Kriechdehnung $\varepsilon(t)$ und die Kriechrate $d\varepsilon(t)/dt$ quantifizieren das Kriechen. *Abbildung 2.13 Phasen der Kriechverformung und Einfluss der Höhe der Last; a) Phasen der Kriechverformung; b) Einfluss der Belastungshöhe (Emmler, et al., 2012)*

Während der Primärphase steigt die Kriechdehnung anfänglich stark an (die Kriechrate ist hoch). Die Kriechrate stabilisiert sich dann auf einen etwa konstanten Wert in der Sekundärphase. Letztendlich steigt die Kriechrate in der Tertiärphase wieder an. Dies führt zum Bruch. Der starke Anstieg der Kriechrate kündigt einen derartigen Bruch an.

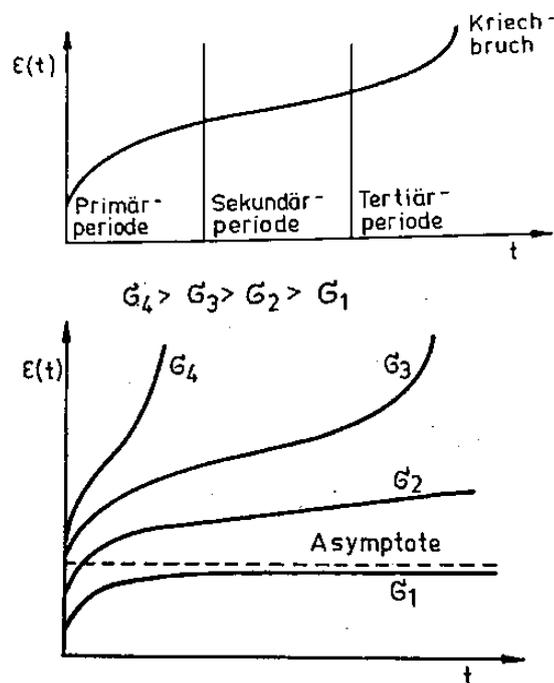


Abbildung 2.13 Phasen der Kriechverformung und Einfluss der Höhe der Last; a) Phasen der Kriechverformung; b) Einfluss der Belastungshöhe (Emmler, et al., 2012)

Bei Biegebeanspruchung ist die Kriechzahl die Kenngröße der Kriechverformung. Berechnet wird sie mit:

$$\varphi = \frac{f_t - f_0}{f_0} \quad (1)$$

φ = Kriechzahl

f_t = zeitabhängige Durchbiegung

f_0 = elastische Durchbiegung

Belastet man Holz parallel zur Faserrichtung, so ist das Kriechen wesentlich geringer (etwa Faktor 8) verglichen mit der Belastung senkrecht zur Faser. Betrachtet man unterschiedliche Holzwerkstoffe, so kriecht Vollholz am stärksten. Das resultiert aus der Tatsache, dass das Gefüge hier nicht blockiert ist und es ungehindert verformen kann. (Emmler, et al., 2012)

2.5.3 Beschreibung der Viskoelastizität von Holz

Das viskoelastische Materialverhalten ist stark durch die Anisotropie des Holzes beeinflusst. Die Verformung hängt von der Temperatur, der Feuchtigkeit, der anliegenden Spannung und der Zeit ab. Diese Faktoren können sich überlagern und individuelle Effekte hervorrufen, wie Holz auf Belastungen während einer Messung reagiert. (Schniewind, 1968)(Gruyter, 2009)

Setzt man Holz unter konstante klimatische Verhältnisse und konstanter relativer Feuchte wird es möglich, die zeitabhängigen Eigenschaften zu messen. Dies geschieht mit statischen und dynamischen Verfahren. *Abbildung 2.14 Formel für die Zeit Dehnungsabhängigkeit* Das orthotrope viskoelastische Verhalten von Holz ist dem strukturellen Aufbau geschuldet. Dabei stehen eine zeitabhängige Belastung und die Dehnung in Beziehung zu einander. (Gruyter, 2009)

$$\sigma_{ij}(t) = \int_{0^-}^t R_{ijkl}(t-\tau) \frac{\partial \varepsilon_{kl}}{\partial \tau} d\tau \quad \varepsilon_{ij}(t) = \int_{0^-}^t S_{ijkl}(t-\tau) \frac{\partial \sigma_{kl}}{\partial \tau} d\tau \quad (2)$$

Abbildung 2.14 Formel für die Zeit Dehnungsabhängigkeit (Gruyter, 2009)

So stellt der Term $(t-\tau)$ die Zeitvariabilität dar. S_{ijkl} und R_{ijkl} stehen für den Kriechsteifigkeitstensor bzw. den Kriech-Nachgiebigkeitstensor.

Für ein isotropes Material wird aus dem Kriech-Nachgiebigkeitstensor ein Skalar. *Abbildung 2.15 Reihen-Formel eines linearen viskoelastischen Materials* Dieser kann dann für ein lineares viskoelastisches Material folgendermaßen als Reihe angegeben werden:

$$S(t) = S_0 + \sum_{i=1}^n S_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}\right) + \frac{t}{\eta_\infty} \quad (3)$$

Abbildung 2.15 Reihen-Formel eines linearen viskoelastischen Materials (Gruyter, 2009)

Die Koeffizienten S_0 , η_∞ , S_i und τ_i werden geeignet bestimmt, um das Material zu modellieren. *Abbildung 2.16 Elemente eines standardisierten Kelvin-Voigt Modells* Ein solches rheologisches Modell kann zur Berechnung des viskoelastischen Langzeitverhaltens von Holz benutzt werden. (Gruyter, 2009)

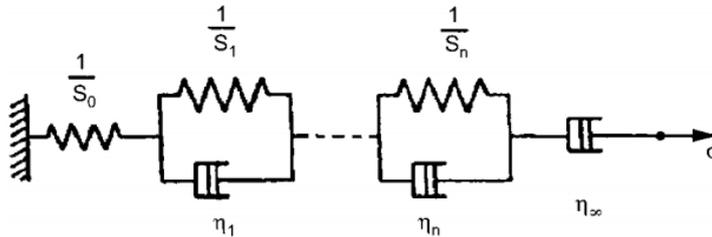


Abbildung 2.16 Elemente eines standardisierten Kelvin-Voigt Modells (Gruyter, 2009)

2.6 Ermüdung von Holz

2.6.1 Definition der Ermüdung

In der Disziplin des Stahlbaus wird Ermüdung als ein Vorgang der Rissbildung und des anschließenden Rissfortschritts definiert. Geregelt ist dieses Werkstoffverhalten in der DIN EN 1993-1-9. Verursacht wird die Ermüdung durch wiederholte Spannungsamplituden. (DIN EN 1993-1-9, 2005) Ermüdungsbeanspruchungen und im Weiteren Ermüdungsbrüche werden physikalisch also mit Schwingbeanspruchungen gekoppelt. Diese können zum einen bei konstanten Amplituden und zum anderen bei zufallsartigen Abfolgen unterschiedlicher Amplituden auftreten. (Aicher & Zachary , 2015)

Das Ermüdungsverhalten von Holz ist beeinflusst von seinem Kriechverhalten. Dieses ist auf Grund der anisotropen inhomogenen Struktur von Holz je nach Richtung unterschiedlich ausgeprägt. Die erhöhte Komplexität der Ermüdungsthematik bei Holz ergibt sich letztendlich auch daraus, dass Holz je nach Belastung (Biegung, Schub, Zug, Druck, Torsion, Belastung in oder in einem Winkel zur Faserrichtung) unterschiedliche Schwingfestigkeiten aufweist. (Aicher & Zachary , 2015)

2.6.2 Versagensmodell einer Ermüdung

Ermüdung ist ein lokal begrenzter, fortschreitender Schädigungsprozess im Material. Ermüdung kann an einer oder mehreren Stellen im Inneren oder an der Oberfläche eines Materials gleichzeitig auftreten. Ermüdung führt zur Bildung von Mikrorissen, dem Wachstum der Risse mit steigender Zahl an Lastspielen und letztendlich zum Bruch. Ermüdungsbrüche resultieren aus zyklischer

Aufbringung von Spannungen. Die Ermüdung von Holz ist von der Anzahl der Belastungszyklen, der verwendeten Frequenz und der Dauer der Beanspruchung abhängig. (Smith, Landis, & Gong, 2003)

Da Holzstrukturen Wasser sowohl in flüssigem als auch gasförmigen Zustand aufnehmen, schwankt die darin enthaltene Feuchtigkeitsmenge und ändert sich mit der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur des umgebenden Mediums. Die Ermüdungseigenschaften werden durch die im Holz vorhandene Wassermenge beeinflusst. Das Ausmaß der Feuchtigkeitsaufnahme ist hier von der Größe des Holzelements abhängig, da Feuchtigkeitsbewegung ein von der Zeit abhängiger Prozess ist. Die Interpretation der Daten bedarf einer Berücksichtigung des rheologischen und hygroscopischen Aufbaus des Materials.

Obwohl Informationen zu Ermüdungsmechanismen- und -prozessen uneinheitlich und nur spärlich vorkommen, sind folgende Aspekte des Verhaltens von Holzwerkstoffen und Verbindungen beschrieben: (Smith, Landis, & Gong, 2003)

1) Es wird angenommen, dass Holz eine Dauerfestigkeit zeigt.

2) Die Anzahl der sich wiederholenden Belastungszyklen, welche notwendig sind um ein Versagen von Holzbauteilen herbeizuführen, ist bei gleichem Maximalwert der Spannung abhängig vom Minimalwert der Spannung des Lastspiels: Minimalwerte unterhalb null sind stärker schädigende Lastspiele als Minimalspannungen größer null. Nielsen schlägt das Vorhandensein eines kritischen Verhältnisses von negativer zu positiver Spannung bei umgekehrter Belastung vor. Unterhalb dessen wäre die Auswirkung des Minimalwertes dann theoretisch vernachlässigbar. Dabei ist die festgelegte Größenordnung bei etwa einem Spannungsverhältnis von $R_{krit} = -0,5$. Dieser Wert stimmt jedoch nicht mit den Ergebnissen von Tsai und Ansell (1990) überein. Sie haben das Biegeverhalten von in Scheiben geschnittenen afrikanischen Mahagonay-Funierschiechtholz untersucht. Dabei implizieren ihre Ergebnisse, dass R_{krit} bei nahe 0 liegen muss. (Tsai & Ansell, 1990)

3) Die Bruchlastspielzahl steigt mit sinkender Spannungsamplitude. Das ist das bei den meisten Werkstoffen gefundene Verhalten. In Abbildung 2.17 ist nicht die Spannungsamplitude, sondern die Amplitude bezogen auf die statische Festigkeit gezeigt. *Abbildung 2.17 Spannungsniveau vs. Anzahl von Lastzyklen bis zum Bruch (S - N) - Kurve* (Tsai & Ansell, 1990)

Feuchtigkeit scheint einen Verschiebungseffekt auf die Ermüdung, die Lebensdauer und entsprechend auch auf die Beziehung von Spannungsniveau und Ermüdungsdauer (S – N bzw. σ – N) zu haben. (Tsai & Ansell, 1990) (Nielsen, 1996)

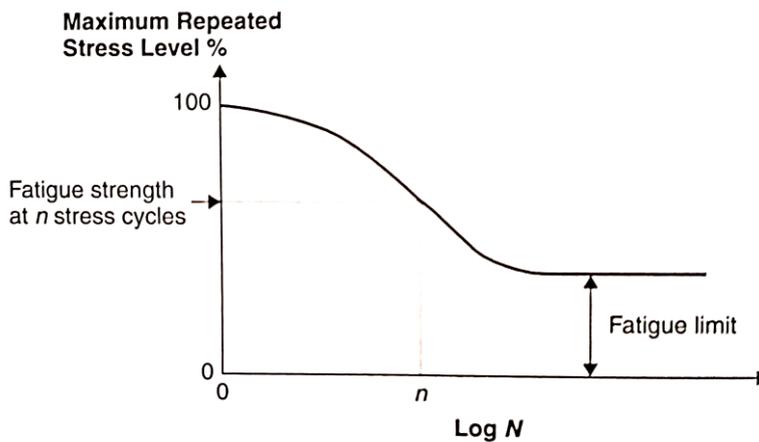


Abbildung 2.17 Spannungsniveau vs. Anzahl von Lastzyklen bis zum Bruch (S - N) - Kurve (Smith, Landis, & Gong, 2003)

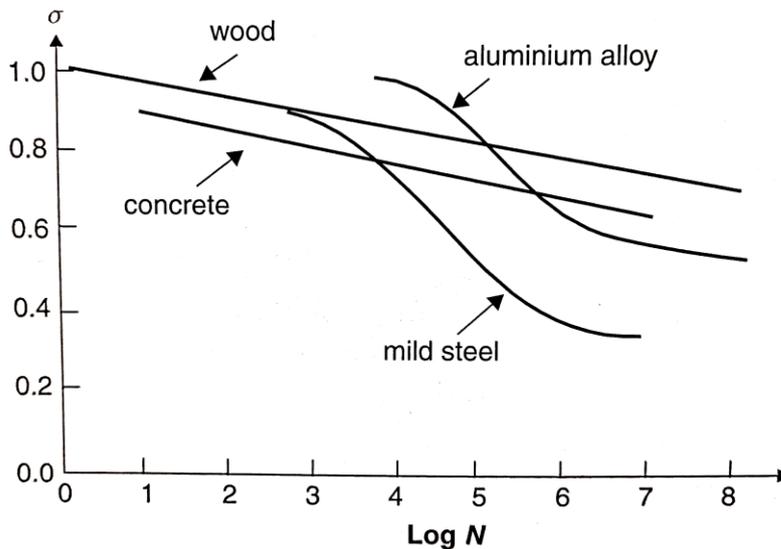


Abbildung 2.18 Stressniveau im Vergleich zum Ermüdungsverhalten - Diagramm für Stahl, Aluminiumverbund, Beton und Holz (Smith, Landis, & Gong, 2003)

Abbildung 2.18 zeigt wie sich Holz im Vergleich zu anderen Materialien in einem Wöhler-Diagramm verhält. Dabei ist auf der Ordinate allerdings keine Spannung, sondern relative Spannungen (Spannungsamplitude / Zugfestigkeit) aufgetragen.

Basierend auf (Hansen, 1991) und dem Handbuch für Holz und Holzwerkstoffe für Ingenieure Architekten und Bauherren (FLP 1989), wird nahegelegt, dass bei einer relativen Spannungsamplitude $\sigma=0,40$, die Anzahl der Lastwechsel N, von Holz bei etwa 10^7 Zyklen liegt. Dies stimmt jedoch nicht mit Abbildung 2.18 überein. Diese Diskrepanz zeigt wie schwierig und uneins man sich über die Charakterisierung der Ermüdungsleistung von Holz ist.

2.6.2.1 Ermüdungsakkumulation nach Gong

Im Versuch wurden zwei einfache Stufenladesequenzen durchgeführt. Jede Sequenz verwendete vier "Blöcke" von je 50 Belastungszyklen. Die ersten 45 Zyklen innerhalb eines Blocks befanden sich an der Zielspannung. Die Spannung der verbleibenden fünf Blöcke wurden in einem schrittweisen Übergang zum nächsten Spannungsniveau erhöht. Die akkumulierte Verformung (AD= accumulated Deformation [mm]) wird als eine beobachtete Beschädigung von Zellwänden nach einer Anzahl von Belastungszyklen angesehen. (Gong & Smith, 2000) Die Übergangszyklen zwischen den Belastungsniveaus hatten einen vernachlässigbaren Einfluss auf die AD und hatten daher vermutlich einen ebenso vernachlässigbaren Einfluss auf den tatsächlichen Schaden. Die Abfolge von hoher zu niedriger Last führte zu einer größeren AD als die Abfolge von niedriger zu hoher Last. Die AD-Kurve pendelte sich nach dem ersten Block von Spannungszyklen für die High-to-Low-Sequenz ein. Unter der Low-to-High-Sequenz trat AD mit jeder Zunahme der Anzahl von Spannungszyklen und der Anzahl von Blöcken von Spannungszyklen zunehmend auf. Insgesamt war die Abfolge von hoher zu niedriger Belastung für das Holz schädlicher als die Abfolge von niedriger zu hoher Belastung.

Obwohl der Effekt nur für Druckspannungszustände bewiesen wurde, ist es wahrscheinlich, dass der Effekt der Lastsequenzierung auch bei anderen Spannungsverhältnissen eintritt.

2.6.3 Dauerfestigkeit

Die Dauerfestigkeit wird bei schwingender Beanspruchung vom Spannungswert σ_D als Obergrenze gekennzeichnet. Dieser wird als Oberspannungswert bezeichnet. Unter diesem Niveau kann die Wiederholung der Beanspruchung theoretisch unendlich oft wiederholt werden ohne, dass eine Schädigung oder ein Versagen eintritt. (Aicher & Zachary, 2015)

Die Anhäufung von Holzschäden bei zyklischer Beanspruchung hängt von der pro Zyklus geleisteten Arbeit, sowie der Verweilzeit bei der Spitzenwertbeanspruchung ab. In der *Abbildung 2.19* sind mögliche unterschiedliche Wellenformen mit derselben Spitzenspannung und Belastungsfrequenz abgebildet. Experimente zeigen, dass für fehlerfreies Holz quadratische Wellenformen am schädlichsten sind (Okuyama, Itoh, & Marsoem, 1984) (Gong & Smith, 2000). Dies liegt daran, dass sie die höchste Belastungsrate, die höchste Änderung der Belastungsrate und die längste Verweilzeit aufweisen.

Symmetrische dreieckige Wellenformen sind weniger schädlich als sinusförmige Wellenformen, obwohl die Änderungsrate der Spannungsrate am Punkt B ungleich 0 ist. Dies liegt daran, dass die Spitzenbelastungsrate hier anstelle der Änderungsrate der Belastung, der vorherrschende Faktor für die Schadensakkumulation unter zyklischer Belastung ist. Obwohl die durchschnittliche Spannungsrate für sinusförmige und dreieckige Wellenformen gleich σ_0 ist, ist sie für eine sinusförmige Wellenform mit der maximalen Rate von $1,57\sigma_0 (= \sigma_0 / 2)$ nicht konstant. Dies ist der Grund, warum sinusförmige Wellenformen schädlicher sind als symmetrische dreieckige Wellenformen mit gleicher Amplitude und Belastungsfrequenz.

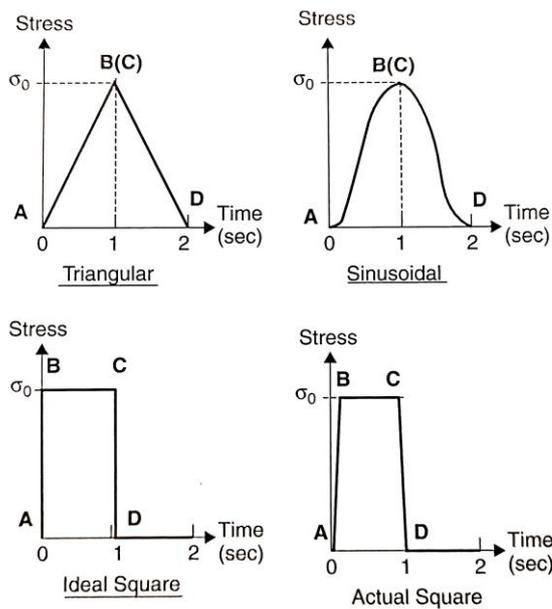


Abbildung 2.19 Wellenformen bei einer Belastungsfrequenz von 0,5 Hz (Smith, Landis, & Gong, 2003)

Häufig wiederholen sich zyklische Belastungen nicht konstant in ihrer Bewegung. D.h. in der Regel, dass eine zyklische Beanspruchung oder Verformung keine konstante Amplitude oder Frequenz aufweist. Daher ist es erforderlich zu wissen, wie sich Unregelmäßigkeiten in den Ladesequenzen auf die Anhäufung von Schäden auswirken.

Kohara und Okuyama (1992) haben anhand von zyklischen Biegetests mit Frequenzen von 0,1 bis 1,0 Hz an reinem Fichtenholz gezeigt, dass ein Zusammenhang zwischen Schadensvorgängen für zyklische Ermüdung und statischer Ermüdung besteht. Die Interaktionsbeziehung lautet wie folgt:

$$\left(\frac{t}{T}\right) + \left(\frac{n}{N}\right)^{0,02} = 1 \quad (4)$$

t= Gesamtbelastungsdauer bis zum Versagen

n= Gesamtzahl der Belastungszyklen bis zum Versagen
T= reine statische Ermüdungslebensdauer
N= reine zyklische Ermüdung

Die Gleichung beschreibt Punkte, die auf der Probenoberfläche in einem t-n-Raum liegen. (Kohara & Okuyama, 1992)

Eine Schwierigkeit besteht darin, dass es nicht möglich ist, die reine Ermüdungslebensdauer eines rheologischen Materials tatsächlich festzustellen. Daher muss N als Ermüdungslebensdauer bei einem niedrigen Tastverhältnis, in diesem Fall $\tau=0,05$, angenähert werden.

Es ist klar, dass sowohl die zyklische Ermüdung als auch die statische Ermüdung bei relativ hohen Belastungsfrequenzen selbst bei einem großen Wert für τ einen erheblichen Beitrag zur Schädigung leistet.

Im Allgemeinen hängt das Ausmaß des Lastwechseleffektes von der Upload-Rate (Wellenform) ab. Diese ist in der Regel direkt proportional zur Ladefrequenz. Somit ist die Zeit unter Last der ausschlaggebende Faktor, welcher die Lebenszeit der Probe bestimmt.

Es wird angenommen, dass die zyklische Kriechverformung asymptotisch wird, wenn sich τ dem Wert 1,0 nähert. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Einfluss von reiner und zyklischer Kriechverformung. Die Probe bestand hier ebenfalls aus getrocknetem fehlerfreiem Fichtenholz, welche parallel zur Faser mit Druck belastet wurde. (Smith, Landis, & Gong, 2003)

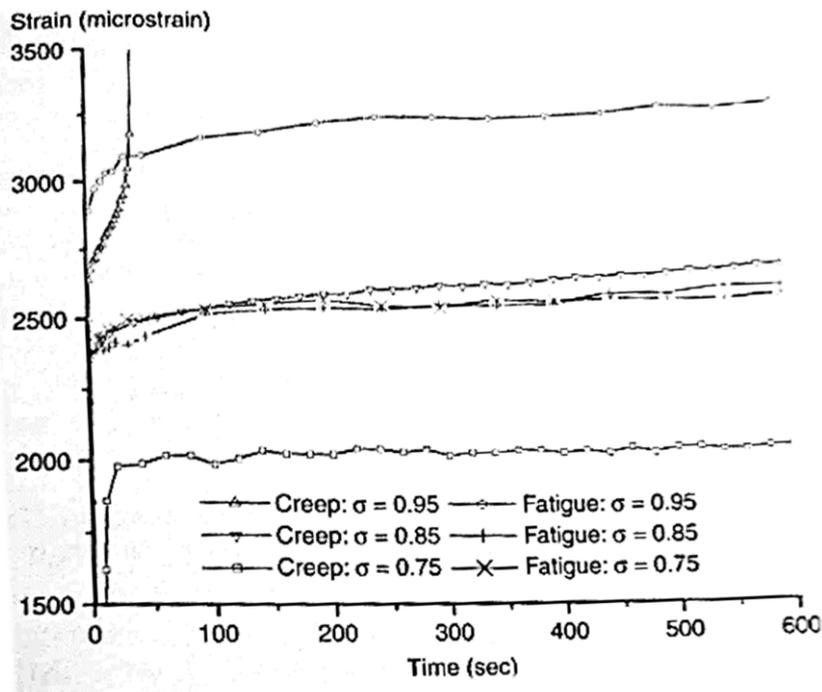


Abbildung 2.20 Akkumulierte Dehnungen bei statischem und zyklischem Kriechen (Smith, Landis, & Gong, 2003)

Tertiäres Kriechen wurde bei Proben beobachtet, die während der Prüfung häufig versagten. Hiervon waren 9 von 11 Proben betroffen. Die Spannung war bei $\sigma=0,95$ und die durchschnittliche Zeit bis zum Bruch betrug dabei 40 Sekunden. Unter zyklischer Belastung fielen bei diesem Spannungsniveau keine Proben aus. Bei $\sigma=0,75$ war die reine Kriechdehnung viel geringer als die zyklische Kriechdehnung. Bei $\sigma=0,85$ waren die reine Kriechdehnung und die zyklische Kriechdehnung ungefähr gleich. Die Daten implizieren, dass es bei der Spannung σ eine Art Schwelle von ungefähr 0,85 gibt. Die allgemein akzeptierte Vorstellung, dass die reine Kriechdehnung immer die zyklische Kriechdehnung begrenzt ist somit ungültig. *Abbildung 2.20 Akkumulierte Dehnungen bei statischem und zyklischem Kriechen* (Smith, Landis, & Gong, 2003)

Das würde bedeuten, dass beim reinen Kriechen Schäden hauptsächlich durch die strukturelle Veränderung der Zellwände entstehen. Diese wiederum würden vom Aufbringen der Spannung am Material entstehen. Bei sehr hohen Belastungen schwächt der beim Aufbringen der Spannung verursachte Schaden das Material, so dass es nach Erreichen der Zielspannung relativ zeitnah versagt. (Smith, Landis, & Gong, 2003)

Schäden aufgrund zyklischer Beanspruchung sind eine Funktion von σ und n . Bonefield et al. 1994 zeigen, dass die reinen Kriechproben größere Dehnungen

aufweisen als Ermüdungsproben. Dies wiederum steht im Gegensatz zu Ergebnissen der Studie, welche in *Abbildung 2.21* untermauert werden. Dies legt nahe, dass sich das Kriech- und Versagensverhalten von Holz zu Verbundwerkstoffen auf Holzpartikelbasis unterscheidet. (Smith, Landis, & Gong, 2003)

Die Bedeutung des Spannungsverhältnisses (R-Verhältnis) wurde für das zyklische Ermüdungsverhalten von Holz in einer Reihe von Studien ermittelt. Eine Erhöhung des R-Verhältnisses entspricht einer Erhöhung der Mittelspannung. Lewis (1962) zeigte, dass für auf Biegung beanspruchtes Holz die Dauerfestigkeit

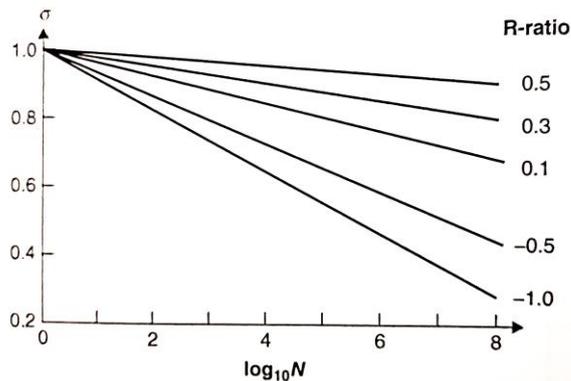


Abbildung 2.21 Einfluss des R-Verhältnisses auf die Ermüdungsfestigkeit von afrikanischem Mahogany LVL. Belastet im 4 Punkt Flex Versuch bei einem Feuchtegehalt von 10% (Tsai and Ansell 1990)

für positive R-Verhältnisse umso niedriger war, desto höher das R-Verhältnis war. Tsai und Ansell (1990) untersuchten den Effekt des R-Verhältnisses auf σ -N-Kurven. Die Ergebnisse zeigen, dass mit Annäherung des R-Verhältnisses gegen 1 die Lebensdauer zunimmt. Eine vollständig umgekehrte Belastung ($R=-1$) führt zu der kürzesten Ermüdungslebensdauer einer gegebenen Spannung bei $\sigma=1$. (Smith, Landis, & Gong, 2003)

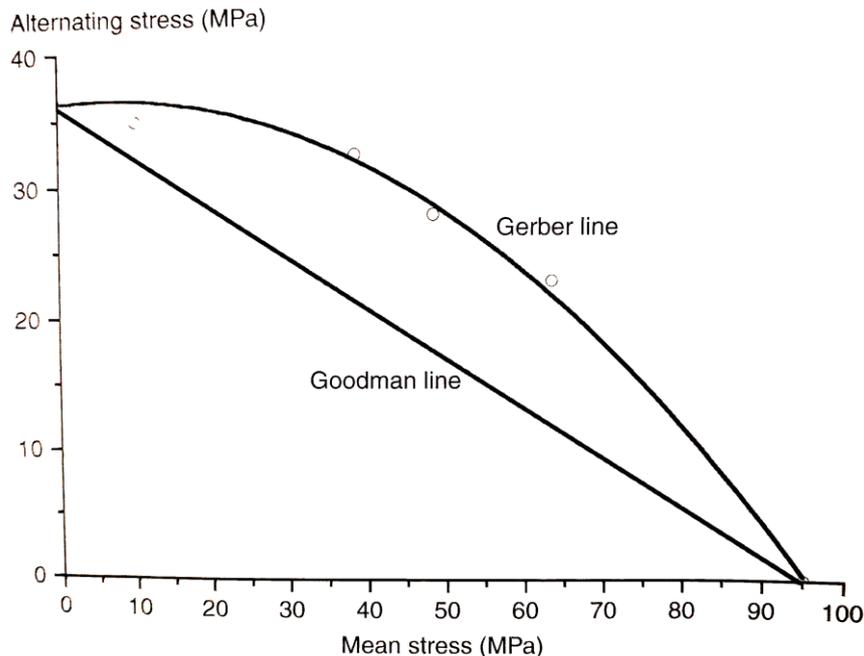


Abbildung 2.22 Goodman und Gerbers konstante Lebensdauer-Kurve für Afrikanisches Mahogany LVL bei 107 Zyklen (Tsai und Ansell 1990)

Beschreibung der Goodman-Gerade:

$$\sigma_a = \sigma_e \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_u}\right) \quad (5)$$

Beschreibung der Gerber-Kurve:

$$\sigma_a = \sigma_e \left(1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u}\right)^2\right) \quad (6)$$

σ_a = alternierende Spannung

σ_e = Spannungsamplitude bei einem Spannungsverhältnis von $R= 1,0$

σ_m = mittlere Spannung

σ_u = maximale Spannung (u=ultimate)

Wie man sehen kann *Abbildung 2.22 Goodman und Gerbers konstante Lebensdauer-Kurve für Afrikanisches Mahogany LVL bei 107 Zyklen (Tsai und Ansell 1990)* passt die Gerber-Parabel viel besser zu den gewonnenen Daten als die Goodman-Gerade. Die Daten und die Gerberbeziehung legen nahe, dass für negative Werte des R-Verhältnisses die Spannungsamplitude einen größeren Einfluss hat als die mittlere Spannung auf N. Für ein zunehmend negatives R-Verhältnis spielt die Druckkomponente des Ermüdungszyklus eine wichtige Rolle in Schadensakkumulation als die Zugkomponente.

