



Anel Imširović, BSc

# **Untersuchungen zur Zeitfestigkeit vorwiegend axial beanspruchter selbstbohrender Holzschrauben**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieur  
Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

Eingereicht an der  
**Technischen Universität Graz**

Betreuer  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer  
Institut für Holzbau und Holztechnologie  
Dipl.-Ing. Andreas Ringhofer  
Institut für Holzbau und Holztechnologie

Graz, November 2014



# EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

## AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

*I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.*

---

Datum / Date

---

Unterschrift / Signature





# Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei all denen bedanken, die mich während meines Studiums und beim Entstehen dieser Masterarbeit unterstützt haben.

Zuerst möchte ich Herrn Univ.-Prof. DI Dr. Gerhard Schickhofer einen Dank aussprechen, der mir die Erstellung dieser Arbeit ermöglichte. Beim DI Manfred Augustin möchte ich mich für die Bereitstellung eines Arbeitsplatzes an der holz.bau forschungs gmbh für die Durchführung dieser Masterarbeit und für seine Unterstützung bedanken.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer, DI Andreas Ringhofer, der mich hervorragend während meiner Arbeit betreut hat. Deine motivierenden Worte, sowie deine Ratschläge und kritische Begutachtung haben diese Arbeit sehr positiv beeinflusst.

Ich möchte mich an dieser Stelle auch bei Herrn Johann Rath für die Unterstützung und Hilfe bei der Durchführung der Ermüdungsversuche bedanken.

Der größte Dank geht an meine Eltern, meine Schwester und meine Freundin, die mich immer und in jeder Hinsicht unterstützt haben und meine schlechten Launen ertrugen. Danke, dass Ihr mir immer den Rücken gestärkt habt und an mich geglaubt habt.

Zuletzt möchte ich mich bei meinen Freunden und Studienkollegen für die wunderschöne Zeit bedanken.



# Kurzfassung

Der Untersuchungsgegenstand der wissenschaftlichen Arbeit sind moderne selbstbohrende Holzschrauben. Im Fokus der Arbeit steht die Erforschung der Ermüdungsfestigkeit dieser Schrauben bei axialer Beanspruchung, die mittels Wöhlerlinie dargestellt werden soll. Die Arbeit baut auf der Tatsache auf, dass Spannungsänderungen durch Verkehrs- oder Windlasten bei der axialen Beanspruchung dieser Schrauben, wie sie im Holzbrückenbau oder im vielgeschossigen Hochbau mit Brettsperholz verwendet werden, einer Feststellung auf Ermüdung bedürfen.

Durch einen statischen Zugversuch mittels einer Prüfmaschine Lignum\_uni\_275 im Lignum Test Center der Technischen Universität Graz, wurde die maximale Bruchkraft pro VM bei  $N = 1$  ermittelt. Basierend darauf werden am Hochfrequenzpulsator „RUMUL“ der TVFA der TU Graz die drei Belastungshorizonte, „Übergang Kurzzeit- zu Zeitfestigkeit“, im Zeitfestigkeitsbereich und „Übergang Zeitfestigkeit zu Dauerfestigkeit“, untersucht. Ziel ist es, eine typische Wöhlerlinie für dieses Produkt zu erhalten. Das dabei gewählte Spannungsverhältnis  $R$  beträgt 0,56.

Die Untersuchungen ergeben, dass die Festigkeit bei  $2 \cdot 10^6$  Lastwechseln 17% der statischen Kurzzeitfestigkeit beträgt, was mit jener, axial beanspruchter, metrischer Schrauben für den Stahlbau (Kerbfall 50) vergleichbar ist. Die Beschreibung der Wöhlerlinie erfolgt abschließend durch den Ansatz eines nichtlinearen goniometrischen Modells auf Basis der Prüfergebnisse.



# Abstract

The main focus of this master thesis is on investigations concerning the fatigue strength of axially loaded self-tapping screws frequently used in modern timber engineering. Examples of applications are timber bridges or tall wood buildings such as wind towers leading to stresses which vary in dependence of the time. Due to this circumstance and the fact that there is only poor knowledge given in this topic, the aim of this work is to experimentally determine and visualise this time dependent behaviour in form of so-called “Wöhler”-curves.

Basing on a static tensile test using the test rig Lignum\_uni\_275 at Lignum Test Center of Graz University of Technology, the maximum reachable force per screw at  $N = 1$  is determined. This information is further used for planning the fatigue tests at the high frequency pulsator “RUMUL” at the TVFA of Graz University of Technology. With the help of this machine, three stress horizons: (i) step between low cycle and high cycle fatigue, (ii) in the area of high cycle fatigue and (iii) step between high and ultra-high cycle fatigue are observed.

Finally, a “Wöhler”-curve is drawn for stress ratio  $R = 0.56$  using the approach of a nonlinear goniometric model basing on test results. In addition, the strength determined for  $2 * 10^6$  load-cycles results in roughly 17 % of static strength at  $N = 1$ , which is comparable with metric screws used in steel engineering (notch case 50).



# Inhaltsverzeichnis

<b>KAPITEL 1: EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
1-1 MOTIVATION.....	1
1-2 GLIEDERUNG DER ARBEIT .....	3
<b>KAPITEL 2: STAND DER TECHNIK</b> .....	<b>5</b>
2-1 DEFINITION ERMÜDUNG .....	5
2-1.1 Geschichte der Schwingfestigkeit .....	5
2-1.2 Materialermüdung .....	6
2-1.3 Bemessung.....	10
2-1.3.1 Bemessungskonzepte.....	10
2-1.3.2 Regelung nach EN 1993-1-9 [10] im Detail.....	11
2-1.3.3 Regelung nach EN 1995-2 [12] für Holzbauten.....	15
2-1.3.4 Fazit.....	17
2-2 ERMÜDUNGSVERHALTEN VON HOLZ UND HOLZWERKSTOFFEN MIT FOKUS AUF SCHUBBEANSPRUCHUNG.....	18
2-2.1 Schub- bzw. Scherschwellfestigkeit von Klebefugen .....	19
2-2.2 Schub- bzw. Scherwechselfestigkeit von Klebefugen.....	20
2-2.3 Schub- bzw. Scherschwellfestigkeit von Holz- und Holzwerkstoffen .....	20
2-2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse.....	22
2-3 ERMÜDUNGSVERHALTEN VON HOLZVERBINDUNGEN .....	25
2-3.1 Allgemein   Erkenntnisse von Kreuzinger und Mohr .....	25
2-3.2 Weiterführende Arbeiten .....	27
2-3.3 Schrauben .....	31
2-3.3.1 Tragverhalten von Schrauben.....	31
2-4 HOLZSCHRAUBEN .....	33
2-4.1 Geschichte der Holzschrauben .....	33
2-4.2 Produktion / mechanische Eigenschaften .....	34
2-4.3 Axial beanspruchte Schrauben .....	36
2-4.3.1 Versagensmechanismen axial beanspruchter Schrauben.....	38
2-4.4 Zulassungen für Schrauben .....	42
2-4.4.1 ETA-12/0063 [32], ETA-12/0062 [33], ETA-12/0373 [34].....	42
2-4.4.2 ETA-12/0114 [35] .....	42
2-4.4.3 ETA-12/0132 [36], ETA-11/0284 [37], ETA-11/0190 [38].....	42
2-4.4.4 ETA-11/0030 [39] .....	42
2-4.4.5 Z-9.1-731 [40], Z-9.1-519 [41], Z-9.1-614 [42].....	42
2-4.5 Argumentation.....	42

2-5	WESENTLICHE PARAMETER UND EINFLUSSGRÖßEN BEI ERMÜDUNGSPRÜFUNGEN .....	43
2-5.2	Schwingfestigkeit und deren Ermittlung.....	47
2-5.3	Verfahren zur Ermittlung der Dauerfestigkeit .....	50
2-5.4	Wöhlerversuch und Wöhlerkurve .....	51
2-6	ZUSAMMENFASSUNG DER LITERATURRECHERCHE.....	52
<b>KAPITEL 3: MATERIAL UND METHODEN.....</b>		<b>53</b>
3-1	ARBEITSHYPOTHESE.....	53
3-2	PRÜFPLANUNG .....	55
3-2.1	Vorgehensweise .....	55
3-3	PRÜFUNGEN .....	58
3-3.1	Zugfestigkeit der Schraube .....	58
3-3.2	Überprüfungen zur Ermüdungsfestigkeit.....	59
3-3.2.1	Übergang Kurzzeitfestigkeit - Zeitfestigkeit.....	59
3-3.2.2	Zeitfestigkeitsbereich .....	60
3-3.2.3	Dauerfestigkeit.....	60
3-3.2.4	Zusammenfassung des Prüfprogrammes .....	62
3-3.3	Materialien .....	63
3-3.3.1	Schrauben.....	63
3-3.4	Zubehör .....	64
3-3.4.1	Einspannung Schraubenkopf .....	64
3-3.4.2	Einspannung Schraubenfuß .....	65
<b>KAPITEL 4: PRÜFERGEBNISSE, MODELLBILDUNG UND DISKUSSION .....</b>		<b>67</b>
4-1	ZUGTRAGFÄHIGKEIT DER SCHRAUBEN .....	67
4-2	ERMÜDUNGSTRAGFÄHIGKEIT DER SCHRAUBEN .....	69
4-2.1	Bruchdokumentation.....	69
4-2.2	Ergebnisse .....	69
4-3	MODELLBILDUNG UND VERGLEICH.....	72
<b>KAPITEL 5: ZUSAMMENFASSUNG / AUSBLICK / RESÜMEE.....</b>		<b>79</b>
5-1	ZUSAMMENFASSUNG .....	79
5-2	AUSBLICK .....	79
<b>ANHANG A VERZEICHNISSE.....</b>		<b>I</b>
A-1	Literaturverzeichnis .....	I
A-2	Abbildungsverzeichnis.....	V
A-3	Tabellenverzeichnis .....	VII
<b>ANHANG B ERGEBNISSE.....</b>		<b>IX</b>
B-1	Prüfergebnisse.....	IX



# KAPITEL 1: EINLEITUNG

## 1-1 MOTIVATION

Ein globaler Trend hin zu Naturmaterialien-, erzeugnissen sowie Recycling ist vor allem in den vorangegangenen Jahren zu erkennen. Neue, innovative Materialien werden immer gefragter. Angesichts dieser Tatsache versucht unter anderem auch der Ingenieurbau neben den konventionellen Materialien wie Stahl und Beton, Materialien wie Holz mit einzubeziehen.

Vor diesem Hintergrund steht in der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit die Frage der Effizienz von Holzschrauben als hochleistungsfähiges Verbindungsmittel im Ingenieurholzbau im Vordergrund. Die Holzschraube ist eine der meist verwendeten mechanischen Verbindungsmittel im modernen Ingenieurholzbau, da sie wegen ihrer hohen Tragfähigkeit bei axialer Beanspruchung vielseitig eingesetzt werden kann. Neben dem Einsatz als Verbindungsmittel, kann die Holzschraube auch als Verstärkungselement eingesetzt werden. Ihr hohes Leistungspotential bei axialer Beanspruchung wird unter anderem für die Konzeption von Hochleistungsverbindungen im Holzbrückenbau sowie im vielgeschossigen Hochbau mit Brettsperrholz ausgenutzt. Beiden Anwendungen gemein ist das mögliche Vorliegen häufiger Spannungsänderungen durch Verkehrs- oder Windlasten, welche die Verbindungen auf Ermüdung beanspruchen und daher gegebenenfalls einer gesonderten Bemessung bedürfen.

Diese Anforderung kann für Anschlüsse mit selbstbohrenden Holzschrauben derzeit nur bedingt erfüllt werden, da diesbezüglich notwendige Kenntnisse nur unzureichend vorhanden sind. Nachfolgend werden einige Beispiele mit axial belasteten Schrauben gezeigt und beschrieben. In Abbildung 1-1 ist eine Zug – Laschenverbindung mit geneigt angeordneten selbstbohrenden Holzschrauben dargestellt.

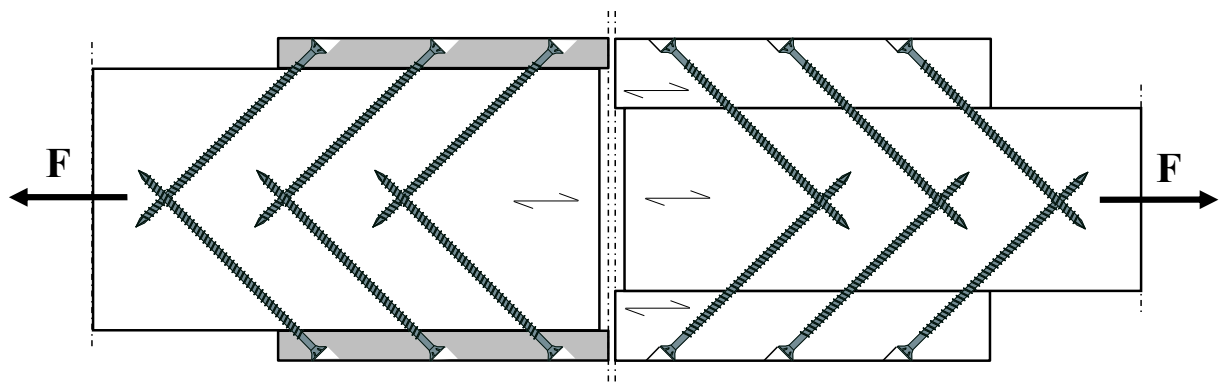
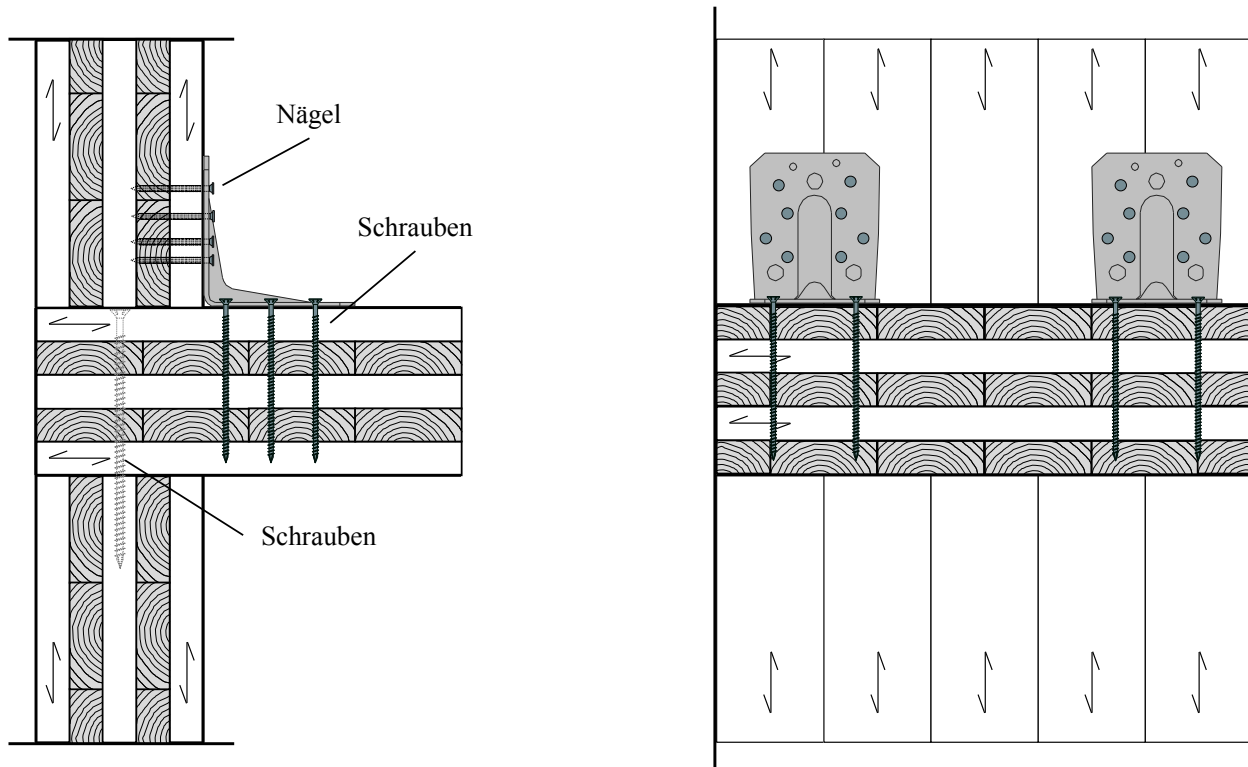


Abbildung 1-1: Zug-Laschenverbindung; links: Stahl-Holz-VB; rechts: Holz-Holz-VB, aus [1]

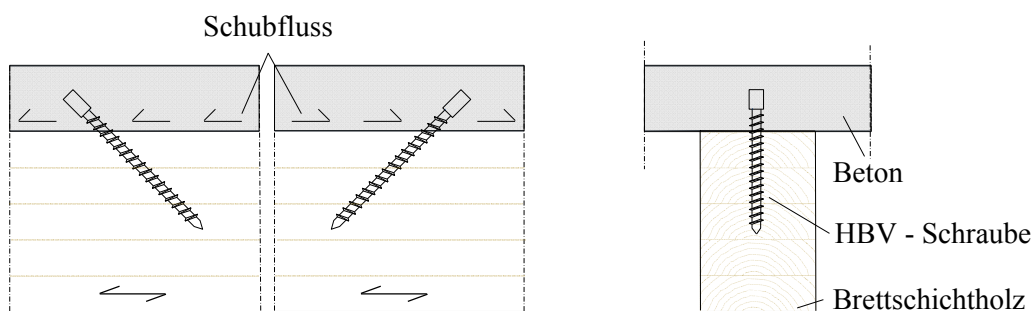
Durch die Schrägstellung werden die Schrauben hauptsächlich axial beansprucht. [1]

Abbildung 1-2 zeigt einen Wand – Decke – Anschluss aus Brettspertholz. Im Fall einer horizontalen Windbelastung erfahren die dargestellten Schrauben eine dynamische Axialbeanspruchung, insbesondere bei sehr großen Geschosshöhen (Hochhäuser | „Tall Wood“).



**Abbildung 1-2: Anschluss Decke – Wand aus Brettspertholz, aus [2]**

Die in Abbildung 1-3 gezeigte Holz – Beton – Verbindung ist derzeit nur für Wohnungsdecken nutzbar, da die Schrauben durch den eingezeichneten Schubfluss einer dynamischen Axialbeanspruchung ausgesetzt sind. Der Schubfluss entsteht bei einer vertikalen Belastung, da durch die HBV – Schrauben eine Verformung „versperrt“ wird.



**Abbildung 1-3: Holz-Beton-Verbindung**

Wie aus den gezeigten Beispielen hervorgeht, ist zu erkennen, dass es für Schrauben eine Vielzahl an möglichen Anwendungsgebieten gibt. Der momentane Wissensstand lässt ein Erschließen neuer Bereiche nicht zu. Wie und inwiefern Schrauben auch auf anderen Gebieten zum Einsatz kommen könnten, soll im

Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht werden. Unter diesem Aspekt widmet sich die vorliegende Arbeit auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche, Grundkenntnisse zur Zeitfestigkeit axial beanspruchter Schrauben bzw. vorwiegend axial beanspruchter Schraubverbindungen mittels experimenteller Untersuchungen zu schaffen. Dabei soll eine getrennte Betrachtung zwischen Schraube und Verbindungsdetail erfolgen.

---

## **1-2 GLIEDERUNG DER ARBEIT**

---

Diese Arbeit wird in folgende Kapitel gegliedert:

### **Kapitel 2 – Stand der Technik**

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Literaturrecherche und liefert die Grundlage für die im Zuge dieser Arbeit gemachten experimentellen Untersuchungen. Hierbei wird das Thema dieser wissenschaftlichen Arbeit vertieft. Des Weiteren werden die wesentlichen Parameter und Einflussgrößen bei der Durchführung von Ermüdungsversuchen genannt und beschrieben.

### **Kapitel 3 – Material und Methoden**

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise bei der Durchführung der Ermüdungsprüfungen erklärt. Des Weiteren werden die dazu benötigten Prüfmaschinen, sowie die verwendeten Schrauben und die Einspannelemente, die zur Durchführung der Versuche notwendig sind, vorgestellt und erklärt.

### **Kapitel 4 – Prüfergebnisse und Diskussion**

Dieses Kapitel befasst sich mit den Ergebnissen, die nach der Durchführung der Prüfungen vorliegen. Hierbei werden alle Ergebnisse zusammenfassend dargelegt und diskutiert.

### **Kapitel 5 – Zusammenfassung / Ausblick**

Abschließend werden in dieser Arbeit die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst. Darüber hinaus erfolgt ein Vorschlag für mögliche weitere Untersuchungen im Hinblick auf das Tragverhalten von Schraubenverbindungen unter zeitlich veränderlicher Belastung.



## KAPITEL 2: STAND DER TECHNIK

Wie in allen argumentativen Diskursen, ist es auch in wissenschaftlichen Arbeiten wichtig, zunächst einmal die wesentlichen Einflussparameter und Begriffe zu benennen und zu definieren. Des Weiteren muss ein Rahmen für eine fruchtbare und aussagekräftige Diskussion geschaffen werden. Aus diesem Grund widmen sich die anschließenden Abschnitte dem Basiswissen und bilden das Grundgerüst für die weiteren Untersuchungen.

### 2-1 DEFINITION ERMÜDUNG

In diesem Abschnitt wird zuerst auf die Geschichte der Schwingfestigkeit kurz eingegangen. In weiterer Folge wird das mechanische Verhalten bei Ermüdung mit dem Fokus auf Stahlversagen beschrieben und die Vorgehensweise bei einer Bemessung auf Ermüdung erklärt.

#### 2-1.1 GESCHICHTE DER SCHWINGFESTIGKEIT

[3], [4], [5]

Im Jahr 1856 kam es bei Eisenbahnwaggons zu einer Serie von Achsbrüchen. Um die Eisenbahnunglücke, die durch diese Achsbrüche auftraten, zu erklären, begann August Wöhler Dauerfestigkeitsversuche für Stahl durchzuführen. Er nahm eine größere Anzahl gleichwertiger Proben und hat diese unter konstantem Spannungsverhältnis  $R$  bis zum Bruch periodisch belastet. Dabei stellte er fest, dass sich ein Bruch des Materials auch durch oft wiederholte Schwingbeanspruchungen herbeiführen lässt, die unterhalb der Bruchgrenze liegen. Als man Flugzeuge mit Holz und Holzwerkstoffen zu bauen begann, trat dieses Problem auch im Holzbau auf. Man hat während des 2. Weltkriegs für die Rüstung auch Holz anstelle von Stahl verwendet, da Stahl eingespart wurde. In dieser Zeit entwarf man Straßenbrücken, Eisenbahnbrücken und Kranbahnträger. Diese wurden dann auf ihre Dauerfestigkeit geprüft und gebaut. Als man herausfand, dass Holz günstige Eigenschaften für den Einsatz als Rotor von Windkraftanlagen besitzt, gab es einen neuen Aufschwung für die Untersuchung des Holzes auf seine Ermüdungsfestigkeit. Die Begutachtung der Vergangenheit zeigt auf, dass Ermüdungsbrüche auftretend bei Maschinen, Anlagen und Fahrzeugen, zu einem wissenschaftlichen Fortschritt auf dem Gebiet geführt haben. Die Bereiche Luftfahrt und relevante Anlagen sowie Maschinen, die zur Zeit von Kriegen Anwendung fanden, waren ausschlaggebend für das Vorantreiben von Forschungsarbeiten in Hinblick auf Ermüdung. Zu diesem Zeitpunkt kann gesagt werden, dass beispielsweise die Automobilindustrie Nutzen aus den Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Ermüdungsfestigkeit gezogen hat, wobei eine exakte Lebensdauervorhersage nach wie vor nicht gemacht werden kann. Das Vergleichen von

Versuchsergebnissen und den tatsächlichen, im realen Leben vorkommenden, Ermüdungserscheinungen ist schwierig, da beispielweise auch Korrosion sowie Witterungseinflüsse eine Rolle spielen könnten.

## 2-1.2 MATERIALERMÜDUNG

Um die Versuchsreihe des empirischen Teils der Arbeit kontextuell einzubetten und bereits im theoretischen Teil vorkommende Phänomene zu erklären, ist es notwendig, auf die Materialermüdung einzugehen. Dabei wird diskutiert, was diese genau ist und wie es dazu kommt.

[6]

Ein Werkstoff kann bei zyklischer Beanspruchung bzw. häufigen Lastwechseln deutlich geringere Lasten als bei einmaliger statischer Beanspruchung ertragen. Wie schon im Kapitel 2-1.1 erwähnt, konnte August Wöhler dieses Phänomen an Achsen von Eisenbahnwaggons im Jahr 1860 beobachten.