Bonefield und Ansell (1991) führten Versuche zur Ermüdung bei axialer Belastung mit afrikanischem Mahagoni-LVL durch, wobei die maximale Spannung etwa gleich der Druckfestigkeit bei einem R-Verhältnis von 10, -2,0, und -1,0 war. Die Ergebnisse zeigten erneut, dass ein R-Verhältnis =-1,0 die schwerwiegendste Situation war. Bei anderen Werten des R-Verhältnisses wurde die Ermüdungslebensdauer zunehmend länger, bis das R-Verhältnis 10,0 betrug und der σ -N-Trend nahezu horizontal verlief. Die in allen Zugversuchen (R-Verhältnis=0,1) gemessene Ermüdungslebensdauer war größer als die in allen Druckversuchen (R-Verhältnis=10,0). (Bonefield & Ansell, 1991)

Es ist klar, dass das R-Verhältnis die Lebensdauer unter wiederholten Lastwechseln stark beeinflusst, wobei ein R-Verhältnis=-1,0 das Worst-Case Szenario in allen aufgezeichneten Studien ist. Bei positiven R-Verhältnissen (nicht umgekehrte Belastung) ist die mittlere Spannung der dominierende Faktor für die Lebensdauer, während bei negativen R-Verhältnissen (umgekehrte Belastung) die Spannungsamplitude der dominierende Faktor ist. (Smith, Landis, & Gong, 2003)

2.6.4 Ermüdungsbemessung nach Eurocode 5, Teil 2

$$\kappa = \frac{|\sigma_{d,max} - \sigma_{d,min}|}{f_k} = \frac{\Delta\sigma_d}{f_k} \gamma_{M,fat} \quad (7)$$

Formel 1 Berechnung der Festigkeitsnormierte Bemessungsschwingbreite κ gemäß DIN EN 1995-2 (Eurocode5, 2010)

$\sigma_{d,max} = \sigma_{d,0}$	maximale Bemessungsspannung infolge ermüdungswirksamer Einwirkungen
$\sigma_{d,min}$	minimale Bemessungsspannung infolge ermüdungswirksamer Einwirkungen
f_k	charakteristische Festigkeit
$\gamma_{M,fat}$	Teilsicherheitsbeiwert für Baustoffe für den Ermüdungsnachweis. Dieser Wert ist gemäß DIN EN 1995-2 $\gamma_{M,fat} = 1,0$
$\Delta\sigma_d$	Bemessungsspannungs-Schwingbreite, vgl. Gl. (2)

Bauteile, Verbindungen, Beanspruchung	κ -Verhältnis
Holzbauteile mit Druck parallel und senkrecht zur Faser	0,6
Holzbauteile beansprucht auf Biegung und Zug	0,2
Holzbauteile beansprucht auf Schub	0,15
Stabdübelverbindungen	0,4
Nagelverbindungen	0,1
andere Verbindungen	0,15

Tabelle 2-4 Festigkeitsnormierte Bemessungsschwingbreite κ gemäß DIN EN 1995-2 (Eurocode5, 2010) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsart für Holz und Holzwerkstoffe sowie für mechanische Verbindungsmittel in Holzbauteilen

Laut Norm ist ein Ermüdungsnachweis notwendig, sobald das Verhältnis von κ die in der *Tabelle 2-2* verzeichneten Werte übersteigt. κ ist die Bemessungsschwingbreite. Die ermüdungswirksamen Einwirkungen dienen hier zur Berechnung der ermüdungswirksamen Spannungen.

2.6.5 Geometrischer Einfluss der Probengröße auf die Dauerfestigkeit

Vergleicht man Proben gleicher Größe zwischen Biegeermüdungsfestigkeit σ_{bW} und Zug-/Druck-Ermüdungsfestigkeit σ_{zdW} , so stellt man fest, dass sich diese unterscheiden. Dies kann durch die Stützwirkung der weniger belasteten inneren Fasern begründet werden.

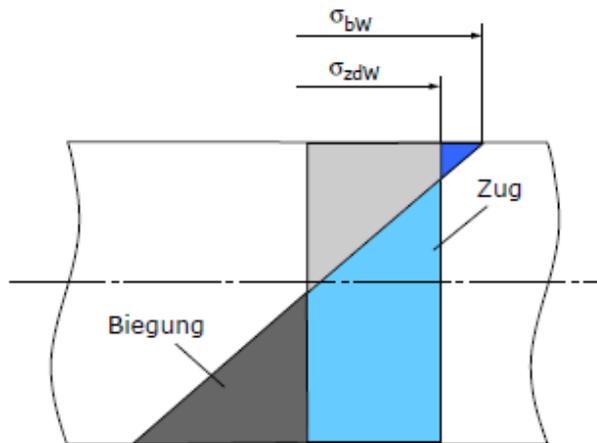


Abbildung 2.23 Makroskopische Stützwirkung Setzt man eine Probe also unter Biegebeanspruchung, so wird die Wechselfestigkeit durch ein Spannungsgefälle und die dadurch eintretende Stützwirkung erhöht. Bei Zug-/Druck-Belastung ist dies nicht der Fall.

Abbildung 2.23 Makroskopische Stützwirkung (Meier , 2007)

2.6.6 Einfluss von Kerben auf die Ermüdungsfestigkeit

Der größte Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit eines Werkstoffes geht von der Kerbwirkung aus. Kerben sind im Holz Steifigkeitssprünge (Frühholz-Spätholz) oder Inhomogenitäten (Astigkeit etc.). Rauheit der Oberfläche führt ebenso zu Kerbwirkungen. Kerbwirkungen erleichtern die Rissbildung und setzen daher die Schwingfestigkeit herab.(Meier , 2007)

2.7 Methodik zu Ermüdungsversuchen

Beim Standard-Ermüdungsversuch wird der zu untersuchende Probenkörper mit einer sinusförmigen, veränderlichen Beanspruchung belastet. *Abbildung 2.24 Spannungs-Zeit-schaubild beim Dauerschwingversuch nach DIN 50100(Aicher & Zachary , 2015)*

Wesentliche Parameter der Schwingbeanspruchung:

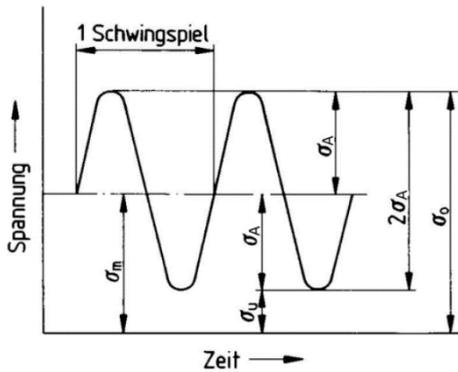
$$\text{Mittelspannung } \sigma_m = \frac{(\sigma_o + \sigma_u)}{2} \quad (8)$$

$$\text{Spannungsschwingbreite } \Delta\sigma = |\sigma_o - \sigma_u| \quad (9)$$

$$\text{Spannungsamplitude } \sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (10)$$

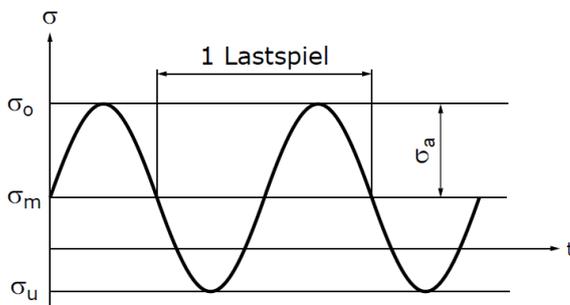
$$\text{Spannungsverhältnis } R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} \quad (11)$$

Die Spannungen sind mit korrektem Vorzeichen einzusetzen (positiv bei Zug- und negativ bei Druckspannung).



Die Schwingspielzeit ist die notwendige Zeit, um eine vollständige Schwingung auszuführen. (Aicher & Zachary , 2015)

Abbildung 2.24 Spannungs-Zeit-schaubild beim Dauerschwingversuch nach DIN 50100 (DIN 50100 Werkstoffprüfung - Dauerschwingversuch - Begriffe, 1978)



Weitere wichtige Kenngrößen sind die Oberspannung [σ_o], Unterspannung [σ_u], die Anzahl der Lastspiele mit der Lastspielzahl [n] und die Lastspielzahl bei Bruch [N]. Diese werden in der Abbildung 2.25 und 2.26 gezeigt. (Meier , 2007)

Abbildung 2.25 Grundbegriffe (Meier , 2007)

Schwell- & Wechselversuch/ -bereiche

Systemisch sind 7 Beanspruchungsfälle unterscheidbar. Diese wiederum können in 3 Hauptbereiche aufgeteilt werden. Der 1. Bereich ist der Druckschwellbereich (I) mit Oberspannung $\sigma_o \leq 0$. Somit handelt es sich in diesem Fall um reine Druckschwellbeanspruchung $\sigma_o = 0$ Fall 2. Der 2. Bereich ist mit $\sigma_o > 0$ und $\sigma_u < 0$ im Wechselbereich (II) mit reiner Wechselbeanspruchung bei $\sigma_m = 0$ (Fall 4). Im Zugschwellbereich (III) mit $\sigma_u \geq 0$ wird reine Zugbeanspruchung an das Material weitergegeben. Somit ist $\sigma_u = 0$ (Fall 6) (Meier, 2007)

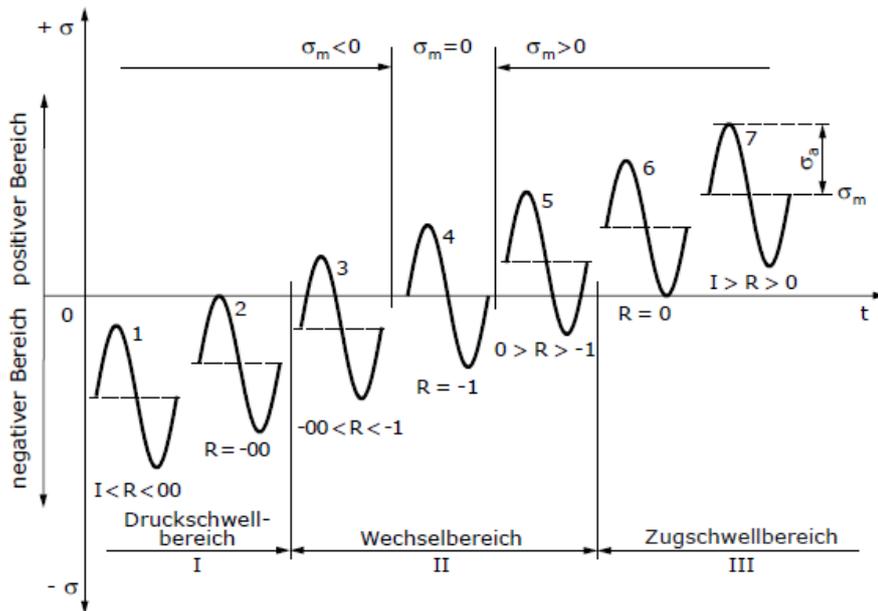


Abbildung 2.26 Belastungsfälle (Meier, 2007)

Im oberen Bild wird ein Schema für die Schwell- und Wechselbereiche mit den möglichen Vorzeichen für den Zug- und Druckbereich dargestellt. Es zeigt die wechselnde Beanspruchung anhand des Vorzeichenwechsels. Der Schwellbereich ist laut Definition sowohl im Zug- als auch im Druckbereich mit einem positiven R-Wert gekennzeichnet. Beim Wechselbereich ändern sich hingegen das Vorzeichen der Randspannungen, wodurch sich ebenfalls das Vorzeichen in positiv und negativ darstellt. Dies wird als Wechsellastspannung bezeichnet. Beispiele dafür sind Zug/ Druck, oder Schub und Biegung. (Aicher & Zachary, 2015)

$$0 < R \leq 1 \text{ Schwellbereich} \quad (12)$$

$$-1 < R \leq 0 \text{ Wechselbereich} \quad (13)$$

$$R > 1 \text{ Druckbereich} \quad (14)$$

Wöhlerkurve

Die Variante der „vollständig nicht linearen Wöhlerkurve“ teilt sich in 3 Bereiche (Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.):

- Zu Beginn die **Kurzzeitfestigkeit**
- Anschließend die **Zeitfestigkeit**
- Bis hin zur **Dauerfestigkeitsgrenze**

(Haibach, 2006)

Der Wöhlerversuch dient der Ermittlung von Versagensgrenzen unter einer Ermüdungsbeanspruchung. Die Probengeometrie muss gewissen Normen entsprechen. Die Probe wird mit vorher bestimmter Mittelspannung und einer Spannungsamplitude beaufschlagt und bis zum Bruch oder bis zu einer Grenzlastspielzahl belastet. Üblicherweise werden die Ergebnisse anschließend in einem doppelt logarithmischen Diagramm dargestellt. σ_A wird dabei auf der Ordinate aufgetragen und kennzeichnet die Höhe der beaufschlagten Last. Auf der Abszisse wird die Lastspielzahl N vermerkt. Werden die Ergebnisse des Versuchs aufgetragen, ergeben sie die sogenannte Wöhlerkurve. Sie dient zur Darstellung, wie viel ein Werkstoff, Material oder Bauteil bei gegebener Ausschlags-Spannung an Lastzyklen ertragen kann. (Meier, 2007)

Der erste Bereich bei Lastspielzahlen bis $N < 10^4$ wird als Low Cycle Fatigue bezeichnet. Hier erreicht die Oberspannung die Dehngrenze. Der Bereich der Lastspielzahlen $10^4 < N < 10^7$ wird mit High Cycle Fatigue bezeichnet. Die Probe

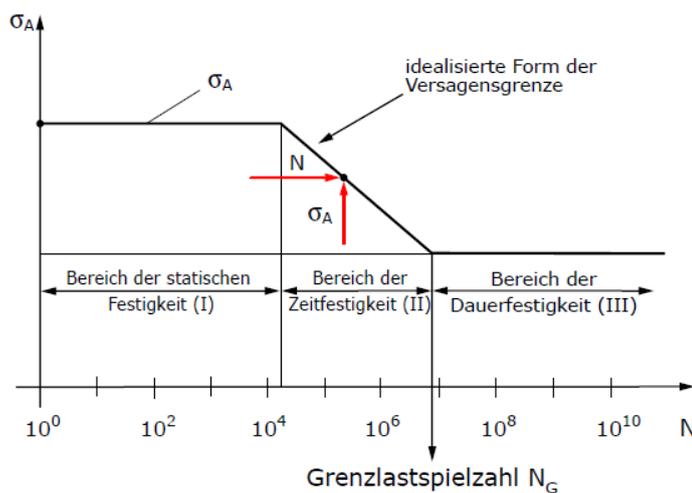


Abbildung 2.27 Festigkeitsbereiche während der Ermüdung

bringt, abhängig von Spannungsamplitude und Mittelast. *Abbildung 2.27 Festigkeitsbereiche während der Ermüdung*

Der Bereich der Lastspielzahlen oberhalb von 10^7 wird mit Very High Cycle Fatigue bezeichnet. Es gibt Werkstoffe (beispielsweise weniger feste Stähle), welche eine Dauerfestigkeit zeigen. Diese Werkstoffe bre-

chen entweder bis 10^7 oder sie überleben auch sehr hohe Lastspiele ohne Bruch. In diesem Fall verläuft die Wöhlerkurve oberhalb von 10^7 Lastspielen parallel zur Abszisse (wie im Bild gezeigt). Die meisten Werkstoffe zeigen allerdings auch im Very High Cycle Fatigue Bereich Brüche. Die Wöhlerkurve fällt daher immer weiter ab.

Eine Wöhlerkurve wird durch Einhaltung konstanter Amplituden und Mittelspannungen ermittelt. Dabei sind $R=-1$, $0,5$ oder $-0,5$ Schwingversuche angesetzt. Verwendet werden mehrere Prüfkörper und unter unterschiedlichen Oberspannungen bzw. absolute Schwingbreiten gesetzt. Das zu prüfende Material wird bis zum Bruch belastet. (Aicher & Zachary , 2015)

Die so gewonnenen Messpunkte geben eine rein statistische Information über die Versagenswahrscheinlichkeit bei einem bestimmten Material, welche unter einer definierten Spannung, zyklisch belastet wurden. Somit ist die Wahrscheinlichkeit jeder Kurve separat zu betrachten. Diese variiert je nach Belastungsart und Werkstoff. (Meier , 2007)

Bei Materialien mit großen Streuungen im Bereich der Kurzzeitfestigkeit, wie es bei Holz der Fall ist, ist es schwierig statistische Analysen zur Ermittlung der beispielsweise 5%-Quantil-Wöhlerkurve durchzuführen. Hierbei müssen ingenieurmäßige Plausibilitätsbetrachtungen zur Abschätzung verwendet werden. *Abbildung 2.28 Streubereich einer Wöhlerkurve doppellogarithmische Darstellung der Wöhlerkurve aus Zugschwellversuchen mit verschiedenen Wahrscheinlichkeiten P_A für das schadlose Überstehen* (Aicher & Zachary , 2015)

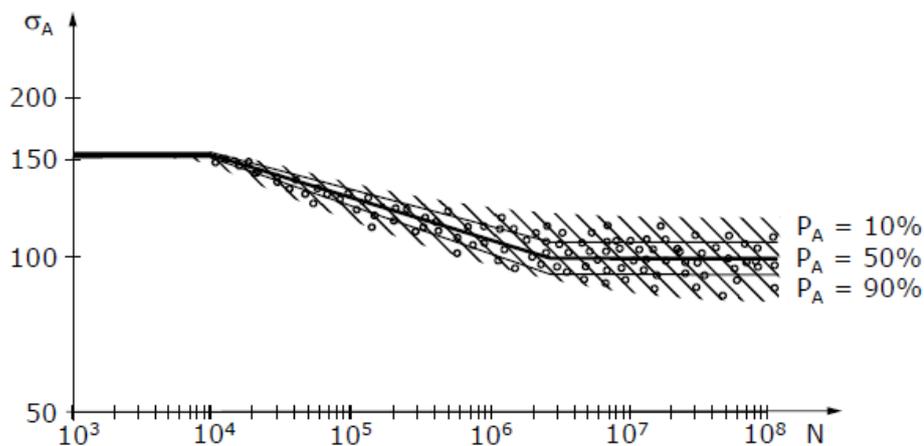


Abbildung 2.28 Streubereich einer Wöhlerkurve doppellogarithmische Darstellung der Wöhlerkurve aus Zugschwellversuchen mit verschiedenen Wahrscheinlichkeiten P_A für das schadlose Überstehen (Meier , 2007)

3 Material & Methodik

3.1 Struktur & Aufbau von Bergahorn

Jede Holzgattung besitzt Eigenschaften, die sie von anderen unterscheidet. So ist auch der Aufbau jeder Holzart an sein Habitat angepasst und darauf optimiert. Unterschiede in der Struktur und dem Aufbau der jeweiligen Art, Faseraufbau & -Länge, Rohdichte, das Verhältnis von Früh- zu Spätholz, die Astigkeit und viele andere Faktoren beeinflussen, wie sich das Holz unter den jeweiligen Bedingungen verhält.

3.1.1 Erkennungsmerkmale

Splint und Kernholz sind hell und weißlich. Der Querschnitt ist zerstreut porig und die Jahringgrenzen sind deutlich erkennbar, jedoch fein definiert. Der Härtegrad von Bergahorn wird mit "hart" bezeichnet. Das Holz des Bergahorn ist eines der hellsten einheimisch wachsenden Baumarten. Der wellige Faserverlauf ist wohl eine der häufigsten Wuchscharakteristika. (Fellner, Teischinger, & Zschokke, 2006)

3.1.2 Physikalisch Eigenschaften

Physikalischen Eigenschaften von Bergahorn können der nachstehenden *Tabelle 3.1 Physikalische Eigenschaften von Bergahorn* entnommen werden.

Rohdichte	
Mittelwerte	623 [kg/m ³]
Grenzwerte	530-790 [kg/m ³]
Schwindmaße (gesamt)	
Axial (l_{\max})	0,4-0,5 [%]
Radial (r_{\max})	3,3-4,4 [%]
Tangential (t_{\max})	8,0-8,5 [%]
Quellmaße (differentiell)	
Radial q_r	0,1-0,2 [%]
Tangential q_t	0,22-0,30 [%]

Tabelle 3-1 Physikalische Eigenschaften von Bergahorn (Fellner, Teischinger, & Zschokke, 2006)

Mit einer Darrdichte von 590 kg/m³ ist der Bergahorn etwas weniger dicht als der Spitzahorn mit 620 kg/m³. Die Spaltbarkeit, des Holzes ist durch das sehr dichte Gefüge niedrig und es verfügt über eine sehr gute Bearbeitbarkeit mit Messern beziehungsweise über gute Eigenschaften bei der Schälbarkeit. Zudem ist Bergahorn sehr gut biegsam.

Diese Eigenschaft ist unter anderem auf die Faserlänge des Holzes zurück zu führen. Untersuchungen an Ahorn haben gezeigt, dass die Länge im Bereich von 0,55 bis 1,10 mm liegt. Um einen Vergleich zu haben, sind die meisten zerstreutporigen Laubhölzer wie Ahorn im Bereich von 0,55-1,40 mm anzusiedeln. *Tabelle 3-2 Gesamtübersicht der Faserlängenmessungen* Damit liegt die Holzart im mitt-

HA Nr.	Holzart Name	Art	Min. [mm]	Max. [mm]	MW [mm]	Median [mm]
5	Berberitze	hp	0,25	0,70	0,43	0,42
11	Hasel	zp	0,75	1,90	1,21	1,21
12	Hartriegel	hp	0,50	1,50	1,03	1,04
33	Douglasie	NH	1,50	3,30	2,33	2,32
39	Weide	zp	0,55	2,20	1,07	1,06
41	Holunder	zp	0,55	1,40	0,94	0,93
47	Flieder	hp	0,30	0,85	0,59	0,59
49	Thuje	NH	0,80	3,60	1,87	1,86
52	Roskastanie	zp	0,45	1,00	0,72	0,73
55	Sanddorn	rp	0,30	0,90	0,61	0,61
56	Rotbuche	hp-zp	0,65	1,80	1,19	1,17
57	Ahorn	zp	0,55	1,10	0,88	0,89
58	Tanne	NH	1,80	5,10	3,67	3,64
61	Marille	hp	0,35	1,35	0,76	0,72
67	Esche	rp	0,55	1,35	0,89	0,89
71	Birne	zp	0,65	1,75	1,07	1,05

Tabelle 3-2 Gesamtübersicht der Faserlängenmessungen (Tuschl, 2016)

leren Bereich der Faserlängen im Vergleich zu anderen Baumarten. Ringporige Holzarten wie die Eschen haben im Vergleich dazu Faserlängen von 0,50 bis 1,15mm und halbringporige Hölzer 0,30 bis 1,0 mm. Nadelholz hingegen hat eine wesentlich längere Faser. Mit 1,10 bis 5,10 mm Länge sind sie deutlich länger und das Holz biegsamer als die der Laubholzgattungen. (Tuschl, 2016)

Für die Bearbeitungsschritte Schnitzen, Bohren, Fräsen und Drechseln ist Ahorn bestens geeignet. (Fellner, Teischinger, & Zschokke, 2006) Zur Bearbeitung der eigenen Probenformen sowie den weiteren Arbeitsgängen wie dem Einspannen

der Prüfkörper in die Versuchsanlage, hat diese Holzart gute Voraussetzungen.

3.1.3 Mechanische Eigenschaften

Mechanische Eigenschaften von Bergahorn können nachstehender *Tabelle 3-3 Mechanische Eigenschaften von Bergahorn* entnommen werden.

Elastische Eigenschaften	
Biege- Elastizitätsmodul E_I	9400 [N/mm ²]
Festigkeitseigenschaften	
Biegefestigkeit	112 [N/mm ²]
Zugfestigkeit $f_{t,0}$	82 [N/mm ²]
Druckfestigkeit $f_{c,0}$	58 [N/mm ²]
Härte	
Brinellhärte $H_{B,0}$	62 [N/mm ²]
Brinellhärte $H_{B,90}$	27 [N/mm ²]
Sonstiges	
Wärmeleitfähigkeit	0,16-0,18 [W/mK]
Natürliche Dauerhaftigkeit	
Pilze	5, nicht dauerhaft
Anobium	S, anfällig
Tränkbarkeit	
Kernholz	1, gut tränkbar
Splintholz	1, gut tränkbar

Tabelle 3-3 Mechanische Eigenschaften von Bergahorn (Fellner, Teischinger, & Zschokke, 2006)

3.2 Verwendete Prüfgeräte

3.2.1 High-Cycle-Fatigue mit Material-Testing-System (MTS 810)

Bei der MTS handelt es sich um eine vielseitig einsetzbare, servohydraulische Prüfmaschine für statische und dynamische Belastungen. *Abbildung 3.1 Schema der MTS 810*

Die stabile Auslegung des Rahmens der MTS sowie die hohe Steifigkeit dessen,

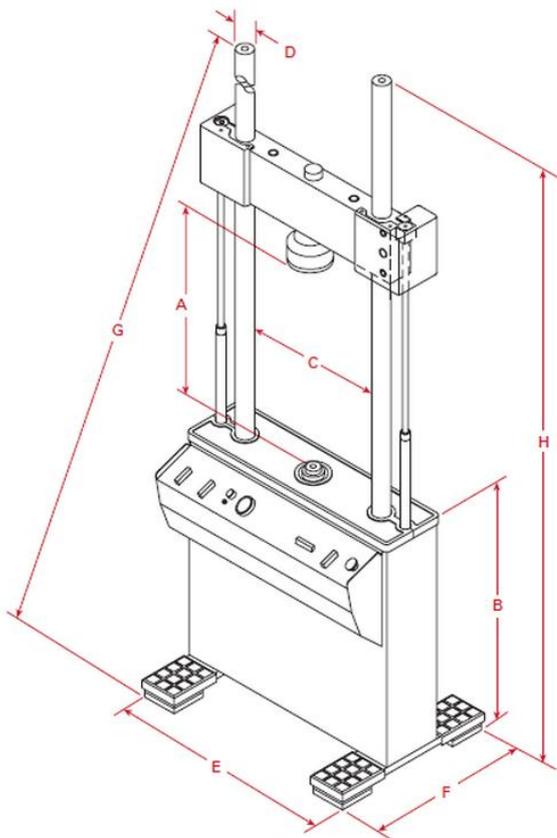


Abbildung 3.1 Schema der MTS 810 (MTS Systems Corporation, 2006)

bieten eine gute Voraussetzung für Ermüdungsversuche. Des Weiteren ist eine präzise Ausrichtung der unteren und oberen Einspannvorrichtung gewährleistet, was eine Bedingung für das spannungsfreie Einbauen der Proben in den Prüfstand ist. *Abbildung 3.2 Darstellung der Einspannvorrichtung mit Probe.* Beim

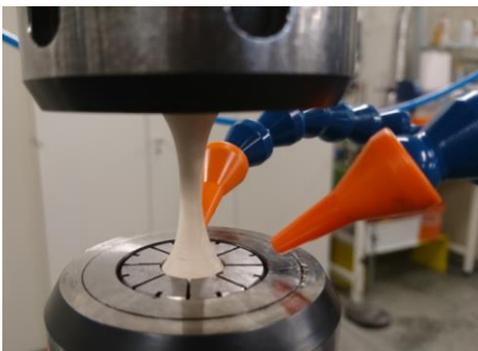


Abbildung 3.2 Darstellung der Einspannvorrichtung mit Probe

Einbau der Probe muss der Prüfbereich unbedingt von unerwünschten Belastungen, wie z.B. Biegung oder Torsion freigehalten werden. Ansonsten ist die Belastung undefiniert und die gewonnenen Messwerte unzuverlässig.

Dies gilt ebenso für andere unerwünschte Belastungen während der Versuchsdurchführung. Lediglich Druck und Zug sollen in axialer Richtung zur Probe aufgebracht werden. Die Einspannung wird mittels Spannschlüssel betätigt und zieht den geschlitzten Spannring mit zunehmendem Druck enger um das Probenstück. Die äußeren Fasern der Probe werden im Einspannbereich gequetscht und das Probenstück somit in Position gehalten.

3.2.2 Ultraschall-Ermüdungsprüfung

Der Versuch im Ultraschallbereich ist ein bewegungskontrollierter Versuch. Dabei wird das Elastizitätsmodul jeder Probe benötigt, um aus der Bewegung die Dehnung und aus dieser die Spannung nach dem Hookeschen Gesetz berech-

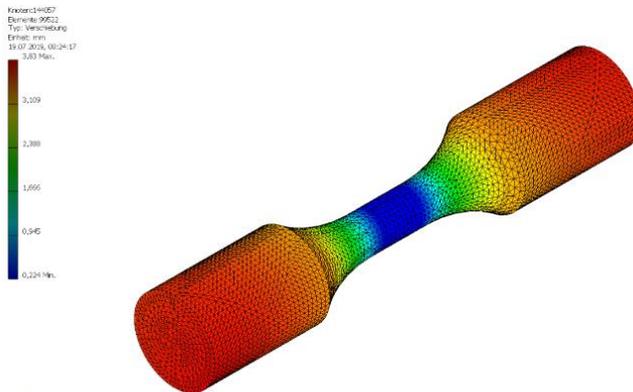


Abbildung 3.4 Auszug aus der FE-Simulation des Probenkörpers für die Ultraschallmessung. Bild und Berechnung von Bernd Schönbauer

nen zu können. Die Ultraschallprüfung selbst ist eine Schwingungsprüfung bei Resonanzfrequenz. Daher muss zuerst die Probenform mit entsprechender

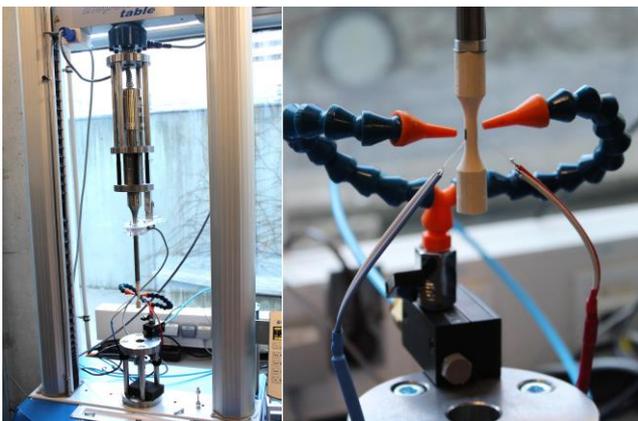


Abbildung 3.3 Aufbau der Ultraschallapparatur mit Kopplung des Probenkörpers und der DMS

Dichte für das Material und dem resultierenden E-Modul berechnet werden. Siehe *Abbildung 3.4 Auszug aus der FE-Simulation des Probenkörpers für die Ultraschallmessung. Bild und Berechnung von Bernd Schönbauer und Abbildung 3.3 Aufbau der Ultraschallapparatur mit Kopplung des Probenkörpers und der DMS*

3.2.2.1 Funktionsprinzip der Ultraschall-Prüfung

Ein sinusförmiges Leistungssignal wird mit einem piezoelektrischen Wandler in eine mechanische Vibration umgewandelt. Die einseitig eingespannte Probe schwingt dann bei einer bestimmten vorgewählten Schwingungsamplitude in Resonanz. Der einstellbare Bereich der Resonanzfrequenz liegt im Bereich von 18 bis 22 kHz. Die Form der Schwingung ist eine symmetrische Zug- Druck-Belastung bei $R=-1$. Die Finite-Element-Simulation dient dazu den Frequenzbereich festzulegen, in dem die Probe anschließend in Eigenschwingung beziehungsweise in Resonanz geraten soll. (Mayer, Recent developments in ultrasonic fatigue, 2016)

3.3 Verwendete Analysegeräte

3.3.1 Dehnmessstreifen mit Messbrücke

Zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls der jeweiligen Probe wurde im Vorfeld die Dehnung jedes Prüfkörpers bestimmt. Dabei wurden im Prüfbereich jeder Probe 2 Dehnmessstreifen an gegenüberliegende Seiten geklebt um anschließend die Dehnung unter bestimmter Spannung ermitteln zu können. Die Messbrücke diente dabei zur Analyse der ermittelten Spannungswerte unter der Probendehnung.

Dehnmessstreifen ändern ihren elektrischen Widerstand proportional zur Dehnung. Diese Widerstandsänderung wird mit einer Wheatstone-Brücke in eine Spannung umgewandelt, deren Größe proportional zur Dehnung ist. So kann der DMS als Dehnungssensor verwendet werden. Für die hier geführten Untersuchungen wurde der KYOWA vom Typ 1-120-C1-23 mit einem k-Faktor von $2,09 \pm 1,0\%$ verwendet.

3.3.2 Lichtmikroskopie Keyence VHX 5000

Mit Hilfe der Digitalmikroskopie konnten Bruchbilder und Analysen der Bruchoberflächen im makroskopischen Bereich erstellt werden. Dabei war das Keyence besonders bei der Erarbeitung der Bruchtypen 1 bis 3 von besonderer Wichtigkeit.

Bei einem Digitalmikroskop ist ein optisches Mikroskop mit einer digitalen Kamera ausgestattet. Zudem benötigt es keine Okulare. Die Betrachtung wird direkt über einen Monitor geführt, der die aufgenommenen Bilder überträgt. Diese Art

der Mikroskopie wird vorwiegend in der Forschung und Entwicklung, aber auch in der Qualitätskontrolle oder der Fehleranalyse verwendet.

3.3.3 Rasterelektronenmikroskopie

Durch die Rasterelektronenmikroskopie war es möglich, auch im mikroskopischen Bereich Ansätze für Bruchmechanismen zu belegen und weiters auch Einschätzungen zu dokumentiertem Verhalten liefern zu können.

Bei der Rasterelektronenmikroskopie (REM) wird ein Elektronenstrahl in einem bestimmten Raster, über die zu untersuchende Oberfläche geleitet. Der Strahl entstammt einer Elektronenquelle, die beispielsweise aus Wolfram sein kann. Die Elektronen werden beschleunigt und erzeugen einen Strahl, der eine Wechselwirkung der Elektronen des Objekts hervorruft. Da die Wellenlänge der Elektronen wesentlich kleiner ist als jene von Licht, können auch Objekte im Nanometerbereich sichtbar gemacht werden. Die Abtastung des Objekts findet im Hochvakuum statt. Dadurch werden Wechselwirkungen mit Atomen in der Umgebung vermieden. Da im REM im Vakuum nur leitende Materialien untersucht werden können, musste die Holzoberfläche mit Gold bedampft werden. (Ardenne, 1938)

3.4 Prüfmethode

Der eingespannte Probenkörper wird mit sinusförmigen, zyklischen Spannungen beaufschlagt. Dabei werden Untersuchungen mit 50 Hz bei zyklischer Zugbeanspruchung ($R=0,1$), bei zyklischer Druckbeanspruchung ($R=10$) sowie Zug-Druckbeanspruchung ($R=-1$) durchgeführt. Die Prüfung erfolgte mit der MTS Prüfmaschine. Verwendet werden im Druckbereich die Probenform 1 (PF1) und im Zugbereich sowie Wechselbereich die Probenform 2 (PF2). Die Belastung der Proben in den unterschiedlichen Spannungsbereichen wird entsprechend einem vorher festgelegten Protokoll oder Programm abgefahren.

In einer weiteren Prüfserie werden Prüfkörper im Ultraschallbereich bei etwa 20 kHz getestet. Bei der Resonanzmethode wird der eingespannte Probenkörper in Eigenresonanz versetzt und es wird eine sinusförmige, zyklische Schwingung des Wechselbereichs simuliert.

Durch die wiederholte und gleichbleibende Belastung der Holzfasern und des Verbundes, in dem sie sich befinden, soll das Material ermüden. Ziel ist es also, die Ermüdungsfestigkeit von Ahorn abhängig von Lastamplitude und Mittellast zu bestimmen.

4 Versuchsdurchführung & Ergebnisse

4.1 Probenvorbereitung

Die Toleranz der Proben-Maße liegen im Prüfbereich bei $\pm 0,05\text{mm}$. Durch das spätere händische nacharbeiten, bei einigen Proben mit Schleifpapier, erhöht sich diese Abweichung. Diese Arbeiten wurden für alle Proben durchgeführt. Die genauen Durchmesser jeder Probe können im Anhang der Tabelle für die Dichte-Berechnung 0-2 entnommen werden.

Im Bereich der Einspannung wurde eine Maßtoleranz von $-0,00$ und $+0,05\text{mm}$ vorgegeben. Dadurch soll die Wahrscheinlichkeit für Bewegungen der Probe in der Einspannung des Prüfstandes während der Versuchsdurchführung vermindert werden. Des Weiteren wird damit der Versuch unternommen, das Herausziehen durch Zugbeanspruchungen, ab einem bestimmten Spannungsniveau zu verhindern. Siehe *Abbildung 4.1 Verwendete Probenformen 1-3*

Die Enden der Prüfkörper werden abgerundet, um ein spannungsfreies Fixieren dieser in der Prüfanordnung zu garantieren.

Die Rauigkeit der Oberfläche im Prüfbereich wurde durch die Nachbearbeitung mittels Schleifpapiers der Körnung 200 und 500 definiert. Die derart erreichte geringe Rauigkeit dient dazu, dass keine undefinierte Rissbildung an Oberflächenkerben eintritt.

Um Spannungsspitzen im Ausrundungsbereich zu vermeiden, wurde besonders darauf geachtet, dass sich hier durch die Bearbeitung keine Kanten ausbilden.

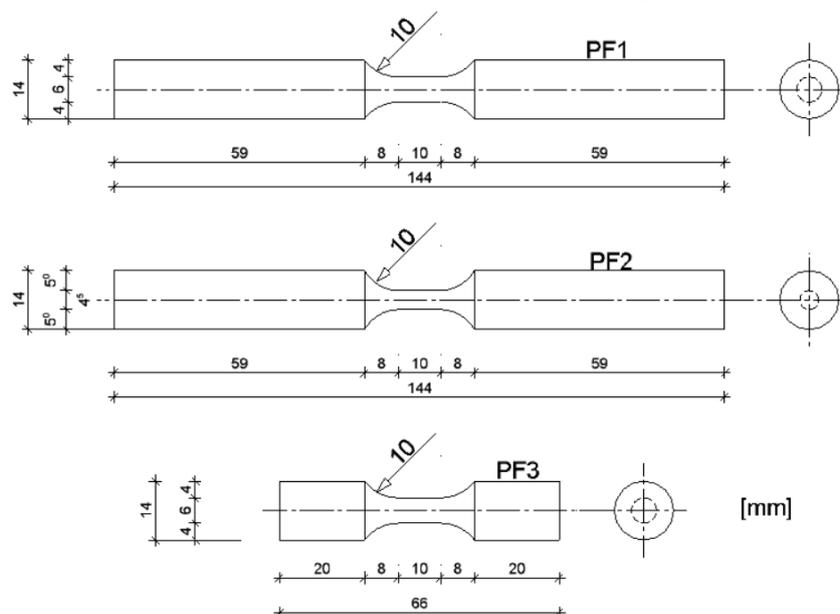


Abbildung 4.1 Verwendete Probenformen 1-3

4.1.1 Herstellung

Alle Prüfkörper wurden aus trocken gelagertem Bergahorn hergestellt. Dieser wurde auf Grund seines relativ homogenen Aufbaus von Früh- und Spätholz ausgewählt. Dabei wurde darauf geachtet, dass alle Proben aus etwa derselben Ebene des Baumquerschnittes gefertigt werden. Dadurch wird eine geringere Dichtevarianz gewährleistet. Die Fertigung der Probenkörper selbst wurde unter Verwendung einer computergestützten Drehmaschine, am Institut für Holzforschung, in Tulln, durchgeführt. Damit sollten Kraftspitzen, die während der Fertigung auf die Proben wirken können, möglichst minimiert werden. Zudem war eine Fertigung mit sehr geringen Formabweichungen möglich. Neben der unbedingt notwendigen Maßhaltigkeit der Proben war außerdem die Parallelität in der Längsachse von großer Wichtigkeit. Sie ist unabdingbar, um ein biegespannungsfreies Einbauen der Probe in die Prüfvorrichtung zu gewährleisten.

4.1.2 Lagerung

Die Lagerung der Prüfkörper erfolgte für mindestens 72 Stunden bei einem Normklima von 23°C und einer relativen Feuchte von 50%. Dabei wurde dafür gesorgt, dass die Proben horizontal und flach gelagert wurden, um eventuellen Verzug der Faser zur Probenachse minimal zu halten.

4.1.3 Modifikation der Probe für den Zug- und Wechselbereich

Bei Proben, die im Versuch Zugkräften unterworfen werden, wurde der Probendurchmesser in der Mitte von 6mm auf 4,5mm verkleinert. Durch die begrenzte Anpresskraft der Einspannung auf die Enden der Proben werden diese ansonsten bei höheren maximalen Zugkräften aus der Einspannung herausgezogen. Außerdem können keine zu hohen Einspannkräfte verwendet werden, da ansonsten die Holzfasern im Prüfbereich beschädigt würden. Um die Kraft zum Erreichen der Spannungsniveaus zu vermindern, wurde die Querschnittsfläche verkleinert. Die erlaubten maximalen Kräfte wurden im Rahmen von Vorversuchen bestimmt.

Zur Reduzierung des Querschnitts wurde, wie eingangs erwähnt, Schleifpapier der Körnungen 200 und 500 verwendet. Der Prüfkörper war zu diesem Zweck in eine Drehbank eingespannt. Dort konnte mit vorgefertigten 1cm breiten Schleifpapierstreifen unter konstanter Bewegung, gleichmäßig eine Dicke von ca. 1,0mm abgetragen werden. Anschließend wurde dann die Oberfläche mit einer 500 Körnung weiter geebnet. Dabei wurde auf eine gleichmäßige und druckkonstante Bewegung der Hand geachtet. Tiefe Riefen und ungleiches Abschleifen

der Probenform wurden derart weitestgehend vermieden. Der letzte Schleifgang erfolgte mit Papier der 500 Körnung in Längsrichtung.

Zur Durchführung und Kalibrierung der Prüfanlage für den Ultraschallversuch wurden die Probenform PF3 im Prüfbereich an gegenüberliegenden Seiten mit je einem Dehnmessstreifen ausgestattet. Dieser wird mittels Sekundenkleber auf die Prüfoberfläche gedrückt und verklebt. Mithilfe von 2 Messbrücken können so die Dehnungen an 2 Stellen gemessen werden. Aus diesen Messungen lassen sich mit Hilfe von statischen Versuchen die Elastizitätsmodule bestimmen. Auch lässt sich derart der lineare Zusammenhang zwischen Schwingungsamplitude im Ultraschallversuch und Dehnungsamplitude im Messbereich der Probe bestimmen.

Die Standardprobenform PF1 wurde um 29mm gekürzt und somit die Prüfform 3 (PF3) hergestellt. Damit wurde gezielt auf eine bekannte Form für die Resonanzfrequenz des Probenkörpers zurückgegriffen. Diese ist nötig, um beim späteren Versuchsablauf die Probe in Schwingung versetzen zu können. Eine Finite-Element-Analyse wurde dabei zur Validierung der Probenform benutzt.



Abbildung 4.2 Darstellung einer gesockelten Probe für die Ultraschallmessung

Zudem wurde mit Spezialklebstoff ein Metallsockel auf das Probenende geklebt. Siehe *Abbildung 4.2 Darstellung einer gesockelten Probe für die Ultraschallmessung*. Durch das Gewinde auf diesem Sockel kann die Probe in die Prüfvorrichtung eingeschraubt und befestigt werden. Die genaue Bezeichnung des Klebers lautet Araldite 2014-1. Hierbei handelt es sich um einen pastösen Zweikomponentenklebstoff auf Epoxidharzbasis. Um eine gute Haftung beim Aufbringen des Klebstoffs zu gewährleisten, wurde darauf geachtet, die Klebeflächen nach dem Schneiden mit nichts mehr in Kontakt kommen zu lassen. Somit wurden Verunreinigungen wie Fett oder Öl ausgeschlossen. Ein mechanisches Aufräuen der Flächen war durch die gegebene Struktur des Holzes am Hirnholz-Ende nicht notwendig. Die Erhärtung wurde entsprechend dem technischen Merkblatt für Araldite 2014-1 bei einer Temperatur von 23°C für mindestens 5 Stunden durchgeführt. Für die anschließenden Versuche im Bereich von 20 kHz waren die Klebeverbindungen stabil und hielten der Belastung stand.

4.1.4 Ermittlung des Elastizitätsmoduls für Ultraschallmessung

Die Proben wurden in der Form PF1 in die MTS eingespannt und die Dehnmessstreifen an jeder Seite des Prüfbereichs mit einer Messbrücke verbunden. Anschließend wurden verschiedene Spannungsintervalle mit der Dehnung auf jeder Seite des Prüfbereichs verglichen. Siehe *Tabelle 4-1 Dehnungsmessung der Probe A063*. Über die bekannte Formel für das Elastizitätsmodul nach dem Hookeschen Gesetz berechnet.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (15)$$

Beispielhaft, hier die Ergebnisse der Probe A063:

Dabei wurden Durchmesser und somit Querschnittsflächen jeder Probe für jeden

gemessene Kraft [kN]	gemessene Spannung [MPa]	Dehnung [mm/m]		$\varepsilon_{\text{mean}}$ [mm/m]
		ε_1	ε_2	
0,000	0,000	0,09	0,06	0,075
0,130	4,702	0,335	0,334	0,3345
0,277	10,019	0,675	0,733	0,704
0,415	15,011	0,995	1,088	1,0415
0,551	19,930	1,33	1,462	1,396
0,693	25,067	1,663	1,82	1,7415
0,829	29,986	2,007	2,18	2,0935
0,690	24,958	1,675	1,81	1,7425
0,552	19,966	1,36	1,447	1,4035
0,412	14,902	1,005	1,05	1,0275
0,280	10,128	0,682	0,678	0,68
0,140	5,064	0,355	0,29	0,3225
0,020	0,723	0,03	0,059	0,0445

Prüfbereich gemessen und ermittelt. Dieser wurde durch dreimaliges Messen an unterschiedlichen Stellen im Zentrum und wiederholen dieser Prozedur um 90° versetzt, ermittelt. Die daraus resultierende Fläche wurde mit der beaufschlagten Kraft verrechnet, um die an die Probe anliegende Spannung berechnen zu können.

Tabelle 4-1 Dehnungsmessung der Probe A063

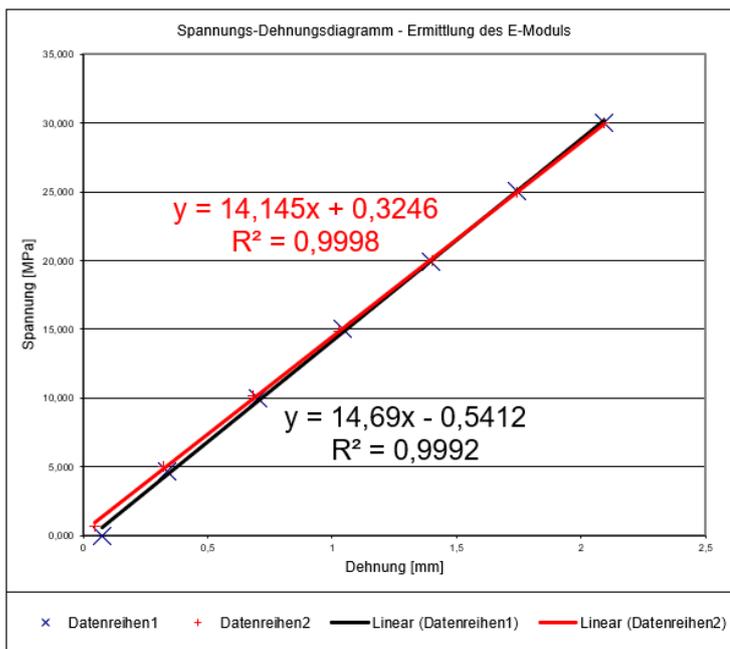


Abbildung 4.3 Graphische Dehnungsauswertung der Probe A063

Die Spannung wurde stufenweise in 5-MPa-Schritten erhöht. Dabei wurde nach einpendeln der Dehnung, diese für jede Seite (siehe ε_1 und ε_2) abgelesen. Die Prozedur wurde bis zu den festgelegten Maxima von 30 MPa wiederholt. Anschließend wurde die Prozedur umgedreht und von 30 MPa auf 0 MPa in 5-MPa-Schritten zurück gemessen. Um einen Mittelwert gewinnen

zu können und eventuelle Ungenauigkeiten durch das Kriechen des Holzes ausschließen zu können, wurden beide Durchgänge miteinander verglichen und gemittelt. Siehe *Abbildung 4.3 Graphische Dehnungsauswertung der Probe A063*.

Um die Dehnung der Proben messen zu können, wurden Dehnmessstreifen auf die Mitte des Prüfbereichs auf die jeweils gegenüberliegenden Seiten geklebt. Dabei wurden KYOWA vom Typ 1-120-C1-23 mit einem Gage Faktor von 2,09 und einer Genauigkeit von $\pm 1,0\%$ verwendet

4.1.5 Dichtermittlung des Prüfbereichs

Da Holz durch seine strukturellen Eigenschaften unterschiedliche Dichteverteilungen aufweist, wurde für jeden Prüfkörper die Dichte im Prüfbereich bestimmt. Dadurch war es möglich die gewonnen Ergebnisse mit der Dichte zu korrelieren, und die Daten zu gewichten. Zu diesem Zweck wurde das Probenstück nach der Prüfung im Einspann-Bereich auf die Faserebene des Prüfbereichs herunter gedreht. Damit ist die Verjüngung von

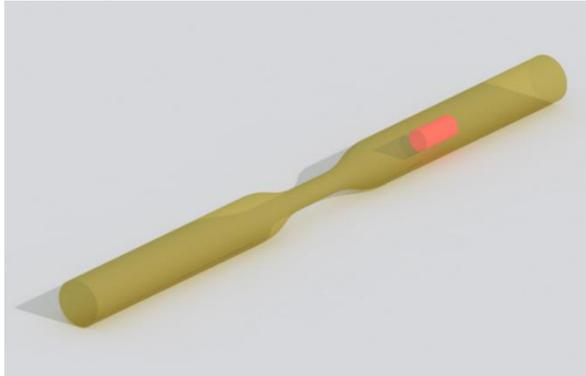


Abbildung 4.4 Herausgearbeiteter Messbereich im Probenkörper zur Dichtebestimmung

10mm Durchmesser am Einspannbereich auf 4,5mm im Prüfbereich gemeint. Es wurde also die gleich Faselinie des Prüfbereichs in den Einspannbereich verfolgt und maschinell herausgedreht. Zum Verständnis betrachte man *Abbildung 4.4*, in dem der Bereich in der Probe hervorgehoben ist. Die Probe wurde zu diesem

Zweck einseitig in eine Drehbank gespannt und mit einer ausgerichteten Klinge auf den Durchmesser des Prüfbereichs gedreht. Dabei war das Augenmerk auf die geringe Anwendung von Druck gelegt, um die Dichte des Holzes in diesem Bereich nicht zu beeinflussen. Anschließend wurde der Probenzylinder abgedreht und als ca. 10mm langes Stück mit einem Durchmesser von ca. 4,5mm, vermessen und gewogen. Die dadurch ermittelten Daten findet man im Anhang in der Tabelle 0-3 der Dichtermittlung aller Proben.

Die mittlere Dichte aller Prüfproben wurde mit $0,620 \text{ g/cm}^3$ ermittelt. Dieser Messwert stimmt gut mit dem Literaturwert von $0,623 \text{ g/m}^3$ (Fellner, Teischinger, & Zschokke, 2006) überein. Mit den für die Proben gemessenen Dichten ist es möglich die Messergebnisse zu gewichten und den Dichteinfluss auf die Steifigkeit und Festigkeit zu berücksichtigen.

4.2 Anpassung der Versuchsdurchführung

4.2.1 Kühlung des Aufbaus

Während der Vorversuche wurde festgestellt, dass sich trotz aller Bemühungen einer maßhaltigen Probenform und einer festen Einspannung, die Proben ab einer gewissen Zykluszahl (bei etwa $3 \cdot 10^6$) aus der Verankerung lösen. Dies beginnt durch ein minimales Spiel innerhalb der Einspannung. Im Laufe der Zeit wird dieses Verhalten immer stärker, bis die Reibung zu Verfärbungen an der Oberfläche der Proben führt.

Die Verfärbungen sind hier wahrscheinlich durch die entstandene Reibungswärme aufgetreten. Siehe *Abbildung 4.5 Verfärbung einer Probe an der Unteren Einspannung durch Testprozedere*. Der Ansatz, der zur Lösung des Problems verfolgt wurde war, dass sich die Holzfasern der Proben durch entstehende Reibungswärme in ihren Ausmaßen verkleinern. Dabei würde das in den Holzfasern gebundene Wasser erwärmt und aus-diffundieren. Dadurch ist das bei Holz typische Verhalten des Schwindens eingetreten.

Zusätzlich plausibel und diese Annahme untermauernd war der Umstand, dass die Probe immer aus der unteren Verankerung gezogen

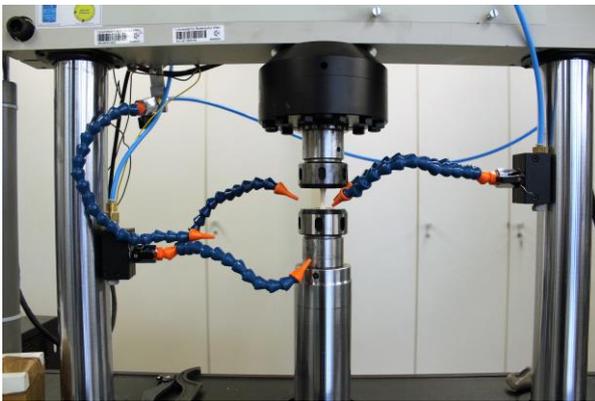


Abbildung 4.6 Installierte Kühlung des Prüfaufbaus



Abbildung 4.5 Verfärbung einer Probe an der Unteren Einspannung durch Testprozedere

wurde, welche durch den Antrieb des Prüfstandes eine über die Zeit erhöhte, Temperatur erreichte. Durch direkte Luftkühlung aus Düsen wurde dieser Prozess merklich minimiert. Durch den Luftstrom wurde der angetriebene Kolben (untere Einspannung) sowie die umliegenden Probenbereiche gekühlt, sodass ausreichend hohe Zykluszahlen

erreicht werden konnten. Siehe *Abbildung 4.6 Installierte Kühlung des Prüfaufbaus*.

4.3 Versuchsdurchführung

4.3.1 Programmablauf des Versuchs

Um die Gefahr fehlerhafter Überlasten im Versuch zu vermeiden, wurden alle Proben über ein speziell für die Versuchsdurchführung erstelltes Programm geprüft. In der ersten Phase ("to mean") werden hierbei die Proben über eine Rampe auf das mittlere Spannungsniveau gefahren. Bei den Proben im Wechselbereich mit $R=-1$ ist keine Rampe notwendig, da bei diesem Lastverhältnis die Mittelspannung gleich 0 ist.

Nach Erreichen der Mittelspannung beginnt das "Wobbeln" in Phase 2 ("Auf Frequenz") Hier steigt die Amplitude bei konstant steigender Frequenz an. Die Regelung wird durch diese Prozedur stabilisiert. Dadurch wird ein eventuelles Reißen an den Proben durch undefinierte Regelung der Servomechanik der Prüfapparatur ausgeschlossen.

In der Phase 3("Zyklischer Sollwert") geht die Belastung der Probe in die für sie angedachte Frequenz und Amplitude über. Die Probe wird nun bis zum Bruch oder bis zum Erreichen der Grenzlastspielzahl geprüft.

Die wichtigsten Spezifikationen für die Programmierung des Prozesses sind nachfolgend den *Tabellen 4-2 4-3 4-4 und 4-5* zu entnehmen.

Datenerfassung	
Erfassungsmethode	Spitzenwerte
Spitzenwertsignal	Chanel Force
Spitzenwertempfindlichkeit	0,005 [N]
Datensicherungsmuster	Linear
Datenintervall	100 [Zyklen]
Letzter gespeicherter Zyklus	$1 \cdot 10^7$
Signalausgabe	Kraft, Zähler, Zeit, Datum, Verschiebung

Tabelle 4-2 Datenerfassung des Versuchsablaufs laut Programmierung

Phase 1 (to mean)	
Segmentform	Rampe
Rampenzeit	10 (Sek.)
Adaptive Regelung	Null Pacing
Regel Art	Kraft
Absoluter Endwert	[N]

Tabelle 4-3 Phase 1 des Versuchsablaufs laut Programmierung

Phase 2 (Auf Frequenz)	
Segmentform	Sinus
Wobbeln- Typ	Linear
Wobbeln- Rate	0,50 [Hz/s]
Startfrequenz	0,50 [Hz/s]
Endfrequenz	50 [Hz]
Adaptive Regelung	Spitzenwerte
Regel Art	Force

Tabelle 4-4 Phase 2 des Versuchsablaufs laut Programmierung

Phase 3 (Zyklischer Sollwert)	
Segmentform	Sinus
Frequenz	50 [Hz]
Zyklen bis Ende	10^7 [Zyklen]
Adaptive Regelung	Spitzenwerte
Regel Art	Force

Tabelle 4-5 Phase 3 des Versuchsablaufs laut Programmierung

4.3.2 Rechnerische Ermittlung des Spannungsniveaus

Das Spannungsniveau wird für die Zug-Druckbeanspruchung ($R=-1$), die zyklische Zugbeanspruchung ($R=0,1$) und die zyklische Druckbeanspruchung ($R=10$) berechnet. Dabei werden folgende Formeln verwendet:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (16)$$

$$\sigma_{min} = \sigma_{max} \times R \quad (17)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (18)$$

$$\sigma_{mean} = \frac{(1+R)}{(1-R)} \times \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (19)$$

$$\sigma_{max} = \frac{2}{(1-R)} \times \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (20)$$

$$\sigma_m = \frac{(1+R)}{(1-R)} \times \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (21)$$

Dabei ist R das Spannungsverhältnis, d.h. der Quotient aus minimaler und maximaler Spannung, während eines Lastspiels, $\Delta\sigma$ die Spannungsschwingbreite und σ_{mean} die Mittelspannung der Beanspruchung. Die nachfolgenden Diagramme wurden ausgehend von der Spannungsschwingbreite erstellt. Diese gibt den übersichtlichsten Aufschluss darüber, wie groß die Laständerung bei der Versuchsdurchführung gewesen ist.

4.3.3 Gewichtete Spannungsschwingbreite

Die Dichte von Holz hat einen starken Einfluss auf die Festigkeit und Steifigkeit. Beide Größen steigen mit der Dichte. Daraus folgt, dass Proben mit höherer Dichte bessere Schwingfestigkeiten zeigen als solche mit niedrigerer Dichte. Das führt zu einer großen Streuung der Messwerte.

Um den Einfluss der Dichte zu berücksichtigen, wird die unter 4.3.2 errechnete Spannungsschwingbreite jeder einzelnen Probe mit der jeweiligen relativen Abweichung der Dichte zur mittleren Dichte multipliziert.

$$(\text{Gewichtungs} - \text{Faktor})_i = \frac{\rho_{mean}}{\rho_i} \quad (22)$$

Notwendig für die Berechnung ist das arithmetische Mittel aller Dichten ρ_{mean} . Die Dichte der Probe i wird mit ρ_i bezeichnet. Der Gewichtungsfaktor wird im Anschluss mit der Spannungsschwingbreite, der die Probe ausgesetzt war, multipliziert. Somit werden die Ergebnisse im Diagramm angepasst. Die Belastung einer Probe mit unterdurchschnittlicher Dichte wird aufgewertet, d.h. für die Erstellung der Diagramme wird die Spannungsamplitude um den Gewichtungsfaktor >1 erhöht. Bei Proben mit überdurchschnittlicher Dichte wird das Spannungsniveau abgewertet. Mit dem Gewichtungsfaktor entsprechend Formel (22) wird eine mit der Dichte linear ansteigende Festigkeit angenommen.

Idee ist es den Einflussfaktor der Dichte, der direkte Auswirkungen auf die Festigkeit und somit auf die Bestimmung der Messergebnisse hat, auszugleichen. Die unterschiedlichen Dichten der Proben werden mit Hilfe der gewichteten Spannungsschwingbreite ausgeglichen. Damit wird versucht, die Streuung der Messwerte zu vermindern.

4.4 Prüfung bei zyklischer Druckbeanspruchung, R=10

Druckbereich											
Probe	σ_{\max} [N/mm ²]	σ_{\min} [N/mm ²]	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	σ_m [N/mm ²]	Dichte [g/cm ³]	σ_{mean} [g/cm ³]	Gewichtungs- Faktor	Zyklen gebrochen [1]	gewichtete Spannungs- Schwingbreite [MPa]	Zyklen Durchläufer [1]	gewichtete Spannungs- Schwingbreite [MPa]
A019	-70	-7	-63	-38,5	0,6608	0,6200	1,0658	2,08E+03	67,14		
A020	-60	-6	-54	-33	0,5834	0,6200	0,9409	2,82E+03	50,81		
A024	-57	-5,7	-51,3	-31,35	0,6738	0,6200	1,0867	1,00E+06	55,75		
A023	-55	-5,5	-49,5	-30,25	0,6509	0,6200	1,0499			1,11E+07	51,97
A021	-50	-5	-45	-27,5	0,6276	0,6200	1,0122	1,05E+05	45,55		
A017	-46	4,6	-41,4	-25,3	0,5860	0,6200	0,9452			1,01E+07	39,13
A018	-46	-4,6	-41,4	-25,3	0,6208	0,6200	1,0013			1,01E+07	41,46
A022	-45	-4,5	-40,5	-24,75	0,5995	0,6200	0,9669			1,00E+07	39,16

Tabelle 4-6 Prüftabelle der ermittelten Probandaten für zyklische Beanspruchung im Druckschwellbereich bei R=10

Als Durchläufer wird hier eine Probe gewertet, welche eine Lastspielzahl $> 10^7$ ohne Bruch überlebt hat. Der Wechsel vom Bruch- zum Durchläuferniveau liegt für Druckbeanspruchung bei R=10 im Bereich der Spannungsschwingbreiten von 51,3 bis 41,4 N/mm². Eine Dauerfestigkeit stellt sich somit im Bereich von unter 41,4 bzw. 40,5 N/mm² ein. Vergleicht man Literaturwerte von Berg-Ahornholz, so liegt dieser bei der Längs-Druckfestigkeit bei -50 N/mm ((NHM), 2003). Somit ist die maximal erlaubte Druckspannung bei wiederkehrender Last ca. 10 MPa

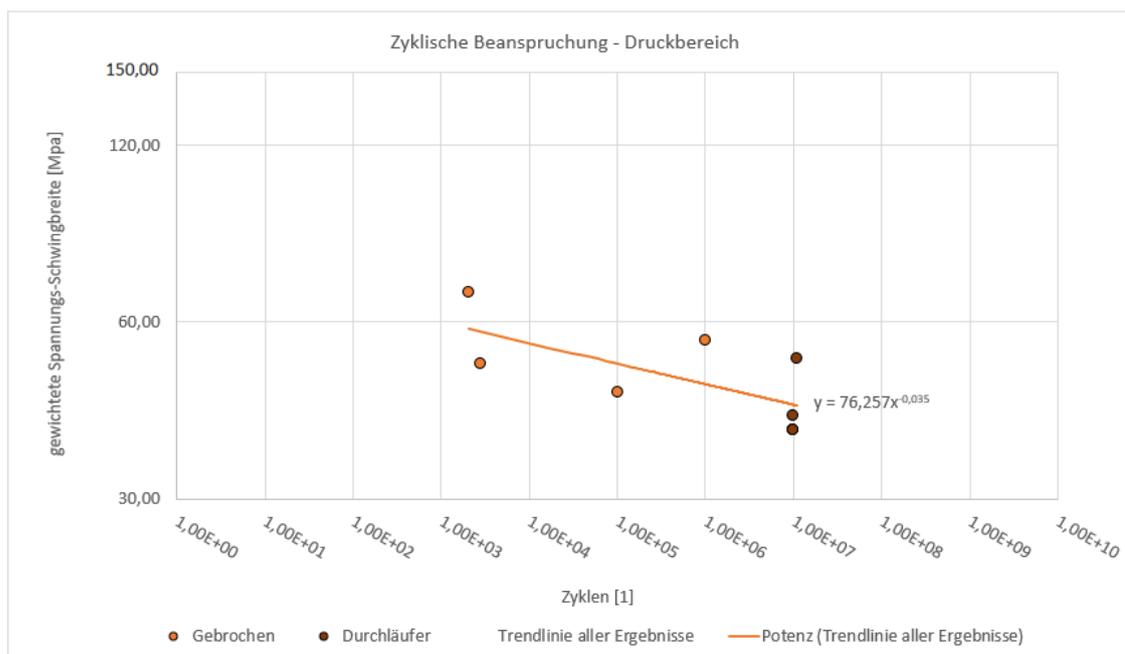


Abbildung 4.7 Diagramm der ermittelten Probandaten für zyklische Beanspruchung im Druckschwellbereich bei R=10

geringer als die Standarddruckfestigkeit von Bergahorn. Siehe *Tabelle 4-6 Prüftabelle der ermittelten Probendaten für zyklische Beanspruchung im Druckschwellbereich bei R=10* und *Abbildung 4.7 Diagramm der ermittelten Probendaten für zyklische Beanspruchung im Druckschwellbereich bei R=10*.