In Abbildung 2-1 ist eine mögliche zyklische Beanspruchung in einem Spannungs-Zeit-Diagramm schematisch dargestellt. Dabei bezeichnen  $\sigma_o$  die Oberspannung,  $\sigma_u$  die Unterspannung,  $\sigma_m$  die Mittelspannung,  $\sigma_a$  die Spannungsamplitude oder den Spannungsausschlag und  $2 * \sigma_a$  den Spitzenwert oder die Spannungsschwingbreite. Die Zykluslänge beschreibt die Dauer eines Lastspiels. [7]

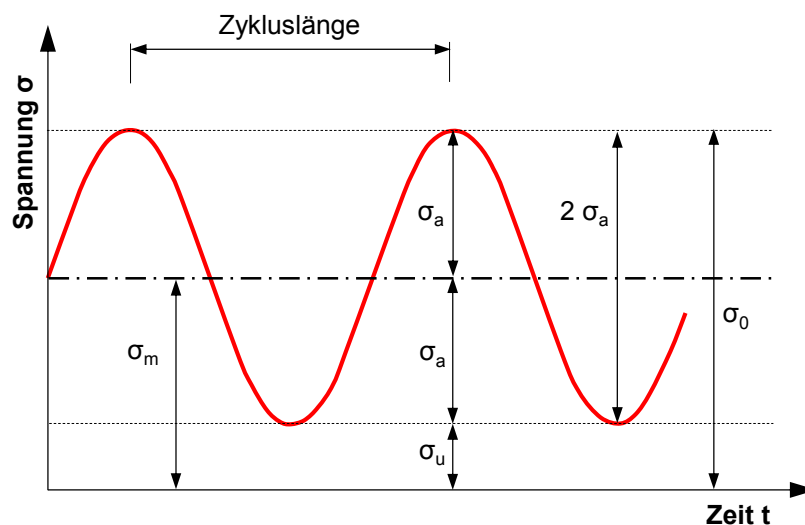


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung einer möglichen zyklischen Beanspruchung, aus [7]

Ein Versagen durch zyklische Beanspruchung findet in mehreren Phasen statt. Im Folgenden wird auf die einzelnen Phasen näher eingegangen.

## Bildung eines Anrisses

[6], [8], [9]

Ein Ermüdungsbruch findet meist bei einer besonders beanspruchten Stelle in einem Bauteil statt. Unter besonders beanspruchten Stellen versteht man Bereiche mit Spannungskonzentrationen, die z.B. durch Kerben hervorgerufen werden. Wie aus Abbildung 2-2 hervorgeht, unterscheidet man bei den Kerben zwischen Formkerben, im Werkstoff bereits vorliegenden Kerben und Belastungskernen.

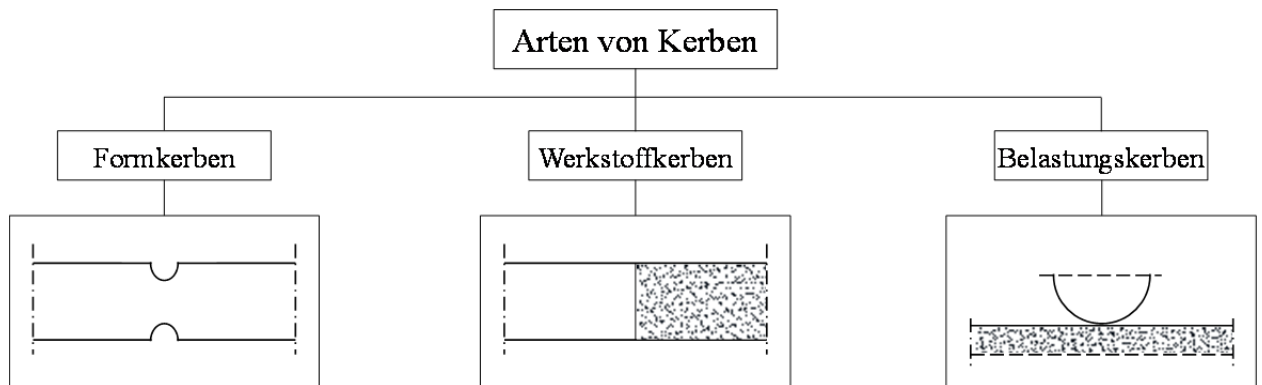


Abbildung 2-2: Arten von Kerben, aus [8]

D. Radaj und M. Vormwald [8] geben in ihrer Arbeit an, dass „[...] die Formkerben durch eine starke Oberflächenkrümmung bei hinreichend großem Oberflächenversatz gekennzeichnet sind.“ D. Radaj und M. Vormwald [8] geben auch an, dass „[...] zwischen milden und scharfen, flachen und tiefen sowie äußeren und inneren Kerben unterschieden wird.“ Des Weiteren geben D. Radaj und M. Vormwald [8] an, dass „[...] die durch den gegen null gehenden Kerbradius gekennzeichneten Risse, Schlitze und einspringenden Ecken, als Grenzfälle von Formkerben bezeichnet werden.“ Die konstruktiv bedingten Formkerben werden wiederum in planmäßige, wie z.B. Blechdickensprünge oder Schweißnähte und unplanmäßige Kerben, wie z.B. Herstellungsfehler (Brennriefen, Schweißspritzer), unterteilt. Unter den im Werkstoff bereits vorliegenden Kerben versteht man Schlackeneinschlüsse, spröde Ausscheidungen sowie Seigerungen. D. Radaj und M. Vormwald [8] geben für Werkstoffkerben an, dass es sich hierbei um „[...] abgegrenzte Bereiche erniedrigter oder erhöhter Steifigkeit, Elastizität oder Fließgrenze, in einem ansonsten homogenen Werkstoff, handelt.“ Als Belastungskernen werden laut D. Radaj und M. Vormwald [8] jene „[...] Bereiche verstanden, die örtlich konzentrierter Krafteinleitung oder Hertzscher Pressung ausgesetzt sind.

Das Material erfährt bei jedem Lastzyklus eine kleine Teilschädigung. Die Ursache dieser kleinen Teilschädigung im Material sind kleine plastische Verformungen, die bei jedem Lastzyklus auftreten. Selbst wenn die Beanspruchung unter der Fließgrenze des Werkstoffs liegt, kann es zu solchen Schädigungen kommen. Das erklärt auch, warum ein Werkstoff unter zyklischer Beanspruchung, die weit unter der Fließgrenze liegt, versagen kann. Da die Schädigungen in den Bereichen von Kerben meist am größten sind, entsteht im Kerbgrund (Risspitze) ein submikroskopischer Anriss. [6]

In Abbildung 2-3 ist der Spannungsverlauf bei einer Halbkreis- Formkerbe dargestellt, wobei  $\sigma_{\max}$  die maximale Kerbspannung und  $\sigma_{\text{Nenn}}$  die Nennspannung ist.

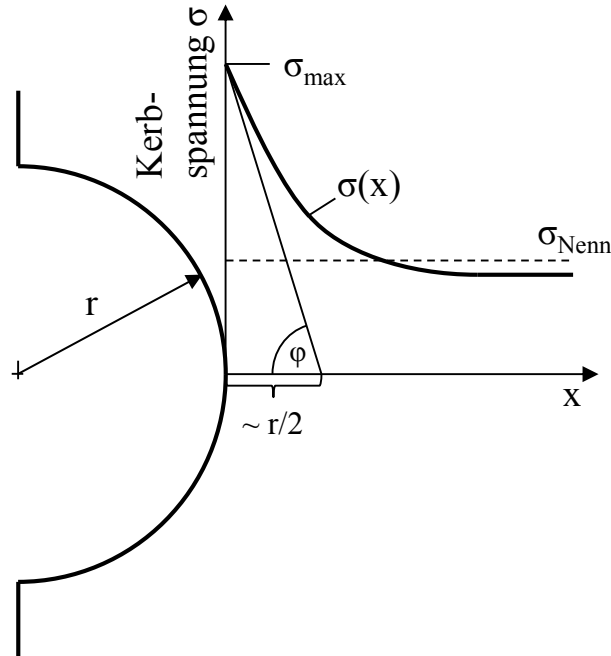


Abbildung 2-3: Spannungsverlauf bei einer Formkerbe, aus [9]

Mit Hilfe der gezeigten Abbildung 2-3 können laut E. Haibach [9] die Formzahl  $\alpha$  und das bezogene Spannungsgefälle  $\chi$  mit folgenden Formeln ermittelt werden.

$$\alpha = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{Nenn}}} \quad (2.1)$$

$$\chi' = \frac{d\sigma}{dx} = \tan(\varphi) \approx \sigma * \frac{2}{r} \rightarrow \chi = \frac{1}{\sigma} * \frac{d\sigma}{dx} \quad (2.2)$$

### Rissfortschritt

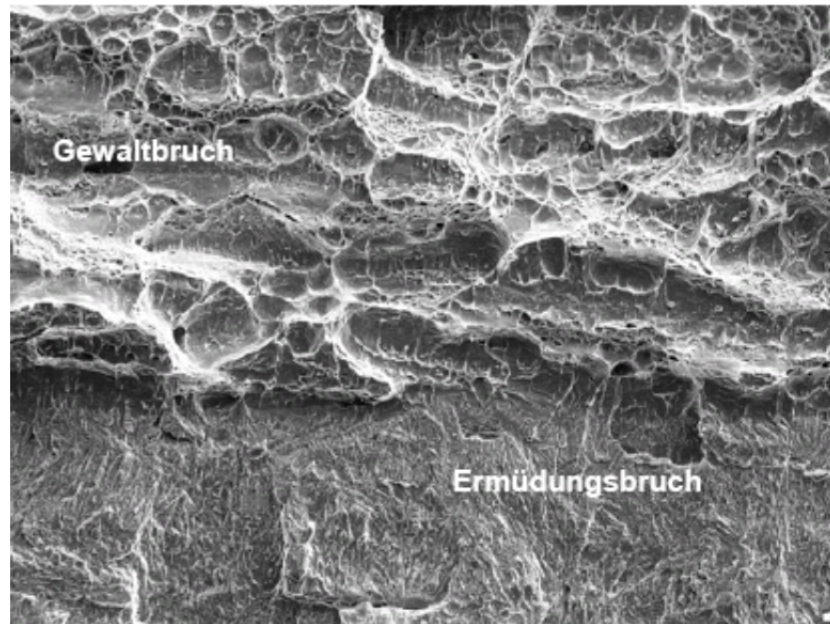
Die Rissspitze wird bei jedem weiteren Lastzyklus überbeansprucht. Jeder Lastzyklus führt zu einer weiteren plastischen Verformung des Materials. Diese plastische Verformung führt zwar nicht immer zu einer Vergrößerung des Risses, es entsteht aber immer eine weitere Schädigung des Materials. Man kann auch sagen, dass das Material bei jedem Lastzyklus eine Teilschädigung aufweist. Betrachtet man die Rissfläche, erkennt man ein feines samtartiges Bruchgefüge. [6]

### Sprödbbruch

Ein plötzliches Versagen ohne Vorankündigung (Gewaltbruch oder Sprödbbruch) tritt dann ein, wenn der durch den Riss verbleibende Restquerschnitt zu klein ist. Wie auch in Abbildung 2-4 zu erkennen ist, unterscheidet sich das Erscheinungsbild des Gewaltbruches vom Erscheinungsbild des



Ermüdungsbruches. Betrachtet man die Oberfläche des Gewalt- oder Sprödbruches, erkennt man, dass sie makroskopisch zerklüftet ist. [6]



**Abbildung 2-4: Erscheinungsbild Gewaltbruch vs. Ermüdungsbruch, aus [6]**

Wegen der Spannungskonzentration an der Rissspitze findet die plastische Verformung lokalisiert statt. Deshalb wäre auch dann keine plastische Verformung am Erscheinungsbild erkennbar, wenn das Material im Gewalt- oder Sprödbruch duktil versagen würde. [6]

## 2-1.3 BEMESSUNG

[10]

### 2-1.3.1 Bemessungskonzepte

Bauteile, die einer dynamischen Beanspruchung ausgesetzt sind, müssen so ausgebildet werden, dass sie mit ausreichender Wahrscheinlichkeit über die gesamte Nutzungsdauer nicht versagen. Deshalb wird in diesem Abschnitt auf die Führung eines Ermüdungsnachweises eingegangen.

Der Ermüdungsnachweis kann z.B. für Stahlbauten laut EN 1993-1-9 [10] auf zwei Arten geführt werden. Entweder nach dem

- Konzept der Schadenstoleranz, oder nach dem
- Konzept der ausreichenden Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung.

Aus der EN 1993-1-9 [10] geht hervor, dass „[...] Ermüdungsschäden durch planmäßige Inspektion und Wartung während der Nutzungsdauer des Tragwerks erkannt und beseitigt werden können.“ Dies kann mit dem Konzept der Schadenstoleranz erreicht werden. Man muss jedoch anmerken, dass das Konzept der Schadenstoleranz nur dann angewendet werden darf, wenn bei auftretenden Rissen infolge Ermüdung entweder die Lasten zwischen Bauteilen oder im tragenden Querschnitt umgelagert werden können. Mit dem Konzept der ausreichenden Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung kann laut EN 1993-1-9 [10] „[...] auch ohne planmäßige Inspektionen, für die Erkennung von auftretenden Schäden, eine ausreichende Sicherheit über die gesamte Nutzungsdauer gewährt werden.“ Die Anwendung dieses Konzeptes sollte dann erfolgen, wenn ein lokales Auftreten von Ermüdungsrissen in einer Bauteilkomponente zu einem unangekündigten Bauteilversagen oder zu einem Versagen des gesamten Tragwerks führen kann. Eine bestimmte Zuverlässigkeit kann durch die Wahl des Teilsicherheitsfaktors  $\gamma_{Mf}$  gewährleistet werden. Dieser ist von dem gewählten Konzept und von den Schadensfolgen abhängig. Das konstruktive Detail bestimmt mit seinen metallurgischen und geometrischen Kerbeffekten die Ermüdungsfestigkeit. In der EN 1993-1-9 [10] ist auch die wahrscheinliche Stelle der Rissbildung der jeweiligen Details angegeben. Die Ermüdungsfestigkeitswerte werden in Form von Wöhlerlinien für Standardkerbfälle (Nennspannungen) und für Kerbfälle bei bestimmten Schweißdetails (Strukturspannungen) angegeben. Eine Zuverlässigkeit kann beim Konzept der Schadenstoleranz wie folgt erreicht werden:

- Das konstruktive Detail, der Werkstoff und das Beanspruchungsniveau müssen so gewählt werden, dass im Fall von auftretenden Ermüdungsrissen ein langsames Risswachstum und große kritische Risslängen erreicht werden können.
- Umlagerungsmöglichkeiten der Lasten;
- Es müssen Konstruktionen gewählt werden, die Rissbildungen hemmen können.

- Für regelmäßige Inspektionen muss eine leichte Zugänglichkeit vorhanden sein.

Beim Konzept der ausreichenden Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung kann eine ausreichende Zuverlässigkeit erreicht werden, indem die Konstruktion und das Beanspruchungsniveau so gewählt werden, dass am Ende der rechnerischen Nutzungsdauer mindestens so hohe Zuverlässigkeitswerte, wie bei Tragsicherheitsnachweisen, gefordert werden können.

### 2-1.3.2 Regelung nach EN 1993-1-9 [10] im Detail

[10], [11]

In den letzten Jahren ist der Stand des Wissens auf dem Gebiet Werkstoffermüdung deutlich angestiegen. Die neuen Regelungen zielen im Stahlbau darauf ab, nicht nur für den Bau von Kranbahnen und Eisenbahnbrücken, sondern für alle Anwendungsbereiche ein grundlegendes Nachweiskonzept zu erstellen. Laut den neuen Regelungen in der EN 1993-1-9 [10] werden die Ermüdungsfestigkeiten für Nennspannungen durch eine Reihe von doppellogarithmischen Kurven bestimmt. Dabei ist jede Kurve einer bestimmten Kerbfallkategorie zugeordnet. Durch den doppellogarithmischen Maßstab ergeben sich die Wöhlerlinien als Gerade mit der Neigung  $m$ . Für die Ermittlung von  $\Delta\sigma_R(N_R)$  werden folgende Formeln angegeben:

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_C^m * 2 * 10^6 \quad \text{mit } m = 3 \text{ für } N \leq 5 * 10^6 \quad (2.3)$$

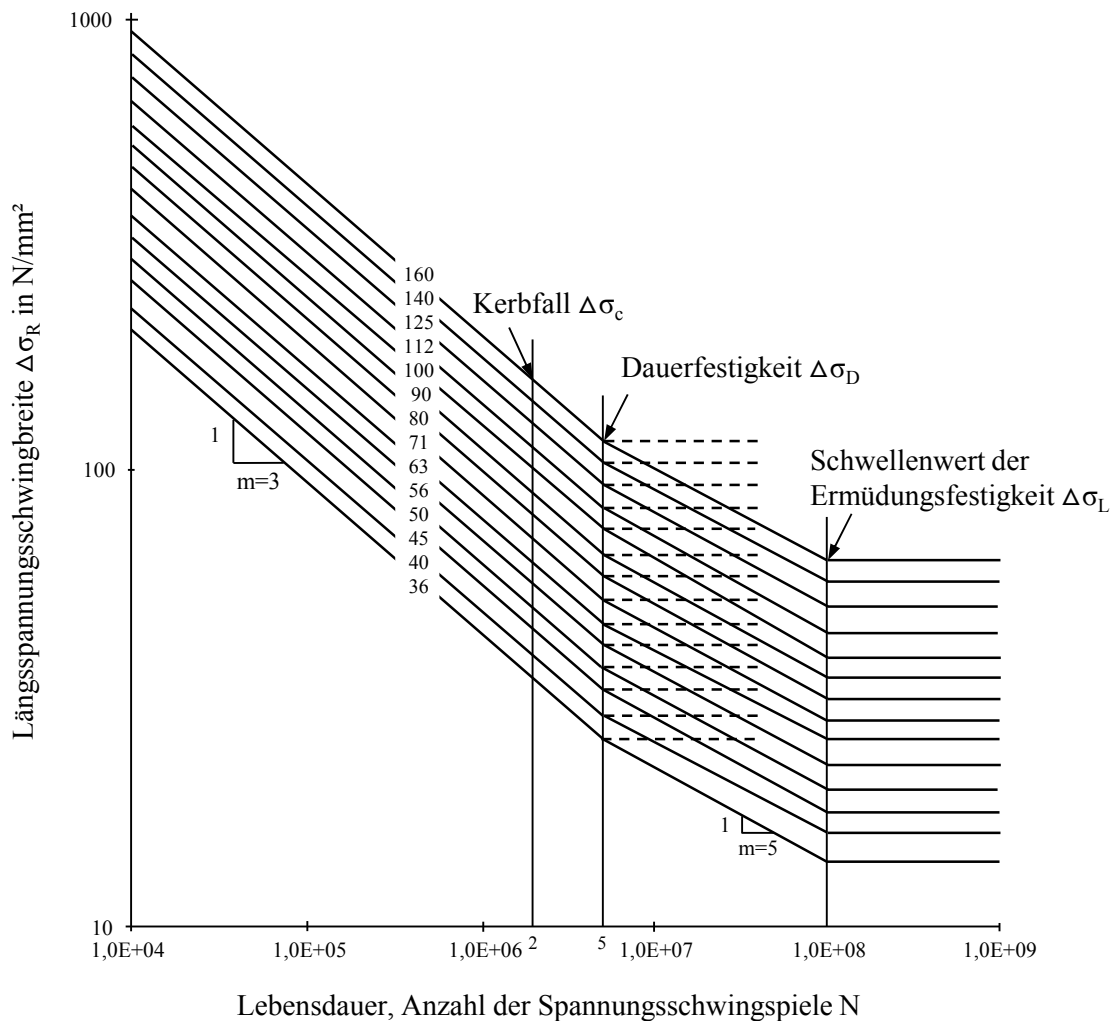
$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_D^m * 5 * 10^6 \quad \text{mit } m = 5 \text{ für } 5 * 10^6 \leq N \leq 10^8 \quad (2.4)$$

Dabei werden die Dauerfestigkeit  $\Delta\sigma_D$  und der Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit  $\Delta\sigma_L$  wie folgt ermittelt:

$$\Delta\sigma_D = (2/5)^{1/3} * \Delta\sigma_C = 0,737 * \Delta\sigma_C \quad (2.5)$$

$$\Delta\sigma_L = (5/100)^{1/5} * \Delta\sigma_D = 0,549 * \Delta\sigma_D = 0,405 * \Delta\sigma_C \quad (2.6)$$

In Abbildung 2-5 sind die Ermüdungsfestigkeitslinien, oder auch Wöhlerlinien genannt, für Längsspannungsschwingbreiten, dargestellt.



**Abbildung 2-5: Ermüdungsfestigkeitslinien bei Normalspannungsbeanspruchung, aus [10]**

Im Folgenden werden die Formeln für die Schubbeanspruchung angeführt:

$$\Delta\tau_R^m N_R = \Delta\tau_C^m * 2 * 10^6 \quad \text{mit } m = 5 \text{ für } N \leq 5 * 10^8 \quad (2.7)$$

Dabei wird der Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit wie folgt ermittelt:

$$\Delta\tau_L = (2/100)^{1/5} * \Delta\tau_C = 0,457 * \Delta\tau_C \quad (2.8)$$

Aus Abbildung 2-6 sind die Ermüdungsfestigkeitslinien für Schubspannungsschwingbreiten zu entnehmen.

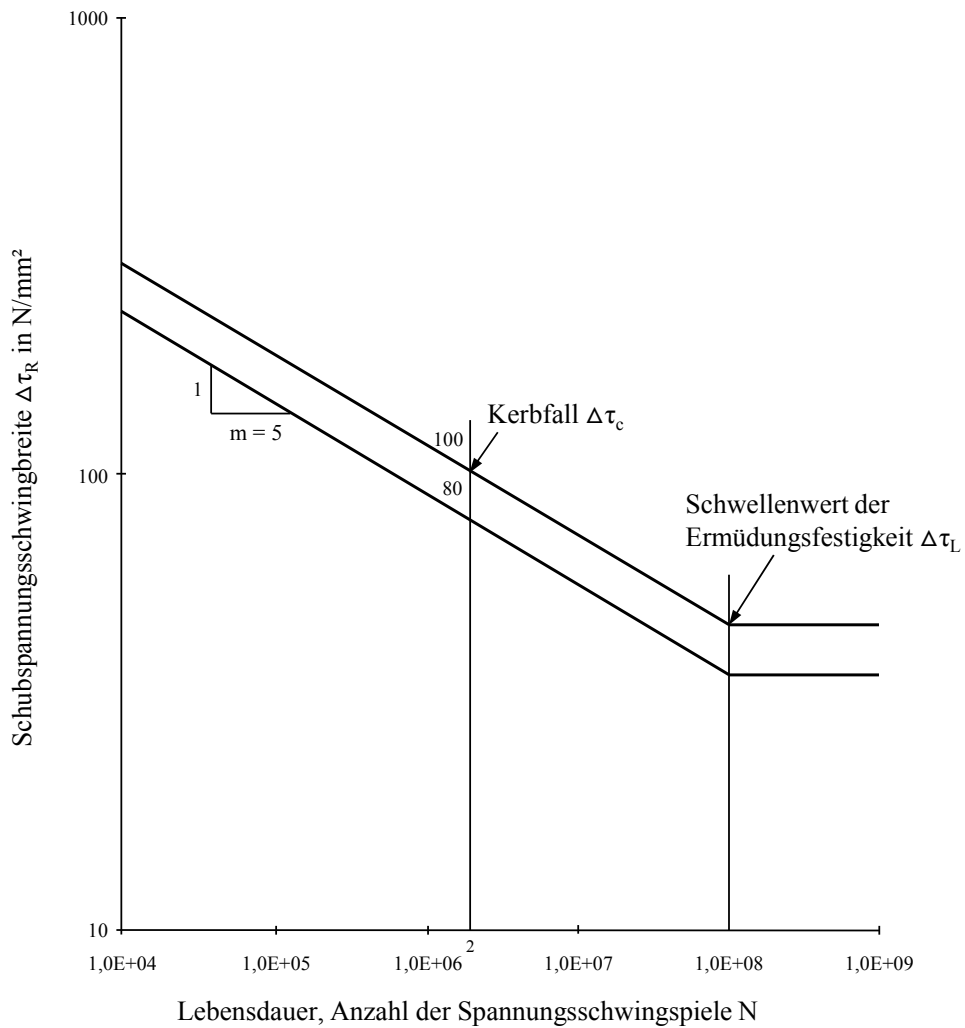


Abbildung 2-6: Ermüdungsfestigkeitslinien bei Schubspannungsbeanspruchung, aus [10]

Die Bezugswerte  $\Delta\sigma_C$  und  $\Delta\tau_C$  für einen bestimmten Kerbfall werden für 2 Millionen Spannungsspiele ( $N=2 \cdot 10^6$ ) in  $\text{N/mm}^2$  angegeben. Die Werte wurden statistisch als 95 % - Fraktile für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 75 % ermittelt. Die verschiedenen Kerbfallklassen sind in einem Kerbfallkatalog angegeben. In Abbildung 2-7 ist ein Ausschnitt aus dem Kerbfallkatalog, aus der EN 1993-1-9 [10], dargestellt.