Alle Werte wurden für die doppelt-logarithmische Darstellung mit dem Gewichtungs-Faktor multipliziert, um die unterschiedlichen Dichten der Proben zu berücksichtigen. Zu Beginn wurde mit leicht ansteigender Frequenz geprüft. Danach wurde mit einer Prüffrequenz von 50 Hz gefahren.

Durch die doppelt logarithmische Darstellung der Ergebnisse im Diagramm und deren Gewichtung mit dem Faktor aus der Dichteabweichung, wird selbst bei wenigen Proben ein klarer Trend sichtbar. Die Schwingfestigkeit nimmt mit zunehmender Schwingbreite ab. In doppelt logarithmischer Darstellung können die Messwerte zwischen Lastspielzahlen von 10^3 bis 10^7 durch eine Gerade angenähert werden (Abbildung 4-5). Das heißt, dass der Zusammenhang zwischen Spannungsamplitude und Bruchlastspielzahl einem Exponentialgesetz gehorcht.

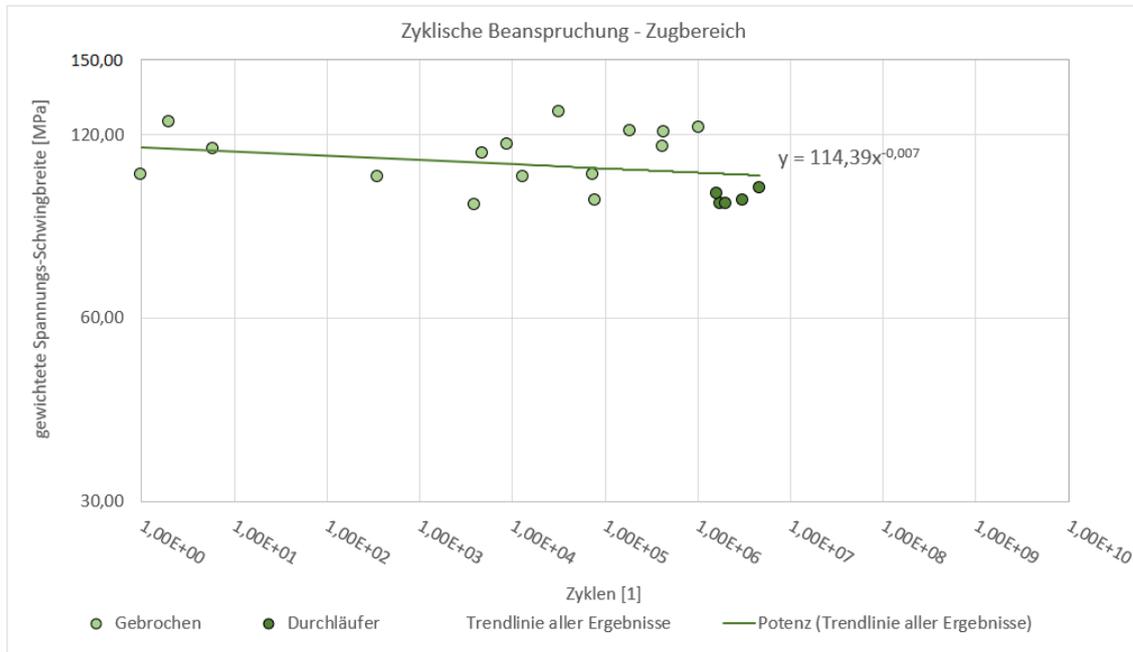
4.5 Prüfung bei zyklischer Zugbeanspruchung, R=0.1

Zugbereich											
Probe	σ_{\max} [N/mm ²]	σ_{\min} [N/mm ²]	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	σ_m [N/mm ²]	Dichte [g/cm ³]	σ_{mean} [g/cm ³]	Gewichtungs- Faktor	Zyklen gebrochen [1]	gewichtete Spannungs- schwingbreite [MPa]	Zyklen Durchläufer [1]	gewichtete Spannungs- schwingbreite [MPa]
A032	140	14	126	77	0,5685	0,6200	0,9169	8,83E+03	115,53		
A038	140	14	126	77	0,6004	0,6200	0,9684	1,85E+05	122,02		
A046	140	14	126	77	0,6439	0,6200	1,0385	3,21E+04	130,86		
A030	140	14	126	77	0,6189	0,6200	0,9983	2,00E+00	125,78		
A036	130	13	117	71,5	0,6420	0,6200	1,0355	4,30E+05	121,15		
A034	130	13	117	71,5	0,6041	0,6200	0,9743	6,00E+00	114,00		
A042	130	13	117	71,5	0,6547	0,6200	1,0559	1,05E+06	123,54		
A037	130	13	117	71,5	0,5920	0,6200	0,9548	4,80E+03	111,71		
A033	120	12	108	66	0,5869	0,6200	0,9466	1,31E+04	102,23		
A039	120	12	108	66	0,5930	0,6200	0,9565	1,00E+00	103,30		
A047	120	12	108	66	0,6601	0,6200	1,0646	4,27E+05	114,98		
A029	120	12	108	66	0,5878	0,6200	0,9481	3,50E+02	102,39		
A026	110	11	99	60,5	0,6474	0,6200	1,0442	7,51E+04	103,37		
A028	110	11	99	60,5	0,5864	0,6200	0,9458	7,87E+04	93,63		
A044	110	11	99	60,5	0,5787	0,6200	0,9333			1,77E+06	92,40
A027	110	11	99	60,5	0,6023	0,6200	0,9714			1,62E+06	96,17
A040	100	10	90	55	0,6331	0,6200	1,0211	3,98E+03	91,89		
A043	100	10	90	55	0,6380	0,6200	1,0290			2,03E+06	92,61
A045	100	10	90	55	0,6463	0,6200	1,0425			3,05E+06	93,82
A005	100	10	90	55	0,6755	0,6200	1,0894			4,66E+06	98,05

Tabelle 4-7Prüftabelle der ermittelten Probendaten für zyklische Beanspruchung im Zugschwellbereich bei R=0,1

Als Durchläufer werden hier Proben bereits ab einer Lastspielzahl von $1,5 \cdot 10^6$ gewertet. Das Übergangsniveau zwischen Kurzzeit- und Dauerfestigkeit bildet sich bei Spannungsschwingbreiten von 90 bis 99 N/mm² aus. Von einer Dauerfestigkeit ist im Zugbereich also ab 90 N/mm² auszugehen. Der Wert der

Zugfestigkeit von Bergahorn, parallel zur Faser unter statischen Bedingungen liegt bei 120 N/mm² (Mittelwert) ((NHM), 2003). Somit liegt auch hier die Festigkeit bei zyklischer Belastung signifikant unter jener bei statischer Belastung. Siehe *Tabelle 4-7 Prüftabelle der ermittelten Probendaten für zyklische Beanspruchung im Zugschwellbereich bei R=0,1*



Die doppelt logarithmische Darstellung der Messdaten, multipliziert mit dem Gewichtungsfaktor zeigt eine klare Erhöhung der Bruchlastspielzahl mit abnehmender Spannungsamplitude. Analog zur Prüfung im Druckschwellbereich, wurde auch hier die Frequenz zu Beginn der Prüfung langsam gesteigert, um Spannungsspitzen zu vermeiden. Siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**

4.6 Prüfung bei zyklischer Wechselbeanspruchung, R=-1

Wechselbereich (Zug/Druck)											
Probe	σ_{max} [N/mm ²]	σ_{min} [N/mm ²]	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	σ_m [N/mm ²]	Dichte [g/cm ³]	σ_{mean} [g/cm ³]	Gewichtungs- Faktor	Zyklen gebrochen [1]	gewichtete Spannungs- schwingbreite [MPa]	Zyklen Durchläufer [1]	gewichtete Spannungs- schwingbreite [MPa]
A012	45	-45	90	0	0,6570	0,6200	1,0596	4,35E+03	95,36		
A015	45	45	90	0	0,6355	0,6200	1,0250	1,46E+05	92,25		
A010	45	-45	90	0	0,5984	0,6200	0,9651	1,29E+05	86,85		
A004	40	-40	80	0	0,6254	0,6200	1,0088	1,38E+05	80,70		
A011	40	-40	80	0	0,5643	0,6200	0,9102	2,54E+05	72,81		
A041	40	-40	80	0	0,6140	0,6200	0,9903			4,30E+06	79,22
A050	35	-35	70	0	0,6250	0,6200	1,0081			1,01E+07	70,57
A048	35	-35	70	0	0,5812	0,6200	0,9374			5,33E+06	65,62
A009	35	-35	70	0	0,6057	0,6200	0,9769	1,12E+06	68,38		
A014	30	-30	60	0	0,6722	0,6200	1,0842			2,11E+07	65,05
A006	30	-30	60	0	0,6469	0,6200	1,0433			5,92E+06	62,60
A049	30	-30	60	0	0,6250	0,6200	1,0081			1,10E+07	60,48

Tabelle 4-8 Prüftabelle der ermittelten Probendaten für zyklische Beanspruchung im Wechselbereich R=-1

Bei zyklischer Wechselbeanspruchung und R=-1 wird als Grenzlasterlastspielzahl für die Kennzeichnung von Durchläufern ein Überleben von Lastspielzahlen $>1,5 \cdot 10^6$ angenommen. Die Frequenz wird wie in den Versuchen vorher bei 50 Hz gehalten. Der Übergang zwischen Bruch und Dauerfestigkeit bildet sich bei gewichteter Spannungsschwingbreiten zwischen 60 und 80 N/mm² aus. Laut Literatur liegt die mittlere Festigkeit für Zug bei 120 und für Druck bei 50 N/mm², längs zur Faser. Für Biegung liegt sie bei ca. 95 N/mm². Siehe *Tabelle 4-8 Prüfta-*

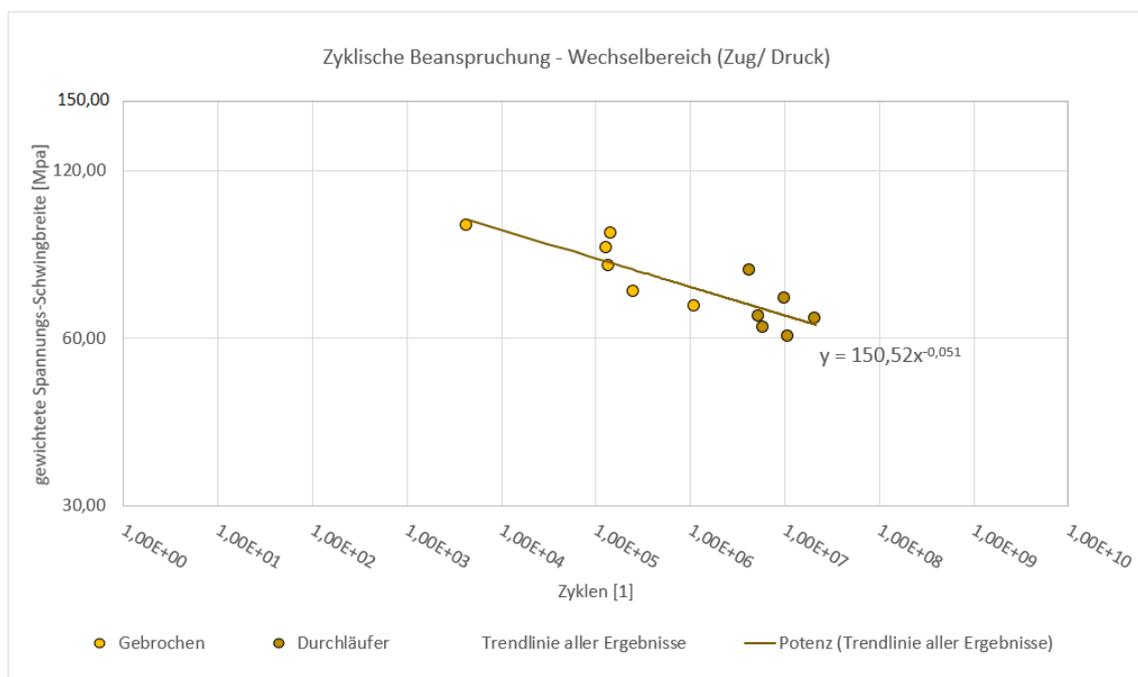


Abbildung 4.8 Diagramm der ermittelten Probendaten für die zyklische Beanspruchung in Wechselbereich bei R=-1

belle der ermittelten Probendaten für zyklische Beanspruchung im

Wechselbereich R=-1 Der ermittelte Übergangswert zwischen Dauer- und Zeitfestigkeit liegt zwischen Zug- und Druckfestigkeit.

Die Trendlinie zeigt das mit Abstand stärkste Gefälle im Vergleich mit Versuchen im Druckschwellbereich (R=10) und Zugschwellbereich (R=0,1). Die Versuchsdurchführung wurde analog zu den Versuchsreihen im Druck- bzw. Zugbereich durchgeführt Siehe *Abbildung 4.8 Diagramm der ermittelten Probendaten für die zyklische Beanspruchung in Wechselbereich bei R=-1*

4.7 Ultraschall- Ermüdungsversuche, R=-1

Die hier verwendete Versuchsvariante wurde unter besonderen Vorbereitungen getroffen. Der Prüfstand lässt die eingespannten Proben bei ca. 20.000 Hz in Eigenresonanz schwingen. Die Proben werden mit konstanter Dehnungsamplitude belastet. Um die entsprechende Spannung ermitteln zu können, ist bei diesem Verfahren die Kenntnis des E-Moduls jeder einzelnen Probe notwendig. Diese wurden wie unter Kapitel 4.1.4 beschrieben, ermittelt.

4.7.1 Messdaten im Ultraschallbereich

Bei der Durchführung von Ermüdungsversuchen mit einer Prüffrequenz im Ultraschallbereich (bei annähernd 20 kHz) können wesentlich höhere Zyklenzahlen erreicht werden als im servohydraulischen Versuch. So waren Versuche bis zu einer Lastspielzahl von 10^9 und höher möglich. Es wurden bei den Ultraschallversuchen alle Proben bis zum Bruch beansprucht. Spannungen im Bereich zwischen ca. 100 MPa und 40 MPa wurden getestet. Diese Methode gilt als Referenzmethode um die Tests im HCF-Bereich an der MTS vergleichen zu können.

Ultraschallbereich									
Probe	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	σ_a [N/mm ²]	E [kN/mm ²]	Dichte [g/cm ³]	σ_{mean} [g/cm ³]	Gewichtungs- Faktor	Frequenz [Hz]	Zyklen [1]	gewichtete Spannungs- schwingbreite [MPa]
A067	98,06	49,03	9,40	0,6106	0,6200	0,9847	18991	3,55E+04	96,57
A055	98,06	49,03	9,40	0,5904	0,6200	0,9522	18884	8,87E+02	93,38
A053	60,00	30,00	15,46	0,5834	0,6200	0,9409	19280	3,98E+08	56,46
A056	70,00	35,00	13,05	0,5825	0,6200	0,9395	18936	2,68E+06	65,76
A054	42,41	21,21	15,46	0,6125	0,6200	0,9878	18867	1,92E+08	41,90
A063	60,70	30,35	14,25	0,5972	0,6200	0,9632	19241	6,52E+04	58,46
A066	60,00	30,00	16,34	0,6323	0,6200	1,0198	19245	5,77E+06	61,19
A065	47,85	23,92	17,89	0,6527	0,6200	1,0527	19262	1,10E+09	50,37
A065	66,99	33,49	17,89	0,6527	0,6200	1,0527	19262	1,49E+07	70,52
A052	49,68	24,84	15,46	0,6809	0,6200	1,0982	19338	5,22E+06	54,55

Tabelle 4-9Prüftabelle der ermittelten Probendaten für zyklische Beanspruchung im Ultraschallbereich

Siehe *Tabelle 4-9 Prüftabelle der ermittelten Probandaten für zyklische Beanspruchung im Ultraschallbereich*

Statistisch werden die Messwerte mit und ohne die Gewichtung über die Dichte ausgegeben. Dies ist hier von Belang, da die Dichte bereits über die Ermittlung des Elastizitätsmoduls miteinbezogen wurde. Bei der Gewichtung der angelegten

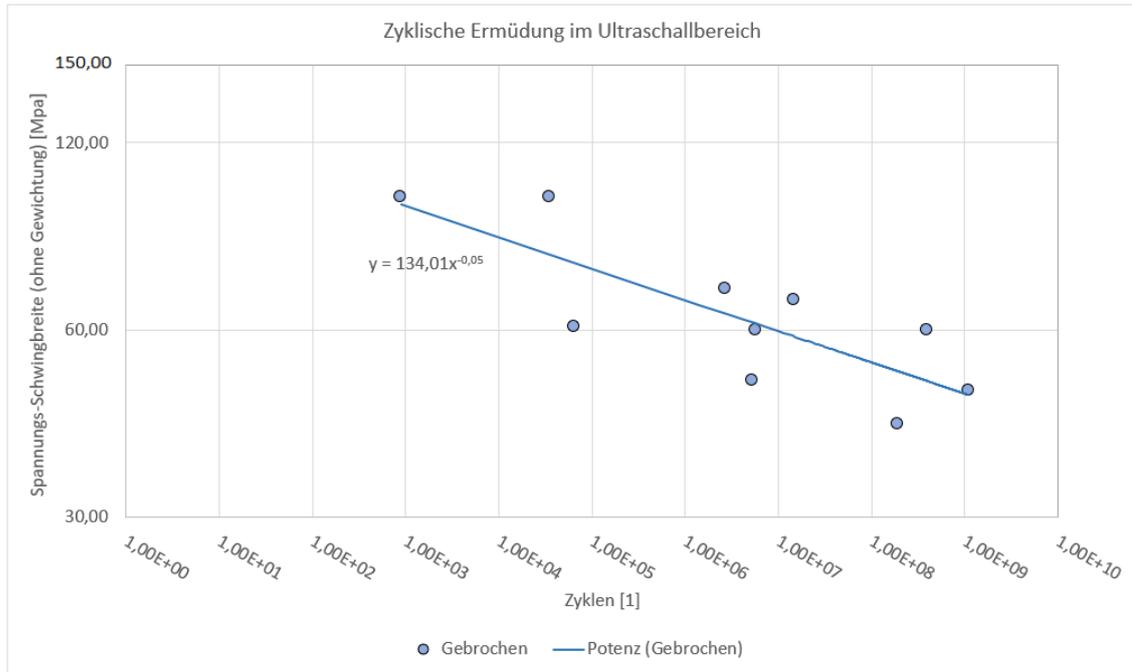


Abbildung 4.10 Diagramm der ermittelten Probandaten für die zyklische Beanspruchung im Ultraschallbereich für die ungewichtete Spannungsschwingbreite

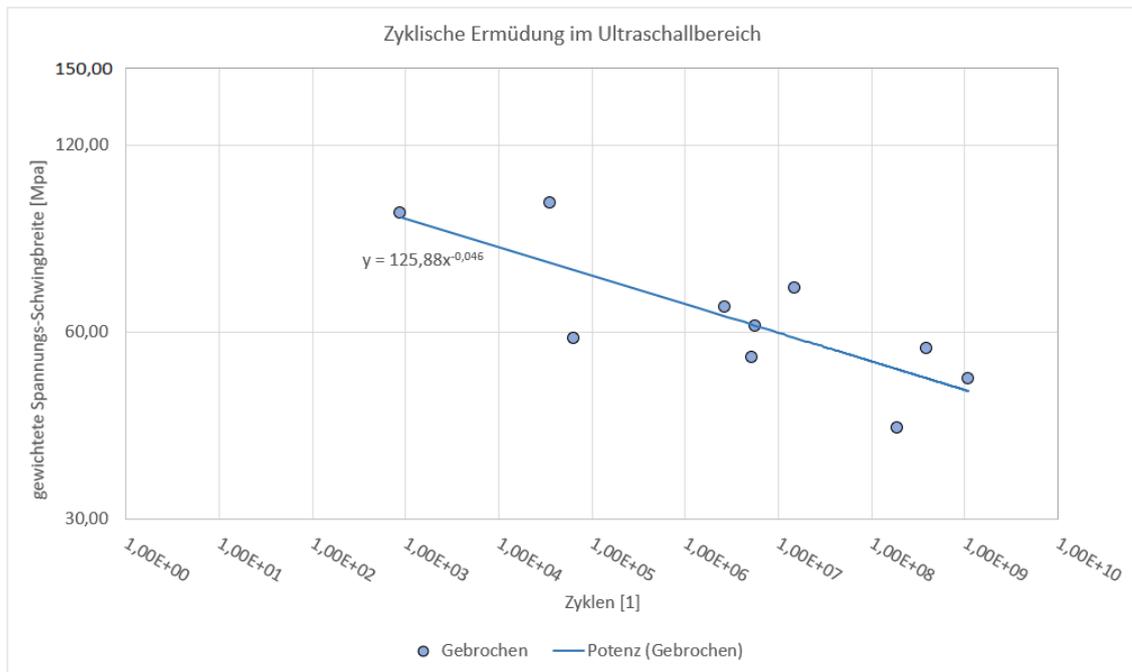


Abbildung 4.9 Diagramm der ermittelten Probandaten für die zyklische Beanspruchung im Ultraschallbereich für die gewichtete Spannungsschwingbreite

Spannung über die Dichte fällt auf, dass sich die Messdaten im Vergleich zu den ungewichteten weniger streuen. Siehe *Abbildung 4.11 und 4.12*.

4.8 Vergleichbarkeit zwischen konventionellen und Ultraschall- Ermüdungsversuchen

Die Proben wurden im Ultraschallbereich bei ca. 20 kHz, sowie bei 50 Hz geprüft. Dabei sind ähnliche Bruchlastspielzahlen der Proben aufgetreten. Ist die Abweichung der Bruchlastspielzahlen für beide Frequenzen innerhalb der Schwankungsbreite der Lebensdauern, so bedeutet das, dass kein signifikanter Einfluss der Frequenz gefunden wurde. Die Darstellung der Wöhlerdaten beider Messserien in *Abbildung 4.13* zeigt genau das. *Abbildung 4.11 Diagramm der ermittelten Probandaten im Vergleich zwischen zyklischer Beanspruchung im Ultraschall- und Wechselbereich.*

Die Erkenntnis vorweggenommen, würde das bedeuten, dass Holzermüdung ab einer bestimmten Frequenz, von dieser unabhängig ist. Die Ermüdung würde dann nur mehr von der Belastung innerhalb eines Lastspiels, aber nicht mehr von der Zeit, wie schnell diese Lastspiele aufgebracht werden, abhängen.

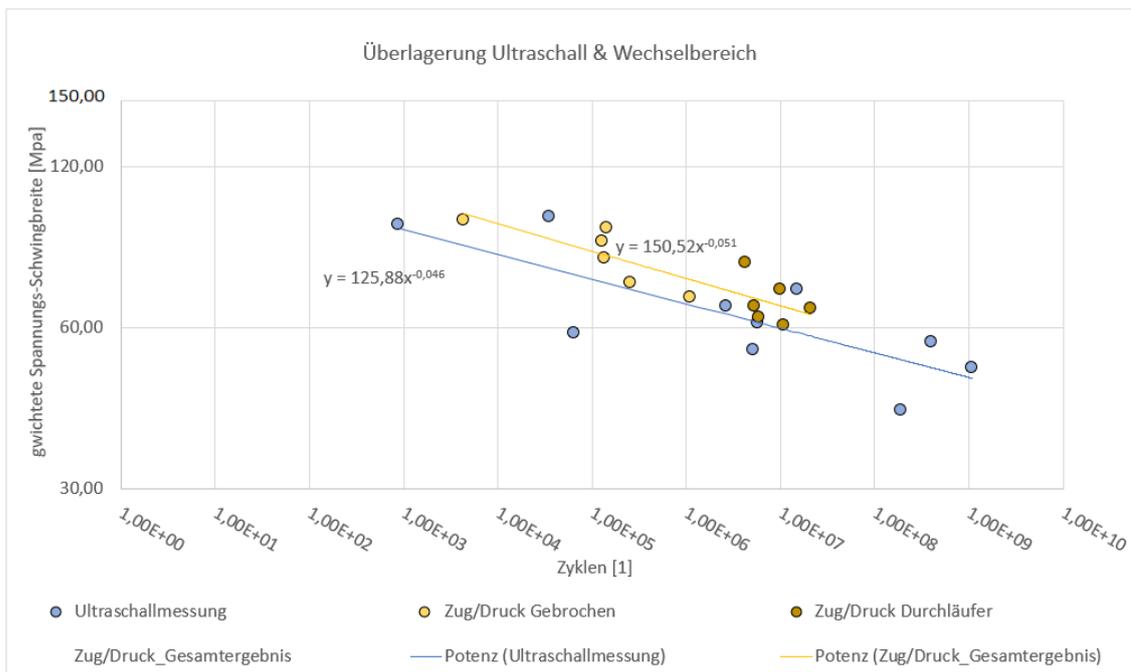


Abbildung 4.11 Diagramm der ermittelten Probandaten im Vergleich zwischen zyklischer Beanspruchung im Ultraschall- und Wechselbereich

4.8.1 Statistischer Vergleich der Messergebnisse

Um beurteilen zu können, ob es sich bei der Abweichung der unterschiedlichen Messergebnisse um eine Signifikanz handelt, wurde der Varianzkoeffizient der beiden Messreihen ermittelt und die Überschneidungs-Fläche verglichen. Der Varianzkoeffizient ist der Quotient aus der Standardabweichung und dem arithmetischen Mittelwert und wird prozentual angegeben. Er ist von den ursprünglichen Messdaten unabhängig und somit gut dafür geeignet Daten unterschiedlicher Datenreihen miteinander zu vergleichen.

4.8.2 Berechnung des Varianzkoeffizienten

Zuerst wird der Variationskoeffizient v der Ergebnisse der servo-hydraulischen Prüfung ($R=-1$) berechnet. Anschließend jener der mit der Ultraschallmethode gewonnenen Daten. Dann werden beide Varianzbereiche in einem Bild dargestellt, um zu sehen ob sich die Bandbreiten überlappen.

4.8.2.1 Servo-hydraulische Tests, $R=-1$

- Arithmetisches Mittel m aus den Werten der gewichteten Spannungsschwingbreite:

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (23)$$

$$m = 75,18 \text{ [MPa]}$$

- Berechnung der Varianz s^2 und der Standardabweichung s mit den Werten der gewichteten Spannungsschwingbreite:

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2 \quad (24)$$

$$s^2 = 149,03 \text{ [MPa]}$$

$$s = \sqrt{s^2} \quad (25)$$

$$s = 12,208$$

- Berechnung des Varianzkoeffizienten v [%]:

$$v = \frac{s}{m} \quad (26)$$

$$v = 0,1624 \text{ bzw. } \mathbf{16,24 \%}$$

Die Berechnung zeigt, dass die Werte statistisch gesehen um ca. **16%** variieren bzw. abweichen können.

4.8.2.2 Ultraschalltests, R=-1 (Werte ohne Gewichtung über die Dichte)

- Arithmetisches Mittel m aus den Werten der gewichteten Spannungsschwingbreite:

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (27)$$

$$m = 65,37 \text{ [MPa]}$$

- Berechnung der Varianz s^2 und der Standardabweichung s mit den Werten der gewichteten Spannungsschwingbreite:

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2 \quad (28)$$

$$s^2 = 332,14 \text{ [MPa]}$$

$$s = \sqrt{s^2} \quad (29)$$

$$s = 18,22$$

- Berechnung des Varianzkoeffizienten v [%]:

$$v = \frac{s}{m} \quad (31)$$

$$v = 0,2788 \text{ bzw. } \mathbf{27,88 \%}$$

Die Berechnung zeigt, dass die Werte statistisch gesehen um ca. **28%** variieren bzw. abweichen können.

4.8.3 Graphische Auswertung des Varianzkoeffizienten

Abbildung 4.14 zeigt die bei servo-hydraulischer Prüfung und bei Ultraschallprüfung gewonnen Messwerte, inklusive der jeweiligen Standardabweichungen.

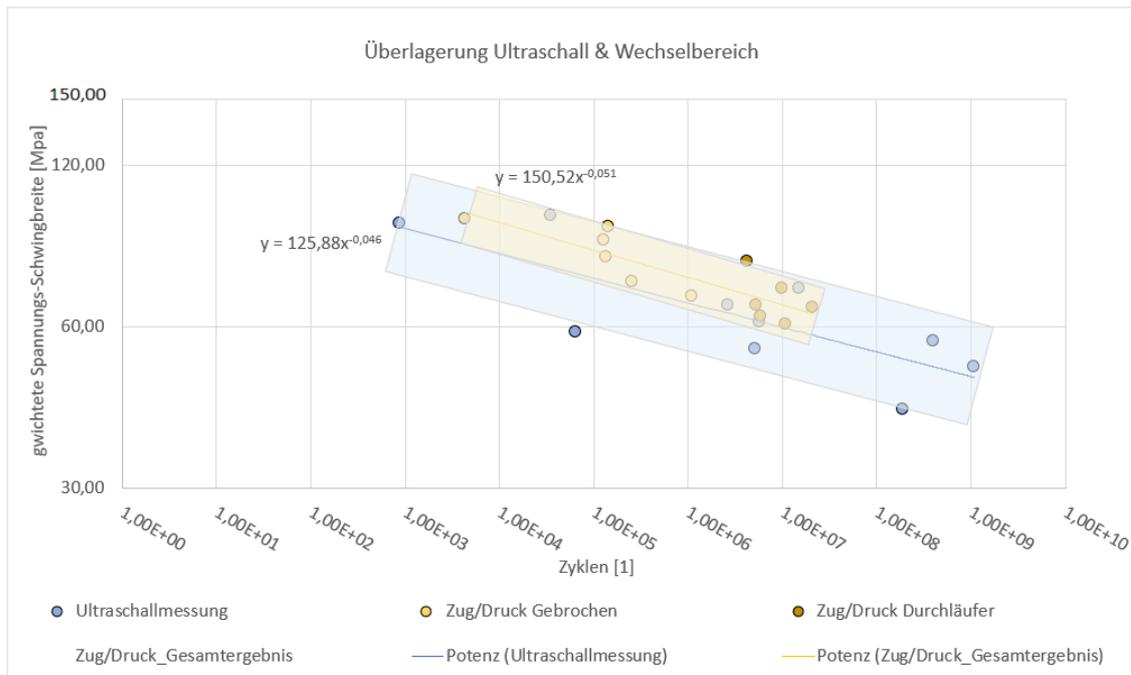


Abbildung 4.12 Vergleich der Varianzbereiche im Ultraschall- und Wechselbereich

Wie man erkennen kann, schließt der Varianzbereich der Ultraschallmessungen den der Zug-Druckmessungen fast vollkommen ein. Somit ist ein statistisch signifikanter Unterschied in den Messdaten der beiden Messreihen ausgeschlossen.

Im Weiteren muss somit ein Rückschluss im Verhalten von Ahornholz und der Kriechverformung gefunden werden.

4.8.4 Temperaturen während der Ultraschallermüdung

Alle Versuche wurden im Labor unter Normklima, bei 23°C und einer relativen Feuchte von 50%, durchgeführt. Auch die Akklimatisierung des Holzes an das Umgebungsklima wurde mit mindestens 48 Stunden, vor jeder Versuchsdurchführung, berücksichtigt. Mit Düsen wurde Luft mit Raumtemperatur auf den Probenquerschnitt während der Prüfung geblasen, um die Probe vor übermäßiger Erhitzung zu schützen. Bei der Durchführung der Ultraschalltests wurden Infrarot Messungen an der Oberfläche des Prüfbereichs durchgeführt. Als maximale Probentemperatur wurde dabei 38°C festgestellt. Der Anstieg der Oberflächentemperatur gegenüber Raumtemperatur liegt daher bei maximal 16°C.



Abbildung 4.13 Abbildung der Bruchfläche von Probe A066 nach der Ultraschallbelastung

Bei metallischen Proben ist ein Anstieg der Probentemperatur unmittelbar nach der Anrissbildung im Prüfbereich beschrieben – Wärme wird dabei kurz vor dem Bruch durch die dann um den Anriss erhöhte plastische Verformung und durch das hochfrequente Reiben der Bruchflächen aneinander produziert. (Ranc, Wagner, & Paris, 2008)

Das Reiben der Bruchflächen nach der Rissbildung zeigte sich ebenfalls bei den Ultraschall- Ermüdungsversuchen mit Holzproben. Dabei wurden kleine Areale dunkel verfärbt und man nahm kurz nach dem Bruch des Prüfkörpers einen leichten Geruch von verbranntem Holz wahr. Letztlich werden die leichten Verbrennungen von brucheinleitenden Rissen verursacht, die die letzte Phase des Ermüdungsprozesses kurz vor dem Bruch darstellen. Die Temperaturerhöhung kurz vor dem Bruch der Probe ist für die gemessene Bruchlastspielzahl unbedeutend. Siehe *Abbildung 4.13 Abbildung der Bruchfläche von Probe A066 nach der Ultraschallbelastung*

Auch bei Messungen an der MTS im 50 Hz Bereich wurde mit Lüftungsdüsen gekühlt. Dies hatte zwar die vorrangige Aufgabe die Einspannung zu kühlen, um somit ein Herausziehen der Proben aus der Verankerung zu vermeiden, hatte jedoch auch den positiven Nebeneffekt, dass die Probenkörper stets bei gleichbleibender Temperatur gehalten wurden. Zusammenfassend wird von einem nur geringen Einfluss der Temperatur sowohl bei 50 Hz als auch bei 20 kHz auf die Messergebnisse ausgegangen.

4.9 Kriechen bei zyklischer Ermüdung

Holz kriecht bereits bei Raumtemperatur. Deshalb sind alle elastischen und plastischen Eigenschaften zeitabhängig. Die Mechanismen und Abläufe des Kriechens wurden bereits unter Punkt 2.5.2, 2.6.2, 2.6.3 näher erläutert. Vergleicht man nun Ergebnisse, die sich mit dem Phänomen des Kriechens bei Holz beschäftigen, so fällt auf, dass diese in Zeitspannen von Stunden, Tagen, Monaten und sogar mehreren Jahren gemacht wurden. Im Bereich von 50 Hz bzw. 20 kHz ist es kaum möglich, einen Zusammenhang mit dem äußerst langwierigen Prozess des Kriechens herzustellen. Vielmehr wird angenommen, dass beide Frequenzen bereits so hoch sind, dass sich bei Belastung mit $R=-1$ keine wesentliche Kriechverformung der spannungsinduzierten Verformung überlagert. 50 Hz ist bereits eine hohe Frequenz und der Effekt einer weiteren Erhöhung der Frequenz auf 20 kHz hat keinen wesentlichen Einfluss auf die gemessenen Lebensdauern.

4.10 Fazit zur Ermüdungsprüfung

Verbesserungen in der Art der Probenverankerung im niederfrequenten Bereich an der MTS mussten im Laufe der Versuche durchgeführt werden. Die Wärmeentwicklung bedingt durch Reibung und Eigenwärme des Kolbens konnte durch die Luft und Gebläse- Kühlung kontrolliert werden. Die Verankerung bei der Ultraschallprüfung hielt bei allen Proben stand.

Die Ermüdungsprüfung zeigte zuverlässige und nachvollziehbare Werte, sowohl in den servo-hydraulischen Versuchen, als auch in den Ultraschallversuchen. Mit abnehmender Spannungsamplitude nehmen bei allen drei Lastverhältnissen die Bruchlastspielzahlen zu. Bei Lastverhältnis $R=-1$ zeigen sich ähnliche Messdaten bei 50 Hz und 20 Hz.

4.11 Bruchanalyse

Bei der Interpretation der Bruchflächen im Probekörper wurde besonderes Augenmerk auf den Versagensmodus gelegt, da dieser Rückschlüsse über die Art des Bruches geben kann. Da die Zug- und Druckkräfte parallel zur Faserrichtung des Holzes aufgebracht wurden, wird vereinfacht von einer Modus I Beanspruchung ausgegangen.

Unter Beobachtung des Bruchverhaltens mit optisch/visuellen Mitteln und im Raster-Elektronenmikroskop wurden von mir 3 verschiedene Bruchmodi unterschieden.

4.11.1 Bruchmodus 1

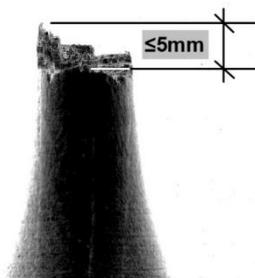


Abbildung 4.14 Archetyp Bruchmodus 1

Beim ersten Bruchmodus handelt es sich um das Resultat aus dem Test im Druckbereich. Hier bildete sich eine horizontale Bruchfläche aus, dessen Höhenprofil relativ geringe Unterschiede von weniger als 5mm hat. Der Bruch geht aus kollabierten Zellwänden hervor, welche überpresst wurden und anschließend gebrochen sind.

Siehe *Abbildung 4.14 Archetyp Bruchmodus 1*

4.11.2 Bruchmodus 2

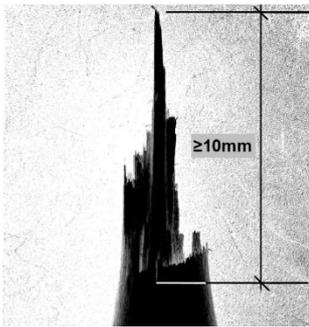


Abbildung 4.15 Archetyp Bruchmodus 2

Beim zweiten Bruchmodus handelt es sich um eine Ausprägung von Bruchflächen, wie sie bei Belastungen im Zugbereich auftritt. Dabei wirkt die Bruchfläche eher zerklüftet und langgezogen. Verallgemeinert würde man hier von einer vertikalen Bruchfläche sprechen. Der Bruch auslösende Aspekt ist hier die Delaminierung des Zellverbundes. Dabei kann die Scher-/Bruch-Fläche bis über 10mm betragen. Siehe *Abbildung 4.15 Archetyp Bruchmodus 2*

4.11.3 Bruchmodus 3

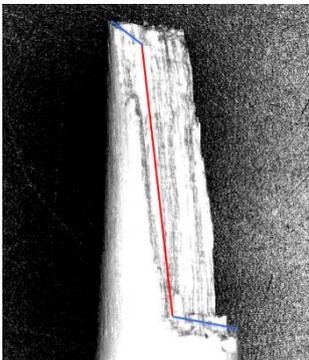


Abbildung 4.16 Archetyp Bruchmodus 3

Beim dritten Bruchmodus handelt es sich in gewisser Weise um eine Verbindung aus Bruchmodus 1, dem Druckbruch und dem Bruchmodus 2, dem Bruch auf Zug. Dieses Bruchbild wurde auch in logischer Folge bei der zyklischen Belastung im Wechselbereich, also Zug-/Druck-Bereich beobachtet. Dabei bilden sich oben und unten jeweils die einleitenden Risse vom Rand ausgehend und dann weiter die Druck-Bruch-Flächen. Mittig erfolgt die Bildung der Scherbruchfläche. Bei diesem Bruchscenario muss weiter festgehalten werden, dass das Resonanzverfahren im Ultraschallbereich bei bis zu 20 kHz formähnliche Bruchflächen hervorgebracht hat. Siehe *Abbildung 4.16 Archetyp Bruchmodus 3*

4.11.4 Validierung des Bruchmodus für den Druckschwellbereich bei R=10

Der durchgeführte Prüfungsumfang beträgt insgesamt 20 Proben. Die zyklische

Druckbereich								
Probe	A019	A020	A024	A023	A021	A017	A018	A022
gewichtete Spannungsschwingbreite [MPa]	-67,14	-50,81	-55,75	-51,97	-45,55	-39,13	-41,46	-39,16
Zyklen [1]	2,08E+03	2,82E+03	1,00E+06	1,11E+07	1,05E+05	1,01E+07	1,01E+07	1,00E+07
Bild Lichtmikroskop Keyence	Druchläufer		Druchläufer	Druchläufer	Druchläufer		Druchläufer	Druchläufer

Tabelle 4-10 Abbildungsverzeichnis der Ermüdungsversuche im Druckschwellbereich

Druckbelastung erfolgte bei 50 Hz, bei gewichteten Spannungsschwingbreiten zwischen 67,14 MPa bei der Probe A019 bis 39,13MPa bei der Probe A017. Von insgesamt 8 Proben wurden 6 als Durchläufer klassifiziert und lediglich 2 konnten zum Bruch im Druckbereich geführt werden. Die Beurteilung der Schädigungszone viel auf den Bruchmodus 1 der hier als Archetyp dargestellt wird. Dabei verläuft der Bruch horizontal und eher planar. Schädigungen stellten sich bei bis zu 78% der statischen Druckfestigkeit von Bergahorn in Längsrichtung der Faser ein. Dabei ist die Bruchfläche unabhängig von der Höhe der anliegenden Belastung. Die Bruchfläche leitet sich durch Holzfasern, die im Lumen kollabieren ein. Dies führt zu einer Kettenreaktion, die bei einer höheren Amplitude zu einer leicht abgeschrägten Schädigungszone führt. Diese leitet sich vom Abrutschen der Fasern entlang der ausgebildeten Bruch Zone und dem ermüdeten Faserbereich ab. Siehe *Tabelle 4-10 Abbildungsverzeichnis der Ermüdungsversuche im Druckschwellbereich*

4.11.5 Validierung des Bruchmodus für den Zugschwellbereich, R=0,1

Zugschwellbereich								
Probe	A032	A038	A046	A030	A036	A034	A042	A037
gewichtete Spannungsschwingbreite [N/mm ²]	115,53	122,02	130,86	125,78	121,15	114	123,54	111,71
Zyklen [1]	8,83E+03	1,85E+05	3,21E+04	2,00E+00	4,30E+05	6,00E+00	1,05E+06	4,80E+03
Bild Lichtmikroskop Keyence Einspannung unten								
Probe	A033	A039	A047	A029	A026	A028	A044	A027
gewichtete Spannungsschwingbreite [N/mm ²]	102,23	103,3	114,98	102,39	103,37	93,63	92,4	96,17
Zyklen [1]	1,31E+04	1,00E+00	4,27E+05	3,50E+02	7,51E+04	7,87E+04	1,77E+06	1,62E+06
Bild Lichtmikroskop Keyence							Druchläufer	Druchläufer
Probe	A040	A043	A045	A005				
gewichtete Spannungsschwingbreite [N/mm ²]	91,89	92,61	93,82	98,05				
Zyklen [1]	3,98E+03	2,03E+06	3,05E+06	4,66E+06				
Bild Lichtmikroskop Keyence		Druchläufer	Druchläufer	Druchläufer				

Tabelle 4-11 Abbildungsverzeichnis der Ermüdungsversuche im Zugschwellbereich

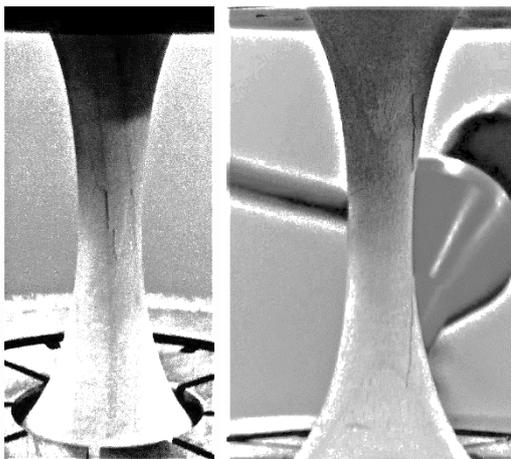


Abbildung 4.17 Risseinleitung im Zugschwellbereich bei hohen Amplituden

Der durchgeführte Prüfungsumfang war insgesamt 20 Proben. Die zyklische Belastung bei 50 Hz erfolgte bei gewichteten Spannungsschwingbreiten zwischen 130,86 MPa bei der Probe A046 bis 91,89 MPa bei der Probe A040. Von Insgesamt 20 Proben wurden 15 zum Bruch geführt und 5 als Durchläufer-Proben kategorisiert. Meine Beobachtungen zeigten eine stark zerklüftete Schädigungszone bei hohen Amplituden, die sich bei ca. 110% bis 90% der mittleren statischen Zugfestigkeit einstellt. In diesem Belastungsbereich wird auch bereits eine klar definierte Risskontur während der Prüfung sichtbar. Hier wird der Bruchmodus 2 als

Archetyp definiert. Siehe *Tabelle 4-11 Abbildungsverzeichnis der Ermüdungsversuche im Zugschwellbereich*. Die Höhe der Schädigungszone nimmt, wie man in den Abbildungen der Proben A042 und folgende sehen kann, mit abnehmender Amplitude ab. Dabei hat die Stärke der Amplitude direkte Auswirkung auf die Höhe der Schädigungszone. Im Bereich von 100 N/mm² ist die Bruchfläche bereits annähernd horizontal ausgeprägt und der Riss wird vermutlich an einer Stelle eingeleitet. Die stark zerklüfteten Bereiche sind vermutlich auf eine Delaminierung des Fasern-Verbundes und eine mehrfache Risseinleitung zurückzuführen, wie man sie auch analog in Literatur für Ermüdungsversuche findet. Siehe *Abbildung 4.17 Risseinleitung im Zugschwellbereich bei hohen Amplituden*. In einschlägiger bekannter Literatur wird beschrieben, dass bei hohen Amplituden ein Effekt ähnlich der De-Laminierung bei Holz, eintritt. (Smith, Landis, & Gong, 2003)

4.11.6 Validierung des Bruchmodus für Zug- Druckbelastung bei 50 Hz und R=-1

Zug-/Druckbereich								
Probe	A012	A015	A010	A004	A011	A041	A050	A048
gewichtete Spannungsschwingbreite [MPa]	95,36	92,25	86,85	80,7	72,81	79,22	70,57	65,62
Zyklen [1]	4,35E+03	1,46E+05	1,29E+05	1,38E+05	2,54E+05	4,30E+06	1,01E+07	5,33E+06
Bild Lichtmikroskop Keyence						Druchläufer	Druchläufer	Druchläufer
Probe	A009	A014	A006	A049				
gewichtete Spannungsschwingbreite [N/mm ²]	65,62	65,05	62,6	60,48				
Zyklen [1]	1,12E+06	2,11E+07	5,92E+06	1,10E+07				
Bild Lichtmikroskop Keyence		Druchläufer	Druchläufer	Druchläufer				

Tabelle 4-12 Abbildungsverzeichnis der Ermüdungsversuche im Wechselbereich

Der Prüfungsumfang enthielt insgesamt 12 Proben, von denen 50%, also 6 Proben zum Bruch geführt wurden. Die anderen 6 Proben wurden als Durchläufer eingestuft. Im Wechselbereich wurde Die Spannungsschwingbreite von maximal 95,36 MPa bis 60,48 MPa angesetzt. Hier wurde eine stufenförmige Schädigungszone im Sinne des Bruchmodus 3 beobachtet. Dabei ist von einer Mischform des Ermüdungsverhaltens auszugehen. Hierbei werden die Fasern in den

Randzonen gestaucht und in der Mitte des Prüfbereiches kommt es entlang der Faser zu einem abscheren. Dabei scheint die Höhe der Schädigungszone von der Höhe der Amplitude unabhängig zu sein. Die Form des Bruchs erinnert jedoch stark an die Versuchsreihe im Ultraschallbereich. *Siehe Tabelle 4.12 und Tabelle 4.13.*

4.11.7 Validierung des Bruchmodus für Zug-Druckbelastung bei 20 kHz und R= -1

Ultraschalltest								
Probe	A067	A055	A056	A065	A063	A053	A066	A052
gewichtete Spannungsschwingbreite [N/mm ²]	96,57	93,38	65,76	50,37	58,46	56,46	61,19	54,55
Zyklen [1]	3,55E+04	8,87E+02	2,68E+06	1,49E+07	6,52E+04	3,98E+08	5,77E+06	5,22E+06
Bild Lichtmikroskop Keyence								
Probe	A065	A054						
gewichtete Spannungsschwingbreite [N/mm ²]	50,37	41,90						
Zyklen [1]	1,10E+09	1,92E+08						
Bild Lichtmikroskop Keyence								

Tabelle 4-13 Abbildungsverzeichnis der Ermüdungsversuche im Ultraschallbereich

Der Prüfungsumfang der Ultraschall-Ermüdungsprüfung umfasste 10 Proben. Dabei wurden 100% zum Bruch beansprucht. Die gewichtete Spannungsschwingbreite lag zwischen 96,57 MPa bis 41,90 MPa. Analog zum Wechselbereich bei 50 Hz wurde hier eine ähnliche Schädigung des Prüfbereichs bei ca. 20kHz beobachtet. Hier wurde eine stufenförmige Schädigungszone im Sinne des Bruchmodus 3 beobachtet. Dabei ist von einer Mischform des Ermüdungsverhaltens auszugehen. Dabei werden die Fasern in den Randzonen gestaucht und in der Mitte des Prüfbereiches kommt es entlang der Faser zu einem abscheren. Die Höhe der Schädigungszone scheint von der Höhe der Amplitude unabhängig zu sein. Die Form des Bruchs erinnert jedoch stark an die Versuchsreihe im Ultraschallbereich. Dabei wurde der Bruchmodus 3 mit einer longitudinalen Scherfläche und äußeren Stauchungsflächen klassifiziert. Die Höhe der

Schädigungszone ist hier weitgehend gleichbleibend und unabhängig von der angesetzten Amplitude.

4.12 Validierung der mikroskopischen Bruchfläche im Wechsel- & Ultraschallbereich

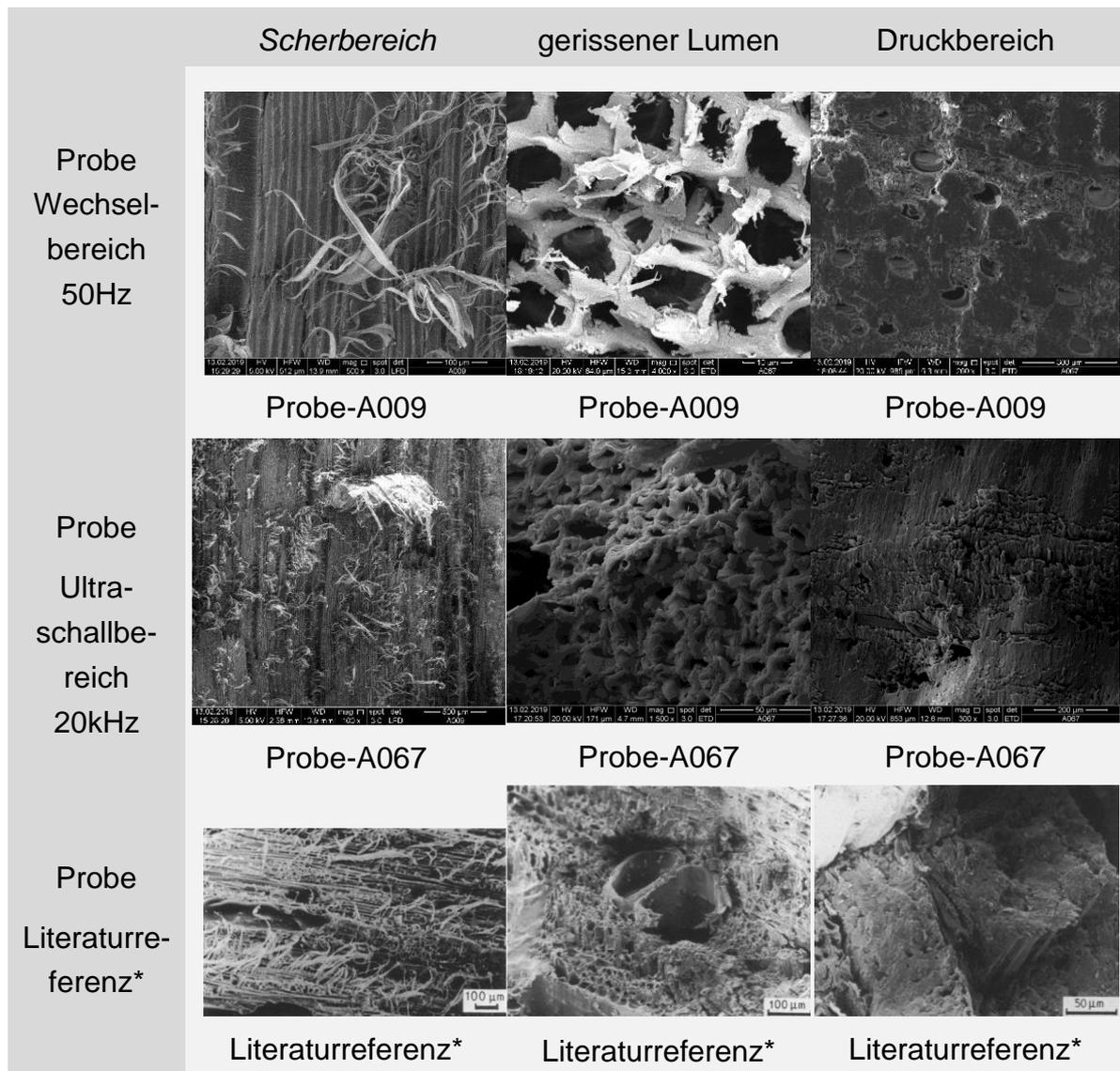


Tabelle 4-14 Vergleich der Schädigungszone von Wechsel- und Ultraschallbereich im mikroskopischen Bereich

* (Bonfield & Ansell, 1989)

Mittels Raster-Elektronen-Mikroskopie war es möglich, die einzelnen Bruchflächen genauer bezüglich ihres Mikrogefüges hin zu untersuchen. Dabei konnten auch mittels Literatur zu Bruchoberflächen von Holz, Vergleiche zu den Schädigungszonen herangezogen werden. Wie in der Tabelle 4-14 ersichtlich, handelt es sich jeweils um eine Probe aus dem Wechselbereich bei 50Hz und einer Probe

aus dem Ultraschallbereich bei 20 kHz, welche mit Referenzaufnahmen verglichen wurden. Die Referenzprobe aus der Literatur wurde dabei ebenfalls einem Verfahren mit einer servohydraulischen Apparatur für Ermüdungsversuche unterzogen. Die Frequenz betrug dabei 150 Hz. Die angelegte Spannung wurde ebenfalls über eine Rampe langsam an den Normwert herangeführt. Die Holzproben wurden anschließend zyklisch auf Zug- Druck-Schwellbereiche und Wechselbereiche geprüft. (Bonfield & Ansell, 1989). Beim Vergleich der Oberflächen untereinander konnten in allen 3 Varianten der Belastungen Parallelen gefunden werden. Dabei sind Scherflächen sowie gerissene Lumen, als auch Druckbereiche in allen Proben vorhanden. Dies lässt die Vermutung zu, dass in dem vorgegebenen Frequenzbereich zwischen 50Hz-150Hz-20kHz gleiche Bruchmechanismen vorherrschen. Siehe *Tabelle 4-14 Vergleich der Schädigungszone von Wechsel- und Ultraschallbereich im mikroskopischen Bereich.*

4.13 Fazit zur Bruchanalyse

Die Bruchanalyse mittels Keyence Lichtmikroskop und mit einem Raster-Elektronen-Mikroskop zeigt folgendes: Zum einen konnten den verschiedenen Belastungsmodi spezifische Archetypen des Bruchs zugeordnet werden, was auf spezifische Bruchmechanismen innerhalb des Holzes für bestimmte mechanische Einwirkungen schließen lässt. Zum anderen stellten sich Trends ein, wie das mit der Amplitude abnehmende Höhenprofil der Schädigungszone im Schwellbereich von Zugspannungen. Sowohl die Darstellung der Bruchzone als auch der Vergleich von Strukturen im mikroskopischen Bereich waren möglich. Dabei können weitere Indizien und Parallelen zu den vorherrschenden Bruchmechaniken gesammelt werden.

5 Abschließendes Fazit

Zur Übersicht werden in nachstehender Tabelle 5-1 die Festigkeitswerte für den Übergang im Kurz- sowie Dauerfestigkeitsbereich verglichen:

Grenzwerte der Ermüdungsprüfung	Druck-Schwellbereich R=10	Zug-Schwellbereich R=0,1	Wechselbereich R=-1
Kurzzeitfestigkeit [MPa]	51	99	80
Dauerfestigkeit [MPa]	41	90	60
Δ [MPa]	10	9	20

Tabelle 5-1 Vergleich der Grenzwerte der Ermüdungsprüfung

Vergleicht man den Spannungsunterschied zwischen Kurzzeitfestigkeit und Dauerfestigkeit für die verschiedenen Prüfserien, so erkennt man, dass im Wechselbereich bei R=-1 der Übergang von der Kurzzeitfestigkeit zu Dauerfestigkeit am größten ist. Dieses Materialverhalten kann auf eine erhöhte Bruchanfälligkeit von Holz im Wechselbereich hinweisen. Zyklisch Zug oder zyklisch Druck ist für diesen Faserwerkstoff weniger schädigend, als wenn während eines Lastspiels zwischen Zug und Druck gewechselt wird.

Bei der Einteilung der Brüche für die verschiedenen Belastungs-Modi, helfen die festgelegten Archetypen von Bruchmodus 1, 2 & 3 bei der Bestimmung. So ziehen Belastungen im Zug-Schwellbereich einen Kollaps durch De-Laminierung und abscheren der Holzfasern zueinander nach sich. Das Bruchbild ist daher auch eine stark zerklüftete und vertikale Schädigungszone. Der Druck-Schwellbereich bildet eine Schwächungsebene quer zu den Fasern, durch wiederholtes Stauchen des Lumens aus. Diese geschwächte Ebene führt in letzter Konsequenz zum Kollaps durch Schub, Quer zur Faser bzw. einem Abdriften der geschwächten Zellen. So entstehen relativ horizontale Bruchflächen.

Vergleicht man den Wechselbereich bei R=-1 und die Daten der Ultraschallprüfung und beachtet, dass die Messreihen laut statistischer Auswertung ihrer Varianz keiner Signifikanz unterlegen, so kann eine Frequenz-Unabhängigkeit der Ermüdungsqualität der beiden Messbereiche von 50 Hz und 20 kHz angenommen werden. Es zeigt sich im Bereich oberhalb von 50 Hz und Zug-Druckbelastung kein Frequenzeinfluss. Es werden Indikatoren herangezogen wie dieselbe Trendlinie der Messreihen, nachgewiesene ähnliche Ausprägungen des Schädigungsbereiches in Form und Struktur, sowie ein ähnliches Spannungsfeld, in dem die Proben belastet wurden.

Letztendlich sei bemerkt, dass das Ermüdungsverhalten von Holz sehr ähnlich zu jenem von technischen Faserverbundwerkstoffen ist. Auch glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) oder mit Glasfasern verstärkte Aluminiumlamine für den Flugzeugbau (GLARE) zeigen sehr gute (GFK) bis überragende (GLARE) Ermüdungseigenschaften, solange sie unter zyklischer Zugbeanspruchung belastet werden. Läuft die Spannung während der Schwingbelastung dagegen in den Druckbereich, dann knicken die Fasern und die Ermüdungsfestigkeit ist deutlich reduziert.

6 Ausblick

Die hier entstandenen Messergebnisse und durch diese Arbeit festgelegten ersten Grundlagen müssen im weiteren Verlauf noch in einigen Bereichen detaillierter untersucht werden.

Der Effekt des Kriechens ist dabei noch auf seinen Einfluss hinsichtlich des Ermüdungsverhaltens von Holz zu prüfen. Zumindest bei $R=-1$ und bei Frequenzen oberhalb von 50 Hz scheint der Effekt vernachlässigbar. Bei Belastung nur im Zug- oder nur im Druckbereich ist der Effekt dagegen möglicherweise wichtig.

Zudem ist ein weit umfangreicherer Prüfumfang für die Erweiterung einer statistischen Analyse notwendig. Die Streuung der Ermüdungswerte resultiert aus der Inhomogenität von Holz. Da der Ermüdungsprozess auf lokale Spannungskonzentrationen wesentlich sensibler ist als eine statische Belastung, ist die große Streuung erklärbar. Nur mit einer größeren Zahl an Proben kann dieser Effekt quantifiziert werden. Zu beachten ist zudem, dass das Prüfvolumen der Proben relativ klein gegenüber einem Bauteil ist. Auch der Größeneffekt muss über geeignete statistische Methoden berücksichtigt werden.