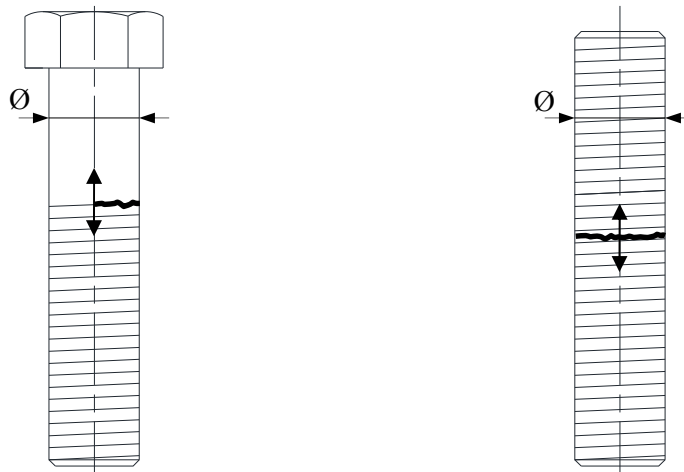


Abbildung 2-7: Ausschnitt aus dem Kerbfallkatalog für Kerbfall 50, aus [10]

Die EN 1993-1-9 [10] gibt für die gezeigten „[...] zugbeanspruchten Schrauben und Gewindestangen mit gerolltem oder geschnittenem Gewinde eine Ermüdungsfestigkeit von 50 N / mm<sup>2</sup> an.“

### Ermüdungsnachweis nach EN 1993-1-9

[10], [11]

Bei Einzelbeanspruchung sind folgende Ermüdungsnachweise zu führen:

$$\gamma_{Ff} * \Delta \sigma_{E2} \leq \frac{\Delta \sigma_c}{\gamma_{Mf}} \quad (2.9)$$

$$\gamma_{Ff} * \Delta \tau_{E2} \leq \frac{\Delta \tau_c}{\gamma_{Mf}} \quad (2.10)$$

Falls in den Kerbfallkategorien nicht anders angegeben ist, dann muss bei gleichzeitigem Auftreten von Längsspannungsschwingbreiten  $\Delta \sigma_{E2}$  und Schubspannungsschwingbreiten  $\Delta \tau_{E2}$  folgender Nachweis erfolgen:

$$\left( \frac{\gamma_{Ff} * \Delta \sigma_{E2}}{\Delta \sigma_c / \gamma_{Mf}} \right)^3 + \left( \frac{\gamma_{Ff} * \Delta \tau_{E2}}{\Delta \tau_c / \gamma_{Mf}} \right)^5 \leq 1,0 \quad (2.11)$$

Dabei ist:

- $\Delta \sigma_{E2}$ ,  $\Delta \tau_{E2}$  ... schadensäquivalente konstante Spannungsschwingbreite bei zwei Millionen Lastwechseln ( $2 * 10^6$ ). Dieser Wert wird wie folgt berechnet:  $\Delta \sigma_{E2} = \lambda * \Delta \sigma_p$  [N / mm<sup>2</sup>]
- $\Delta \sigma_c$ ,  $\Delta \tau_c$  ... Ermüdungsfestigkeit bei  $2 * 10^6$  Lastwechseln (aus Kerbfallkatalog)
- $\gamma_{Ff}$  ... lastseitiger Teilsicherheitsfaktor bei Ermüdung für schadensäquivalente Spannungsschwingbreiten  $\Delta \sigma_c$  und  $\Delta \tau_c$ . Dieser Wert kann mit 1,0 angenommen werden.

- $\gamma_{Mf}$  ... Dieser Wert wird als Teilsicherheitsfaktor auf der Widerstandsseite bezeichnet. Er hängt von der Schadenstoleranz und von den Schadensfolgen beim Versagen des Bauteils ab und kann aus Tabelle 2-1 entnommen werden:

**Tabelle 2-1: Empfehlungen für den Teilsicherheitsfaktor  $\gamma_{Mf}$ , aus [10]**

Bemessungskonzept	Schadensfolgen	
	niedrig	hoch
Schadenstoleranz	1	1,15
Sicherheit gegen Ermüdungsversagen ohne Vorankündigung	1,15	1,35

### 2-1.3.3 Regelung nach EN 1995-2 [12] für Holzbauten

[12]

Dieser Nachweis gilt dann, wenn das Bauteil durch eine konstante Spannungsamplitude belastet wird. Für veränderliche Spannungsamplituden kann man auf die kumulative lineare Schadenstheorie nach Palmgreen - Miner zurückgreifen. Bei der elastischen Berechnung der Spannungen müssen die Nachgiebigkeit von Verbindungen und die Effekte 2. Ordnung aus den Formänderungen berücksichtigt werden. Um das Verhältnis R, welches benötigt wird, um herauszufinden, ob ein Ermüdungsnachweis zu führen ist, zu berechnen, müssen die Werte in die nachfolgende Formel eingesetzt werden:

$$R = \frac{|\sigma_{d,max} - \sigma_{d,min}|}{f_k / \gamma_{M,fat}} \quad (2.12)$$

Dabei ist:

- $\sigma_{d,max}$  ... maximale Bemessungsspannung infolge ermüdungsrelevanter Einwirkungen;
- $\sigma_{d,min}$  ... minimale Bemessungsspannung infolge ermüdungsrelevanter Einwirkungen;
- $f_k$  ... charakteristische Festigkeit;
- $\gamma_{M,fat}$  ... baustoffseitiger Teilsicherheitsfaktor für den Ermüdungsnachweis ( $\gamma_{M,fat} = 1,0$ ).

Wenn dieses Verhältnis größer ist als die in Tabelle 2-2 dargestellten Werte, dann ist ein Ermüdungsnachweis zu führen.

**Tabelle 2-2: Grenzwerte für das Verhältnis R, aus [12]**

für Holzbauteile mit Druck parallel und senkrecht zur Faser	0,60
für Holzbauteile beansprucht auf Biegung und Zug	0,20
für Holzbauteile beansprucht auf Schub	0,15
für Stabdübelverbindungen	0,40
für Nagelverbindungen	0,10
für andere Verbindungen	0,15

### Ermüdungsnachweis nach EN 1995-2 [12]

Folgende Formel gilt für Einwirkungen mit konstanter Amplitude:

$$\sigma_{d,max} \leq f_{fat,d} \quad (2.13)$$

Dabei ist:

- $\sigma_{d,max}$  ... die maximale Bemessungsspannung infolge ermüdungsrelevanter Einwirkungen;
- $f_{fat,d}$  ... Bemessungswert der Ermüdungsfestigkeit.

Der Bemessungswert der Ermüdungsfestigkeit sollte wie folgt angenommen werden:

$$f_{fat,d} = k_{fat} \frac{f_k}{\gamma_{M,fat}} \quad (2.14)$$

Dabei ist:

- $f_k$  ... die charakteristische Festigkeit für die statische Belastung;
- $k_{fat}$  ... Beiwert für die Festigkeitsminderung infolge der Anzahl der Belastungszyklen,

wobei der  $k_{fat}$ -Wert wie folgt angenommen werden sollte:

$$k_{fat} = 1 - \frac{1-R}{a(b-R)} \log(\beta N_{obs} t_L) \geq 0 \quad (2.15)$$

Dabei ist:

- $R = \sigma_{d,min} / \sigma_{d,max}$  mit  $-1 \leq R \leq 1$
- $\sigma_{d,min}$  ... minimale Bemessungsspannung infolge ermüdungsrelevanter Einwirkungen;
- $\sigma_{d,max}$  ... maximale Bemessungsspannung infolge ermüdungsrelevanter Einwirkungen;
- $N_{obs}$  ... Anzahl der jährlichen Spannungsspiele mit konstanter Amplitude;



- $t_L$  ... Bemessungswert der Lebensdauer des Tragwerks in Jahren (z.B.:  $t_L = 100$  Jahre);
- $\beta$  ... Beiwert zur Berücksichtigung der Auswirkungen eines Schadens des betrachteten Tragwerkselements, wobei zwischen beträchtlichen Konsequenzen ( $\beta = 3$ ) und ohne beträchtlichen Konsequenzen ( $\beta = 1$ ) unterschieden werden muss;
- a, b ... Beiwerte zur Berücksichtigung der Art der Ermüdungseinwirkung.

Die Werte der Beiwerte a und b sind aus Tabelle 2-3 zu entnehmen:

**Tabelle 2-3: Werte der Beiwerte a und b, aus [12]**

	a	b
Holzbauteile beansprucht auf		
- Druck, parallel oder senkrecht zur Faser	2,0	9,0
- Biegung und Zug	9,5	1,1
- Schub	6,7	1,3
Verbindung mit		
- Dübeln und Passbolzen mit $d \leq 12 \text{ mm}^a$	6,0	2,0
- Nägeln	6,9	1,2
<small><sup>a</sup> Die Werte für Dübel und Passbolzen basieren größtenteils auf Tests an 12 mm dicken Passbolzen. Dübel und Passbolzen mit deutlich größeren Durchmessern sowie Bolzen können weniger günstige Ermüdungseigenschaften haben.</small>		

### 2-1.3.4 Fazit

Wie hier ersichtlich ist, sind Regelungen hinsichtlich der Verwendung von axial beanspruchten Schraubenverbindungen unter dynamischen Beanspruchungen in der EN 1995-2 [12] nicht vorhanden.

## 2-2 ERMÜDUNGSVERHALTEN VON HOLZ UND HOLZWERKSTOFFEN MIT FOKUS AUF SCHUBBEANSPRUCHUNG

---

Ein zentraler Teil der empirischen Forschungsarbeit bezieht sich auf die Ermüdung und somit auch das Ermüdungsverhalten von Holz und Holzwerkstoffen. Ein solider theoretischer Rahmen stellt das Fundament jeder erfolgreichen empirischen Arbeit dar.

[4], [7]

Für das Ermüdungsverhalten von Holz und Holzwerkstoffen wurde bereits im Jahr 1994 ein sehr umfangreicher Literaturbericht von Kreuzinger und Mohr [4] verfasst. Da hinsichtlich des Herausziehens der Schrauben bisher nur wenige Erkenntnisse vorhanden sind und es sich dabei prinzipiell um eine Form der Schubbeanspruchung des Holzes handelt, werden im Folgenden die wesentlichen Erkenntnisse von Kreuzinger und Mohr [4] für Voll- und Schichthölzer zusammenfassend dargelegt, wobei auf das Ermüdungsverhalten der Schub- bzw. Scherschwellfestigkeit von Holz- und Holzwerkstoffen und auf das Ermüdungsverhalten der Schub- bzw. Scherschwell- bzw. -wechselfestigkeit von Klebefugen näher eingegangen wird.

Die Versuche stammen aus unterschiedlichen Literaturangaben und wurden mit folgenden Variationen ermittelt:

- Variation der Holzarten
- Variation des Spannungsverhältnisses  $R$
- Variation der Prüfkörperdimensionen und Prüfkörpergeometrien
- Variation der Holzfeuchte
- Variation der Prüfumfänge
- Variation der Produkte, wie z.B. Voll- und Schichthölzer

Dabei kamen die unterschiedlichsten Ergebnisse heraus. Um diese Ergebnisse dennoch vergleichbar darstellen zu können, wurden folgende Punkte eingehalten.

- Die Messergebnisse wurden in Form von Wöhlerdiagrammen dargestellt. Von den meisten Autoren wurde ein halblogarithmischer Maßstab verwendet, wobei die relativen Festigkeiten linear und die Lastwechsel in „log  $N$ “ eingetragen wurden. Die ermittelten Ergebnisse wurden laut Brandner [7] „auf die statische Kurzzeitfestigkeit bezogen.“
- Für die Auswertung wurden ausschließlich jene Daten verwendet, die den Anforderungen entsprachen und für die ausreichende Kenntnisse zur Beurteilung dessen Qualität verfügbar waren.

- Die Forschungsberichte wurden nicht nach der Anzahl der Dauerfestigkeitsproben für eine Wöhlerlinie unterschieden.
- Eine Unterscheidung hinsichtlich der Probengröße, der Rohdichte, der Frequenz, der Temperatur sowie der Versuchsart erfolgte bei der Auswertung nicht.
- Bei der Ermittlung der  $k_{fat}$  - Werte wurden laut Brandner [7] die [...] „verschiedenen Spannungsverhältnisse R durch lineare Beziehungen, wie z.B. Extrapolation und Linearität in den Bereichen  $[-1 \leq R \leq 0]$  und  $[0 \leq R \leq 1]$ , berücksichtigt.“ Für die Darstellung in den Wöhlerdiagrammen wurden laut Brandner [7] „keine Anpassungen vorgenommen.“
- Brandner [7] gibt in seiner Arbeit an, dass „[...] im Bericht von Kreuzinger und Mohr [4] nicht genau beschrieben ist, welches statistische Quantilniveau die Basis für die Darstellung der Funktionen in den Diagrammen bildet, und man daher davon ausgeht, dass es sich um die 5 % Quantilwerte der Zeitfestigkeiten bezogen auf die 5 % - Quantilen der Kurzzeitfestigkeit handelt.“
- Die  $k_{fat}$ -Werte wurden laut Brandner [7] unter der Annahme normalverteilter Festigkeiten berechnet. Es wurde angenommen, dass die Normalverteilung der Kurzzeitfestigkeiten unabhängig von jener der Zeitfestigkeit ist. Dies wurde aber als nicht zutreffend bewertet. Des Weiteren wurden lineare Beziehungen in den Bereichen  $[-1 \leq R \leq 0]$  und  $[0 \leq R \leq 1]$  verwendet und es wurden konstante Streuungen (Variationskoeffizienten) angenommen.
- Die  $k_{fat}$ -Werte wurden laut Brandner [7] „zur Berücksichtigung des Ermüdungsverhaltens von Holz und Holzwerkstoffen auf dem 5 % - Quantilniveau ermittelt.“

## 2-2.1 SCHUB- BZW. SCHERSCHWELLFESTIGKEIT VON KLEBEFUGEN

[7], [4]

Mit dem Ermüdungsverhalten von Klebefugen bei Schub- bzw. Scherschwellbelastung haben sich Kück [13], Lewis [14] [15], Kolb [16], Sterr [17] und Moslemi [18] auseinandergesetzt.

Der Ermüdungsbeiwert  $k_{fat}$  wird von Kreuzinger und Mohr [4] auf Basis der Untersuchungen von den oben genannten Autoren nach  $10^7$  Lastwechseln und einem Spannungsverhältnis  $R = 0$  wie folgt angegeben:

$$k_{fat|\log(N)=7,R=0} = 0,34 \quad (2.16)$$

Kreuzinger und Mohr [4] merkten an, dass sich das Ermüdungsverhalten von Klebefugen unter oft wiederholten Abscherbeanspruchungen günstiger verhält, als jenes des umgebenden Holzes. Deshalb liegt für Leimverbindungen der Ansatz des  $k_{fat}$ -Wertes für Holz bei Abscheren in radialer Ebene von  $k_{fat|\log(N)=7,R=0} = 0,30$  auf der sicheren Seite. Leimverbindungen, die auf Abscheren beansprucht werden, stellen somit keine Schwachpunkte dar.

## 2-2.2 SCHUB- BZW. SCHERWECHSELFESTIGKEIT VON KLEBEFUGEN

[7], [4]

Aus dem Literaturbericht von Kreuzinger und Mohr [4] geht hervor, dass sich bisher nur Sterr [17] mit den Untersuchungen des Ermüdungsverhaltens der Schub- bzw. Scherwechselfestigkeit von Klebefugen befasst hat. Er untersuchte Fichtenhölzer, die unter Verwendung von drei verschiedenen Klebstoffen miteinander verleimt waren. Dabei waren diese einer Scherwechselbeanspruchung ausgesetzt. Der Ermüdungsbeiwert  $k_{fat}$  wird von Kreuzinger und Mohr [4] auf Basis der Untersuchungen von Sterr [17] für eine Schub- bzw. Scherwechselbeanspruchung der Klebefuge nach  $10^7$  Lastwechseln und einem Spannungsverhältnis  $R = -1$  wie folgt angegeben:

$$k_{fat|\log(N)=7,R=-1} = 0,24 \quad (2.17)$$

## 2-2.3 SCHUB- BZW. SCHERSCHWELLFESTIGKEIT VON HOLZ- UND HOLZWERKSTOFFEN

[7], [4]

Im diesem Abschnitt wird auf das Ermüdungsverhalten der Schub- bzw. Scherschwellfestigkeit von Holz und Holzwerkstoffen näher eingegangen.

Mit dem Schub- und Scherverhalten von Holz und Holzwerkstoffen bei schwellender Belastung haben sich bereits Lewis [14], sowie Bonfield und Ansell [19] auseinandergesetzt. Lewis [14] hat für seine Untersuchungen die Holzarten Southern Pine und Douglasie verwendet. Die verwendeten Proben waren groß (Querschnittsfläche  $A \geq 40 \text{ cm}^2$ ) und in den Bereichen der größten Schubspannungen seitlich gekerbt. Bonfield [19] hat für seine Untersuchungen verleimte Proben aus der Holzart Khaya verwendet. Bei allen Versuchen wurde das Spannungsverhältnis  $R = 0,1$  verwendet. Der Ermüdungsbeiwert  $k_{fat}$  wird von Kreuzinger und Mohr [4] nach  $10^7$  Lastwechseln und einem Spannungsverhältnis  $R = 0$  wie folgt angegeben:

$$k_{fat|\log(N)=7,R=0} = 0,30 \quad (2.18)$$

Insgesamt gibt es fünf Werte, wobei ein Wert den angegebenen  $k_{fat}$ -Wert unterschreitet. Die zugehörigen Werte für Schwellbeanspruchungen auf Zug, Druck und Biegung liegen deutlich über dem angegebenen Wert für Schub. Schub- bzw. Scherbeanspruchungen an Proben in tangential-faserparalleler Richtung wirkten sich im Gegensatz zu Beanspruchungen in radial-faserparalleler Richtung günstiger auf das Ermüdungsverhalten aus. Um auf der sicheren Seite zu liegen, wurden für die Ermittlung des  $k_{fat}$ - Wertes nur Proben betrachtet, die einer radial - faserparallelen Beanspruchung ausgesetzt waren.

Abbildung 2-8 enthält das zugehörige Wöhlerdiagramm, welches aus der Literaturstudie von Kreuzinger und Mohr [4] stammt und in der Arbeit von Brandner [7] ergänzt wurde.

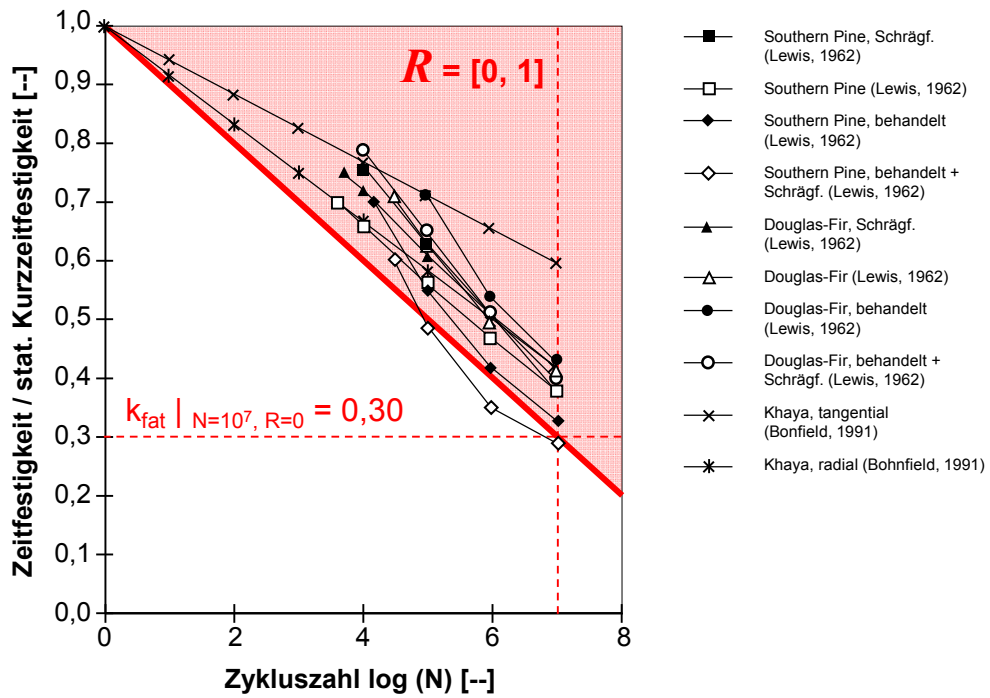


Abbildung 2-8: Wöhlerdiagramm zur Schub- bzw. Scherschwellfestigkeit vs. der stat. Kurzzeitfestigkeit von Holz und Holzwerkstoffen, in Abhängigkeit von der Zykluszahl N, aus [7]

## 2-2.4 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

[7], [4]

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Holz und Holzwerkstoffe zur Abtragung von oft wiederholten Beanspruchungen geeignet sind. Sie werden zwar geschädigt, aber der Tragfähigkeitsverlust hält sich in Grenzen. Oft wiederholte Belastungen, die die Größe der statischen Beanspruchungen haben, können nicht ertragen werden. Betrachtet man die Restfestigkeit nach einer bestimmten Anzahl von Lastwechseln, stellt man fest, dass sie sich kaum ändert. Wenn man das Bauteil aber weiter mit dieser Beanspruchung belastet, wird es zum Bruch führen. In Tabelle 2-4 sind die von Kreuzinger und Mohr [4] vorgeschlagenen  $k_{fat}$  - Werte ersichtlich. Dabei unterschied er zwischen dynamisch schwellender und wechselnder Beanspruchung. Die angeführten  $k_{fat}$  - Werte beziehen sich auf eine Lastwechselzahl von  $\log(N) = 7$  und auf folgende Grenzspannungsverhältnisse:

- $R = 0$  (für schwellende Beanspruchungen)
- $R = -1$  (für wechselnde Beanspruchungen)

**Tabelle 2-4: Ermüdungsbeiwerte  $k_{fat}$  nach Kreuzinger und Mohr [4], aus [7]**

	Beanspruchung	Material	$k_{fat} (N = 10^7)$
<b>schwellend (R = 0)</b>	Zug II	Holz u. Holzwerkstoffe	0,50
	Druck II	Holz u. Holzwerkstoffe	$\geq 0,75$
	Biegung	Vollholz	0,42
		Schichtholz	0,52
	Schub	Holz u. Holzwerkstoffe	0,30
<b>wechselnd (R = -1)</b>	Zug – Druck II	Holz u. Holzwerkstoffe	0,26
	Biegung	Vollholz	0,26
		Schichtholz	0,20
	Schub	Holz u. Holzwerkstoffe	0,24

Betrachtet man die verschiedenen Materialien stellt man unterschiedliche Ergebnisse fest. Die Abminderungswerte der Vollhölzer unterscheiden sich von den Abminderungswerten der Schichthölzer. Bei den Biegewechselversuchen liefert das Vollholz gegenüber dem Schichtholz die besseren Ergebnisse. Bei den Schwellversuchen ist es genau umgekehrt. Man muss aber auch anmerken, dass die Biegeschwellversuche mit größeren Abmessungen durchgeführt wurden als die Biegewechselversuche.

Für die Nachweisführung des Ermüdungswiderstandes wird von Kreuzinger und Mohr [4] vorgeschlagen, nicht nur den Ermüdungsbeiwert  $k_{fat}$ , sondern auch den Modifikationsbeiwert  $k_{mod}$  zu berücksichtigen. Den sogenannten Designwert würde man dann mit folgender Formel ermitteln, wobei  $\gamma_m$  der materialeitige Teilsicherheitswert ist:

$$f_{d,fat} = f_k * \frac{k_{mod} * k_{fat}}{\gamma_m} \quad (2.19)$$

In Abbildung 2-9 sind die von Kreuzinger und Mohr [4] vorgeschlagenen Ermüdungsbeiwerte nochmals grafisch dargestellt.

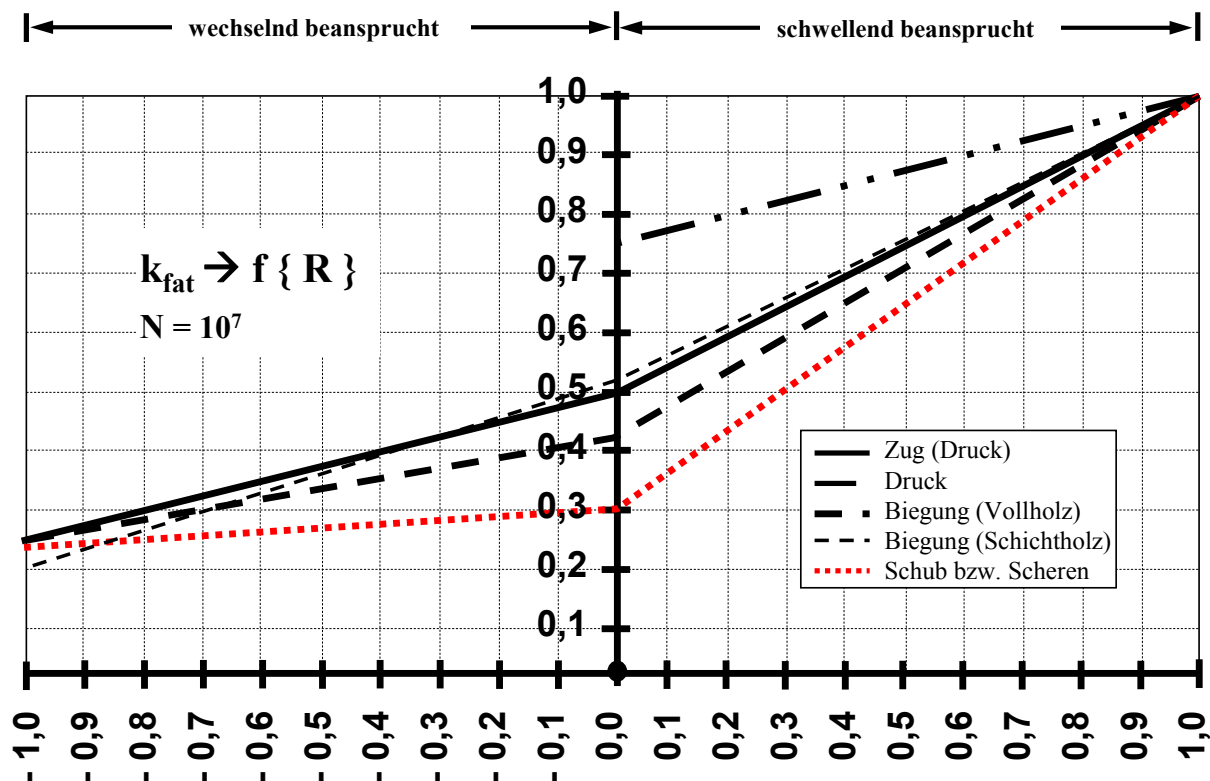


Abbildung 2-9: Ermüdungsbeiwerte  $k_{fat}$  nach Kreuzinger und Mohr [4], aus [7]

### Vergleich der Ergebnisse von Kreuzinger und Mohr [4] mit EN 1995-2 [12]

Werden die vorgeschlagenen Ermüdungsbeiwerte  $k_{fat}$  aus der Arbeit von Kreuzinger und Mohr [4] herangezogen und mit den Resultaten verglichen, die laut EN 1995-2 [12] (siehe Kapitel 2-3.1.3) resultieren, so kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse aus der Arbeit von Kreuzinger und Mohr [4] nicht maßgebend für die Erstellung der EN 1995-2 [12] waren. Ob und inwiefern die Resultate der Arbeit von Kreuzinger und Mohr [4] eine Rolle bei der Erstellung der EN 1995-2 [12] gespielt haben, kann im Rahmen der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit nicht geklärt werden, jedoch ist sicher, dass diese Quelle nicht die einzige herangezogene für die Entwicklung der EN 1995-2 [12] war. Des Weiteren kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass die Ergebnisse der Arbeit von Kreuzinger und Mohr [4] bei der

Erstellung der EN 1995-2 [12] mit einbezogen wurden, der Stellenwert aber nicht genau bestimmt werden kann. Aus Tabelle 2-5 können die vorgeschlagenen Werte von Kreuzinger und Mohr [4], sowie die ermittelten Werte nach EN 1995-2 [12] entnommen werden.

**Tabelle 2-5: Vergleich der Ermüdungsbeiwerte  $k_{fat}$  nach Kreuzinger und Mohr [4] aus [7] mit EN 1995-2 [12]**

	Beanspruchung	Material	$k_{fat} (N = 10^7)$	$k_{fat}$ lt. EN 1995-2 [12]
<b>schwellend (R = 0)</b>	Zug II	Holz u. Holzwerkstoffe	0,50	0,33
	Druck II	Holz u. Holzwerkstoffe	$\geq 0,75$	0,61
	Biegung	Vollholz	0,42	0,33
		Schichtholz	0,52	0,33
	Schub	Holz u. Holzwerkstoffe	0,30	0,20
<b>wechselnd (R = -1)</b>	Zug – Druck II	Holz u. Holzwerkstoffe	0,26	0,30
	Biegung	Vollholz	0,26	0,30
		Schichtholz	0,20	0,30
	Schub	Holz u. Holzwerkstoffe	0,24	0,09

### **Anmerkungen:**

Bei der Berechnung nach EN 1995-2 [12] wurde für die Anzahl der jährlichen Spannungsspiele mit konstanter Amplitude  $N_{obs}$  der Wert  $10^7$  eingesetzt. Für den Bemessungswert der Lebensdauer des Tragwerks  $t_L$  wurde 1 Jahr gewählt und der Beiwert zur Berücksichtigung der Auswirkungen eines Schadens des betrachteten Tragwerkselements  $\beta$  wurde auch mit 1 (ohne beträchtliche Konsequenzen) angesetzt. Die Beiwerte a und b wurden für die jeweiligen Beanspruchungen aus Tabelle 2-3 entnommen.



## 2-3 ERMÜDUNGSVERHALTEN VON HOLZVERBINDUNGEN

### 2-3.1 ALLGEMEIN | ERKENNTNISSE VON KREUZINGER UND MOHR

[4]

Bisher haben viele Autoren das Ermüdungsverhalten verschiedenster Holzverbindungen untersucht, wobei ein großer Teil davon im Literaturbericht von Kreuzinger und Mohr [4] beschrieben wird. Im Folgenden werden die wesentlichen Erkenntnisse aus [4] zusammenfassend dargelegt.

#### **Bolzenverbindungen**

Bei der Untersuchung von Bolzenverbindungen stellte man mäßige Zeit- und Dauerfestigkeitseigenschaften fest. Man erhielt folgende Abminderungswerte (siehe Tabelle 2-6):

**Tabelle 2-6: Ermüdungsbeiwerte bei Schwellbeanspruchung, aus [4]**

Anzahl der Lastwechsel	Ermüdungsbeiwert $k_{fat}$
$5 * 10^5$	0,48
$2 * 10^6$	0,30

Vergleicht man die ermittelten Abminderungswerte mit den Abminderungswerten für Zug- und Biegeschwellen bei Vollholz, stellt man fest, dass sie geringer sind.

#### **Stabdübeln**

Es liegen nur wenige Versuche zur Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit von Stabdübeln vor. Die bisherigen Untersuchungen ergaben lt. [4] gute Zeit- und Dauerfestigkeitseigenschaften von Stabdübeln unter schwellender und wechselnder Beanspruchung. Für einen gesicherten Einsatz müssen lt. [4] aber noch weitere Versuche gemacht werden.

#### **Nagelverbindungen**

Nagelverbindungen sind für den Einsatz unter oft wiederholten Beanspruchungen grundsätzlich geeignet. Dies sollte aber in der Bemessung mit einem geeigneten Ermüdungsbeiwert  $k_{fat}$  berücksichtigt werden. Es werden folgende Werte vorgeschlagen (siehe Tabelle 2-7):

**Tabelle 2-7: Ermüdungsbeiwerte für Nagelverbindungen, aus [4]**

Beanspruchung	Ermüdungsbeiwert $k_{fat}$
schwellend ( $R = 0$ )	0,40 bis 0,50
wechselnd ( $R = -1$ )	0,15 bis 0,20

Bei drei unterschiedlichen Versuchen mit schwellender Beanspruchung konnte man keinen Bruch feststellen. Für Versuche mit wechselnder Beanspruchung liegen wenige Ergebnisse vor. Es lässt sich feststellen, dass die Bruchursache beim Stahlversagen liegt.

### **Nagelplatten**

Nagelplatten sind für den Einsatz unter oft wiederholten Beanspruchungen lt. [4] nicht gut geeignet. Im Vergleich zu Vollholz zeigen auch in diesem Fall die Wöhlerlinien eine vielfach schlechtere Tragfähigkeit bei oft wiederholten Beanspruchungen.

### **Verschiedene Dübelarten**

Bei der Untersuchung verschiedener Dübelarten stellte man gute Eigenschaften bei schwellender Belastung fest. Für ein Spannungsverhältnis von  $R = 0$  werden Ermüdungsbeiwerte  $k_{fat}$  zwischen 0,45 und 0,50 vorgeschlagen.

### **Leimverbindungen**

Bei der Untersuchung von Leimverbindungen stellte man keine schlechteren Zeit- und Dauerfestigkeitseigenschaften als beim Holz selbst fest. Außer bei der Keilzinkenverbindung konnte man keine ungünstigeren Ermüdungsbeiwerte feststellen. Deshalb werden von den Leimfugen in Hölzern keine negativen Auswirkungen erwartet. Für die Keilzinkenverbindung wurde ein Mittelwert der Abminderungsbeiwerte von 0,37 ermittelt. Bei einem Spannungsverhältnis von  $R = 0$  wird unter einer oft wiederholten schwellenden Zugbeanspruchung ein Ermüdungsbeiwert  $k_{fat}$  von 0,35 vorgeschlagen.

### **Fazit**

Bei den meisten Versuchen stellte man fest, dass beim Ermüdungsverhalten das Problem eher beim verwendeten Verbindungsmittel aus Stahl (erhöhte Neigung auf Versagen zufolge Stahlbruch) als beim Holz selbst liegt.

## 2-3.2 WEITERFÜHRENDE ARBEITEN

In diesem Abschnitt wird auf einige ausgesuchte Arbeiten eingegangen, die nach dem Bericht von Kreuzinger und Mohr [4] entstanden sind (ohne Anspruch auf Vollständigkeit).

### **Bainbridge et al. [20]**

Bainbridge et al. [20] haben sich mit der Ermüdungsfestigkeit von eingeklebten Stahlstangen in Brettschichtholz unter Verwendung von drei verschiedenen Klebverfahren befasst. Dem Bericht nach, verhält sich Stahl in Bezug auf Ermüdung anders als Holz. So gibt es laut Bainbridge et al. [20] ein „klares potentiell Risiko“ eines Materialschadens durch Ermüdung bei eingeklebten Stahlstangen, die als Verbindung dienen. Es wurden hochfeste Stahlstangen mit einem Durchmesser von 8 mm und Baustahlstangen mit einem Durchmesser von 16 mm geprüft. Die Klebedicke betrug bei der gesamten Serie 0,5 mm. Die Testfrequenz der sinusförmigen Axialladungen betrug ca. 1 Hz und das Spannungsverhältnis wurde mit  $R = 0,1$  festgelegt. In Abbildung 2-10 ist der Prüfaufbau für die durchgeführten Ermüdungsprüfungen zu sehen.



**Abbildung 2-10: Prüfaufbau für die Ermüdungsversuche, aus [20]**

Ogleich hochfester Stahl den Baustahl in vielerlei Hinsicht, wie beispielsweise bei der Spannungshöchstgrenze, die bei hoher Schwingspielzahl ausgehalten werden kann, überlegen ist, konnte ein schlechteres Ermüdungsverhalten bei hochfestem Stahl festgestellt werden. **Die Versuche zeigen auf, dass die Ermüdungserscheinungen mit dem allgemeinen Ermüdungsversagen bei Stahlstangen bestimmt werden können.** Das beobachtete Ermüdungsversagen bei Baustahl hingegen, ließ sich, bei niedrigerer Schwingspielzahl oder niedrigerer Spannung als der Grunddatensatz vorgibt, feststellen. Das liegt daran, dass die Ermüdungsfestigkeit bei den verwendeten Stahlstangen in den GIROD-Ermüdungsversuchen den Gewindeflächen der Stangen, als eine Reihe von spannungserhöhenden Kerben, zugeschrieben werden kann. Diese haben einen bedeutenden Einfluss auf den Vorgang des Ermüdungsschadens. Die Stangenmerkmale sind beim Feststellen der Ermüdungsfestigkeit häufig wichtiger als die Stahlzusammensetzung an sich. Somit erreichen hochwertigere Stahlsorten laut Bainbridge et al. [20] eine höhere Ermüdungsfestigkeit in Hinblick auf den Spannungsdurchschnitt, der zum Versagen führt, wenn man die Probedurchgänge  $10^4$  und  $10^5$  näher betrachtet. Dennoch muss gesagt werden, dass, sofern es im Rahmen der Versuchsreihe zu einem Ermüdungsversagen bei den Stahlstangen

kam, ein größerer Teil dieser, aus hochwertigerem Stahl war. Neben dem Gewindeeffekt gibt es auch andere Faktoren, die das Ermüdungsversagen von Stahlstangen bestimmen. Zu nennen sind laut Bainbridge et al. [20] beispielsweise die Sprödigkeit in Verbindung mit kleineren Fehlern und Exzentrizitäten, die zu kombinierter Biege- und Spannungsbelastung führen. Die angeführten Argumente erklären zum Teil das Ermüdungsvorkommen in den schmälere und spröderen hochwertigen Stahlstangen. In Abbildung 2-11 sind die Prüfergebnisse von Bainbridge et al. [20] dargestellt.

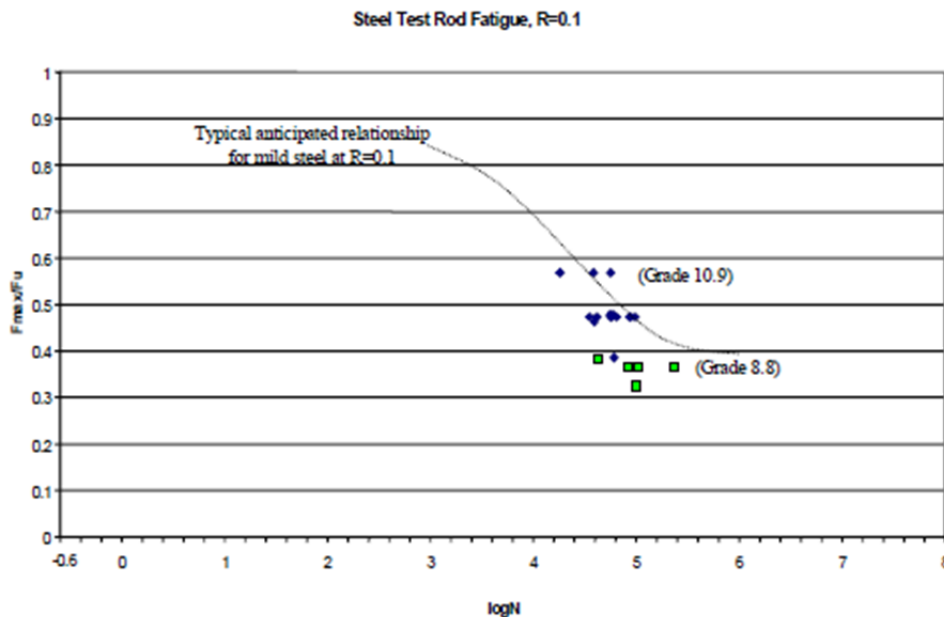


Abbildung 2-11: Prüfergebnisse, aus [20]

### **Kuhlmann et al. [21]**

Kuhlmann et al. [21] befassten sich mit der Ermüdungsresistenz von Holz-Beton-(Verbund) Verbindungen, welche für den Einsatz bei Straßenbrücken eine wesentliche Rolle spielen. Ziel war es, die Dauerfestigkeit von den sogenannten TCC-Balken (Timber-concrete-composite) zu erforschen. Die Verbindung von Holz mit dem Beton kann hierbei entweder durch Nutverbindungen oder durch quer eingeklebte Bewehrungsstäbe erreicht werden. Diese Verbindungen sind für den Einsatz bei Klein- bis Mittelfeldbrücken geeignet. Die Verbindungen zwischen Holz und Beton wurden im Rahmen der Versuche aus Stahl gemacht und hatten einen Durchmesser von 16 mm. Die Versuche mit quer eingeklebten Bewehrungsstäben wurden mit Stahlelementen durchgeführt, die in einem Winkel von 45 ° zu deren Hauptachsen und der Holz-Beton-Schuboberfläche angebracht waren. Für die Versuche wurde eine Prüffrequenz von ca. 2,5 – 3 Hz und ein Spannungsverhältnis von  $R = 0,1$  verwendet. Wie aus Abbildung 2-12 ersichtlich ist, versagten die Stahlbewehrungen unter Spannung, wobei das Holz und der Beton keine sichtbaren Schäden davontrugen.



Abbildung 2-12: Versagen der Stahlbewehrung, aus [21]

Der Hauptunterschied im Vergleich zu den statischen Tests war das plötzliche Versagen ohne Vorankündigung eines beginnenden Ermüdungsversagens, während in den Referenzversuchen eine lange duktile Phase und eine entsprechend hohe Deformation der Versuchsobjekte beobachtet wurde. In Abbildung 2-13 sind die Prüfergebnisse von Kuhlmann et al. [21] im Vergleich zu den Ergebnissen nach EN 1995-2 [12] grafisch dargestellt.

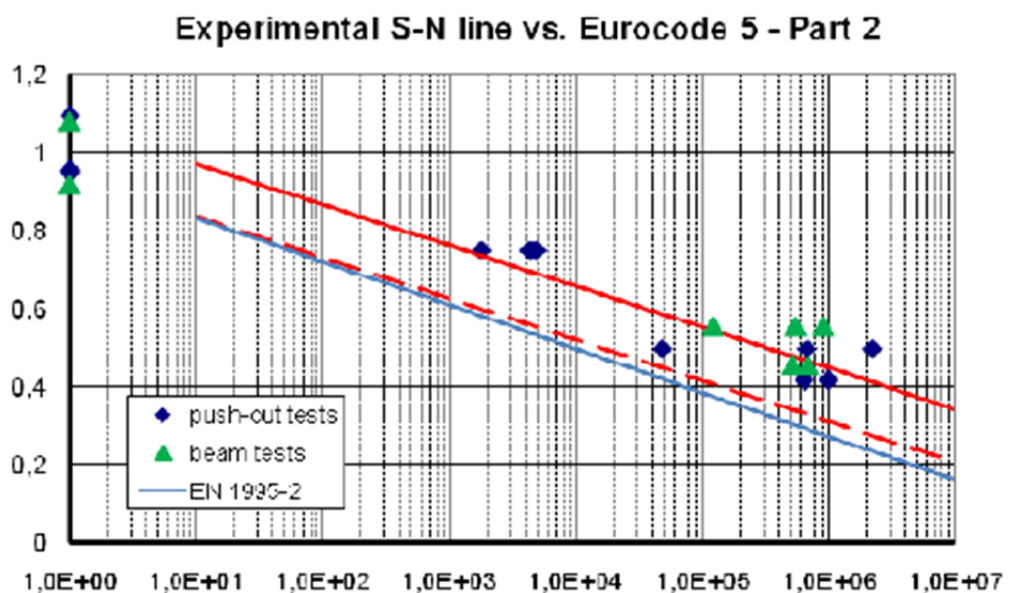


Abbildung 2-13: Vergleich der Prüfergebnisse mit EN 1995-2 [12], aus [21]

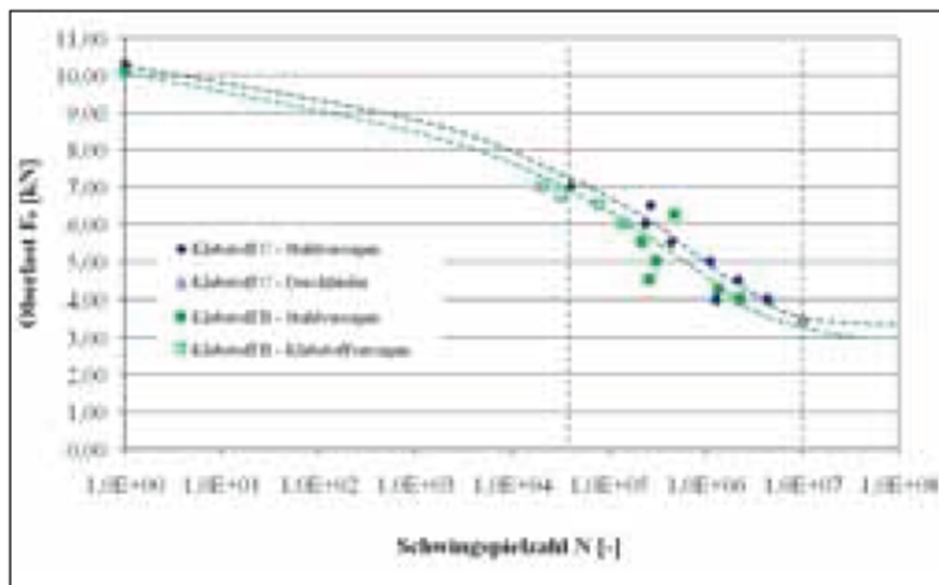
### **Bathon et al. [22], [23]**

In diesen Berichten geht es um die Temperaturbeständigkeit und Ermüdungsfestigkeit von in Holz eingeklebten Gewindestangen und Lochblechen. Im Folgenden werden die wesentlichen Erkenntnisse zur Ermüdungsfestigkeit zusammenfassend dargelegt. Die Versuche wurden mittels einer Hydropulsmaschine durchgeführt, wobei ca. 30 Proben geprüft wurden. Aus Abbildung 2-14 sind die verwendeten Prüfkörper ersichtlich.



**Abbildung 2-14: Prüfkörper für die Ermüdungsprüfungen; links: eingeklebte Gewindestange; rechts: eingeklebtes Lochblech, aus [22]**

Die Prüfungen wurden entweder bis zum Bruch der Probe oder bis zum Erreichen der definierten Grenzlastspielzahl von  $10^7$  Lastwechseln gemacht. Bei den Prüfungen der eingeklebten Gewindestangen wurde eine Prüffrequenz von 3 Hz und bei den Prüfungen der eingeklebten Lochbleche eine Prüffrequenz von 10 Hz verwendet, wobei für beide die aufgebrauchten Lasten (Mittellast, Spannungsamplitude) immer am Beginn der Prüfung definiert und bis zum Ende nicht verändert wurden. Das Spannungsverhältnis betrug für alle Versuche  $R = 0,1$ . Bathon et al. [22] stellten bei den Versuchen eine steigende Schwingspielzahl bei fallender Oberlast fest. Des Weiteren stellten Bathon et al. [22] fest, dass die Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsbereich eine stark fallende Tendenz aufwies (siehe Abbildung 2-15).



**Abbildung 2-15: Darstellung der Wöhlerlinie, aus [22]**

Anzumerken ist auch, dass bei allen geprüften eingeklebten Gewindestangen die Schadensursache beim Ermüdungsbruch der Gewindestangen lag (siehe Abbildung 2-16).



Abbildung 2-16: Ermüdungsbruch der eingeklebten Gewindestange, aus [22]

## 2-3.3 SCHRAUBEN

[4]

Der in Kapitel 3 und 4 dargelegte experimentelle Teil dieser Arbeit baut auf den bisherigen Erkenntnissen in den angeschnittenen Bereichen auf und kann diese möglicherweise erweitern. Wie in der Folge erläutert wird, wurden bereits Versuche zum Ausziehverhalten von Möbelschrauben durchgeführt. Der Vollständigkeit halber werden auch diese Ergebnisse diskutiert, jedoch muss gesagt werden, dass Möbelschrauben relativ klein sind und die Resultate daher nur bedingt für die im empirischen Teil durchzuführenden Tests verwendet werden können. Des Weiteren kann gesagt werden, dass zur Ermüdungsfestigkeit von modernen Holzschrauben lt. dem Kenntnisstand des Verfassers dieser Arbeit bisher noch keine Versuche veröffentlicht wurden.

### 2-3.3.1 Tragverhalten von Schrauben

In diesem Abschnitt werden die Erkenntnisse aus dem Bericht von Kreuzinger und Mohr [4] zusammenfassend dargelegt. Laut [4] haben sich drei verschiedene Autoren mit dem Ausziehverhalten von Schrauben unter oft wiederholten Einwirkungen befasst. Dabei wurden Schraubengrößen verwendet, die eher den Möbelbau als den Ingenieurholzbau betreffen.

Bröker und Krause [24] haben für die Versuche neun verschiedene Schrauben in vorgebohrten Löchern verwendet. Dazu nahmen sie Trägermaterialien wie Fichtenvollholz, Flachpressplatte und Buchenvollholz. Die Versuche wurden nach dem Treppenstufenverfahren (siehe Abs. 2-5.3) durchgeführt. Dabei wurden die Proben mit  $10^4$  Lastspielen schwellend belastet. Bei der Auswertung gab es große Streuungen. Die unter Schwellbeanspruchung dynamisch beanspruchten Schrauben haben, im Vergleich zu den im rein statischen Versuch ermittelten Ausziehungskräften, die in Tabelle 2-8 ausgewiesenen Prozentanteile erreicht.

**Tabelle 2-8: Prozentanteile dynamisch zu statisch, aus [4]**

Fichtenvollholz:	21 % bis 86 %
Flachpressplatte:	57 % bis 83 %
Buchenvollholz:	36 % bis 86 %

Aus Tabelle 2-8 ist ersichtlich, dass das Trägermaterial einen gewissen Einfluss auf die Höhe des Schraubenhaltevermögens hat.

Burmester [25] hat seine Versuche mit verschiedenen Belastungsgraden durchgeführt. Er hat seine Proben einer Zugschwellbelastung bis maximal  $2 \cdot 10^6$  Lastwechseln ausgesetzt. Bei der Auswertung der ertragbaren Beanspruchung erhielt er Prozentanteile zwischen 30 und 50 % der statischen Kurzzeitfestigkeit. Die Ergebnisse waren von der Holzart und von der Einschraubrichtung (radial oder tangential) abhängig. Burmester [25] hat auch festgestellt, **dass das Haltevermögen des Holzes unter der oft wiederholten Beanspruchung teilweise höher als die Schraubenfestigkeit war. Daraus lässt sich erkennen, dass die Versagensursache unter oft wiederholten Beanspruchungen nicht beim Holz, sondern beim verwendeten Verbindungsmittel liegt.**

Trübswetter [26] hat für seine Versuche zwei Holzbauteile (Spanplatte und Fichte) verwendet. Er hat Schrauben, Schraubennägel und verschiedene Klammern auf ihren Auszieh Widerstand untersucht. Dabei hat er die Verbindungsmittel in der Scherfuge zwischen den beiden Holzbauteilen einer schwellenden Beanspruchung ausgesetzt. In Tabelle 2-9 ist der Auszieh Widerstand der verschiedenen Verbindungsmittel nach  $2,1 \cdot 10^4$  Lastwechseln aufgelistet.