Die während dieser Arbeit entwickelte Methode zur Prüfung des Ermüdungsverhaltens von Holz liefert mit der Literatur vergleichbare Werte. Insbesondere aber wurde eine Prüfmethode sowohl für konventionelle als auch für hochfrequente Prüfung entwickelt und erfolgreich angewendet. Bei zukünftigen Arbeiten können die hier gewonnenen Erfahrungen weiter genutzt und verfeinert werden.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1 Bruchfläche der Probe A067 aus Bergahorn.....	15
Abbildung 2.2 Laubholzwürfel schematisch (Wagenführ , 1989).....	16
Abbildung 2.3 Zellwandmodell nach Sell/ Zimmermann (Kühen & Wagenführ, 2002).....	16
Abbildung 2.4 Verteilung von Zellulose, Hemizellulose und Lignin im makroskopischen Holzaufbau (Balodis & Balodis, 1977).....	18
Abbildung 2.5 Zusammenhang zwischen Rohdichte und Biegefestigkeit und Biege-E-Modul in Abhängigkeit von der Ästigkeit, ermittelt von [Glos/Gamm 1987] an 280 Balken aus Fichtenholz (α =Ästigkeit in % nach DIN 4074-1) (Rug & Mönck, 2015)Früh und Spätholanteile....	19
Abbildung 2.6 Dichteverteilung über den Jahrringquerschnitt (Wimmer , 2002)	19
Abbildung 2.7 Verformung des Schnittholzes entsprechend seiner Lage im Stamm (übertrieben dargestellt) (Rug & Mönck, 2015)	20
Abbildung 2.8 Skizze: Dr. Dietger Grosser, München (Struktureller Aufbau von Laubhölzern) (Rug & Mönck, 2015)	21
Abbildung 2.9 Prozentualer Abfall der statischen und dynamischen Festigkeit mit veränderlichem Winkel zwischen Faserrichtung und Stabachse nach Ghelmeziu (Kühen & Wagenführ, 2002)	23
Abbildung 2.10 Festigkeit - Einfluss der Belastungsrichtung (Hochreiner & Schweigler, 2017).....	24
Abbildung 2.11 Einfluss der Belastungsrichtung - Spannungsinteraktion & -transformation (Hochreiner & Schweigler, 2017)	24
Abbildung 2.12 (Hochreiner & Schweigler, 2017).....	25
Abbildung 2.13 Phasen der Kriechverformung und Einfluss der Hohe der Last; a) Phasen der Kriechverformung; b) Einfluss der Belastungshöhe (Emmler, et al., 2012)	27
Abbildung 2.14 Formel für die Zeit Dehnungsabhängigkeit (Gruyter, 2009)	28
Abbildung 2.15 Reihen-Formel eines linearen viskoelastischen Materials (Gruyter, 2009)	28
Abbildung 2.16 Elemente eines standardisierten Kelvin-Voigt Modells (Gruyter, 2009)	28
Abbildung 2.17 Spannungsniveau vs. Anzahl von Lastzyklen bis zum Bruch (S - N) - Kurve (Smith, Landis, & Gong, 2003)	30
Abbildung 2.18 Stressniveau im Vergleich zum Ermüdungsverhalten - Diagramm für Stahl, Aluminiumverbund, Beton und Holz (Smith, Landis, & Gong, 2003).....	31
Abbildung 2.19 Wellenformen bei einer Belastungsfrequenz von 0,5 Hz (Smith, Landis, & Gong, 2003)	33
Abbildung 2.20 Akkumulierte Dehnungen bei statischem und zyklischem Kriechen (Smith, Landis, & Gong, 2003)	34

Abbildung 2.21 Einfluss des R-Verhältnisses auf die Ermüdungsfestigkeit von afrikanischem Mahogany LVL. Belastet im 4 Punkt Flex Versuch bei einem Feuchtegehalt von 10% (Tsai and Ansell 1990).....	35
Abbildung 2.22 Googman und Gerbers konstante Lebensdauer-Kurve für Afrikanisches Mahogany LVL bei 107 Zyklen (Tsai und Ansell 1990)	36
Abbildung 2.23 Makroskopische Stützwirkung (Meier , 2007).....	38
Abbildung 2.24 Spannungs-Zeit-schaubild beim Dauerschwingversuch nach DIN 50100 (DIN 50100 Werkstoffprüfung - Dauerschwingversuch - Begriffe, 1978)	39
Abbildung 2.25 Grundbegriffe (Meier , 2007)	39
Abbildung 2.26 Belastungsfälle (Meier , 2007).....	40
Abbildung 2.27 Festigkeitsbereiche während der Ermüdung	41
Abbildung 2.28 Streubereich einer Wöhlerkurve doppeltlogarithmische Darstellung der Wöhlerkurve aus Zugschwellversuchen mit verschiedenen Wahrscheinlichkeiten PA für das schadlose Überstehen (Meier , 2007).....	42
Abbildung 3.1 Schema der MTS 810 (MTS Systems Corporation, 2006) ..	46
Abbildung 3.2 Darstellung der Einspannvorrichtung mit Probe	46
Abbildung 3.3 Aufbau der Ultraschallapparatur mit Kopplung des Probenkörpers und der DMS	47
Abbildung 3.4 Auszug aus der FE-Simulation des Probenkörpers für die Ultraschallmessung. Bild und Berechnung von Bernd Schönbauer .	47
Abbildung 4.1 Verwendete Probenformen 1-3	50
Abbildung 4.2 Darstellung einer gesockelten Probe für die Ultraschallmessung	52
Abbildung 4.3 Graphische Dehnungsauswertung der Probe A063	53
Abbildung 4.4 Herausgearbeiteter Messbereich im Probenkörper zur Dichtebestimmung.....	54
Abbildung 4.5 Verfärbung einer Probe an der Unteren Einspannung durch Testprozedere	55
Abbildung 4.6 Installierte Kühlung des Prüfaufbaus.....	55
Abbildung 4.7 Diagramm der ermittelten Probendaten für zyklische Beanspruchung im Druckschwellbereich bei R=10.....	59
Abbildung 4.8 Diagramm der ermittelten Probendaten für die zyklische Beanspruchung in Wechselbereich bei R=-1.....	62
Abbildung 4.9 Diagramm der ermittelten Probendaten für die zyklische Beanspruchung im Ultraschallbereich für die gewichtete Spannungsschwingbreite.....	64
Abbildung 4.10 Diagramm der ermittelten Probendaten für die zyklische Beanspruchung im Ultraschallbereich für die ungewichtete Spannungsschwingbreite.....	64
Abbildung 4.11 Diagramm der ermittelten Probendaten im Vergleich zwischen zyklischer Beanspruchung im Ultraschall- und Wechselbereich	65

Abbildung 4.12 Vergleich der Varianzbereiche im Ultraschall- und Wechselbereich	68
Abbildung 4.13 Abbildung der Bruchfläche von Probe A066 nach der Ultraschallbelastung	68
Abbildung 4.14 Archetyp Bruchmodus 1	70
Abbildung 4.15 Archetyp Bruchmodus 2	71
Abbildung 4.16 Archetyp Bruchmodus 3	71
Abbildung 4.17 Risseinleitung im Zugschwellbereich bei hohen Amplituden	73
Abbildung 0.1 Probe A017; Druckspannungsbruch bei -39,13MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $1,01 \times 10^7$ Zyklen	93
Abbildung 0.2 Probe A020; Druckspannungsbruch bei -50,80 MPa gewichtete Spannungsschwingbreit bei $2,82 \times 10^3$ Zyklen	93
Abbildung 0.3 Probe A032; Zugspannungsbruch bei 115,53 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $8,83 \times 10^3$ Zyklen.....	93
Abbildung 0.4 Probe A038; Zugspannungsbruch bei 122,02 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $1,85 \times 10^5$ Zyklen	93
Abbildung 0.5 Probe A030; Zugspannungsbruch bei 125,78 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei 2 Zyklen	93
Abbildung 0.6 Probe A046; Zugspannungsbruch bei 130,86 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $3,21 \times 10^4$ Zyklen	93
Abbildung 0.7 Probe A034; Zugspannungsbruch bei 114,00 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei 6 Zyklen	93
Abbildung 0.8 Probe A036; Zugspannungsbruch bei 121,15 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $4,30 \times 10^5$ Zyklen	93
Abbildung 0.9 Probe A037; Zugspannungsbruch bei 111,71 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $4,80 \times 10^3$ Zyklen.....	93
Abbildung 0.10 Probe A042; Zugspannungsbruch bei 123,54 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $1,05 \times 10^6$ Zyklen.....	93
Abbildung 0.11 Probe A039; Zugspannungsbruch bei 103,30 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei 1 Zyklus	93
Abbildung 0.12 Probe A033; Zugspannungsbruch bei 102,23 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $1,31 \times 10^4$ Zyklen	93
Abbildung 0.13 Probe A047; Zugspannungsbruch bei 114,98 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $4,27 \times 10^5$ Zyklen	93
Abbildung 0.14 Probe A029; Zugspannungsbruch bei 102,39 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $3,5 \times 10^2$ Zyklen	93
Abbildung 0.15 Probe A026; Zugspannungsbruch bei 103,37 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $7,51 \times 10^4$ Zyklen.....	93
Abbildung 0.16 Probe A028; Zugspannungsbruch bei 93,63 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $7,87 \times 10^4$ Zyklen	93
Abbildung 0.17 Probe A040; Zugspannungsbruch bei 91,89 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $3,98 \times 10^3$ Zyklen	93

Abbildung 0.18 A015; Zug-Druck-Spannungsbruch bei 92,25 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $1,46 \times 10^5$ Zyklen	93
Abbildung 0.19 Probe A012; Zug-Druck-Spannungsbruch bei 95,36 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $4,35 \times 10^3$ Zyklen	93
Abbildung 0.20 A004; Zug-Druck-Spannungsbruch bei 80,70 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $1,38 \times 10^5$ Zyklen.....	93
Abbildung 0.21 A010; Zug-Druck-Spannungsbruch bei 86,85 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $1,29 \times 10^3$ Zyklen	93
Abbildung 0.22 A009; Zug-Druck-Spannungsbruch bei 65,62 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $1,12 \times 10^6$ Zyklen.....	93
Abbildung 0.23 A011; Zug-Druck-Spannungsbruch bei 72,81 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $2,54 \times 10^5$ Zyklen.....	93
Abbildung 0.24 A067; Zug-Druck Spannungsbruch im Ultraschallbereich bei 96,57 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $3,55 \times 10^4$ Zyklen	93
Abbildung 0.25 A055; Zug-Druck-Spannungsbruch im Ultraschallbereich bei 93,38 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $8,87 \times 10^2$ Zyklen	93
Abbildung 0.26 A065; Zug-Druck Spannungsbruch im Ultraschallbereich bei 50,37 MPa gewichtete Spannungs-schwingbreite bei $1,49 \times 10^7$ Zyklen.....	93
Abbildung 0.27 A056; Zug-Druck Spannungsbruch im Ultraschallbereich bei $2,68 \times 10^6$ MPa gewichtete Spannungs-schwingbreite bei $2,68 \times 10^6$ Zyklen.....	93
Abbildung 0.28 A052; Zug-Druck Spannungsbruch im Ultraschallbereich bei 54,55 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $5,22 \times 10^6$ Zyklen	93
Abbildung 0.29 A066; Zug-Druck Spannungsbruch im Ultraschallbereich bei 61,19 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $5,77 \times 10^6$ Zyklen	93
Abbildung 0.30 A063; Zug-Druck Spannungsbruch im Ultraschallbereich bei 58,46 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $6,52 \times 10^4$ Zyklen	93
Abbildung 0.31 A053; Zug-Druck Spannungsbruch im Ultraschallbereich bei 56,46 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $3,98 \times 10^8$ Zyklen	93
Abbildung 0.32 A054; Zug-Druck Spannungsbruch im Ultraschallbereich bei 41,90, MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $1,92 \times 10^8$ Zyklen.....	93
Abbildung 0.33 A065; Zug-Druck Spannungsbruch im Ultraschallbereich bei 50,37 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $1,10 \times 10^9$ Zyklen	93
Abbildung 0.34 Probe A056 – Übersichtsbild der Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Fadenkreuz.....	93
Abbildung 0.35 Probe A056 - Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Faden-kreuz.....	93

Abbildung 0.36 A009 – Übersichtsbild der Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Fadenkreuz.....	93
Abbildung 0.37 A009 - Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Faden-kreuz	93
Abbildung 0.38 A009 – Übersichtsbild der Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Fadenkreuz.....	93
Abbildung 0.39 A009 - Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Faden-kreuz	93
Abbildung 0.40 A009 - Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Faden-kreuz	93
Abbildung 0.41 A009 – Übersichtsbild der Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Fadenkreuz.....	93
Abbildung 0.42 A009 – Übersichtsbild der Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Fadenkreuz.....	93
Abbildung 0.43 A009 - Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Faden-kreuz	93
Abbildung 0.44 A067 - Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Faden-kreuz	93
Abbildung 0.45 A067 – Übersichtsbild der Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Fadenkreuz.....	93
Abbildung 0.46 A067 - Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Faden-kreuz	93
Abbildung 0.47 A067 – Übersichtsbild der Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Fadenkreuz.....	93
Abbildung 0.48 A067 - Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Faden-kreuz	93
Abbildung 0.49 A067 – Übersichtsbild der Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Fadenkreuz.....	93

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Anordnung, Form und Funktion der Laubholzzellen (einheimische Holzarten) (Kühen & Wagenführ, 2002) (Wagenführ , 1989)	15
Tabelle 2-2 Beschreibung der Zellschichten von außen nach innen (Fellner, Teischinger, & Zschokke, 2006)	17
Tabelle 2-3 Holzfehlerarten (Rug & Mönck, 2015)	22
Tabelle 2-4 Festigkeitsnormierte Bemessungsschwingbreite κ gemäß DIN EN 1995-2 (Eurocode5, 2010) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsart für Holz und Holzwerkstoffe sowie für mechanische Verbindungsmittel in Holzbauteilen	37
Tabelle 3-1 Physikalische Eigenschaften von Bergahorn (Fellner, Teischinger, & Zschokke, 2006)	43
Tabelle 3-2 Gesamtübersicht der Faserlängenmessungen (Tuschl, 2016) .	44
Tabelle 3-3 Mechanische Eigenschaften von Bergahorn (Fellner, Teischinger, & Zschokke, 2006)	45
Tabelle 4-1 Dehnungsmessung der Probe A063	53
Tabelle 4-2 Datenerfassung des Versuchsablaufs laut Programmierung ..	56
Tabelle 4-3 Phase 1 des Versuchsablaufs laut Programmierung.....	57
Tabelle 4-4 Phase 2 des Versuchsablaufs laut Programmierung.....	57
Tabelle 4-5 Phase 3 des Versuchsablaufs laut Programmierung.....	57
Tabelle 4-6 Prüftabelle der ermittelten Probandaten für zyklische Beanspruchung im Druckschwellbereich bei $R=10$	59
Tabelle 4-7 Prüftabelle der ermittelten Probandaten für zyklische Beanspruchung im Zugschwellbereich bei $R=0,1$	60
Tabelle 4-8 Prüftabelle der ermittelten Probandaten für zyklische Beanspruchung im Wechselbereich $R=-1$	62
Tabelle 4-9 Prüftabelle der ermittelten Probandaten für zyklische Beanspruchung im Ultraschallbereich	63
Tabelle 4-10 Abbildungsverzeichnis der Ermüdungsversuche im Druckschwellbereich.....	72
Tabelle 4-11 Abbildungsverzeichnis der Ermüdungsversuche im Zugschwellbereich	73
Tabelle 4-12 Abbildungsverzeichnis der Ermüdungsversuche im Wechselbereich	74
Tabelle 4-13 Abbildungsverzeichnis der Ermüdungsversuche im Ultraschallbereich	75
Tabelle 4-14 Vergleich der Schädigungszone von Wechsel- und Ultraschallbereich im mikroskopischen Bereich.....	76
Tabelle 5-1 Vergleich der Grenzwerte der Ermüdungsprüfung	78
Tabelle 0-1 Übersicht der Versuchsdurchführung und Analyse je Probenstück.....	92
Tabelle 0-2 Probenindex aller Abmessungen der Versuchsbereiche	93

Tabelle 0-3 Dichtebestimmung aller Proben 93

Literaturverzeichnis

- (NHM), N. H. (Mai 2003). DIN 68364 Kennwerte von Holzarten.
- Aicher, S., & Zachary, C. (2015). *Ermüdungsverhalten von Holz und geklebten Holzbauteilen*. Stuttgart: Internationales Holzbau-Forum IHF.
- Ardenne, M. v. (1938). *Das Elektronen Rastermikroskop*. Springer Verlag.
- Balodis, & Balodis, B. (1977). The Chronicles of the Forest Products Laboratory. *The Chronicles of the Forest Products Laboratory*. Melbourne : CSIRO.
- Bonefield, P., & Ansell, M. (1991). The fatigue properties of wood in tension, compression and shear. *Journal of Material Science*, 4765-4773.
- Bonfield, P., & Ansell, M. (6. Oktober 1989). Fatigue properties of wood in tension, compression and shear. *Journal of Materials Science* , S. 4765-4773.
- Burgert, I. (kein Datum). *Werkstoffe I Teil 2 - Holz und Holzwerkstoffe*. Zürich: ETH Zürich, IfB.
- DIN 50100 Werkstoffprüfung - Dauerschwingversuch - Begriffe, Z. D. (1978). . .
- DIN EN 1993-1-9. (2005). *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9. .: Ermüdung*.
- Emmler, R., Faix, O., Gittel, H.-J., Gottlöber, C., Kröppelin, D., Leps, T., . . . Wagenführ, R. (2012). *Taschenbuch der Holztechnik 2. aktualisierte Auflage*. Dresden Rosenheim: Fachbuchverlag Leipzig.
- Eurocode5, D. E.-2. (2010). *Bemessung und Konstruktion von Holzbauten-Teil2: Brücken*.
- Fellner, J., Teischinger, A., & Zschokke, W. (2006). *Holzspektrum Ansichten, Beschreibungen und Vergleichswerte*. Wien: Foundry Journal.
- Gong, M., & Smith, I. (2000). *Failure mechanism of softwood under low-cycle fatigue load in compression parallel to grain*. Vancouver, Canada: University of British Columbia .
- Gruyter, W. (2009). Micromechanics of creep and relaxation of wood. a review. New York: Holzforschung.
- Haibach. (2006). *Betriebsfestigkeit-Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung* (3. Auflage Ausg.). Berlin: Springer.

-
- Hansen, L. (1991). *Experimental investigation of fatigue properties of laminated wood beams*. High Wycombe: Timber Research and Development Association .
- Hering, S. (2011). *Charakterisierung und Modellierung der Materialeigenschaften von Rotbuchenholz zur Simulation von Holzverklebungen*. Zürich: ETH Zürich.
- Hochreiner , G., & Schweigler, M. (2017). Holzmechanik. *Holzkonstruktion* . Wien, Wien, Österreich: TU Wien .
- Issler, L., Ruoss, H., & Häfele, P. (1997). *Festigkeitslehre - Grundlagen; 2. Auflage*. Springer-Verlag.
- Jeske, H., & Grosser, D. (kein Datum). Das Holz des Bergahorns - Eigenschaften und Verwendung. *LWF Wissen*, S. 55-61.
- Kohara, M., & Okuyama, T. (1992). Mechanical responses of wood to repeated loading V: Effect of duration time and number of repetitions on the time to failure in bending. *Journal of Japanese Wood Research Society* 38, 753-758.
- Kühen, R., & Wagenführ, R. (2002). *Werkstoffkunde Holz für Restauratoren* . Leipzig: E.A. Seemann.
- Kuhlmann, U., Dürr, A., & Günter , H. (2003). *Kranbahnen und Betriebsfestigkeit*. Stahlbau Kalender.
- Mayer, H. (2016). Recent developments in ultrasonic fatigue. *Fatigue Fracture, Vol.39*, 3-29. Wien, Wien. doi:<https://doi.org/10.1111/ffe.12365>
- Mayer, H., Schönbauer, B., & Fitzka, M. (2017). Materialkunde . *Materialkunde - Holz und Naturfasertechnologie*. Wien, Wien, Österreich: Universität für Bodenkultur Wien.
- Meier , M. (2007). *Ermüdungsfestigkeit - Research Collection*. Zürich: ETH Zürich.
- Mohr, B. (2001). *Zur Interaktion der Einflüsse aus Dauerstands- und Ermüdungsbeanspruchung im Ingenieurbau*. München.
- MTS Systems Corporation. (2006). *MTS 810 & 858 Material Testing Systems*. USA: MTS.
- Nielsen, L. (1996). *Lifetime and residual strength of wood, Report: Series R, No. 6, Department of Structural Engineering and Materials*, . Lyngby Denmark: Technical University of Denmark.

-
- Okuyama, T., Itoh, A., & Marsoem, S. (1984). Mechanical responses of wood to repeated loading I: Tensile and compressive fatigue fractures. *Journal of Japanese Wood Research Society* 30, S. 791-798.
- Peschke, H. &. (2016). *Hegewald & Peschke Meß- und Prüftechnik GmbH*. Von <https://www.hegewald-peschke.de/produkte/universalpruefmaschinen/pruefanwendungen/product-detail/universalpruefmaschine-inspekt-20-kn-mit-vhcf-vorrichtung.html> abgerufen
- Radaj, D., & Vormwald, M. (2007). *Ermüdungsfestigkeit*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Ranc, N., Wagner, D., & Paris, P. C. (14. April 2008). Study of thermal effects associated with crack propagation during very high cycle fatigue tests. *Science Direct*, S. 4013-4021.
- Richard, H. (29. 11 1989). Grundlagen und Anwendungen der Bruchmechanik. *Technische Mechanik*, S. 69-80.
- Rug, W., & Mönck, W. (2015). *Holzbau - Bemessung und Konstruktion - 16. Auflage*. (D. D. e.V., Hrsg.) Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Schijve, J. (2009). *Fatigue of Structures and Materials*. Niederlande: Springer.
- Schniewind, R. (1968). Recent Progress in the Study of the Rheology of Wood. Richmond, Californien, USA: Wood Science and Technology.
- Schwarz, H. R. (1991). *Methode der finiten Elemente: eine Einführung unter besonderer Berücksichtigung der Rechenpraxis*. Zürich: Springer.
- Smith, I., Landis, E., & Gong, M. (2003). *Fracture and Fatigue in Wood*. Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd.
- Tsai, & Ansell. (1990). Failure in the row model for bolted timber connections. *Journal of Material Science* 25, S. 865-878.
- Tuschl, K. (2016). *Bestimmung der Faserlänge und weiterer holzanatomischer Merkmale selten genutzter Holzarten*. Wien.
- Wagenführ, R. (1989). *Anatomie des Holzes 4. Auflage & 5. Auflage*. Leipzig; Leinfelden- Echterdingen: Fachbuchverlag; DRW-Verlag.
- Wimmer, R. (2002). *Wood and Fiber Quality. Wood and Fiber Quality*. Universität für Bodenkultur Wien, Wien, Österreich: Universität für Bodenkultur Wien.

Zobel, B., & Jett, J. (1995). *The Importance of Wood Density (Specific Gravity) and its Component Parts*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Anhang

Proben	Verfügbarkeit	Verwendung	Anmerkung	Dichte- messung	Foto seitlich	Foto Bruch- fläche	Foto REM
A004	neg.	Cyklisch Zug/Druck					
A005	neg.	Cyklisch Zug					
A006	neg.	Cyklisch Zug/Druck					
A007	pos.	ohne Verwendung	4,5mm				
A008	pos.	ohne Verwendung	4,5mm				
A009	neg.	Cyklisch Zug/Druck					
A010	neg.	Cyklisch Zug/Druck					
A011	neg.	Cyklisch Zug/Druck					
A012	neg.	Cyklisch Zug/Druck					
A013	pos.	ohne Verwendung	4,5mm				
A014	neg.	Cyklisch Zug/Druck					
A015	neg.	Cyklisch Zug/Druck					
A016	neg.	Cyklisch Druck					
A017	neg.	Cyklisch Druck					
A018	neg.	Cyklisch Druck					
A019	neg.	Cyklisch Druck					
A020	neg.	Cyklisch Druck					
A021	neg.	Cyklisch Druck					
A022	neg.	Cyklisch Druck					
A023	neg.	Cyklisch Druck					
A024	neg.	Cyklisch Druck					
A025	neg.	Vorversuche Zug					
A026	neg.	Cyklisch Zug					
A027	neg.	Cyklisch Zug					
A028	neg.	Cyklisch Zug					
A029	neg.	Cyklisch Zug					
A030	neg.	Cyklisch Zug					
A031	neg.	Vorversuche Zug					
A032	neg.	Cyklisch Zug					
A033	neg.	Cyklisch Zug					
A034	neg.	Cyklisch Zug					
A035	neg.	Vorversuche Zug					
A036	neg.	Cyklisch Zug					
A037	neg.	Cyklisch Zug					
A038	neg.	Cyklisch Zug					
A039	neg.	Cyklisch Zug					
A040	neg.	Cyklisch Zug					
A041	neg.	Cyklisch Zug/Druck					
A042	neg.	Cyklisch Zug					
A043	neg.	Cyklisch Zug					
A044	neg.	Cyklisch Zug					
A045	neg.	Cyklisch Zug					
A046	neg.	Cyklisch Zug					
A047	neg.	Cyklisch Zug					
A048	neg.	Cyklisch Zug/Druck					
A049	neg.	Cyklisch Zug/Druck					
A050	neg.	Cyklisch Zug/Druck					
A051	neg.	Vorversuch Ultraschall					
A052	neg.	Ultraschall					
A053	neg.	Ultraschall					
A054	neg.	Ultraschall					
A055	neg.	Ultraschall					
A056	neg.	Ultraschall					
A057	pos.	ohne Verwendung					
A058	pos.	ohne Verwendung					
A059	pos.	ohne Verwendung					
A060	pos.	ohne Verwendung					
A061	pos.	ohne Verwendung					
A062	pos.	ohne Verwendung					
A063	neg.	Ultraschall					
A064	neg.	Ultraschall	zerstört				
A065	neg.	Ultraschall					
A066	neg.	Ultraschall					
A067	neg.	Ultraschall					

Tabelle 0-1 Übersicht der Versuchsdurchführung und Analyse je Probenstück

Index								
Probe	d1-0	d2-0	d3-0	d4-90	d5-90	d6-90	Ø d [mm]	A [mm ²]
A004	4,39	4,41	4,43	4,46	4,43	4,50	4,44	15,4598
A005	4,36	4,38	4,43	4,37	4,34	4,38	4,38	15,0445
A006	4,56	4,46	4,48	4,40	4,38	4,42	4,45	15,5528
A007	4,47	4,53	4,44	4,48	4,45	4,47	4,47	15,7164
A008	4,42	4,37	4,39	4,61	4,63	4,65	4,51	15,9869
A009	4,60	4,61	4,71	4,63	4,67	4,70	4,65	17,0066
A010	4,43	4,41	4,45	4,39	4,41	4,43	4,42	15,3439
A011	4,35	4,47	4,33	4,44	4,43	4,43	4,41	15,2630
A012	4,57	4,58	4,60	4,53	4,54	4,61	4,57	16,4149
A013	4,48	4,52	4,50	4,61	4,53	4,63	4,55	16,2240
A014	4,45	4,50	4,48	4,53	4,52	4,54	4,50	15,9279
A015	4,28	4,31	4,33	4,30	4,25	4,27	4,29	14,4545
A016	6,03	6,01	6,01	6,00	5,98	5,97	6,00	28,2743
A017	6,01	6,02	6,05	6,02	6,04	6,04	6,03	28,5578
A018	5,98	6,00	6,00	5,93	5,92	5,93	5,96	27,8986
A019	5,96	5,98	5,97	5,95	5,97	5,96	5,97	27,9454
A020	6,02	6,00	5,98	6,00	6,01	6,01	6,00	28,3058
A021	6,04	6,02	6,04	6,02	6,03	6,02	6,03	28,5420
A022	6,00	6,02	6,03	5,99	6,01	6,04	6,02	28,4159
A023	5,94	5,94	5,96	5,96	5,97	5,96	5,96	27,8518
A024	5,97	5,97	5,96	5,92	5,92	5,91	5,94	27,7272
A025	5,99	6,00	6,03	5,96	5,97	5,99	5,99	28,1802
A026	6,02	6,02	6,00	5,97	5,97	5,97	5,99	28,1958
A027	5,89	5,90	5,91	5,95	5,95	5,94	5,92	27,5564
A028	5,94	5,90	5,94	5,94	5,96	5,95	5,94	27,6961
A029	5,95	5,96	5,95	5,96	5,98	5,97	5,96	27,9142
A030	5,99	5,98	5,98	5,98	5,98	5,99	5,98	28,1175
A031	4,43	4,32	4,30	4,31	4,38	4,31	4,34	14,8048
A032	4,42	4,38	4,42	4,52	4,41	4,44	4,43	15,4250
A033	4,28	4,29	4,30	4,37	4,32	4,37	4,32	14,6687
A034	4,44	4,43	4,45	4,33	4,38	4,34	4,40	15,1708
A035	4,50	4,44	4,49	4,51	4,56	4,52	4,50	15,9279
A036	4,49	4,46	4,52	4,48	4,46	4,45	4,48	15,7398
A037	4,52	4,48	4,49	4,42	4,43	4,45	4,47	15,6579
A038	4,39	4,41	4,40	4,33	4,34	4,37	4,37	15,0216
A039	4,52	4,48	4,49	4,42	4,43	4,45	4,47	15,6579
A040	4,44	4,37	4,44	4,40	4,36	4,38	4,40	15,1938
A041	4,49	4,5	4,5	4,53	4,55	4,55	4,52	16,0460
A042	4,44	4,45	4,48	4,45	4,47	4,50	4,47	15,6579
A043	4,50	4,51	4,49	4,51	4,50	4,52	4,51	15,9397
A044	4,50	4,50	4,49	4,52	4,43	4,45	4,48	15,7750
A045	4,38	4,38	4,42	4,40	4,38	4,44	4,40	15,2053
A046	6,00	6,01	6,01	5,99	6,00	6,00	6,00	28,2900
A047	5,99	6,00	6,00	5,97	5,97	5,97	5,98	28,1175
A048	4,50	4,48	4,45	4,41	4,39	4,38	4,44	15,4482
A049	4,52	4,51	4,53	4,56	4,58	4,57	4,55	16,2240
A050	4,55	4,56	4,57	4,59	4,58	4,62	4,58	16,4628
A051	5,91	5,92	5,92	5,92	5,92	5,94	5,92	27,5409
A052	5,93	5,93	5,91	5,98	5,98	5,98	5,95	27,8206
A053	5,90	5,89	5,89	5,92	5,92	5,92	5,91	27,4015
A054	5,98	5,97	5,97	5,94	5,92	5,90	5,95	27,7739
A055	5,97	5,97	5,96	5,99	5,97	5,96	5,97	27,9923
A056	5,96	5,95	5,94	5,93	5,94	5,94	5,94	27,7428
A057	5,91	5,90	5,90	5,86	5,84	5,83	5,87	27,0931
A058	5,91	5,89	5,89	5,93	5,93	5,93	5,91	27,4634
A059	5,93	5,94	5,94	5,94	5,93	5,92	5,93	27,6495
A060	6,02	6,01	6,01	5,98	5,98	5,96	5,99	28,2115
A061	5,97	5,96	5,96	5,92	5,91	5,91	5,94	27,6961
A062	5,89	5,88	5,88	5,98	5,97	5,95	5,93	27,5719
A063	5,98	5,98	5,98	5,95	5,97	5,98	5,97	28,0236
A064	5,93	5,94	5,95	5,96	5,96	5,97	5,95	27,8206
A065	5,95	5,96	5,96	5,90	5,90	5,91	5,93	27,6184
A066	5,84	5,86	5,87	5,82	5,82	5,83	5,84	26,7865
A067	5,88	5,89	5,90	5,92	5,92	5,93	5,91	27,4015