**Tabelle 2-9: Auszieh Widerstand nach  $2,1 \cdot 10^4$  Lastwechseln, aus [4]**

Schrauben:	85 %
Schraubennägel:	52 %
Klammern:	44 % bis 65 %

Trübswetter [26] verglich die Proben mit dem Mittelwert der unbelasteten Vergleichsproben. Aus diesen Versuchen lässt sich eine deutliche Verringerung der Restfestigkeit feststellen.

Wie schon erwähnt sind die oben genannten Versuche nur für den Möbelbau und nicht für den Ingenieurholzbau durchgeführt worden. Es lässt sich aber trotzdem feststellen, dass das Problem eher bei den Verbindungsmitteln aus Metall (Stahlversagen) liegt und nicht beim Holz.



---

## 2-4 HOLZSCHRAUBEN

---

### 2-4.1 GESCHICHTE DER HOLZSCHRAUBEN

[27]

Um einen geschichtlichen Überblick geben zu können, muss die Vergangenheit genau begutachtet werden. Wie in allen Bereichen der Wissenschaft kann ein fortschrittlicher Prozess nur durch genaues Studieren oder überlieferte Aufzeichnungen von alten Operationsmethoden erreicht werden. Aus diesem Grund nimmt das folgende Kapitel Bezug auf die ersten Anwendungen und alten Produktions- und Anwendungsmethoden von Holzschrauben, um in der Folge auf die moderne Produktion einzugehen.

Die Schraubenform ist durch Weinreben oder aufgerollten Schnüren allgemein bekannt. Der erste Nachweis für die Verwendung als bronzene Holzschraube wurde gemeinsam mit anderen Relikten aus der Zeit von 350 v. Chr. in der Stadt Gradac in der Herzegowina gefunden.

Da Vinci hinterlässt mit seinem Lebenswerk eine Zeichnung für eine Maschine für das Zuschneiden von Gewinden in Holzstangen, die aus der Zeit um 1500 stammt. Ein halbes Jahrhundert danach wurden Schrauben aus Eisen für die Fertigung bzw. Befestigung von Leder und Holzelementen von Musikinstrumenten verwendet. 1760 gelang den Briten John und William Wyatt ein Meilenstein in der Fertigung von Schrauben. Die patentierte Produktion ermöglichte es zehn Schrauben pro Minute pro Maschine zu erzeugen. Nur wenige Jahre später konnte dieses Verfahren weiterentwickelt und nahezu perfektioniert werden. Durch den Einsatz von Drehbänken konnten Schrauben mit besserer Qualität erzeugt werden. Gleichzeitig kam es durch den Produktivitätsanstieg zu einer Preisminderung von Schrauben. Anfang des 19. Jahrhunderts eröffnete in den Vereinten Staaten die erste Schraubenfabrik und der Fokus der Schraubenproduktion verschob sich von Großbritannien in die USA. Während des 19. Jahrhunderts wurde ebenfalls die Herstellung von Schrauben aus Draht beschrieben, aber auch die maschinelle Erzeugung mit den einzelnen Verarbeitungsschritten waren wichtige Punkte der Weiterentwicklung.

Die Erkenntnis, dass eine hohe Gewindesteigung zu weniger Umdrehungen beim Einschrauben führt, stammt ebenfalls aus der Zeit. Da die Zugkraft in Schraubenachse aber über die Gewindeflanken übertragen wird, führt für Stahl-Stahl-Verbindungen eine derartige Steigung und gleichzeitige Reduzierung der Gewindeflankenfläche zur Abnahme der Lastübertragung.

Ebenfalls in den Vereinigten Staaten und Großbritannien kam es noch in demselben Jahrhundert zur Anwendung von Drehmaschinen und Drehmeißeln, die mehrere Produktionsschritte bewältigen konnten. Erst 1848 eröffnete in der Nähe von Wien die erste Schraubenfabrik Österreichs. In Abbildung 2-17 ist die geschichtliche Entwicklung von Holzschrauben ersichtlich.

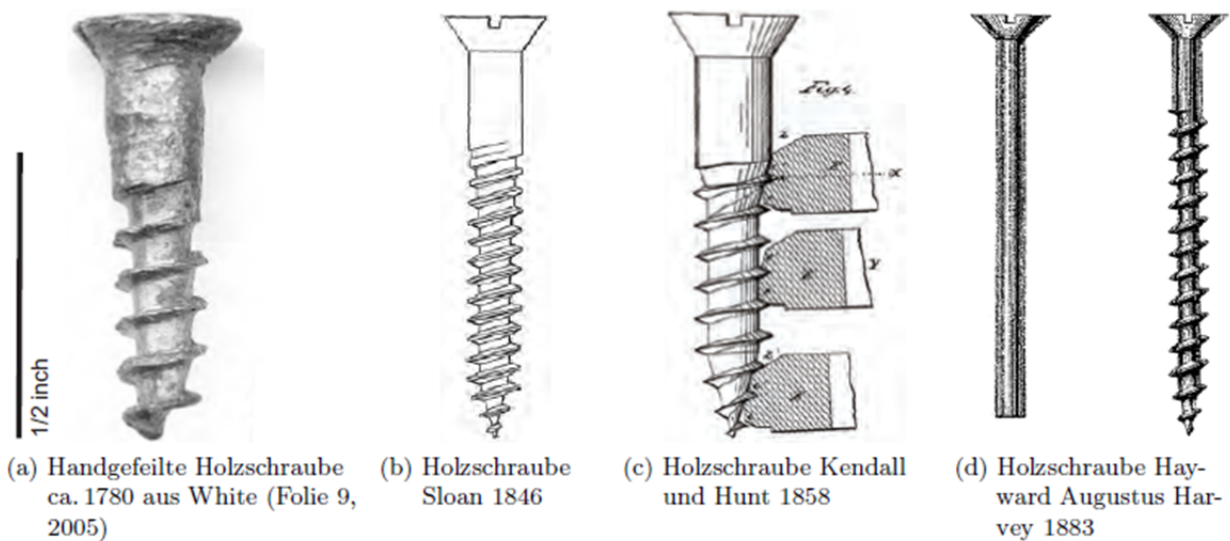


Abbildung 2-17: Geschichtliche Entwicklung von Holzschrauben, aus [27]

## 2-4.2 PRODUKTION / MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN

[27]

Nach einem kurzen Überblick über die Anfänge und Meilensteine der Produktion, widmet sich die Arbeit nun der gegenwärtigen Verfahrensweise in Hinblick auf die Herstellung von Holzschrauben. Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass heute Holzschrauben mit einem Durchmesser von bis zu 14 mm bei Raumtemperatur durch mehrstufiges Fließpressen hergestellt werden. Nachdem der Draht aus niedriggekohltem und borlegiertem Stahl abgelängt wurde, kommt es mit einem Schlag zum Formen des Schraubenkopfs und mit einem zweiten Schlag in einem anderen Gesenk, werden der Innen- sowie Außenangriff, die Herstellerprägung sowie Länge und ggf. Unterkopfrippen geformt. Danach wird das Gewinde zwischen einander verschiebenden mit Rillen versehenen Flachbackenwalzen aufgerollt. Das Formen der Spitze und Entfernen des überschüssigen Materials bilden die letzten Schritte.

Vorreiter für dieses Verfahren waren erneut US-Amerikaner und Engländer, die herausfanden, dass durch das Einblasen von Luft, dem Roheisen Kohlenstoff in der Bessemerbirne entzogen wird. Dadurch kann eine Kaltverformung im Laufe des Walzvorganges ermöglicht werden. Des Weiteren wurde die Erkenntnis gewonnen, dass Gewinde auf Schraubenrohlinge aufgerollt werden können. Durch das Verfahren der Kaltverformung kommt es zu einer Materialeinsparung und einer Vergütung des Stahls. Eine raschere Herstellung von Schrauben mit größerem Gewindeaußendurchmesser konnte durch das Verfahren ebenfalls realisiert werden.

Wird das Gewinde auf eine Schraube mit zwei Flachbacken aufgerollt, so gibt es eine ruhende und eine bewegliche Flachbacke. Die Rillentiefe nimmt dabei zu, je nach Länge des Rollweges. Ein Fräsrad kommt bei eventueller Halbspitze zur Anwendung und stellt damit einen möglichen zweiten Produktionsschritt dar. Die Gewindesteigung ist abhängig vom Formänderungsvermögen. Oft gilt die

höhere Wahrscheinlichkeit von Rissen im Stahl bei der Kaltumformung als Limit, das die höchstmögliche Gewindesteigung angibt. Dieses Verfahren, das ein Fließpressverfahren darstellt, ermöglicht lt. [27] die Produktion von Holzschrauben mit einer Maximallänge von bis zu 600 mm.

Nach dem Press- bzw. Formgebungsvorgang erfolgt das „Härten“ der Schraube in speziellen Härteöfen. Dieser Vorgang, zugleich der Grund für die hohe Zugfestigkeit aber Sprödigkeit der Schrauben, wird von den jeweiligen Herstellern unterschiedlich durchgeführt und ist in der Regel streng geheim.

Zu den letzten Prozessen gehören das Anlassen unter einer Schutzatmosphäre und die Schlussvergütung in Öl. Diese dienen der Zähigkeit, Zug-, Biege- und Torsionsfestigkeit. Ein Legierungsbestandteil ist Bor, der zur Optimierung des Endprodukts beiträgt. Wenn das Beizen abgeschlossen ist, wird mit dem elektrolytischen Verzinken oder dem nichtelektrolytischen Aufbringen von Zinklamellenbezügen fortgefahren. Da bei diesem Vorgang Wasserstoff in das Material eindringen kann, wird beim anschließenden Tempern bei Temperaturen von über 200 °C der Wasserstoff aus dem Material entfernt. Am Ende können organische Beschichtungen angebracht werden, die beim Eindrehen durch die dabei entstehende Wärme weich werden und als Gleit-, bzw. Klebstoff zwischen Holz und Schrauben im ausgekühlten Zustand dienen.

Zu den wichtigsten Merkmalen einer Schraube zählt auch ihre Länge. Der Trend zu immer längeren Schrauben ist deutlich festzustellen. Obwohl der Durchmesser Ende des 20. Jahrhunderts nur zwischen 6 bis 20 mm betrug, konnte bereits damals eine Länge von 180 mm realisiert werden. Heute können Längen von bis zu 3000 mm erreicht werden.

Ein weiteres Hauptmerkmal ist die Kopfform. Anfangs wurden quadratische Köpfe mit zentrischen Sägeschlitzen erzeugt. Durch die Wahrscheinlichkeit, beim Schrauben abzurutschen und Werkzeug, Schraubkopf oder Werkstück zu beschädigen, wurde weitergeforscht, um andere mögliche Lösungen für Schraubköpfe zu finden. 1930 wurde die Kreuzschlitzschraube entwickelt, welche die bis dahin fortschrittlichste Erfindung auf dem Gebiet war. Später wurde auch die Innensechskantschraube entwickelt, mit der das Zehnfache des bis zu diesem Zeitpunkt max. möglichen Drehmoments übertragen werden kann. Weitere Schraubformen wie die Vierrundförmige Torx wurden ebenfalls entwickelt. Die weiterentwickelte Form dieser Schraubenart nennt sich Torx Plus.

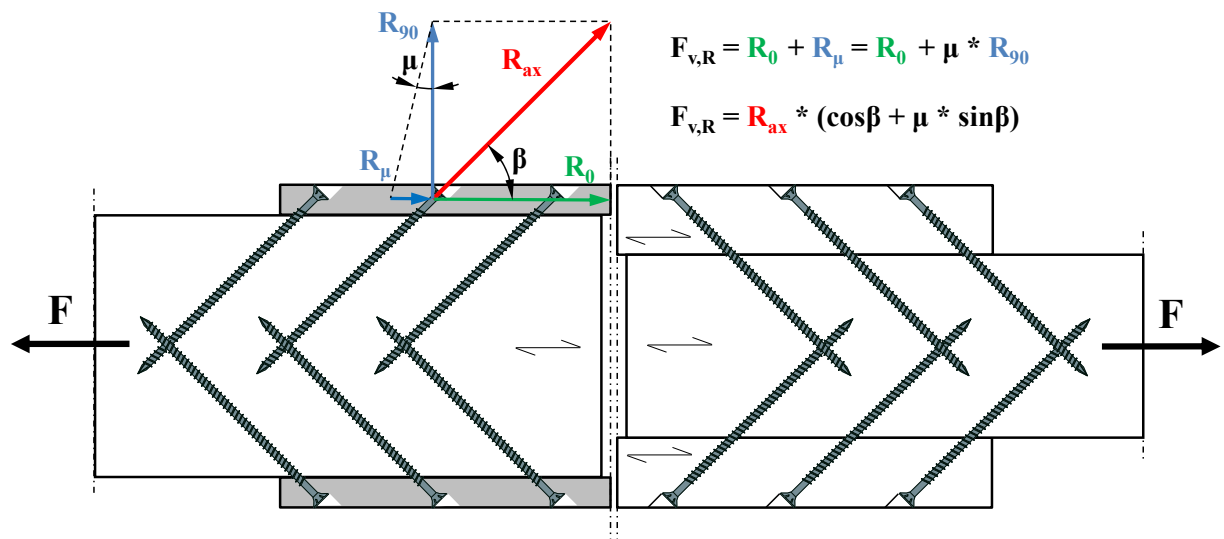
### 2-4.3 AXIAL BEANSPRUCHTE SCHRAUBEN

Nachdem ein kontextueller Rahmen für die Arbeit begründet und dargelegt wurde, wird in diesem Abschnitt dazu übergegangen, weiter ins Detail zu gehen. Dabei wird auf die Anwendungen und Versagensmechanismen der selbstbohrenden Holzschraube bei axialer Beanspruchung eingegangen. Des Weiteren werden praktische Beispiele genannt. Die Beschreibung und kurze Diskussion zu diesem Thema dient der Nachvollziehbarkeit des empirischen Teils der Arbeit.

[28], [1]

Selbstbohrende Holzschrauben haben bei axialer Beanspruchung nicht nur eine hohe Tragfähigkeit, sondern auch eine hohe Steifigkeit. Da sie auch schnell und wirtschaftlich montiert werden können, gehören sie zu den meist verwendeten Verbindungsmitteln im modernen Ingenieurholzbau. Bei den Anwendungen der selbstbohrenden Holzschrauben wird laut Ringhofer et al. [28] zwischen aktiven und passiven Anwendungen unterschieden.

Man spricht von einer aktiven Anwendung selbstbohrender Holzschrauben, wenn die Schraube dazu dient, um zwei Bauteile miteinander zu verbinden, oder besser gesagt, um die Kraft von einem in das andere Bauteil zu übertragen. Dabei soll die Kraft möglichst axial auf die Schraube wirken. Betrachtet man den Ingenieurholzbau, dann werden die selbstbohrenden Holzschrauben nicht nur bei eindimensionalen, sondern auch bei zweidimensionalen Tragstrukturen aktiv angewendet. Die Anschlüsse werden je nach Größe der Tragstrukturen und den verwendeten Werkstoffen auf unterschiedliche Art und Weise ausgelegt. Unter eindimensionalen Tragstrukturen werden Fachwerkknoten mit Normalkraftbeanspruchung oder auch Haupt-Nebenträger-Anschlüsse verstanden. Die Anschlüsse Decke-Wand in mehrgeschossigen Hochbauten werden den zweidimensionalen Tragstrukturen untergeordnet. Axial beanspruchte Holzschrauben mit geneigter Anordnung kommen bei den oben genannten Fachwerkknoten in Form von Holz-Holz-Verbindungen und Stahl-Holz-Verbindungen zum Einsatz. Da die Haupt-Nebenträger-Anschlüsse und die Anschlüsse Decke-Wand hohen Querkräften ausgesetzt sind, werden Systemverbinder, die mit einer bestimmten Anzahl von geneigten selbstbohrenden Holzschrauben befestigt werden, eingesetzt. In Abbildung 2-18 ist eine Laschenverbindung als Holz-Holz-Verbindung (rechts) und als Stahl-Holz-Verbindung (links) dargestellt.

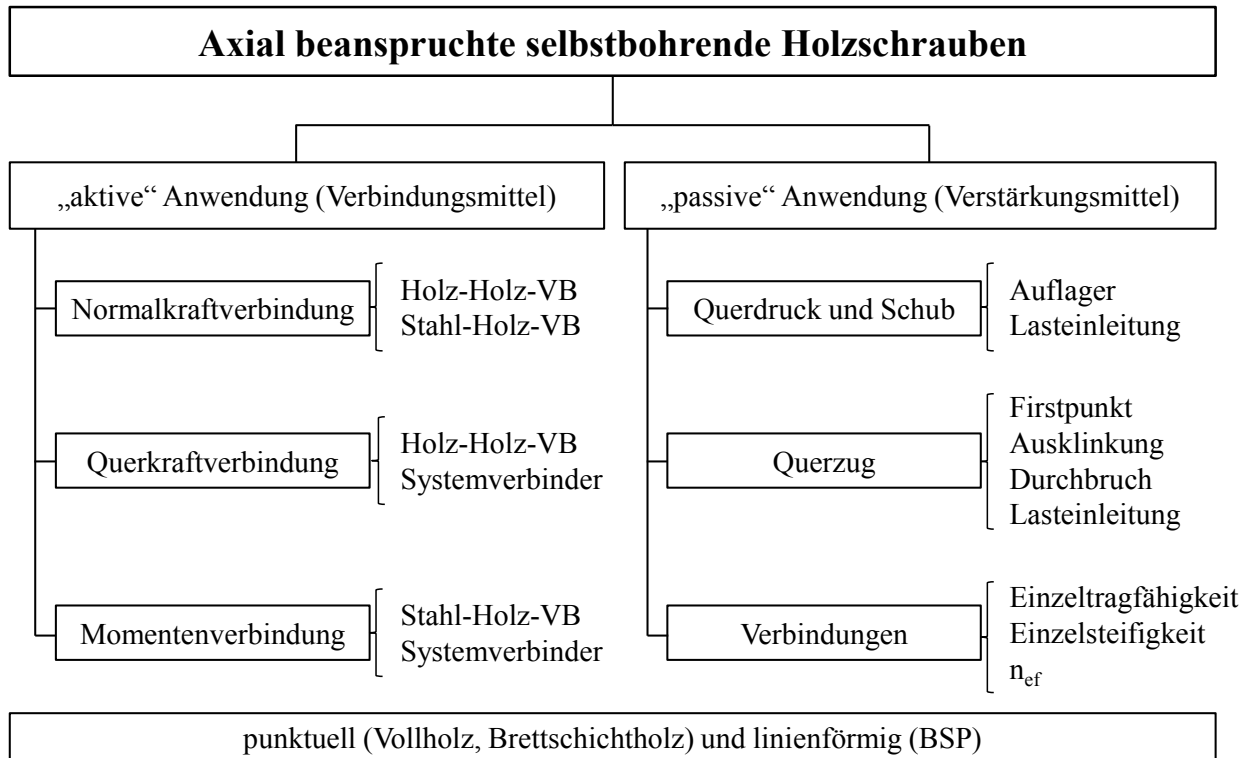


**Abbildung 2-18: Laschenverbindung mit geneigten selbstbohrenden Holzschrauben, aus [1]**

Die geneigt angeordneten Holzschrauben haben gegenüber den auf Abscheren beanspruchten Stabdübeln oder Passbolzen den wesentlichen Unterschied, dass sie im Großteil eine axiale Beanspruchung erfahren.

Von einer passiven Anwendung der selbstbohrenden Holzschrauben spricht man, wenn die Schrauben dazu dienen, um ein Bauteil zu verstärken. Dabei werden sie in ein Bauteil an jenen Stellen geschraubt, die quer zur Faserrichtung entweder zug-, druck- oder schubbeansprucht werden. Darüber hinaus dienen die Schrauben auch zur Verstärkung von auf Abscheren beanspruchten Verbindungen mit Stabdübeln oder Passbolzen. Durch eine fachgerechte Positionierung können sie nicht nur die Einzeltragfähigkeit und Einzelsteifigkeit der Verbindungen verbessern, sondern sie können auch die Differenz der vorhandenen und effektiv wirksamen Verbindungsmittel verringern.

In Abbildung 2-19 sind die bereits erwähnten Anwendungsgebiete der selbstbohrenden Holzschrauben übersichtlich dargestellt.



**Abbildung 2-19: Anwendungsgebiete selbstbohrender Holzschrauben, aus [28]**

### 2-4.3.1 Versagensmechanismen axial beanspruchter Schrauben

Aus der EN 1995-1-1 [29] geht hervor, dass bei axial beanspruchten Schrauben folgende Versagensmechanismen zu berücksichtigen sind, wobei Stahlbruch und Herausziehen zu den wesentlichen Versagensmechanismen für große Verbindungen zählen:

- Stahlbruch des Schraubenquerschnitts

Bei einer axial beanspruchten Schraubenverbindung kann es vorkommen, dass die Schraube aufgrund von Stahlbruch versagt. Schickhofer [30] gibt an, dass „[...] der Bruch sowohl am Übergang von Kopf zum Schaft oder im Gewindeteil auftreten kann.“

- Stabilitätsversagen infolge Druckbeanspruchung

Schickhofer [30] gibt für das Stabilitätsversagen infolge Druckbeanspruchung an: „[...] Es kann bei hohen Belastungen zum [...] Ausknicken der Holzschraube oder dem Überschreiten der Querdruckfestigkeit im, unmittelbar an die Schraubenspitze anschließenden Bereich des Holzes bzw. Holzwerkstoffes, kommen.“ In Abbildung 2-20 sind Beispiele für ein solches Versagen dargestellt.



Abbildung 2-20: Ausknicken der Holzschrauben infolge Druckbeanspruchung, aus [30]

- Holzversagen bzw. Herausziehen des Gewindes

Des Weiteren gibt Schickhofer [30] für das Versagen auf Herausziehen bzw. Hineindrücken an, dass es bei „[...] entsprechender Belastung zum Überschreiten der Scher- bzw. Schubfestigkeit im, durch die Umrisslinie des Schraubengewindes gebildeten Bereich des Holzes kommen kann.“

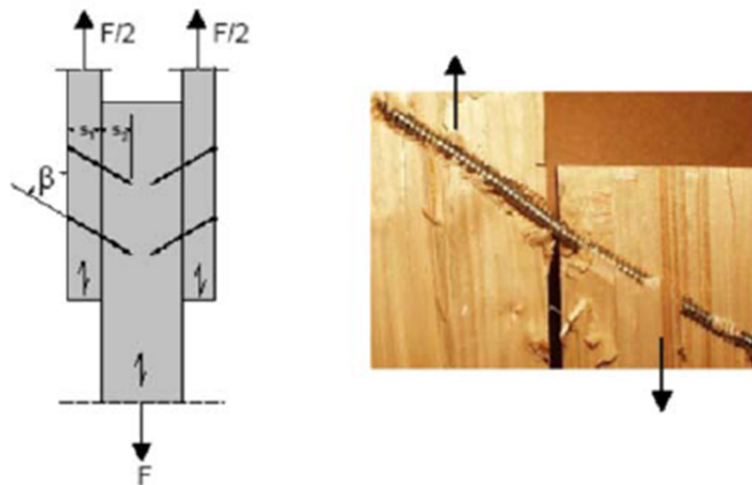


Abbildung 2-21: Vollgewindeschrauben, beansprucht auf Herausziehen, aus [30]

- Kopfdurchziehen (bei Holz-Holz-Verbindungen)

Das Versagen durch Kopfdurchziehen wird von Schickhofer wie folgt beschrieben: „[...] Bei entsprechenden geometrischen Verhältnissen der zu verbindenden Holzteile und in Abhängigkeit der verwendeten Schraubenart kann es bereits vor dem Versagen auf Herausziehen zu einem Einpressen des Schraubenkopfes in das Holz und [...] Durchziehen des Schraubenkopfes durch das Holz- bzw. Holzwerkstoffmaterial kommen.“





**Abbildung 2-22: Kopfdurchziehen von Holzschrauben, aus [30]**

- Linien- bzw. Blockscheren der Verbindung

Unter einem Blockscherversagen wird ein Holzversagen verstanden, welches durch Belastung einer Schraubengruppe hervorgerufen wird. Mahlknacht [31] schreibt in ihrer Masterarbeit, dass „[...] dabei das Holz entlang der Umrisslinien der Schraubengruppe versagt.“ Des Weiteren gibt Mahlknacht [31] an, dass „[...] die beiden Umrissflächen, die senkrecht zur Oberfläche und in Faserrichtung stehen, durch die Rollschubbelastung, und die Fläche parallel zur Oberfläche auf Höhe der Schraubenspitze durch die Querkzugbelastung, versagen.“ Somit kann die Kraft in Faserrichtung nur mehr durch den Restquerschnitt abgetragen werden. Abbildung 2-23 zeigt einen aufgeschnittenen Probekörper, der durch Blockscheren versagte. [31]



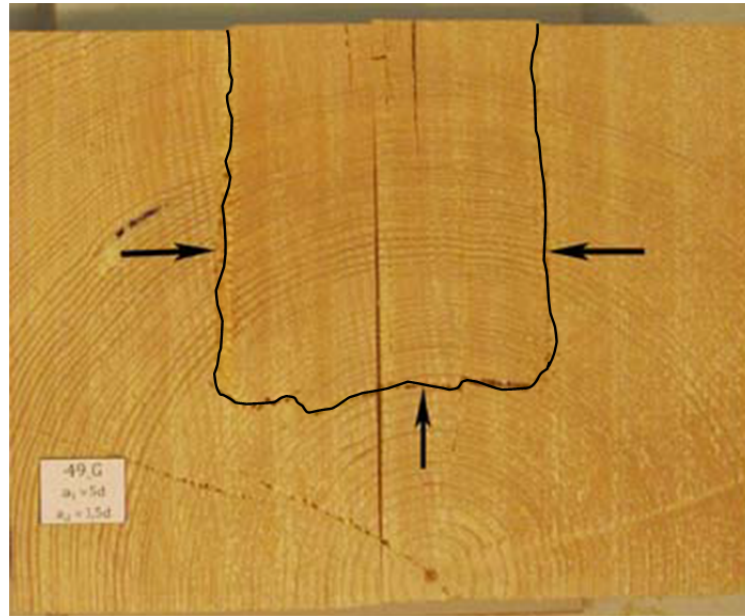


Abbildung 2-23: Probekörper, der durch Blockscheren versagte, aus [31]

- Versagen des Nettoquerschnitts

[1]

Abschließend ist noch zu erwähnen, dass bei Schraubenverbindungen natürlich auch ein Versagen des Nettoquerschnitts auftreten kann. Durch die Verwendung von Verbindungsmitteln wird der Bruttoquerschnitt des Holzes sozusagen „geschwächt“, da die Verbindungsmittel einen Teil des Querschnitts einnehmen. Für die Sicherstellung der Resttragfähigkeit des Holzes sollte daher auch bei Schraubenverbindungen ein Nettoquerschnittsnachweis geführt werden.

### Zusammenfassung

Zusammenfassend werden die nachzuweisenden Versagensmodi in Abbildung 2-24 dargestellt.

$$\mathbf{F_{ax,d} = \min} \left\{ \begin{array}{l} n_{ef} * \min \left\{ \begin{array}{l} \text{Herausziehen} \\ \text{Stahlbruch} \\ \text{Kopfdurchziehen} \\ \text{Stabilität – Knicken der Schraube} \end{array} \right\} \\ F_{Block} \dots \text{Versagen des Querschnitts auf Blockscheren} \\ F_{Netto} \dots \text{Versagen des Nettoquerschnitts} \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} \text{Versagen der VB} \\ \text{Holzversagen} \end{array} \right.$$

Abbildung 2-24: Nachzuweisende Versagensmodi

Betrachtet man jetzt die genannten möglichen Anwendungen und Versagensmechanismen der axial beanspruchten Schrauben, welche bis dato durchgehend für eine statische Beanspruchung untersucht und beschrieben worden sind, stellt sich die Forschungsfrage, wieviel diese bei n Lastwechseln aushalten?

## 2-4.4 ZULASSUNGEN FÜR SCHRAUBEN

Um die rechtlichen Anwendungsmöglichkeiten von Schrauben bei einer zeitlich veränderlichen Beanspruchung festzustellen, wurden zudem verschiedene gegenwärtig geläufige Zulassungen gesichtet.

### 2-4.4.1 ETA-12/0063 [32], ETA-12/0062 [33], ETA-12/0373 [34]

Die Inhaber dieser Zulassungen sind die Firmen SFS Intec AG und Schmid Schrauben Hainfeld GmbH. Der Verwendungszweck der Schrauben wird wie folgt beschrieben: „[...] Das Produkt darf nur statischen und quasi statischen Einwirkungen ausgesetzt werden.“

### 2-4.4.2 ETA-12/0114 [35]

Die Firma SPAX International GmbH & Co. KG schreibt in dieser Zulassung, dass „[...] die Schrauben oder Gewindestangen für die Verwendung in Verbindungen mit ruhender oder vorwiegend ruhender Belastung vorgesehen sind.“

### 2-4.4.3 ETA-12/0132 [36], ETA-11/0284 [37], ETA-11/0190 [38]

Diese Zulassungen gehören den Firmen HECO-Schrauben GmbH & Co. KG und Adolf Würth GmbH und Co. KG. Sie geben an, dass „[...] die Schrauben nur für Verbindungen verwendet werden können, die ruhender oder quasi-ruhender Belastung ausgesetzt sind.“

### 2-4.4.4 ETA-11/0030 [39]

Die Firma Rotho Blaas s.r.l gibt in ihrer Zulassung Folgendes an: “[...] The screws are intended for use for connections subject to static or quasi static loading.“

### 2-4.4.5 Z-9.1-731 [40], Z-9.1-519 [41], Z-9.1-614 [42]

Laut den Zulassungen der Firmen ROTHO BLAAS GmbH, SPAX International GmbH & Co. KG und Adolf Würth GmbH & Co. KG „[...] dürfen die Schrauben nur für vorwiegend ruhende Belastungen verwendet werden.“

Wie aus den genannten Zulassungen hervorgeht, dürfen sämtliche untersuchten Schrauben keine dynamischen Einwirkungen erfahren.

## 2-4.5 ARGUMENTATION

Wie aus den vorangegangenen Kapiteln hervorgeht, haben sich viele Autoren mit der Ermüdungsfestigkeit von Holz und Holzwerkstoffen, sowie der Ermüdungsfestigkeit von Holzverbindungen auseinandergesetzt. Dabei stellten die meisten Autoren bei ihren Dauerschwingversuchen fest, dass das Problem eher beim Verbindungsmittel aus Stahl, als beim Holz selbst, liegt. Betrachtet man die Führung des Ermüdungsnachweises aus der EN 1995-2 [12], stellt man

fest, dass Beiwerte für Dübel und Passbolzen mit  $d \leq 12$  mm sowie für Nägel, nicht aber für Schrauben, vorhanden sind. Deshalb werden im Zuge dieser Masterarbeit Versuche zur Ermüdungsfestigkeit an selbstbohrenden Holzschrauben gemacht. Die Ergebnisse aus den Versuchen können nicht automatisch für jede mögliche Verbindungsart herangezogen werden, da im Rahmen dieser Arbeit nur der Grundfall Einzelschraube auf Stahlbruch untersucht wird.

## **2-5 WESENTLICHE PARAMETER UND EINFLUSSGRÖßEN BEI ERMÜDUNGSPRÜFUNGEN**

---

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die wesentlichen Parameter und Einflussgrößen von Prüfungen zur Ermittlung der Dauerschwingfestigkeit.

### **Betriebsfestigkeit**

Der Begriff Betriebsfestigkeit wird verwendet, wenn eine zeitlich veränderliche Beanspruchung vorliegt. [43]

### **Betriebs-Schwingversuche**

Bei Betriebs-Schwingversuchen handelt es sich um Dauerschwingversuche mit betriebsähnlichen Belastungsfolgen. Dabei muss bekannt sein, wie oft eine bestimmte Beanspruchungsamplitude im Betrieb vorkommt. [44]

### **Dauerfestigkeit**

Die Dauerfestigkeit ist der um eine Mittelspannung schwingende größte Spannungsausschlag, den eine Probe oder ein Bauteil unendlich oft ohne Schädigung aushält. Sie wird auch Dauerschwingfestigkeit bezeichnet. [44]

### **Einstufen-Dauerschwingversuch**

Bei Einstufen-Dauerschwingversuchen wird am Anfang die Beanspruchung der Probe eingestellt. Diese Einstellung wird bis zum Ende der Prüfung nicht verändert. [44]

### **Ermüdungsfestigkeit**

Der Begriff Ermüdungsfestigkeit wird als Oberbegriff für Schwingfestigkeit und Betriebsfestigkeit verwendet (siehe Abbildung 2-25). [43]

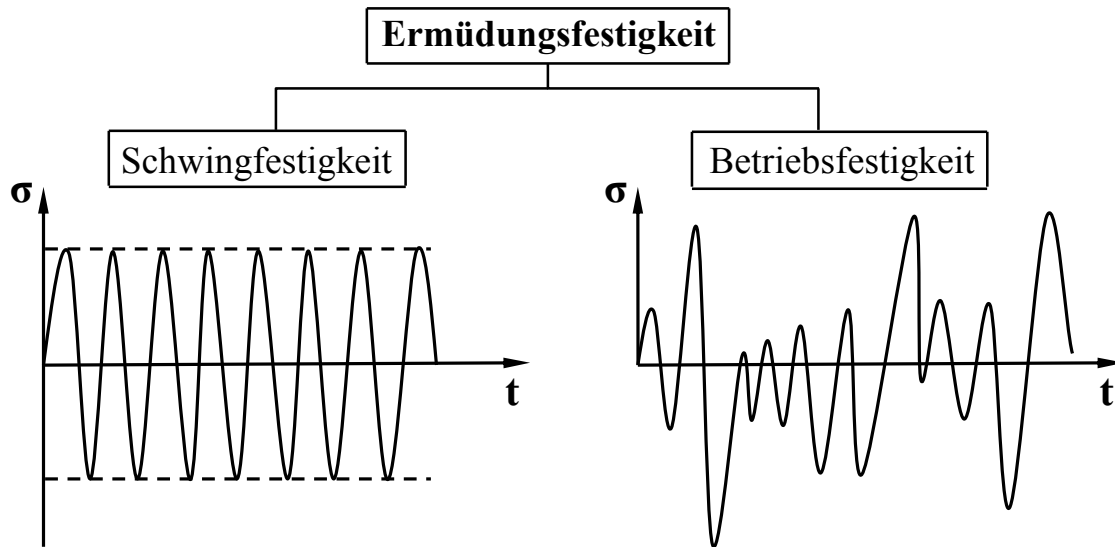


Abbildung 2-25: Ermüdungs-, Schwing- und Betriebsfestigkeit, aus [43]

## Frequenz und Frequenzeinfluss

[4], [7]

Zum Einfluss der Prüffrequenz während der Dauerfestigkeitsversuche gibt es bisher verschiedene Erkenntnisse.

Einen Frequenzeinfluss auf die Dauerfestigkeit stellten Okuyama et al. [45] fest. Dabei bewirkten höhere Prüffrequenzen bei gleicher Beanspruchung höhere Lastspielzahlen, jedoch eine geringere Zeit bis zum Bruch (Duration of Load).

Clorius et al. [46] und Clorius [47] stellten ebenso fest, dass bei höheren Frequenzen höhere Lastspielzahlen erreicht werden können als bei niedrigeren Frequenzen. Nahezu deckungsgleiche Funktionen ergab der Vergleich zwischen den aufsummierten Beanspruchungsdauern der Serien mit unterschiedlichen Frequenzen.

Bei der Untersuchung von Nagelplatten verwendeten Hayashi et al. [48] Prüffrequenzen von 100 und 1000 Hz. Dabei stellten Sie keinen Frequenzeinfluss fest.

Bei der Durchführung von Rotationsbiegeversuchen haben Fuller und Oberg [49] zwei verschiedene Frequenzen (57,5 und 177 Hz) verwendet. Dabei ergaben die Prüfungen mit 177 Hz bis zu 11 % geringere Festigkeiten.

Tokuda [50] verwendete bei der Untersuchung von Nagelverbindungen mit Holzwerkstoffen unter wechselnder Beanspruchung Frequenzen von 0,05 bis 2 Hz. Die Bruchlastspielzahl wurde dabei nicht von den Frequenzen beeinflusst.

Soltis und Mtenga [51] kamen zum Ergebnis, dass höhere Frequenzen festigkeitsmindernd wirken. Sie haben dabei jedoch nur eine geringe Lastspielzahl von maximal 40 bei der Prüfung von einschnittigen Nagelverbindungen untersucht und nach der wiederholten Beanspruchung die Restfestigkeit geprüft.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass höhere Frequenzen zu geringeren Versuchsdauern führen. Die in dieser Arbeit durchzuführenden Langzeitprüfungen zur Ermüdungsfestigkeit der Schrauben werden mit einem Hochfrequenzpulsator der Marke Rumul, der eine Prüffrequenz von über 90 Hz erreichen kann, durchgeführt. Es muss auch gesagt werden, dass die Prüffrequenz beim genannten Pulsator nicht beliebig verändert werden kann, sondern dieser immer auf eine Eigenfrequenz anschwingt.

### **Grenzwingspielzahl, Durchläufer, Bruch**

Bei der Grenzwingspielzahl  $N_{\text{grenz}}$  handelt es sich um eine Schwingspielzahl, die vom Prüfer vor dem Versuch festgelegt wird. Als Durchläufer wird eine Probe bezeichnet, die eine Lebensdauer  $N > N_{\text{grenz}}$  erreicht. Eine Probe, die vorzeitig versagt, wird Bruch genannt. [52]

### **Materialermüdungsbeiwert $k_{\text{fat}}$**

[7], [4]

Der  $k_{\text{fat}}$ -Wert wird für die Bemessung der Bauteile für oft wiederholte Beanspruchungen gebildet. Diesen Beiwert erhält man, wenn man die Ermüdungsfestigkeit (Widerstand  $R$ ) bei gegebener Zykluszahl  $N$ , Spannungsverhältnis  $R$  und Belastungsart mit der statischen Kurzzeitfestigkeit entsprechend der Belastungsart dividiert. Dabei wird bei der Belastungsart zwischen Zug, Druck und Biegung unterschieden. Im Allgemeinen werden hierfür 5 % - Fraktile verwendet.

$$k_{\text{fat}}(N, R, BA) = \frac{R | N, R, BA}{R | BA} \quad (2.20)$$

### **Mehrstufen-Dauerschwingversuch**

Bei einem Mehrstufen-Dauerschwingversuch wird am Anfang die Beanspruchung der Probe eingestellt. Danach wird die Beanspruchung der gleichen Probe stufenweise gesteigert. Eine weitere Möglichkeit ist, die gleiche Probe abwechselnd mit hohen und niedrigen Beanspruchungen des Zeit- und Dauerfestigkeitsbereichs zu prüfen. Dabei wird die Beanspruchungsdauer der verschiedenen Stufen anhand der Wöhlerkurve gewählt. [44]

### **Mittelspannung $\sigma_m$**

$$\sigma_m = 0,5 (\sigma_o + \sigma_u) \quad (2.21)$$

Bei der Mittelspannung muss das Vorzeichen berücksichtigt werden. [44]

### **Oberspannung $\sigma_o$**

Der größte Wert der Spannung je Schwingspiel wird Oberspannung genannt. [44]

### **Schwellfestigkeit**

Der Sonderfall der Dauerfestigkeit für eine zwischen Null und einem Höchstwert an- und abschwellige Spannung wird Schwellfestigkeit genannt. Dabei ist die Mittelspannung gleich dem Spannungsausschlag, die Unterspannung Null und die Schwellfestigkeit gleich der Schwingbreite. [44]

### **Schwingfestigkeit**

Das Festigkeitsverhalten von Materialproben, die einer schwingenden Belastung ausgesetzt sind, wird Schwingfestigkeit genannt. [52]

### **Schwingspiel**

Ein Lastwechsel um eine Ruhelage wird Schwingspiel bezeichnet. Die Amplitude ist der Abstand zwischen maximaler und minimaler Kraft. [52]

### **Spannungsausschlag $\sigma_a$**

$$\sigma_a = \pm 0,5 (\sigma_o + \sigma_u) \quad (2.22)$$

Hierbei muss das Vorzeichen berücksichtigt werden. [44]

### **Spannungsverhältnis R**

[7]

Das Spannungsverhältnis R errechnet sich aus dem Verhältnis der Unter- zur Oberspannung. Dabei ist die Oberspannung  $\sigma_o$  die betragsmäßig höhere Spannung.

$$R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o}; |\sigma_o| \geq |\sigma_u| \quad (2.23)$$

### **Unterschied Zeitfestigkeit und Zeitstandfestigkeit**

Der um eine Mittelspannung schwingende Spannungsausschlag, bei dem ein Bauteil vor der gegebenen Grenzschwingspielzahl zum Bruch führt, wird Zeitfestigkeit oder Zeitschwingfestigkeit bezeichnet. [52]

Als Zeitstandfestigkeit wird jene Festigkeit bezeichnet, die von der Beanspruchungszeit, bei konstantem Beanspruchungsgrad, abhängig ist. Die Zeitfestigkeit ist sozusagen eine Funktion der Zeitstandfestigkeit und der zyklischen Belastung. [7]

In Abbildung 2-26 sind jeweils die Einwirkungs- und Widerstandsseite von der Zeitfestigkeit und der Zeitstandfestigkeit schematisch dargestellt.

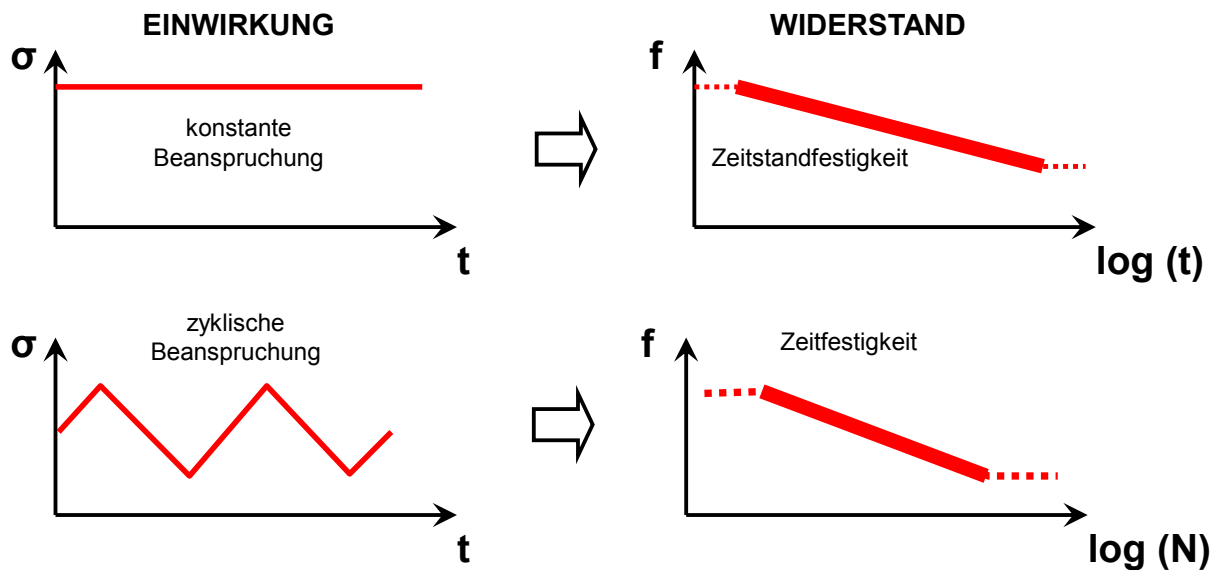


Abbildung 2-26: Unterschied zwischen Zeitfestigkeit und Zeitstandfestigkeit, aus [7]

### Unterspannung $\sigma_u$

Der kleinste Wert der Spannung je Schwingspiel wird Unterspannung genannt. [44]

### Wechselfestigkeit

Der Sonderfall der Dauerfestigkeit für die Mittelspannung Null wird Wechselfestigkeit bezeichnet. In diesem Fall wechselt die Spannung zwischen gleich großen Plus- und Minuswerten, wobei ihr Zahlenwert gleich dem der Ober- und Unterspannung ist. [44]

### Wöhlerlinie

Die Abhängigkeit der Bruchlastspielzahl  $N$  von der Spannungsamplitude wird über die Wöhlerlinie dargestellt. Sie wird auch Wöhlerkurve genannt. [52]

## 2-5.2 SCHWINGFESTIGKEIT UND DEREN ERMITTLUNG

[53]

Metallische Werkstoffe können unter zyklischen Belastungen auch dann versagen, wenn die Spannungsamplitude unterhalb der Zugfestigkeit liegt. Selbst wenn die Spannungsamplitude kleiner als die Streckgrenze der Werkstoffe ist, können zug-druck-wechselbeanspruchte Proben in vielen Fällen versagen. Somit wird das Werkstoffverhalten durch die Spannungsamplitude und die Häufigkeit ihrer Wiederholungen bestimmt. Darüber hinaus wirken sich die Beanspruchungsart, die Mittelspannung, die Probengeometrie und die Umgebungsbedingungen auf die Schwingfestigkeit aus. Deshalb ist es notwendig, bestimmte Kenngrößen zur Beurteilung des mechanischen Verhaltens der zyklisch beanspruchten Werkstoffe zu ermitteln. Diese Kenngrößen werden in den sogenannten

Dauerschwingversuchen mit geeigneten Schwingprüfmaschinen ermittelt. Der einfachste Fall ist die Aufnahme einer Spannungs-Wöhlerkurve.

Wenn man einem Werkstoff den in Abbildung 2-27 skizzierten Spannungs-Zeit-Verlauf aufprägt, dann gilt für die Mittelspannung

$$\sigma_m = \frac{\sigma_o + \sigma_u}{2} \quad (2.24)$$

für die Spannungsamplitude

$$\sigma_a = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{2} \quad (2.25)$$

und für das Spannungsverhältnis

$$R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} \quad (2.26)$$

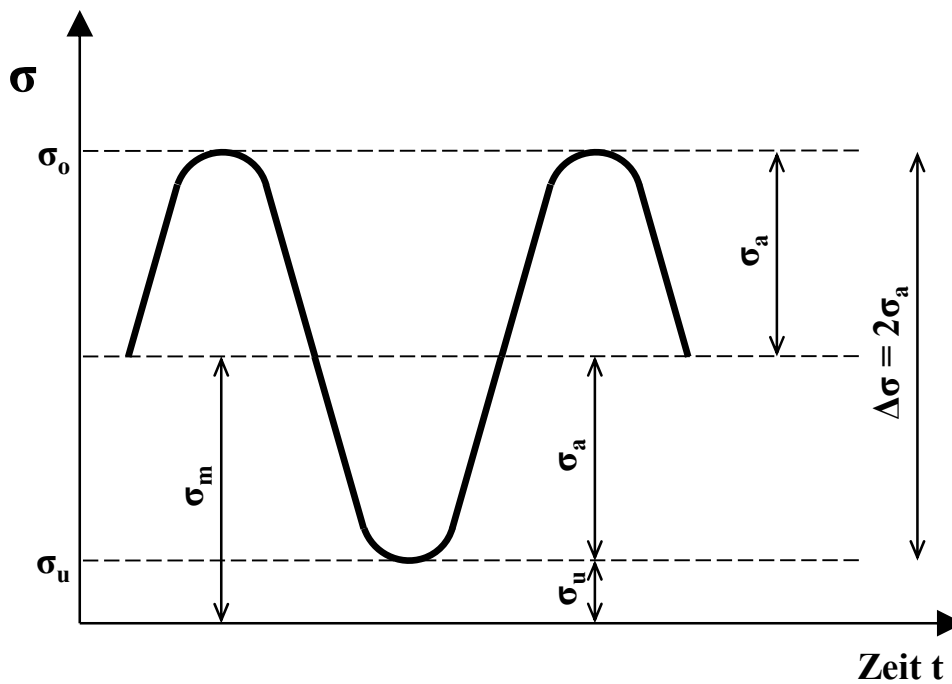


Abbildung 2-27: Spannungs-Zeit-Schaubild beim Dauerschwingversuch, nach [44]



Die zyklische Belastung wird in Abhängigkeit vom Spannungsverhältnis in folgende Bereiche unterteilt (siehe Abbildung 2-28):

- Zug-Schwellbereich  
Oberspannung  $\sigma_o$  und Unterspannung  $\sigma_u$  sind beide positiv ( $0 \leq R < 1$ )
- Druck-Schwellbereich  
 $\sigma_o$  und  $\sigma_u$  sind beide negativ ( $1 < R \leq \infty$ )
- Wechselbereich  
 $\sigma_o$  und  $\sigma_u$  haben entgegengesetzte Vorzeichen ( $-\infty < R < 0$ )

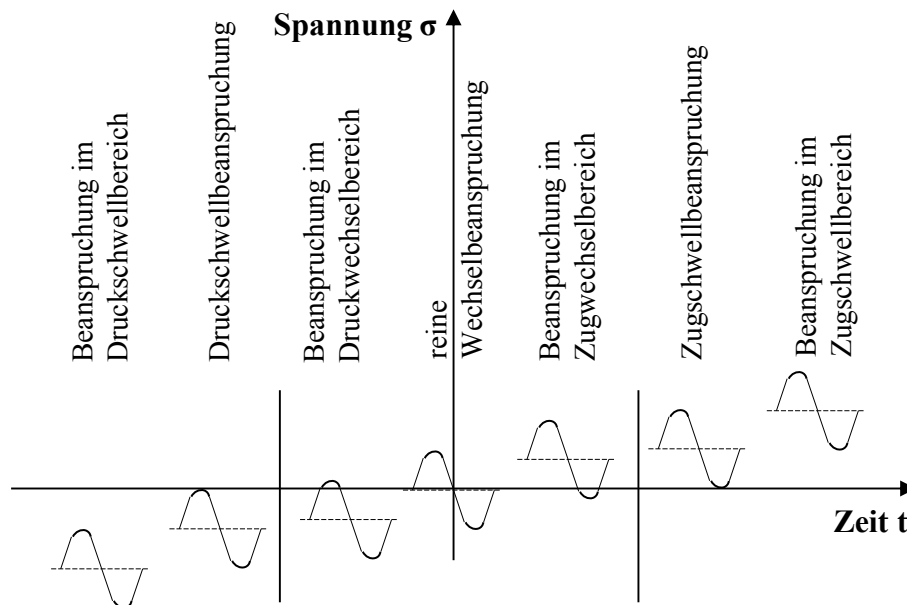


Abbildung 2-28: Bereiche der Schwingbeanspruchung, nach [53/

## 2-5.3 VERFAHREN ZUR ERMITTLUNG DER DAUERFESTIGKEIT

Zur Ermittlung der Dauerfestigkeit gibt es mehrere Verfahren, die angewendet werden können. Nachfolgend werden einige dieser Verfahren näher erläutert.