Tabelle 0-2 Probenindex aller Abmessungen der Versuchsbereiche

Proben	d1-0	d2-0	d3-0	d4-90	d5-90	d6-90	Ø d [mm]	h 1	h 2	h 3	Ø h [mm]	V [cm³]	Gewicht [g]	Dichte [g/cm³]	Gewichtungs-Faktor
A004	4,29	4,31	4,31	4,43	4,31	4,32	4,3283	10,17	10,20	10,24	10,2033	0,1501	0,0939	0,62544948	1,0088
A005	4,62	4,64	4,60	4,61	4,66	4,64	4,6283	10,63	10,69	10,78	10,7000	0,1800	0,1216	0,67547714	1,0894
A006	4,39	4,42	4,38	4,46	4,41	4,41	4,4117	10,69	10,68	10,85	10,7400	0,1642	0,1062	0,64688186	1,0433
A007	ohne verwendung														
A008	ohne verwendung														
A009	4,28	4,33	4,35	4,35	4,31	4,30	4,3200	10,01	10,01	10,02	10,0133	0,1468	0,0889	0,60571135	0,9769
A010	4,53	4,52	4,51	4,51	4,54	4,52	4,5217	10,63	10,60	10,68	10,6367	0,1708	0,1022	0,59835425	0,9651
A011	3,92	3,94	3,97	3,92	3,93	3,95	3,9383	10,13	10,09	10,11	10,1100	0,1232	0,0695	0,56431140	0,9102
A012	4,66	4,70	4,74	4,79	4,79	4,80	4,7467	10,19	10,27	10,30	10,2533	0,1814	0,1192	0,65696741	1,0596
A013	ohne verwendung														
A014	4,54	4,54	4,51	4,53	4,54	4,56	4,5367	10,64	10,49	10,62	10,5833	0,1711	0,1150	0,67222049	1,0842
A015	4,41	4,43	4,45	4,47	4,44	4,42	4,4367	9,34	9,32	9,34	9,3333	0,1443	0,0917	0,63551979	1,0250
A016	4,95	4,93	4,96	4,96	4,97	4,95	4,9533	10,23	10,19	10,38	10,2667	0,1978	0,1388	0,70157647	1,1315
A017	4,23	4,19	4,18	4,15	4,12	4,17	4,1733	10,08	10,05	10,07	10,0667	0,1377	0,0807	0,58604615	0,9452
A018	4,69	4,72	4,73	4,69	4,68	4,72	4,7050	10,38	10,35	10,37	10,3667	0,1802	0,1119	0,62084304	1,0013
A019	4,38	4,36	4,32	4,35	4,37	4,35	4,3550	11,05	11,05	11,06	11,0533	0,1646	0,1088	0,66079908	1,0658
A020	4,19	4,21	4,26	4,20	4,23	4,26	4,2250	10,16	10,17	10,15	10,1600	0,1424	0,0831	0,58339675	0,9409
A021	4,77	4,75	4,72	4,76	4,76	4,74	4,7500	10,11	10,11	10,10	10,1067	0,1791	0,1124	0,62759759	1,0122
A022	4,76	4,86	4,82	4,85	4,85	4,79	4,8217	10,35	10,21	10,63	10,3967	0,1898	0,1138	0,59946509	0,9669
A023	4,52	4,55	4,55	4,56	4,52	4,53	4,5383	10,45	10,48	10,41	10,4467	0,1690	0,1100	0,65092700	1,0499
A024	4,18	4,18	4,16	4,12	4,13	4,13	4,1500	10,66	10,63	10,64	10,6433	0,1440	0,0970	0,67376430	1,0867
A025	4,32	4,33	4,36	4,29	4,33	4,38	4,3350	10,17	10,15	10,14	10,1533	0,1499	0,0994	0,66329948	1,0698
A026	4,24	4,16	4,14	4,01	4,03	4,11	4,1150	10,01	10,07	9,99	10,0233	0,1333	0,0863	0,64739458	1,0442
A027	4,13	4,14	4,17	4,53	4,57	4,55	4,3483	10,71	10,70	10,69	10,7000	0,1589	0,0957	0,60227193	0,9714
A028	4,34	4,26	4,26	4,33	4,38	4,35	4,3200	10,17	10,14	10,16	10,1567	0,1489	0,0873	0,58641581	0,9458
A029	3,99	3,97	3,91	3,94	3,94	3,88	3,9383	10,15	10,16	10,19	10,1667	0,1238	0,0728	0,58781135	0,9481
A030	4,50	4,55	4,57	4,48	4,53	4,57	4,5333	10,19	10,14	10,15	10,1600	0,1640	0,1015	0,61893800	0,9983
A031	4,39	4,38	4,31	4,40	4,37	4,33	4,3633	10,12	10,13	10,11	10,1200	0,1513	0,0926	0,61193291	0,9870
A032	4,35	4,38	4,39	4,44	4,43	4,38	4,3950	9,50	9,50	9,42	9,4733	0,1437	0,0817	0,56847530	0,9169
A033	4,63	4,64	4,66	4,70	4,69	4,64	4,6600	9,84	9,79	9,83	9,8200	0,1675	0,0983	0,58692190	0,9466
A034	4,50	4,49	4,52	4,53	4,47	4,43	4,4900	10,20	10,19	10,19	10,1933	0,1614	0,0975	0,60409581	0,9743
A035	Vorversuche Zug														
A036	4,25	4,19	4,16	4,26	4,21	4,19	4,2100	10,18	10,11	10,19	10,1600	0,1414	0,0908	0,64200449	1,0355
A037	4,37	4,33	4,29	4,41	4,36	4,35	4,3517	10,12	10,08	10,09	10,0967	0,1502	0,0889	0,59200124	0,9548
A038	4,18	4,17	4,24	4,20	4,24	4,27	4,2167	10,16	10,20	10,16	10,1733	0,1421	0,0853	0,60042302	0,9684
A039	4,24	4,20	4,32	4,34	4,30	4,27	4,2783	10,23	10,25	10,24	10,2400	0,1472	0,0873	0,59302796	0,9565
A040	4,20	4,22	4,26	4,25	4,24	4,27	4,2400	10,11	10,13	10,10	10,1133	0,1428	0,0904	0,63307114	1,0211
A041	4,56	4,56	4,53	4,55	4,57	4,58	4,5583	10,13	10,14	10,12	10,1300	0,1653	0,1015	0,61398047	0,9903
A042	4,51	4,53	4,57	4,53	4,53	4,58	4,5417	10,18	10,18	10,16	10,1733	0,1648	0,1079	0,65469312	1,0559
A043	4,63	4,62	4,61	4,69	4,67	4,67	4,6483	10,75	10,69	10,23	10,5567	0,1791	0,1143	0,63802106	1,0290
A044	4,72	4,74	4,71	4,68	4,63	4,61	4,6817	10,42	10,42	10,39	10,4100	0,1792	0,1037	0,57867826	0,9333
A045	4,58	4,59	4,59	4,59	4,57	4,54	4,5767	10,45	10,57	10,58	10,5333	0,1733	0,1120	0,64634404	1,0425
A046	4,47	4,50	4,51	4,46	4,49	4,52	4,4917	10,17	10,16	10,19	10,1733	0,1612	0,1038	0,64391592	1,0385
A047	4,08	4,09	4,14	4,05	4,07	4,12	4,0917	10,15	10,19	10,18	10,1733	0,1338	0,0883	0,66009593	1,0646
A048	4,55	4,58	4,59	4,53	4,56	4,58	4,5650	10,71	10,84	10,87	10,8067	0,1769	0,1028	0,58120577	0,9374
A049	4,75	4,74	4,73	4,76	4,79	4,69	4,7433	10,15	10,12	10,26	10,1767	0,1798	0,1124	0,62503392	1,0081
A050	4,42	4,41	4,40	4,41	4,41	4,42	4,4117	10,71	10,71	10,73	10,7167	0,1638	0,0952	0,58114160	0,9373
A051	4,47	4,48	4,49	4,51	4,50	4,54	4,4983	10,04	10,03	10,04	10,0367	0,1595	0,0942	0,59056574	0,9525
A052	4,48	4,47	4,41	4,48	4,50	4,48	4,4700	10,21	10,20	10,22	10,2100	0,1602	0,1091	0,68091685	1,0982
A053	4,53	4,53	4,50	4,52	4,52	4,54	4,5233	10,03	10,02	10,03	10,0267	0,1611	0,0940	0,58339702	0,9409
A054	4,46	4,47	4,48	4,47	4,48	4,48	4,4733	9,71	9,70	9,70	9,7033	0,1525	0,0934	0,61245407	0,9878
A055	4,38	4,39	4,38	4,42	4,41	4,38	4,3933	10,40	10,37	10,37	10,3800	0,1574	0,0929	0,59039160	0,9522
A056	4,27	4,20	4,13	4,25	4,32	4,30	4,2450	10,10	10,06	10,08	10,0800	0,1427	0,0831	0,58249905	0,9395
A057	ohne verwendung														
A058	ohne verwendung														
A059	ohne verwendung														
A060	ohne verwendung														
A061	ohne verwendung														
A062	ohne verwendung														
A063	3,99	3,97	3,99	3,96	4,01	4,00	3,9867	10,97	11,01	11,14	11,0400	0,1378	0,0823	0,59720169	0,9632
A064	4,49	4,50	4,52	4,40	4,42	4,46	4,4650	10,96	10,95	10,96	10,9567	0,1716	0,1032	0,60154544	0,9702
A065	4,52	4,56	4,55	4,55	4,59	4,57	4,5567	10,53	10,50	10,51	10,5133	0,1714	0,1119	0,65268743	1,0527
A066	4,50	4,48	4,48	4,50	4,51	4,48	4,4917	10,57	10,80	10,64	10,6700	0,1691	0,1069	0,63227843	1,0198
A067	4,41	4,39	4,33	4,40	4,39	4,41	4,3883	10,00	10,03	10,02	10,0167	0,1515	0,0925	0,61056150	0,9847
													Durchschnitt	0,62001856	

Tabelle 0-3 Dichtebestimmung aller Proben



Abbildung 0.2 Probe A020; Druckspannungsbruch bei -50,80 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $2,82 \times 10^3$ Zyklen

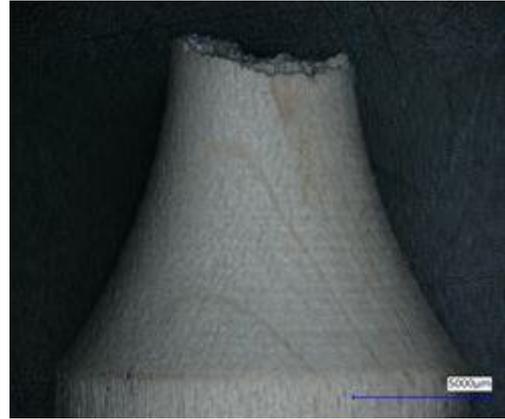


Abbildung 0.1 Probe A017; Druckspannungsbruch bei -39,13MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $1,01 \times 10^7$ Zyklen



Abbildung 0.3 Probe A032; Zugspannungsbruch bei 115,53 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $8,83 \times 10^3$ Zyklen

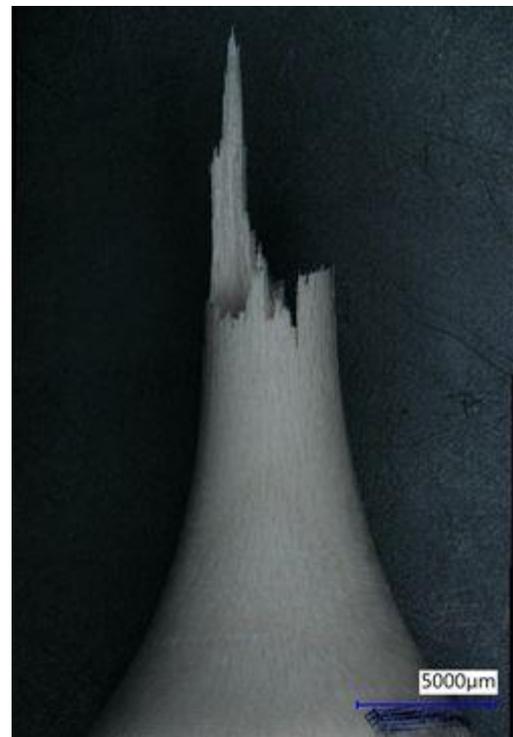


Abbildung 0.4 Probe A038; Zugspannungsbruch bei 122,02 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $1,85 \times 10^5$ Zyklen

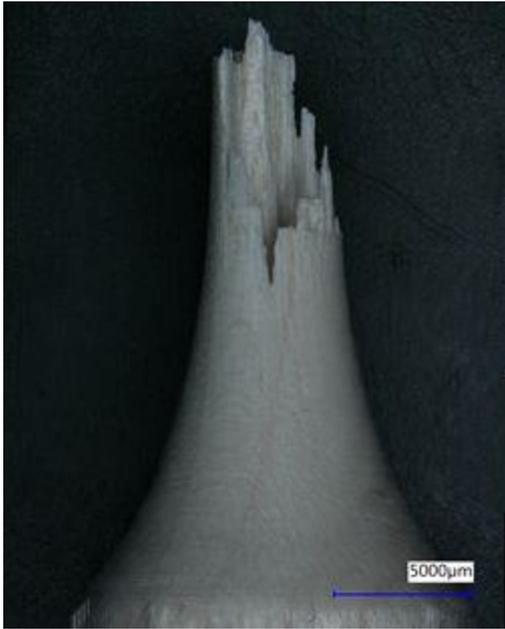


Abbildung 0.6 Probe A046; Zugspannungsbruch bei 130,86 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $3,21 \times 10^4$ Zyklen



Abbildung 0.5 Probe A030; Zugspannungsbruch bei 125,78 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei 2 Zyklen

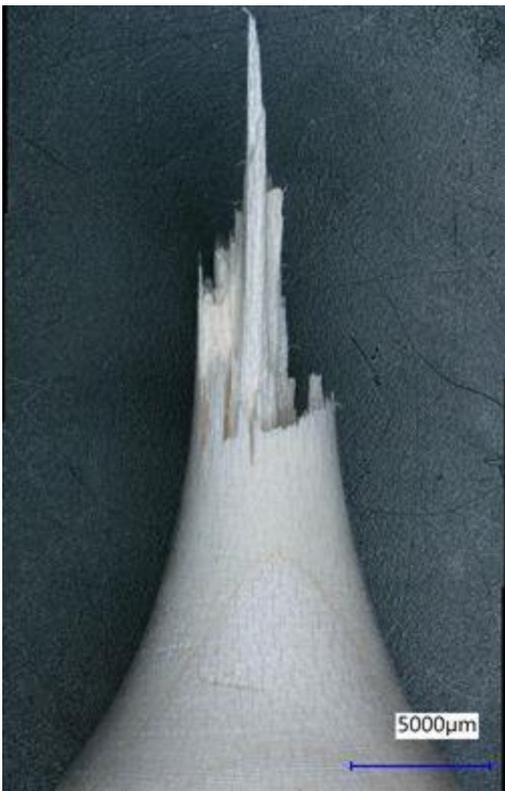


Abbildung 0.8 Probe A036; Zugspannungsbruch bei 121,15 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $4,30 \times 10^5$ Zyklen

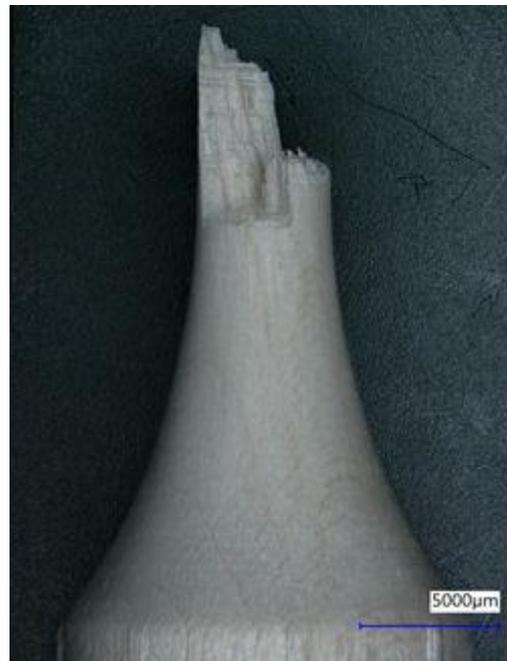


Abbildung 0.7 Probe A034; Zugspannungsbruch bei 114,00 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei 6 Zyklen



Abbildung 0.10 Probe A042; Zugspannungsbruch bei 123,54 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $1,05 \times 10^6$ Zyklen



Abbildung 0.9 Probe A037; Zugspannungsbruch bei 111,71 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $4,80 \times 10^3$ Zyklen

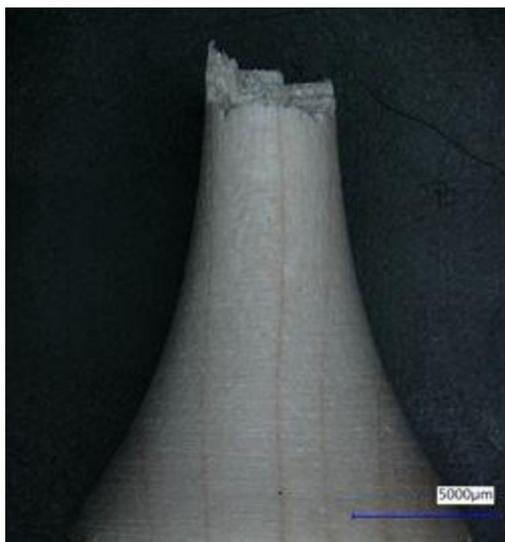


Abbildung 0.12 Probe A033; Zugspannungsbruch bei 102,23 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $1,31 \times 10^4$ Zyklen

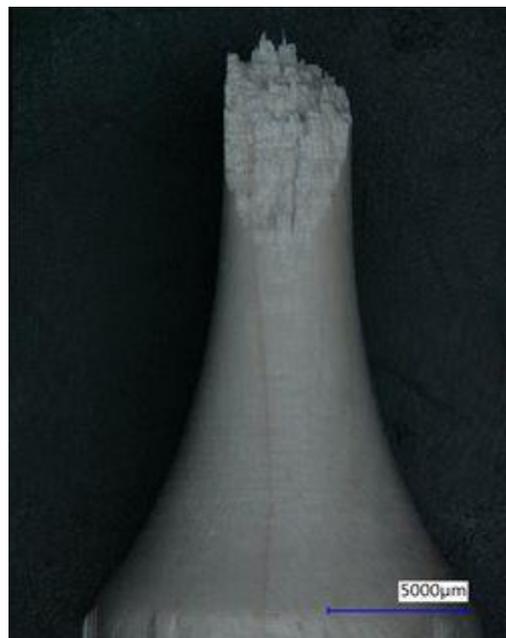


Abbildung 0.11 Probe A039; Zugspannungsbruch bei 103,30 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei 1 Zyklus

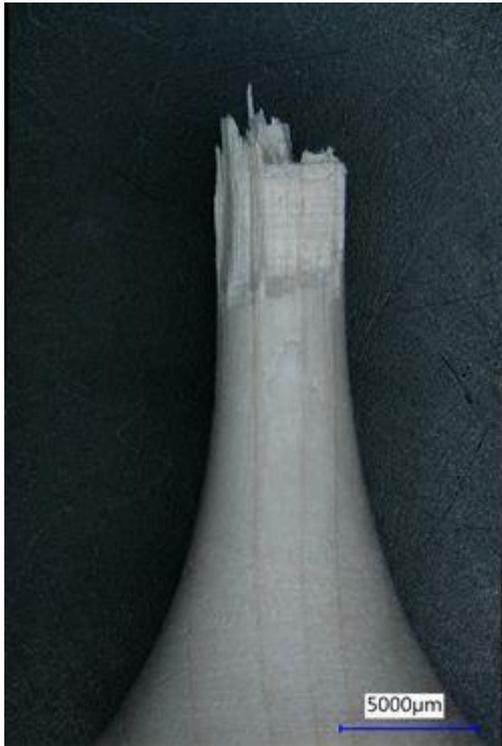


Abbildung 0.13 Probe A047; Zugspannungsbruch bei 114,98 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $4,27 \times 10^5$ Zyklen

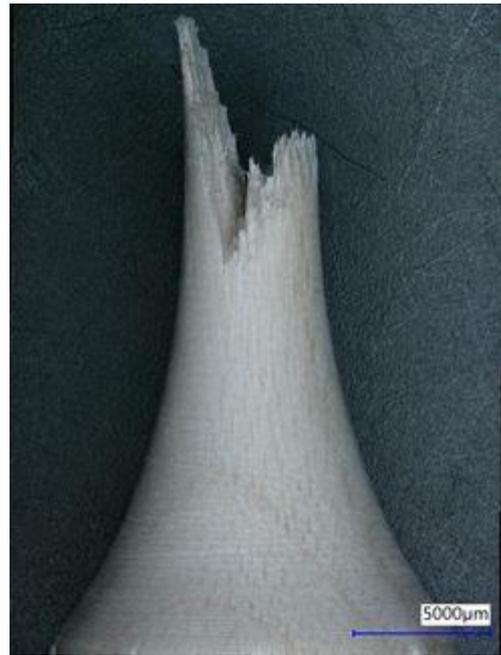


Abbildung 0.14 Probe A029; Zugspannungsbruch bei 102,39 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $3,5 \times 10^2$ Zyklen



Abbildung 0.15 Probe A026; Zugspannungsbruch bei 103,37 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $7,51 \times 10^4$ Zyklen



Abbildung 0.16 Probe A028; Zugspannungsbruch bei 93,63 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $7,87 \times 10^4$ Zyklen

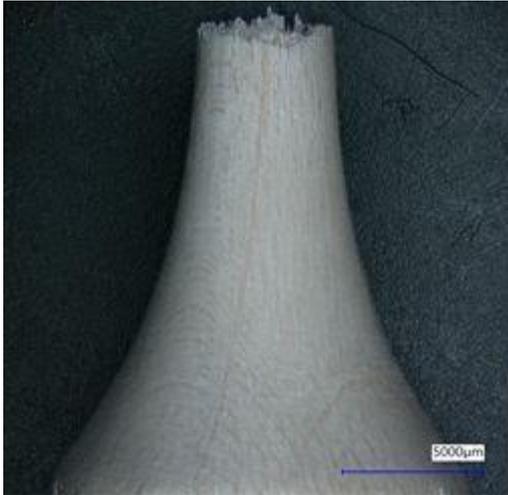


Abbildung 0.17 Probe A040; Zugspannungsbruch bei 91,89 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $3,98 \times 10^3$ Zyklen

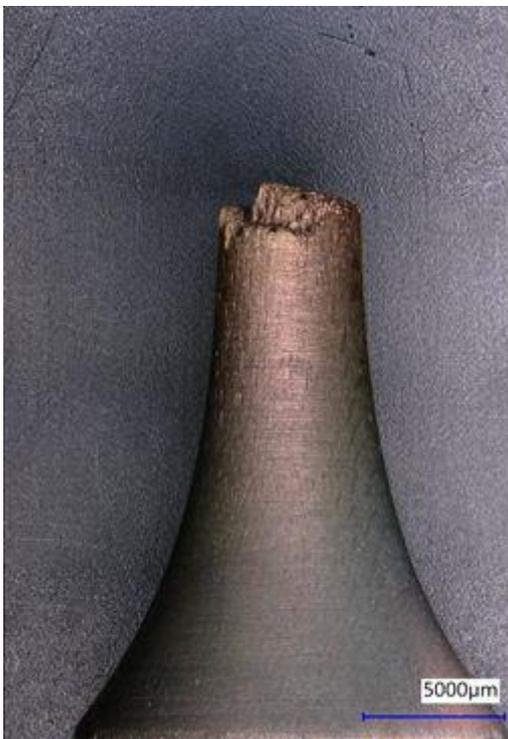


Abbildung 0.19 Probe A012; Zug-Druck-Spannungsbruch bei 95,36 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $4,35 \times 10^3$ Zyklen



Abbildung 0.18 A015; Zug-Druck-Spannungsbruch bei 92,25 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $1,46 \times 10^5$ Zyklen



Abbildung 0.21 A010; Zug-Druck-Spannungsbruch bei 86,85 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $1,29 \times 10^3$ Zyklen



Abbildung 0.20 A004; Zug-Druck-Spannungsbruch bei 80,70 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $1,38 \times 10^5$ Zyklen



Abbildung 0.23 A011; Zug-Druck-Spannungsbruch bei 72,81 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $2,54 \times 10^5$ Zyklen

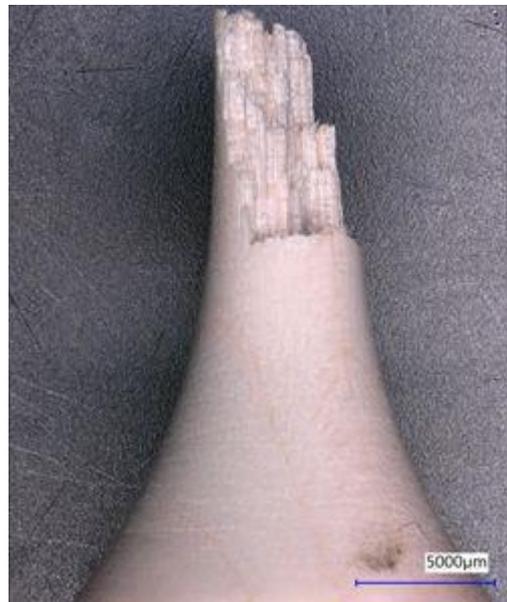


Abbildung 0.22 A009; Zug-Druck-Spannungsbruch bei 65,62 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $1,12 \times 10^6$ Zyklen



Abbildung 0.24 A067; Zug-Druck Spannungsbruch im Ultraschallbereich bei 96,57 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $3,55 \times 10^4$ Zyklen



Abbildung 0.25 A055; Zug-Druck-Spannungsbruch im Ultraschallbereich bei 93,38 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $8,87 \times 10^2$ Zyklen



Abbildung 0.27 A056; Zug-Druck Spannungsbruch im Ultraschallbereich bei $2,68 \times 10^6$ MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $2,68 \times 10^6$ Zyklen

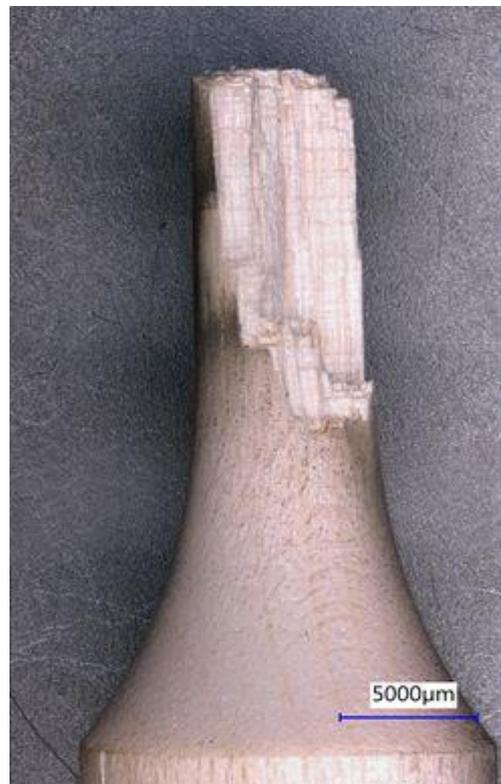


Abbildung 0.26 A065; Zug-Druck Spannungsbruch im Ultraschallbereich bei 50,37 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $1,49 \times 10^7$ Zyklen

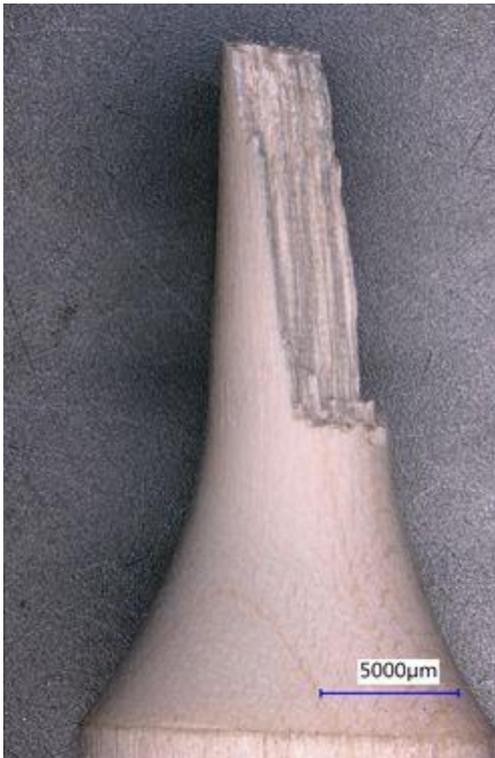


Abbildung 0.30 A063; Zug-Druck Spannungsbruch im Ultraschallbereich bei 58,46 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $6,52 \times 10^4$ Zyklen



Abbildung 0.31 A053; Zug-Druck Spannungsbruch im Ultraschallbereich bei 56,46 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $3,98 \times 10^8$ Zyklen

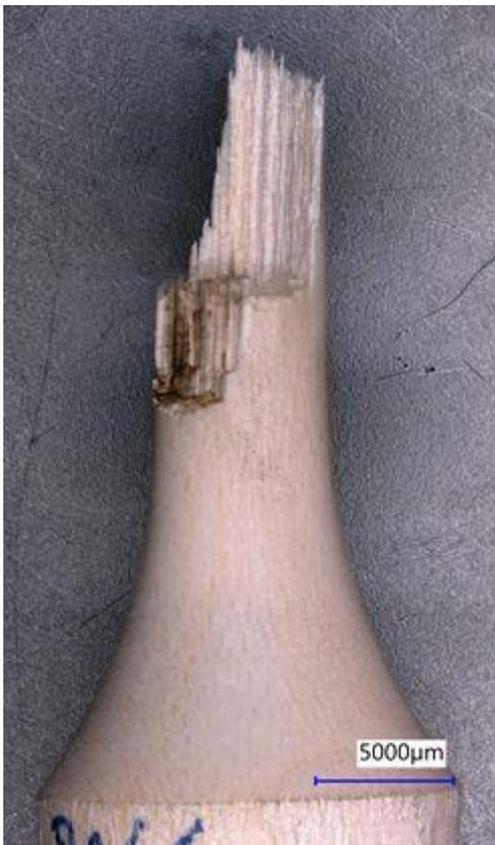


Abbildung 0.29 A066; Zug-Druck Spannungsbruch im Ultraschallbereich bei 61,19 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $5,77 \times 10^6$ Zyklen

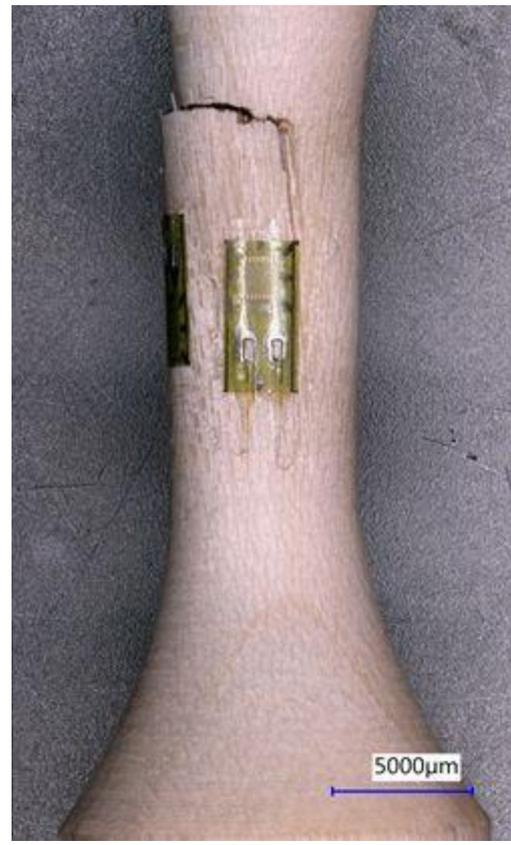


Abbildung 0.28 A052; Zug-Druck Spannungsbruch im Ultraschallbereich bei 54,55 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $5,22 \times 10^6$ Zyklen

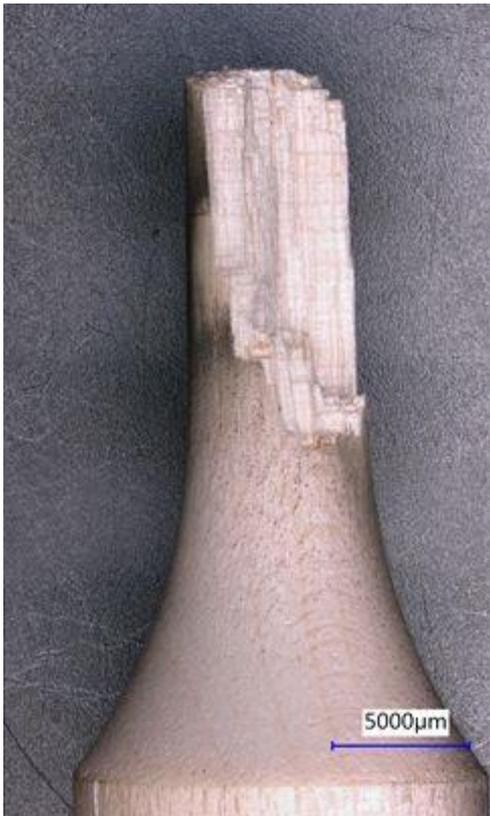


Abbildung 0.33 A065; Zug-Druck Spannungsbruch im Ultraschallbereich bei 50,37 MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $1,10 \times 10^9$ Zyklen



Abbildung 0.32 A054; Zug-Druck Spannungsbruch im Ultraschallbereich bei 41,90, MPa gewichtete Spannungsschwingbreite bei $1,92 \times 10^8$ Zyklen



Abbildung 0.34 Probe A056 – Übersichtsbild der Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Fadenkreuz

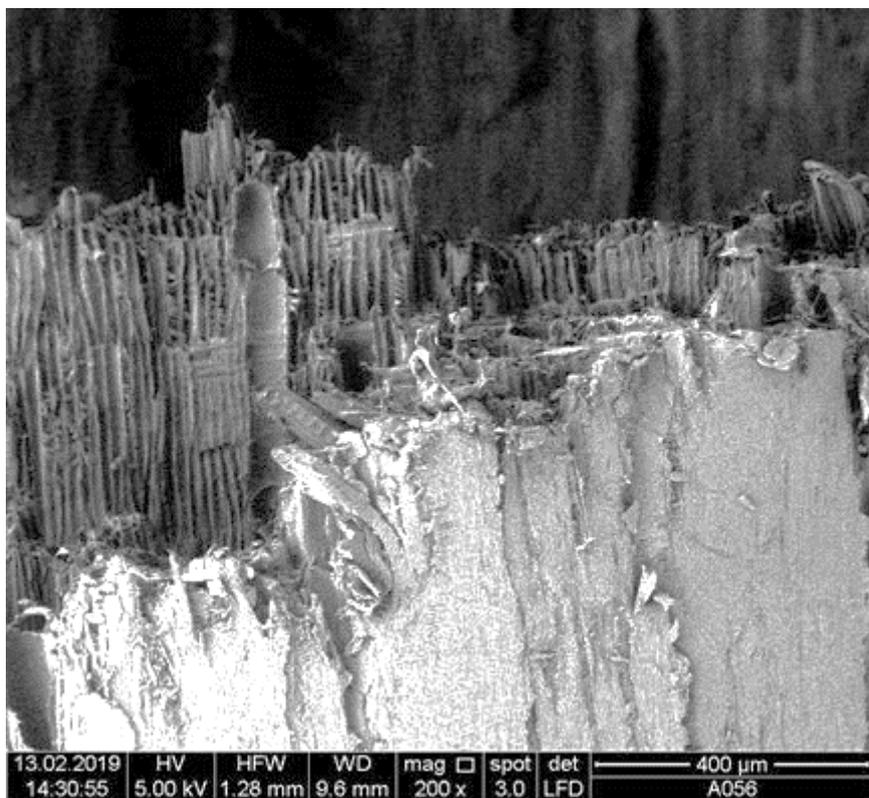


Abbildung 0.35 Probe A056 - Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Faden-kreuz

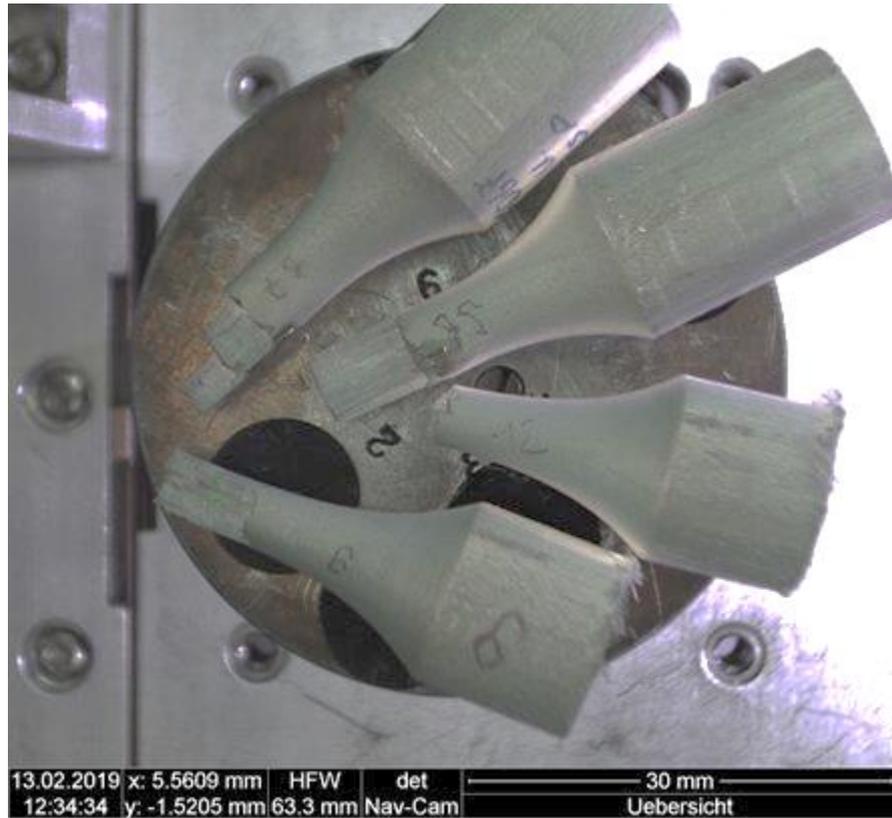


Abbildung 0.36 A009 – Übersichtsbild der Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Fadenkreuz

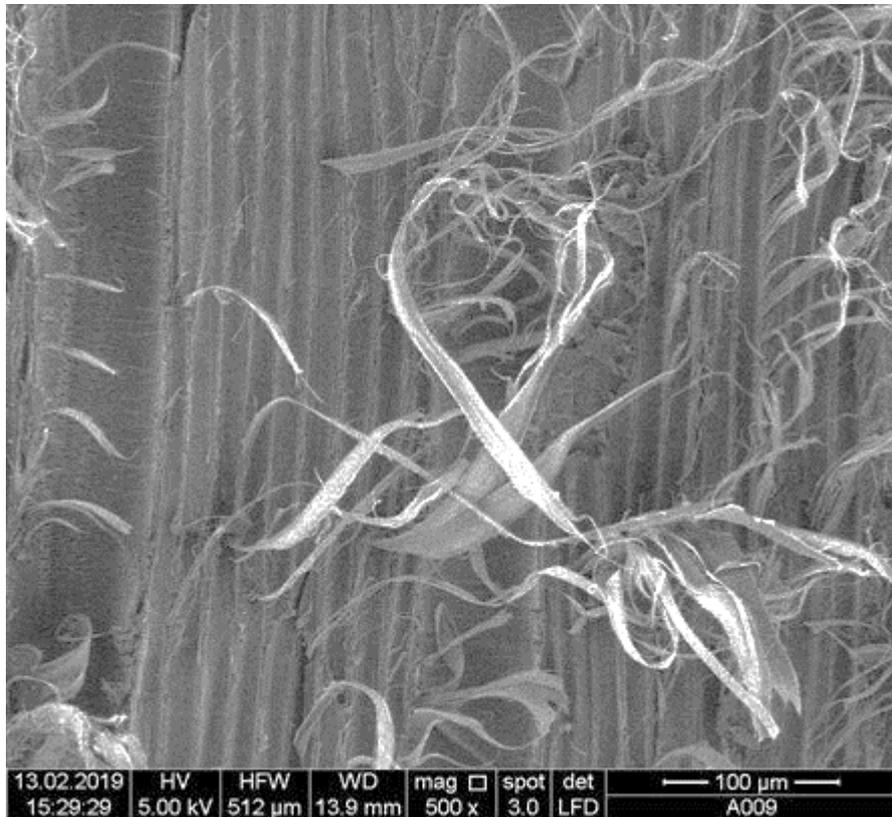


Abbildung 0.37 A009 - Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Faden-kreuz

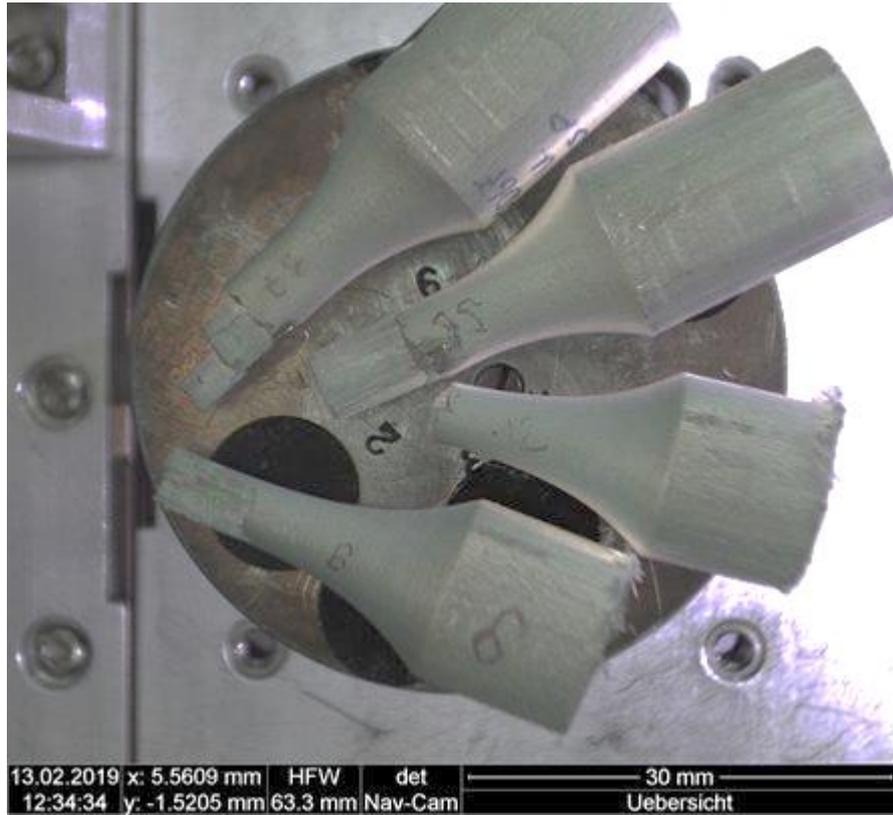


Abbildung 0.38 A009 – Übersichtsbild der Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Fadenkreuz

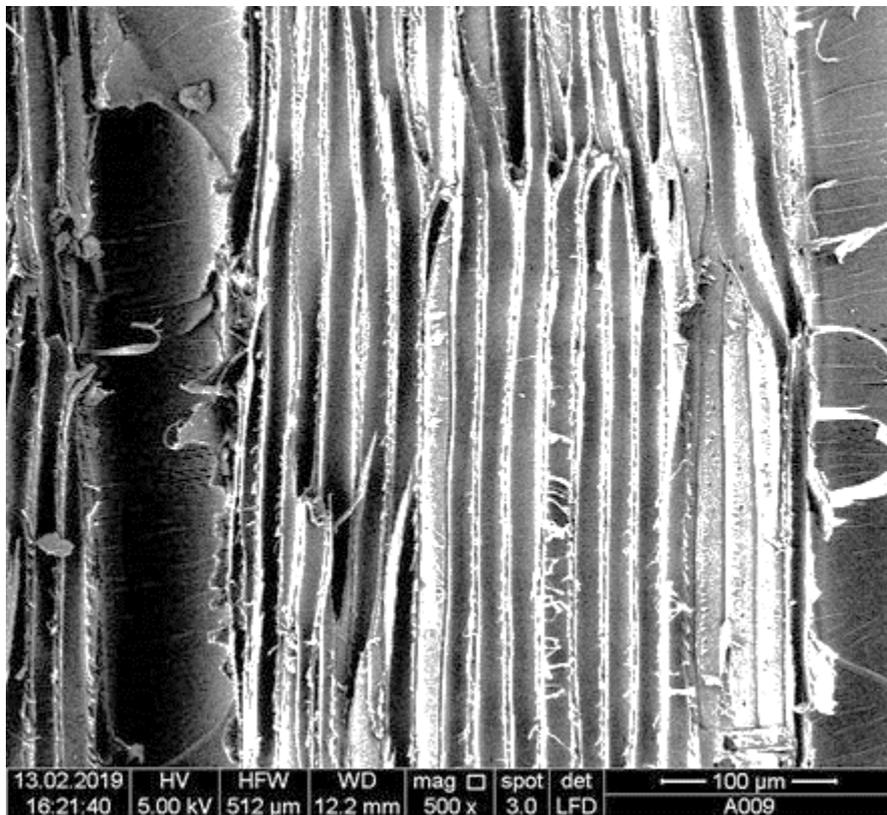


Abbildung 0.39 A009 - Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Faden-kreuz

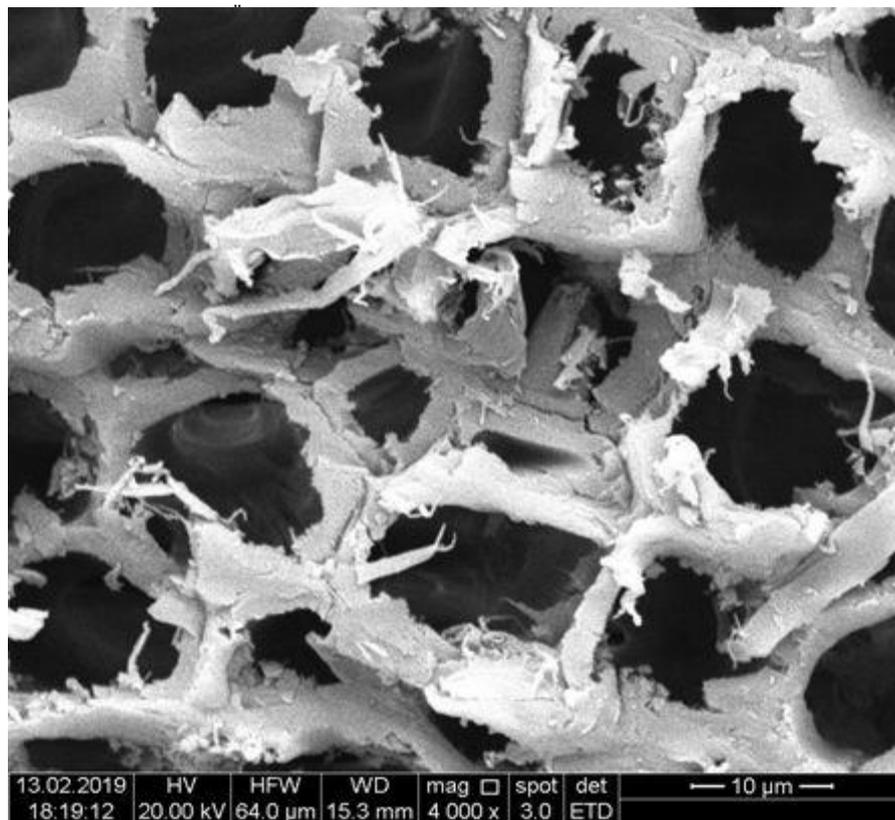
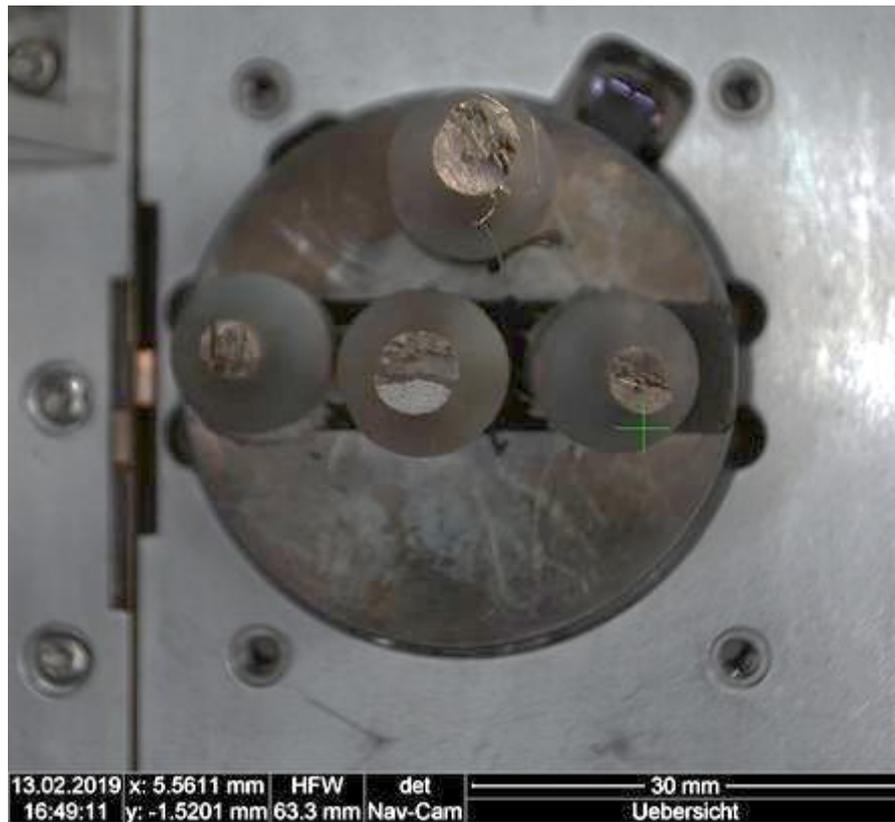


Abbildung 0.40 A009 - Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Faden-kreuz



Abbildung 0.42 A009 – Übersichtsbild der Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Fadenkreuz

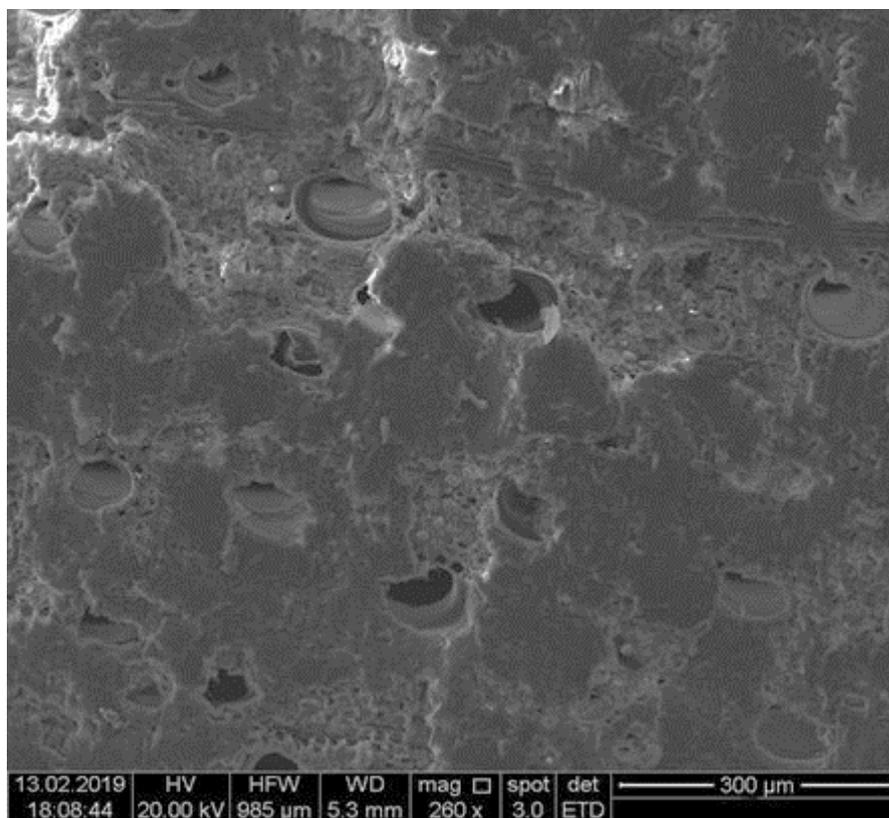


Abbildung 0.43 A009 - Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Faden-kreuz

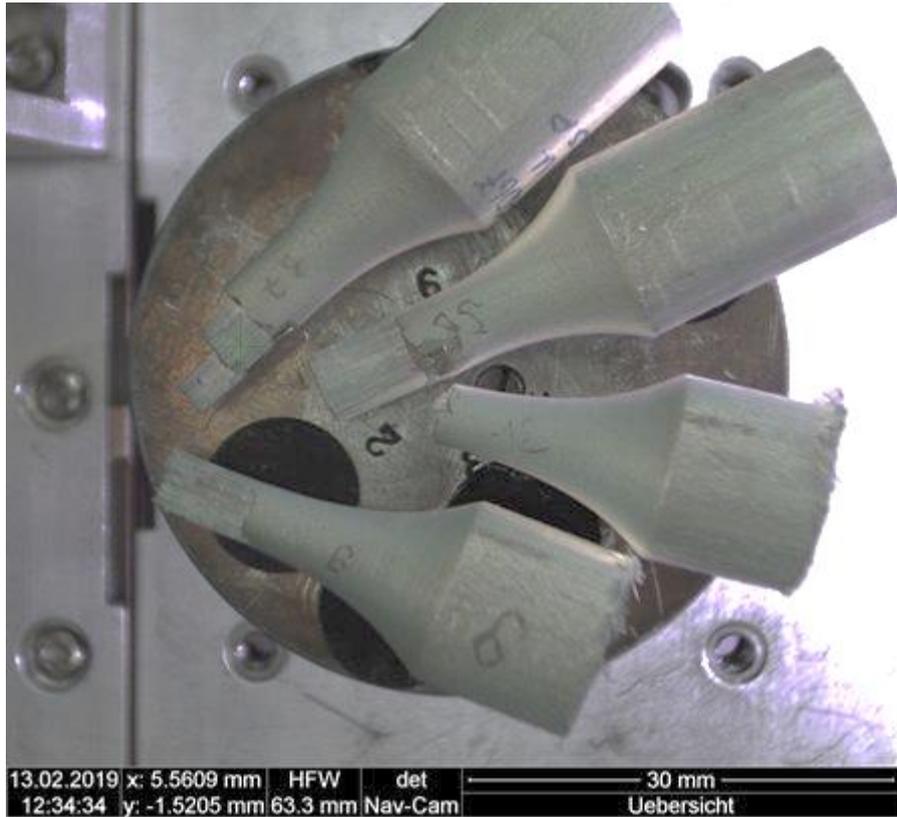


Abbildung 0.45 A067 – Übersichtsbild der Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Fadenkreuz

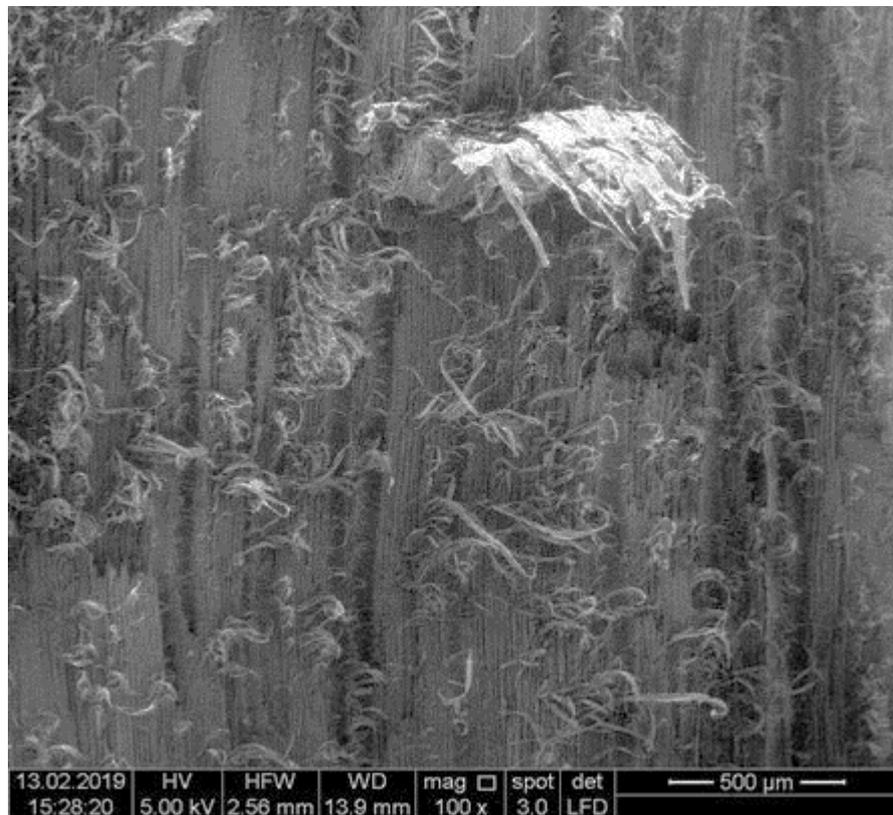


Abbildung 0.44 A067 - Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Faden-kreuz

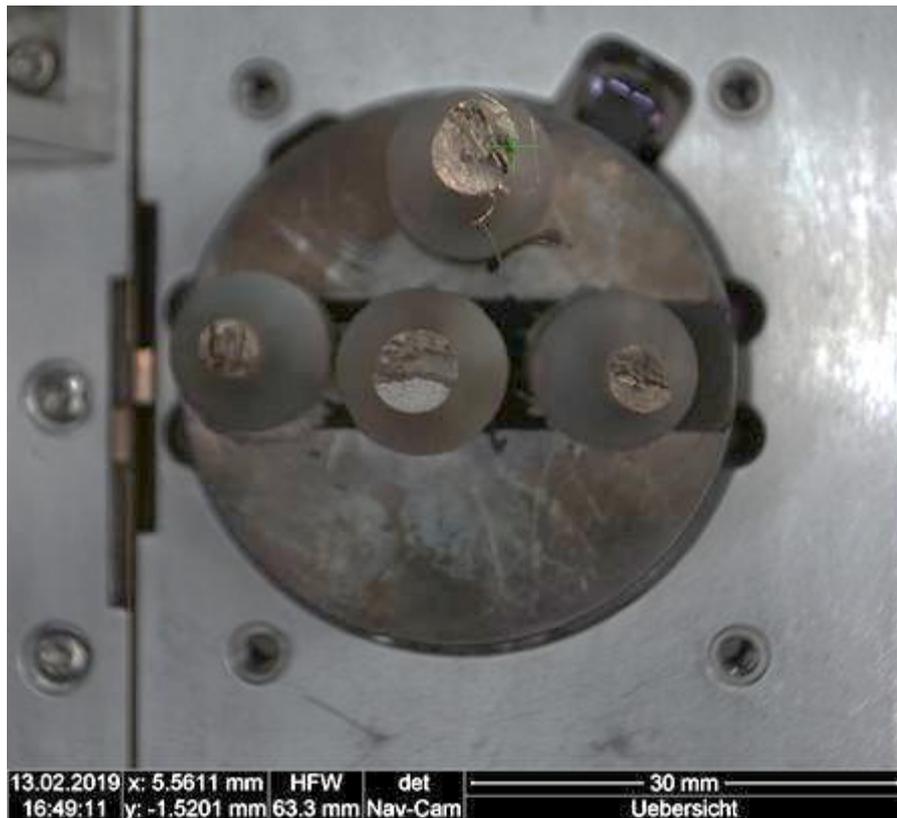


Abbildung 0.47 A067 – Übersichtsbild der Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Fadenkreuz

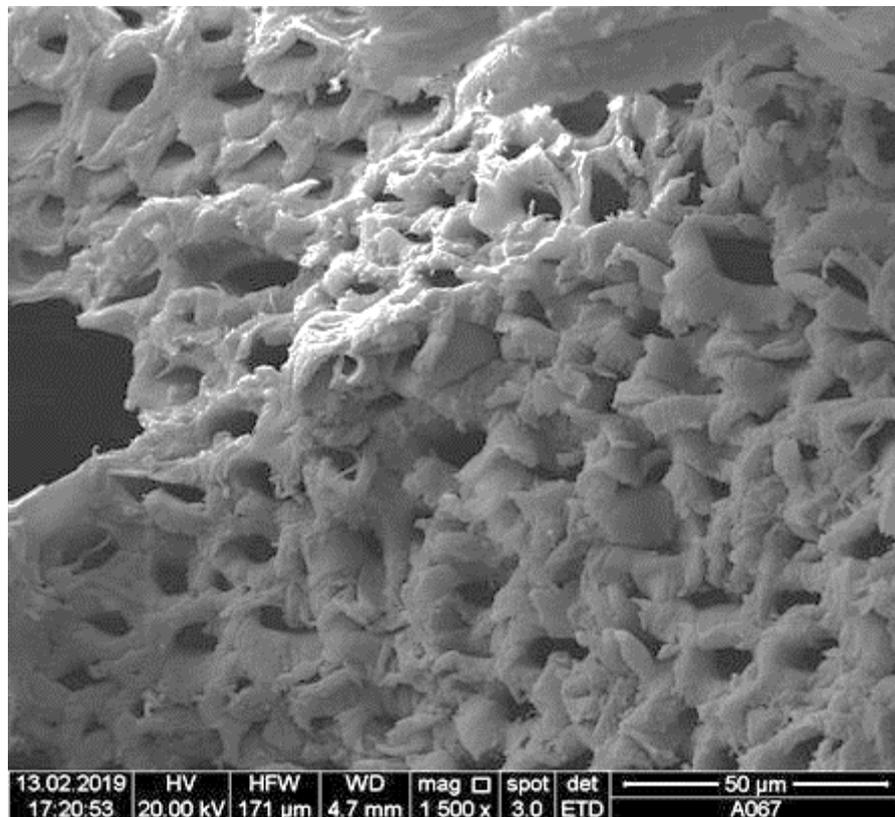


Abbildung 0.46 A067 - Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Faden-kreuz

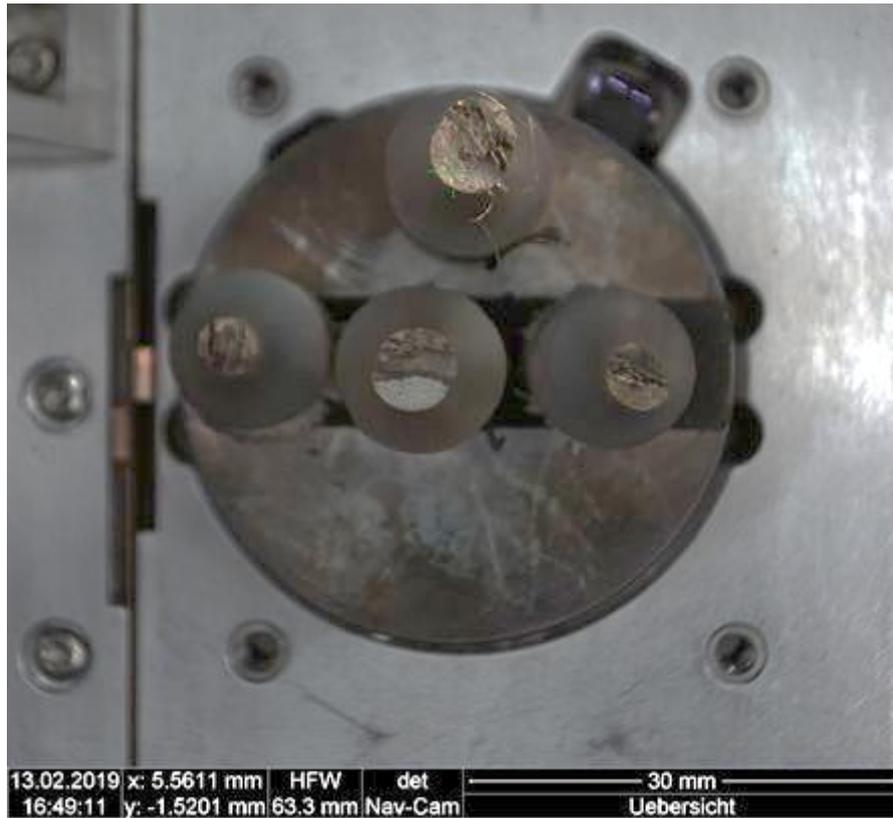


Abbildung 0.49 A067 – Übersichtsbild der Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Fadenkreuz

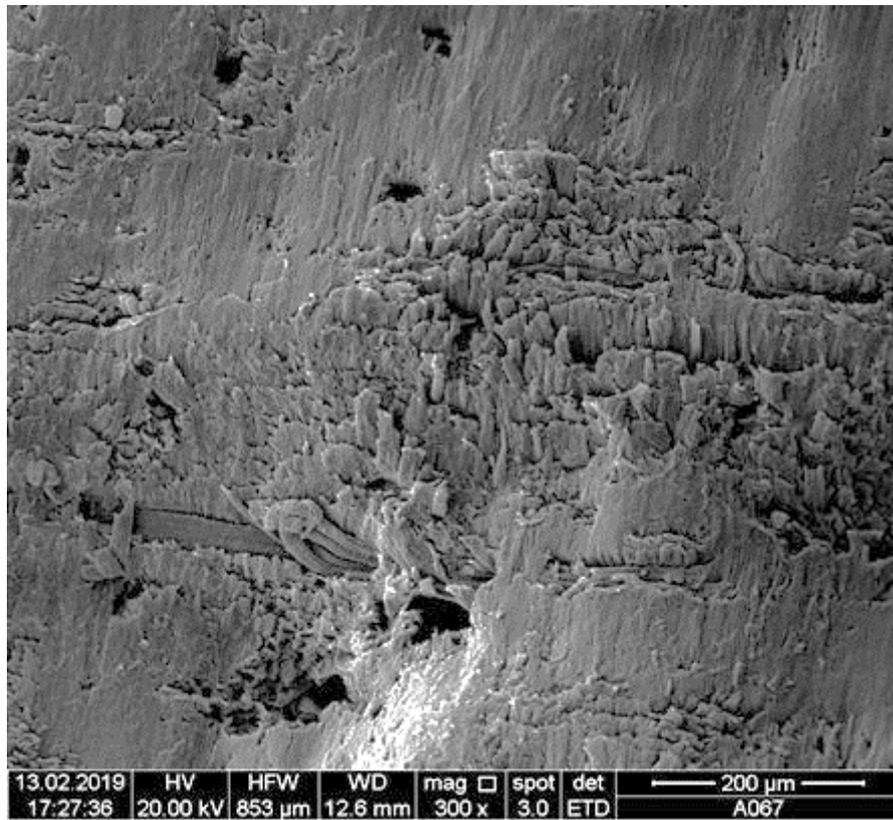


Abbildung 0.48 A067 - Bruchflächenaufnahme mit REM - Positionierung der Aufnahme nach Faden-kreuz