### Perlschnurverfahren

[52], [54]

Das Perlschnurverfahren ist gut geeignet, wenn aus Zeit- und Kostengründen wenige Prüflinge zur Verfügung stehen. Dieser Fall kommt in der Praxis sehr oft vor. Beim Perlschnurverfahren wird eine Last für die erste Probe gewählt. Diese Last wird nach jedem Versuch gezielt verringert, bis ein erster Durchläufer vorkommt. Dabei liegen pro Lastniveau weniger als drei Versuchswerte vor. Die statistische Absicherung der Wöhlerkurve ist wegen der geringen Probenzahl sehr gering. Daher ist das Auffüllen der Lastniveaus auf mindestens drei Versuchswerte, die im Perlschnurverfahren angesteuert wurden, sehr empfehlenswert.

### Horizontverfahren

[52], [54]

Das Perlschnurverfahren kann mit anderen Verfahren fortgesetzt werden. Ein gutes Beispiel hierfür wäre das Horizontverfahren. Bei diesem Verfahren werden die Lastniveaus erweitert. Abbildung 2-29 zeigt eine Erweiterung der Lastniveaus auf zehn Proben.

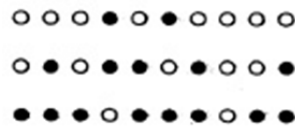


Abbildung 2-29: Erweiterung der Lastniveaus auf zehn Proben, aus [52]

### Treppenstufenverfahren

[52], [54], [9], [8]

In diesem Verfahren werden bei vorgegebener Grenzschwingspielzahl die mittlere Schwingfestigkeit und deren Standardabweichung bestimmt. Das Treppenstufenverfahren wird oft im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit anstelle des Horizontverfahrens verwendet. Dadurch wird der Prüfaufwand geringer. Jeder Versuch läuft höchstens bis zu einer vorgegebenen Grenz-Schwingspielzahl. Für die erste Probe wird eine kritische Spannungsamplitude geschätzt. Danach wird die Probe mit dieser Spannungsamplitude beansprucht. Wenn die Probe vor Erreichen der vorgegebenen Grenzschwingspielzahl bricht, dann muss für den nächsten Versuch die Spannungsamplitude um einen vorher festgelegten äquidistanten Stufensprung herabgesetzt werden. Sollte die Probe die Grenzschwingspielzahl ohne Bruch erreichen, dann wird die Amplitude für den nächsten Versuch heraufgesetzt. Die Spannungsamplitude der nachfolgenden Probe ist also immer vom Prüfergebnis der

vorhergehenden Probe abhängig. Der einzige Unterschied dieses Versuchsschemas zum einfachen Verfahren nach DIN 50100 [44] ist die äquidistante Stufenteilung. Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgt rechnerisch. Sie liefert bei der vorgegebenen Grenzspielzahl den Mittelwert der ertragbaren Spannung.

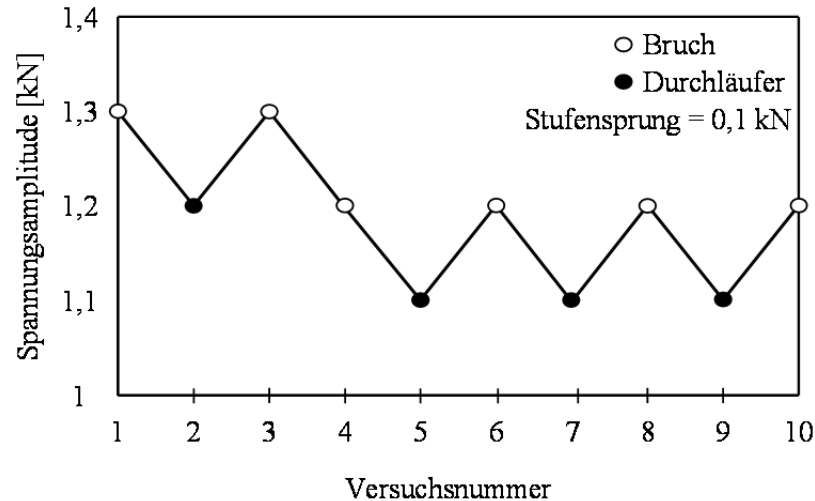


Abbildung 2-30: Treppenstufenverfahren, nach [54]

Radaj und Vormwald [8] schlagen für die Ermittlung des Mittelwertes  $F_{\text{mean}}$  und der Standardabweichung  $s_d$  folgende Formeln vor:

$$F_{\text{mean}} = F_o + \Delta F \left( \frac{\sum i H_i}{\sum H_i} + \frac{1}{2} \right) \quad (2.27)$$

$$s_d = 1,62 * \Delta F \left[ \frac{\sum H_i * \sum i^2 H_i - (\sum i H_i)^2}{(\sum H_i)^2} + 0,029 \right] \quad (2.28)$$

Dabei ist:

- $F_o$  ... Prüfkraft des untersten Horizonts;
- $\Delta F$  ... Kraftstufenhöhe;
- $i$  ... Prüfkrafthorizont;
- $H_i$  ... Häufigkeit der nicht gebrochenen Proben.

## 2-5.4 WÖHLERVERSUCH UND WÖHLERKURVE

[43], [52]

Die Wöhlerkurve oder Wöhlerlinie wurde nach August Wöhler (1819 - 1914) benannt. Sie dient zur Beurteilung des Werkstoffverhaltens unter einstufiger Schwingbelastung. Beim Wöhlerversuch werden die Proben meist einer sinusförmigen Schwingbeanspruchung unterworfen. Dabei werden gleichwertige

Proben oder Bauteile nacheinander mit gleicher Mittelspannung  $\sigma_m$  und jeweils gestaffelter Spannungsamplitude  $\sigma_a$  so lange beansprucht, bis ein Bruch eintritt. Wöhlerversuche werden auch mit konstantem Spannungsverhältnis  $R$  und gestufter Schwingbreite  $\Delta\sigma = 2 * \sigma_a$  durchgeführt.

Die jeweiligen Spannungsamplituden  $\sigma_a$  werden über der bis zum Bruch ertragbaren Schwingspielzahl  $N_B$  in einem Diagramm aufgetragen. Wenn man eine ausreichende Anzahl von Messpunkten hat und diese miteinander verbindet, erhält man die Wöhlerkurve.

Bei linearer Aufteilung ist keine sinnvolle Auflösung der Versuchsergebnisse möglich. Deshalb werden die Spannungsamplitude und die Schwingspielzahl in der Wöhlerkurve meist logarithmisch aufgetragen. Es ist auch möglich, die Schwingspielzahl logarithmisch und die Spannungsamplitude linear, aufzutragen. Durch die Skalierung erhält man für viele Werkstoffe im Zeitfestigkeitsbereich eine Gerade (siehe Abbildung 2-31).

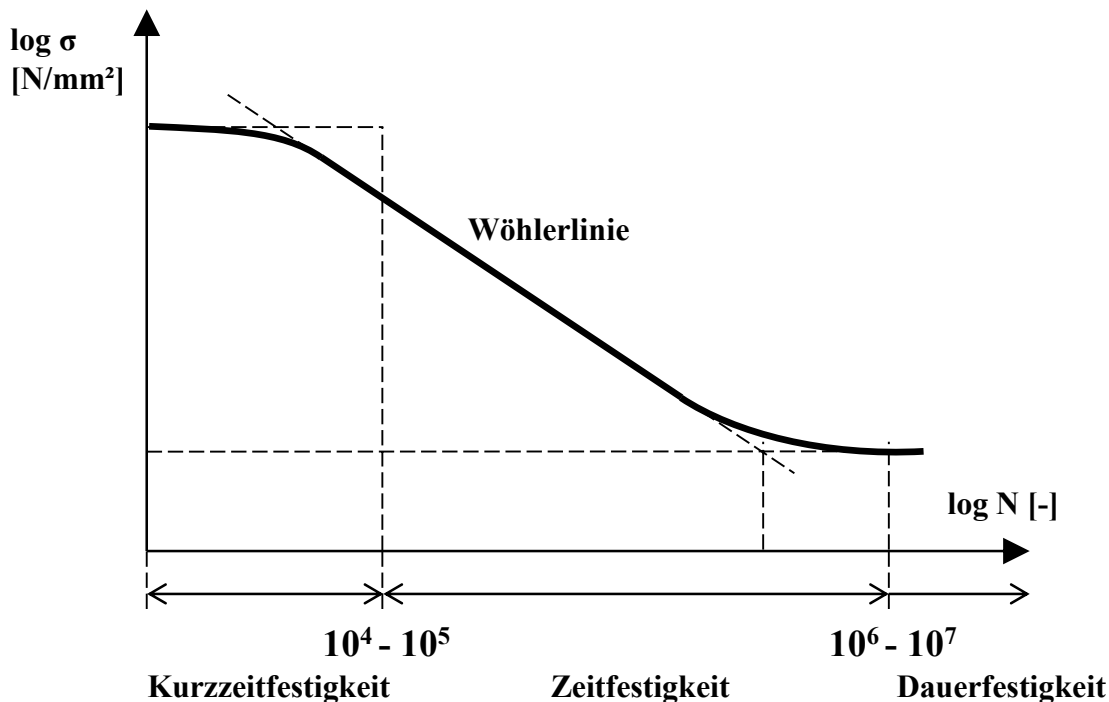


Abbildung 2-31: Wöhlerlinie, nach [52]

## 2-6 ZUSAMMENFASSUNG DER LITERATURRECHERCHE

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die in Kapitel 2 durchgeführte Literaturrecherche ergab, dass Forschungsbedarf im Hinblick auf die Ermüdungsfestigkeit von selbstbohrenden Holzschrauben besteht. Deshalb werden in den nachfolgenden Kapiteln, die Prüfplanung, sowie die durchgeführten Prüfungen und Prüfergebnisse näher erläutert.

## KAPITEL 3: MATERIAL UND METHODEN

Wie in den vorangegangenen Kapiteln bereits erwähnt wurde, hat diese wissenschaftliche Arbeit das Ziel, die Ermüdungsfestigkeit von selbstbohrenden Holzschrauben, in Form von Wöhlerlinien, zu ermitteln. Deshalb beschäftigt sich dieses Kapitel mit einer umfangreichen Erklärung der Durchführung der durchgeführten Versuche. Zudem werden die verwendeten Prüfmaschinen, sowie die Einspannelemente der Schraube beschrieben.

### 3-1 ARBEITSHYPOTHESE

Dieses Kapitel hat das Ziel, die Vorgehensweise zur Bestimmung der Schwingfestigkeit in Form von Wöhlerlinien von modernen selbstbohrenden Holzschrauben bei axialer Beanspruchung zu erläutern. Es soll ein Vergleich mit dem für das Versagen des Verbindungsmittels auf Stahlbruch repräsentativen Kerbfall 50 (bei  $N = 2 \cdot 10^6$ ) gemäß EN 1993-1-9 [10] erfolgen.

Im Folgenden werden daher die Regelungen für Ermüdung von Holz aus der EN 1995-2 [12] und Stahl aus der EN 1993-1-9 [10] beschrieben.

#### **HOLZ – EN 1995-2 [12]**

Betrachtet man die Berechnung der Zeitfestigkeit aus der EN 1995-2 [12] stellt man folgendes fest:

$$\sigma_{d,max} \leq f_{fat,d} \quad (3.1)$$

$$f_{fat,d} = k_{fat} \frac{f_k}{Y_{M,fat}} \quad (3.2)$$

Wie schon in Kapitel 2-2 erwähnt, handelt es sich beim Herausziehen der Schraube prinzipiell um ein Versagen des Holzes auf Schub. Setzt man in Gleichung (3.3) die Werte für Schubversagen ( $a = 6,7$ ;  $b = 1,3$ ) ein und für die weiteren Parameter zu  $N = 2 \cdot 10^6$ ;  $\beta = 1,0$ ;  $t_L = 1,0$ , dann erhält man folgendes Ergebnis:

$$k_{fat} = 1 - \frac{1-R}{a(b-R)} \log(\beta N_{obs} t_L) = 1 - \frac{1-R}{6,7(1,3-R)} 6,3 = f(R) = f\left(\frac{\sigma_u}{\sigma_o}\right) \quad (3.3)$$

Wie aus der oberen Formel hervorgeht, erhält man für den  $k_{fat}$ -Wert eine Funktion, welche ausschließlich von R abhängig ist.

## STAHL – EN 1993-1-9 [10]

Für den Ermüdungsnachweis für Stahl ist im EC 3-1-9 [10] folgende Formel gegeben:

$$\gamma_{FF} * \Delta \sigma_e \leq \frac{\Delta \sigma_R}{\gamma_{Mf}} \quad (3.4)$$

Nimmt man aus dem Kerbfallkatalog den Kerbfall 50 für Schrauben und Gewindestangen her, und setzt den Wert 50 N / mm<sup>2</sup> für eine Lebensdauer von 2 \* 10<sup>6</sup> Lastwechseln entsprechend ein, dann erhält man folgende Ergebnisse:

$$\Delta \sigma_R = \sigma_o - \sigma_u = 50 \text{ N/mm}^2 \quad (3.5)$$

$$R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} \rightarrow \sigma_u = \sigma_o * R \quad (3.6)$$

Aus (3.5) und (3.6) resultiert:

$$\Delta \sigma_R = \sigma_o - \sigma_o * R = \sigma_o(1 - R) \rightarrow \sigma_o = \frac{\Delta \sigma_R}{1-R} \quad (3.7)$$

Wenn man in  $k_{fat}$  den für  $\sigma_o$  ( $\sigma_o \rightarrow f_{fat,k}$ ) erhaltenen Ausdruck einsetzt, erhält man erneut eine Funktion von R.

$$k_{fat} = \frac{f_{fat,k}}{f_{t,u,k}(N=1)} = \frac{\Delta \sigma_R}{f_{t,u,k}} * \frac{1}{1-R} = \frac{50}{1100} * \frac{1}{1-R} = f(R) \quad (3.8)$$

### Gegenüberstellung

Setzt man jetzt die entsprechenden, für Zugschwellbeanspruchung realistischen, Werte für das Spannungsverhältnis R (0,10 – 0,90) ein, erhält man folgende Kurven (siehe Abbildung 3-1):

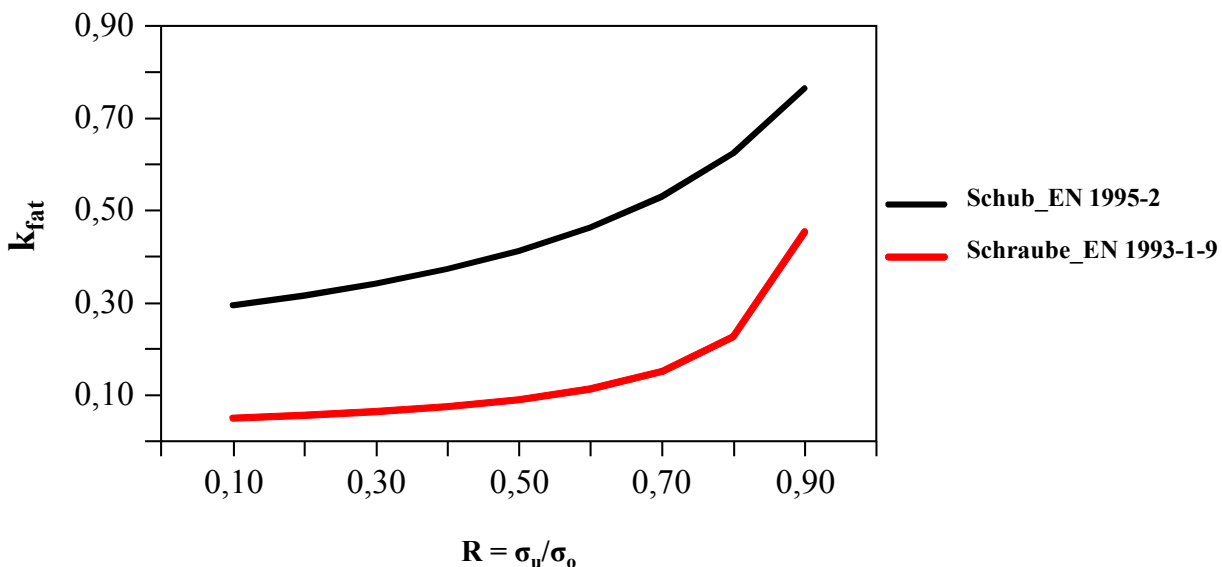


Abbildung 3-1: Gegenüberstellung Stahlbruch – Herausziehen

Auf Basis der in Abbildung 3-1 gezeigten Gegenüberstellung wird erwartet, dass die Schraube (Stahlversagen) das „schwächste Glied“ in einer Holzverbindung ist. Daher ist es aus der Sicht des Verfassers dieser Arbeit ausreichend, im Rahmen der hier vorliegenden, ersten Studien zu dieser Thematik die Schraube allein auf ihr Verhalten bei zeitlich veränderlicher Beanspruchung zu untersuchen. Zudem werden Schrauben in einer Holzverbindung in der Regel nur auf Zug beansprucht, was zur Folge hat, dass die Untersuchungen ausschließlich im Zugschwellbereich durchgeführt werden.

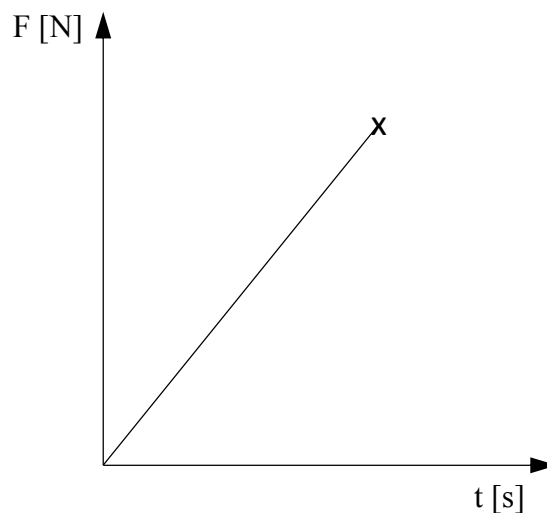
## 3-2 PRÜFPLANUNG

In diesem Abschnitt wird auf die Gesichtspunkte der Prüfplanung eingegangen. Neben der Prüfmaschine, die zur Ermittlung der Schraubenzugfestigkeit sowie der Ermüdungsfestigkeit bei  $x \cdot 10^3$  Lastwechseln dient, werden auch die Prüfmaschinen zur Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit der weiteren Belastungshorizonte genannt und beschrieben. Darüber hinaus gibt es einen Überblick über das verwendete Material (Schraube) und das Zubehör, welches für die Fixierung der Schraube benötigt wird.

### 3-2.1 VORGEHENSWEISE

Im Folgenden wird auf die Vorgehensweise bei Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit kurz eingegangen.

Zuerst soll die maximale Bruchkraft pro Verbindungsmittel bei  $N = 1$  aus einem statischen Zugversuch, an der Universalprüfmaschine, lignum\_uni\_275, der Marke Zwick / Roell, ermittelt werden. Dabei soll das in Abbildung 3-2 dargestellte Lastprotokoll angewendet werden.



**Abbildung 3-2: Lastprotokoll für den statischen Zugversuch**

Wie hier ersichtlich ist, wird die Last  $F$  so lange mit konstanter Geschwindigkeit erhöht, bis die Schraube nach einer gewissen Zeit  $t$  versagt.

Des Weiteren sollen an dieser Maschine (lignum\_uni\_275) Ermüdungsversuche durchgeführt werden, die einen Horizont in der Wöhlerlinie, für eine Lebensdauer von  $x \cdot 10^3$  Lastwechseln, bestimmen sollen. Danach werden weitere Belastungshorizonte an einem Hydraulikpulsator (siehe Abschnitt 3-3.2.2), sowie am Hochfrequenzpulsator „Rumul“ (siehe Abschnitt 3-3.2.2 und 3-3.2.3; bzw. [55]) der TVFA der TU Graz untersucht. Für die Durchführung der Ermüdungsversuche werden die in Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4 gezeigten Belastungsprotokolle verwendet, wobei  $F_o$  die Oberlast,  $F_u$  die Unterlast,  $t$  die Prüfzeit und  $f$  die Frequenz der Prüfmaschine ist.

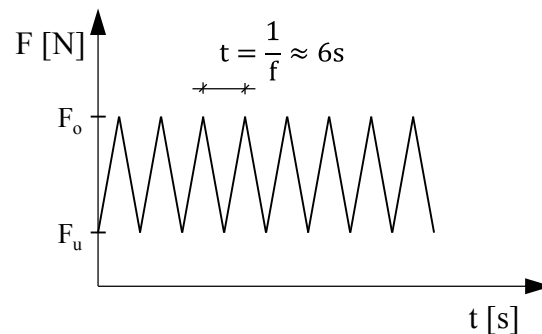


Abbildung 3-3: Lastmodell für die Ermüdungsversuche mit der Prüfmaschine lignum\_uni\_275

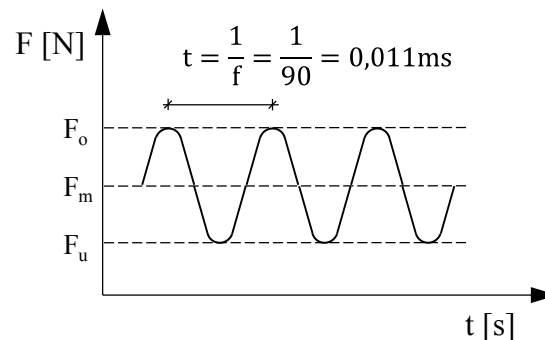


Abbildung 3-4: Lastmodell für die Ermüdungsversuche mit einem Pulsator

Es werden folgende 3 Belastungshorizonte untersucht:

- Übergang Kurzzeit- zu Zeitfestigkeit
- Zeitfestigkeit
- Übergang Zeitfestigkeit zu Dauerfestigkeit

Ziel ist es, für jeden Belastungshorizont mindestens fünf verwendbare Lebensdauern  $N$  zu ermitteln. Wie aus Abbildung 3-5 ersichtlich ist, wird für die, je Horizont aufzubringende Oberlast ein Wert geschätzt, der unter der Zugfestigkeit der Schraube liegt bzw. ein gewisser Anteil dieser ist.



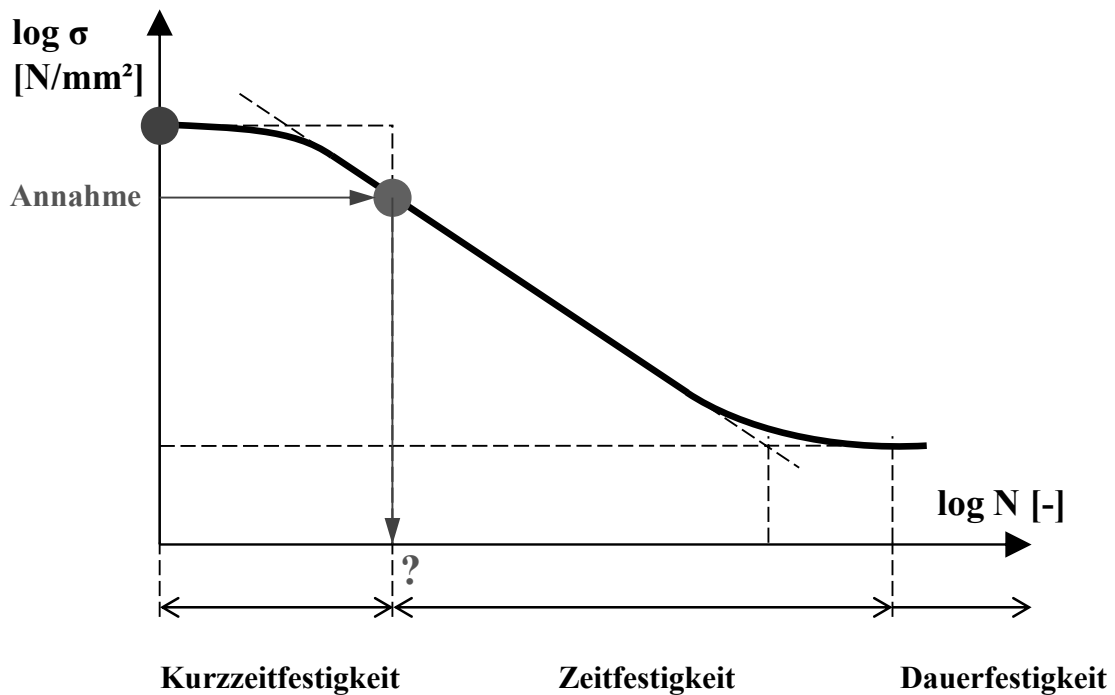


Abbildung 3-5: Grafische Darstellung des Vorgehens anhand der Wöhlerlinie, nach [52]

Die Prüfungen werden dann bis zum Bruch der Probe durchgeführt und die erreichte Lastspielzahl in das Diagramm eingetragen. Dabei wird ein Spannungsverhältnisses  $R$  zwischen Ober- und Unterspannung von 0,56 gewählt. Die Prüfdauer, welche vor Prüfbeginn für jene Horizonte mit hohen zu erwartenden Lebensdauern abgeschätzt wurde (Annahme: Einhaltung einer Prüffrequenz von rund 80 Hz) kann Tabelle 3-1 entnommen werden.

Tabelle 3-1: Ermittlung der Prüfdauer

N	R (Anzahl)	Tests pro Horizont und R	Prüfstunden (bei $f_c = 80$ Hz)	Prüftage (bei $f_c = 80$ Hz)
10000	3	6	0,63	0,03
100000	3	6	6,25	0,26
2000000	3	8	167	6,94
<b>Summe</b>		<b>60</b>	<b>174</b>	<b>7,23</b>

## 3-3 PRÜFUNGEN

### 3-3.1 ZUGFESTIGKEIT DER SCHRAUBE

Zur Ermittlung der Zugfestigkeit der Schrauben ist ein statischer Zugversuch von Nöten. Dieser wird auf der Prüfmaschine (Lignum\_uni\_275) im Lignum Test Center der Technischen Universität Graz geprüft. Die Prüfung erfolgt nach ÖNORM EN 14592 [56]. Insgesamt werden fünf Schrauben geprüft. Um die in [56] angegebene Prüfzeit von 10 Sekunden ( $\pm 5$  sec.) einzuhalten, wurde eine Prüfgeschwindigkeit von 0,7 mm/s gewählt.

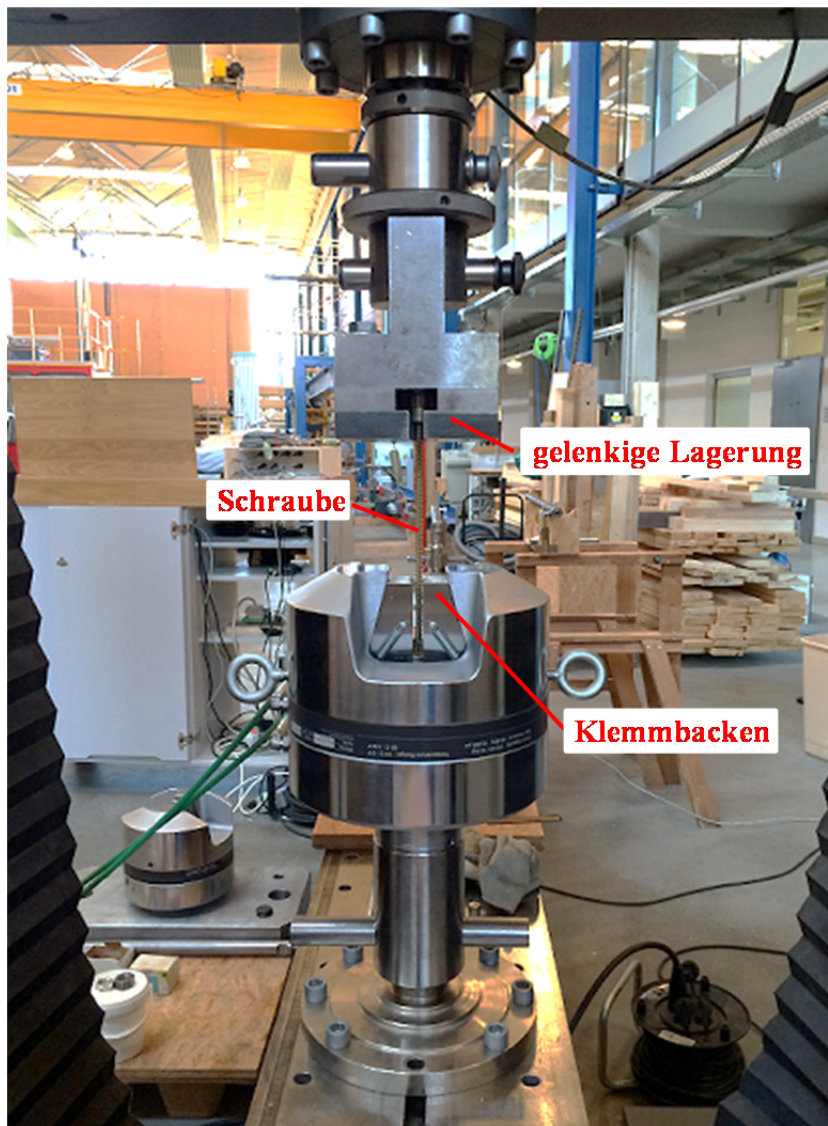


Abbildung 3-6: Universalprüfmaschine Lignum\_uni\_275

Wie aus Abbildung 3-6 ersichtlich ist, wurde die Schraube im unteren Bereich über Klemmbacken eingespannt und im oberen Bereich gelenkig gelagert.

### 3-3.2 ÜBERPRÜFUNGEN ZUR ERMÜDUNGSFESTIGKEIT

Für die Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit werden die in Abbildung 3-7 gezeigten Belastungshorizonte untersucht, um letztendlich eine Wöhlerlinie je Spannungsverhältnis R zu erhalten.

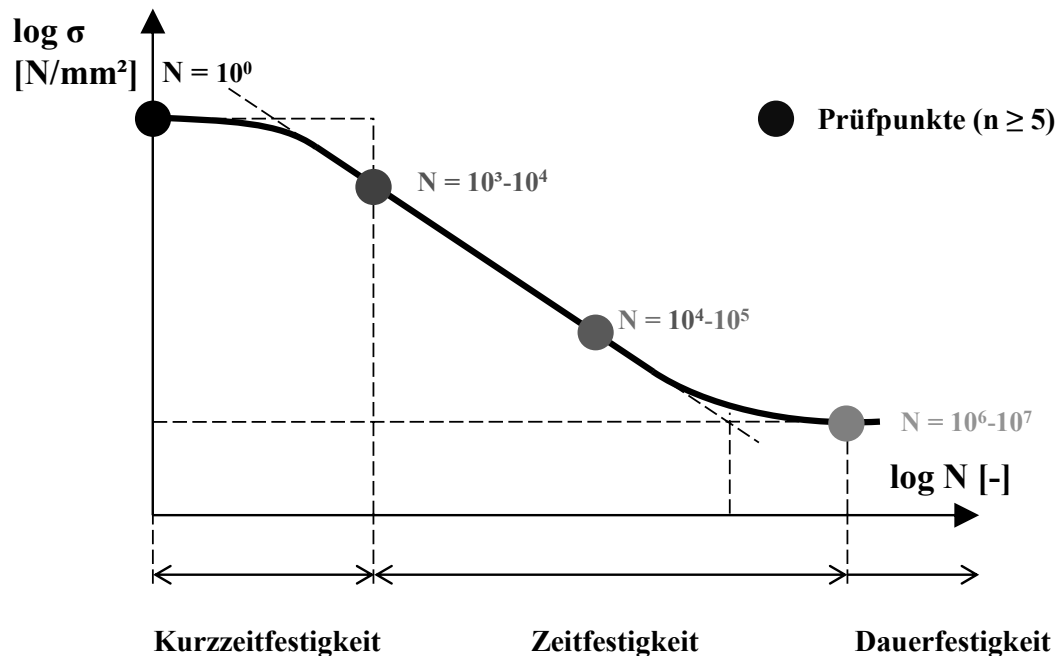


Abbildung 3-7: Untersuchte Belastungshorizonte

#### 3-3.2.1 Übergang Kurzeitfestigkeit - Zeitfestigkeit

Für den Übergang Kurzeitfestigkeit zur Zeitfestigkeit werden zwei Prüfmaschinen (Lignum\_uni\_275 und Hydraulikpulsator; letzterer von der TVFA der TU Graz zur Verfügung gestellt) verwendet. Die Anwendung der Prüfmaschine (Lignum\_uni\_275) ist nur für das Erreichen von max.  $10^3$  Lastwechseln sinnvoll, da diese im Gegensatz zu einem Pulsator relativ langsam arbeitet. Der Hydraulikpulsator wird für das Erreichen von  $10^3$  bis  $10^4$  Lastwechseln eingesetzt, da dieser eine Prüffrequenz von 8 Hz erreichen und daher die Prüfzeit vermindert werden kann. Da beide Horizonte nahe beisammen liegen, ist es zudem möglich, den Einfluss der Frequenz auf die erreichbare Lebensdauer - zumindest qualitativ - zu untersuchen. In Abbildung 3-8 ist der verwendete Hydraulikpulsator der TVFA der TU Graz dargestellt.



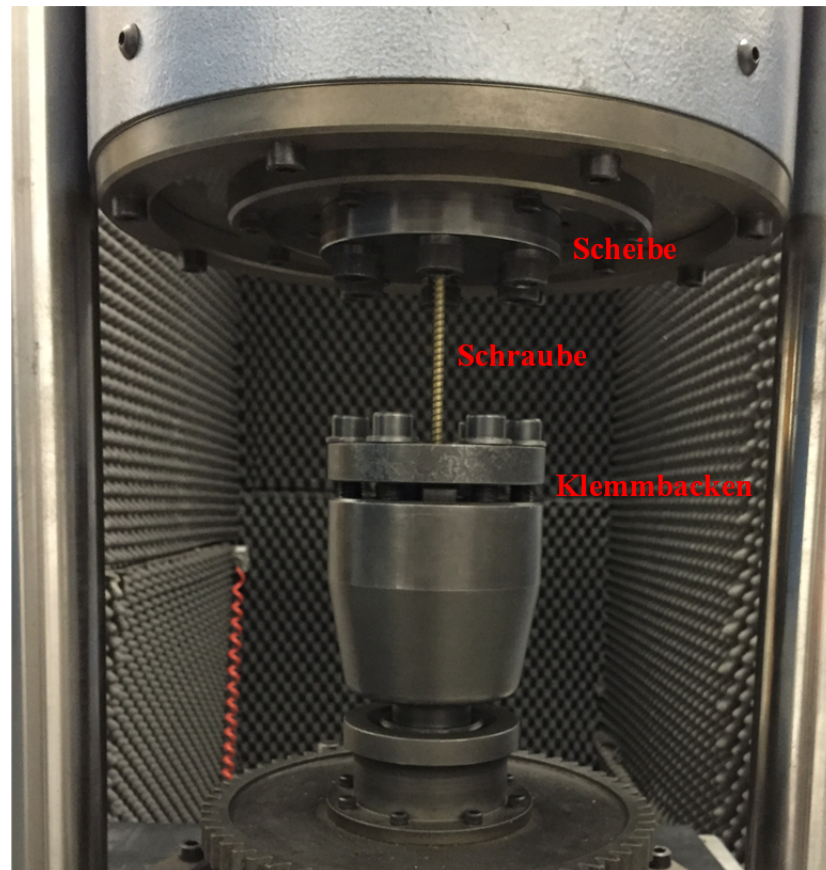
Abbildung 3-8: Hydraulikpulsator der TVFA

### 3-3.2.2 Zeitfestigkeitsbereich

Im Zeitfestigkeitsbereich wird ausschließlich ein Hochfrequenzpulsator der Marke RUMUL [55] verwendet da dieser eine Prüffrequenz von über 90 Hz erreichen kann und für die hohen zu erwartenden Lebensdauern eine wirtschaftliche Alternative darstellt. Insgesamt werden zwei Horizonte zwischen  $10^4$  und  $10^5$  Lastwechseln untersucht.

### 3-3.2.3 Dauerfestigkeit

Für die Ermittlung der Dauerfestigkeit wird, wie im Zeitfestigkeitsbereich, ein Hochfrequenzpulsator der Marke RUMUL [55], verwendet, welcher von der TVFA der Technischen Universität Graz zur Verfügung gestellt wird. Für die Auswertung der Versuche zur Ermittlung der Dauerfestigkeit wird das Treppenstufenverfahren (Erläuterung siehe Kapitel 2-5.3) angewendet. In Abbildung 3-9 ist der genannte Hochfrequenzpulsator dargestellt.



**Abbildung 3-9: Rumul Hochfrequenzpulsator [55]**

Die technischen Daten des Pulsators sind aus Tabelle 3-2 zu entnehmen. Die Beschreibungen der Schraube und der Einspannelemente sind den nachfolgenden Abschnitten zu entnehmen.

**Tabelle 3-2: Technische Daten des Pulsators, aus [55]**

Maschinenausführung	250 kN
Ober- resp. Unterlast	max. 250 kN
Statische Mittellast (Zug oder Druck)	max. 125 kN
Schwingbreite der Last (Doppelamplitude)	250 kN
Schwingbreite des Weges (Doppelamplitude)	3 mm
Spindelweg mit Feinverstellung	50 mm
Nachstellgeschwindigkeit	3,5 mm/min
Genauigkeit der Lastmessung	1 %
Lastkonstanz	0,5 %
Durchgang zwischen Säulen	370 mm



Distanz zwischen Aufnahmeplatten	750 mm
Gewicht der Maschine	ca. 800 kp
<b>19“ Elektronischschrank</b>	
Breite	520 mm
Höhe	1150 mm
Tiefe	450 mm
Gewicht Steuerschrank	ca. 80 kp
Anschluss einphasig 220 V	800 Watt

### 3-3.2.4 Zusammenfassung des Prüfprogrammes

In Tabelle 3-3 ist eine Übersicht über das gesamte Prüfprogramm ersichtlich.

**Tabelle 3-3: Übersicht über das Prüfprogramm der Ermüdungsversuche**

Horizont	Prüfmaschine	Prüfkraft [kN]	Frequenz [Hz]	Testanzahl
10 <sup>3</sup>	lignum_uni_275	30,3	0,20	5
10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>	Hydraulikpulsator	28,0	8,00	5
10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup>	Rumul	16,0	87,0	6
10 <sup>5</sup>	Rumul	9,60	89,0	5
10 <sup>6</sup>	Rumul	5,00-7,00	90,0	3

### 3-3.3 MATERIALIEN

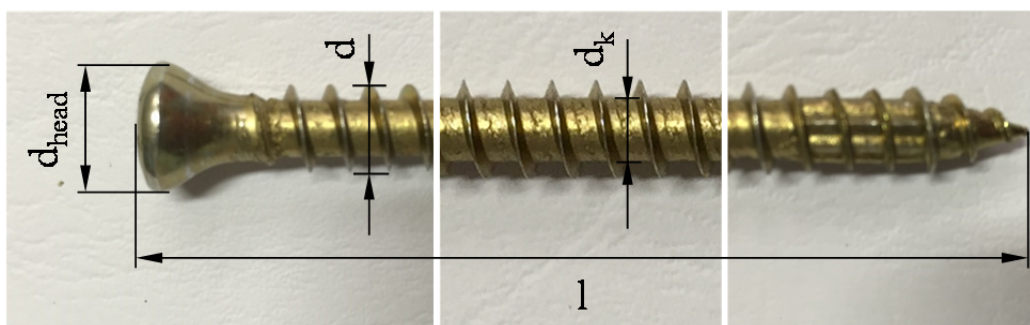
#### 3-3.3.1 Schrauben

Die gewählten Schrauben wurden von der Firma Schmid Hainfeld GmbH [34] produziert und für die Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Diese Vollgewindeschrauben besitzen einen Birnenkopf und eine Vollspitze. Die genauen Daten der Schrauben sind aus Tabelle 3-4 zu entnehmen.

**Tabelle 3-4: Technische Daten der Schraube**

Hersteller:	Schmid Hainfeld GmbH
Zulassung:	ETA-12/0373
Gewinde:	Vollgewinde
Nenn Durchmesser d:	8,00 mm
Kerndurchmesser $d_k$ :	5,20 mm
Kopfdurchmesser $d_{\text{head}}$ :	11,5 mm
Länge l:	240 mm
Kopf:	Birnenkopf
Spitze:	Vollspitze mit Verdichter

In Abbildung 3-10 sind die in Tabelle 3-4 verwendeten, geometrischen Parameter der Schraube dargestellt.



**Abbildung 3-10: Abmessungen der Schraube**

### 3-3.4 ZUBEHÖR

#### 3-3.4.1 Einspannung Schraubenkopf

Die Einspannung am Schraubenkopf erfolgt über eine Scheibe aus Stahl S235, die hierfür extra angefertigt wurde. Eine Skizze ist in Abbildung 3-11 ersichtlich.

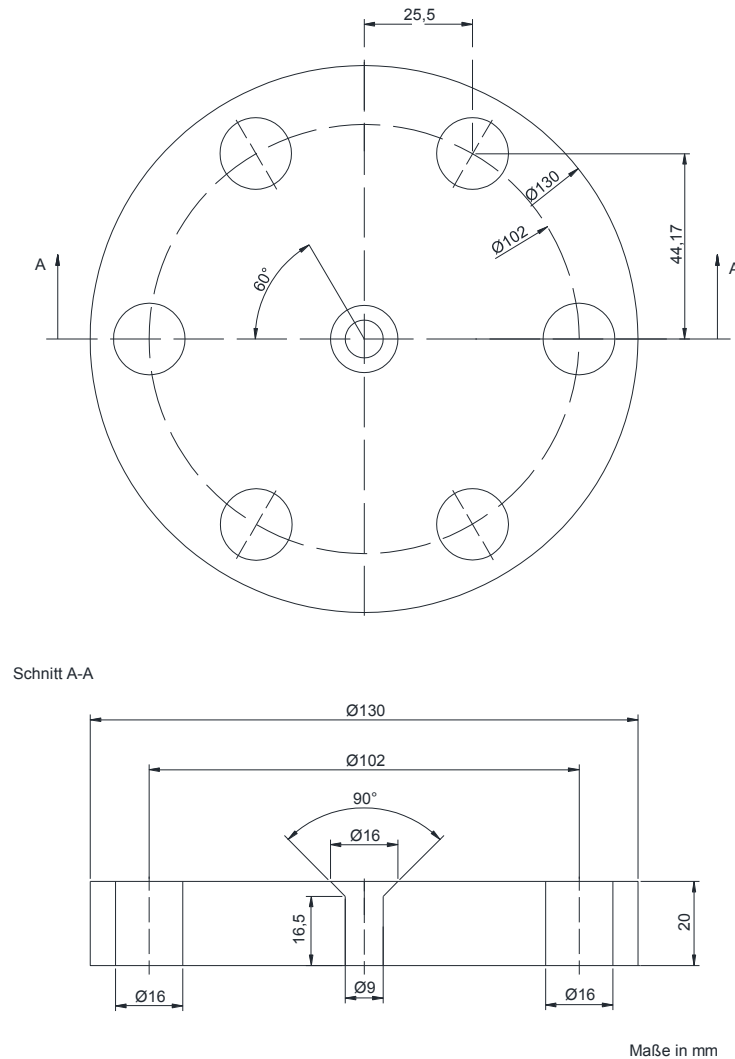
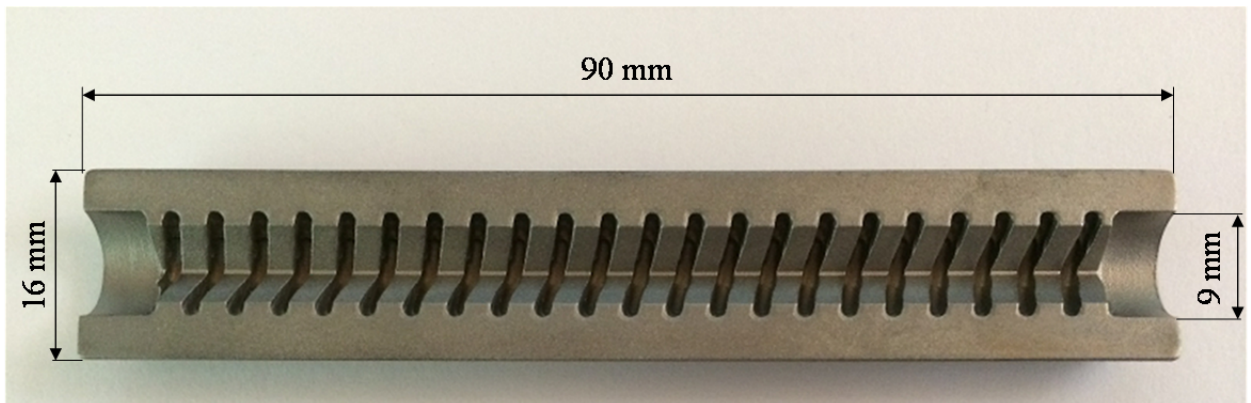


Abbildung 3-11: Scheibe für die Einspannung am Schraubenkopf



### 3-3.4.2 Einspannung Schraubenfuß

Für die Einspannung des Schraubenfußes wurden Negativformen aus Stahl gefertigt, die im unteren Teil der Schraube angebracht werden. Die Stahlummantelung wird dann über Klemmbanken gehalten. So kann ein Zusammenpressen des Gewindes und somit eine Verfälschung der Ergebnisse zufolge eines möglichen Versagens im Einspannbereich vermieden werden. Die Abmessungen der Negativform sind aus Abbildung 3-12 zu entnehmen.



**Abbildung 3-12: Negativform Einspannung**



## KAPITEL 4: PRÜFERGEBNISSE, MODELLBILDUNG UND DISKUSSION

In diesem Kapitel werden die Prüfergebnisse zusammenfassend dargelegt und diskutiert. Aufgrund des Umstandes, dass sämtliche Probekörper am Ansatz des Gewindegangs gebrochen sind, werden die Ergebnisse in diesem Kapitel auf die Tragfähigkeit (F) und nicht auf die Festigkeit (f) bezogen.

### 4-1 ZUGTRAGFÄHIGKEIT DER SCHRAUBEN

Insgesamt wurden die Versuche an fünf Schrauben gemacht. Bei jedem versagte die Schraube im oberen Bereich zwischen dem zweiten und fünften Gewindegang. In Abbildung 4-1 ist das Versagen einer Probe zu sehen.



**Abbildung 4-1: Schraubenversagen**

Die in der EN 14592 [56] vorgeschriebene Prüfzeit von 10 Sekunden ( $\pm 5$  sec.) konnte mit der gewählten Prüfgeschwindigkeit von 0,7 mm/s eingehalten werden. Die Ergebnisse weisen, wie in Tabelle 4-2 ersichtlich ist und verglichen mit Prüfungen von Holz, nur leichte Streuungen auf. In Abbildung 4-2 sind die Prüfergebnisse zudem anhand von Kraft-Maschinenweg-Kurven grafisch dargestellt.

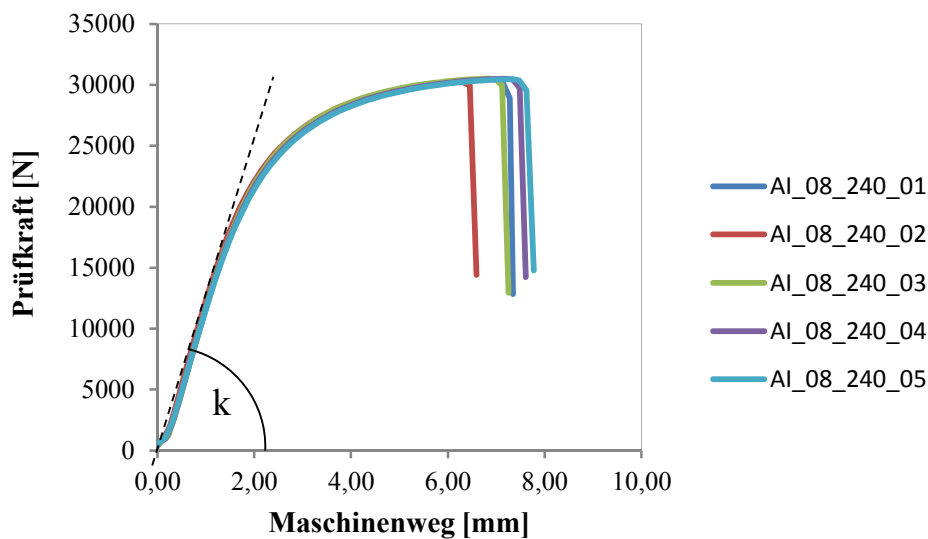


Abbildung 4-2: Prüfergebnisse zur Zugfestigkeit der Schrauben

Die maximalen Prüfkraften und Steifigkeiten (letztere bezogen auf den Maschinenweg) bei den einzelnen Proben sind aus Tabelle 4-1 zu entnehmen.

Tabelle 4-1: Maximale Prüfkraften

Probe	Maximale Prüfkraft [N]	Steifigkeit k [N/mm]
1	30445,6	13350,9
2	30244,0	13434,3
3	30515,7	13272,9
4	30503,4	13245,5
5	30459,7	12971,3

Die Mittelwerte der Zugtragfähigkeit der Schrauben, die Standardabweichungen, sowie die Variationskoeffizienten und 5 % - Quantilwerte sind in der Tabelle 4-2 ersichtlich.

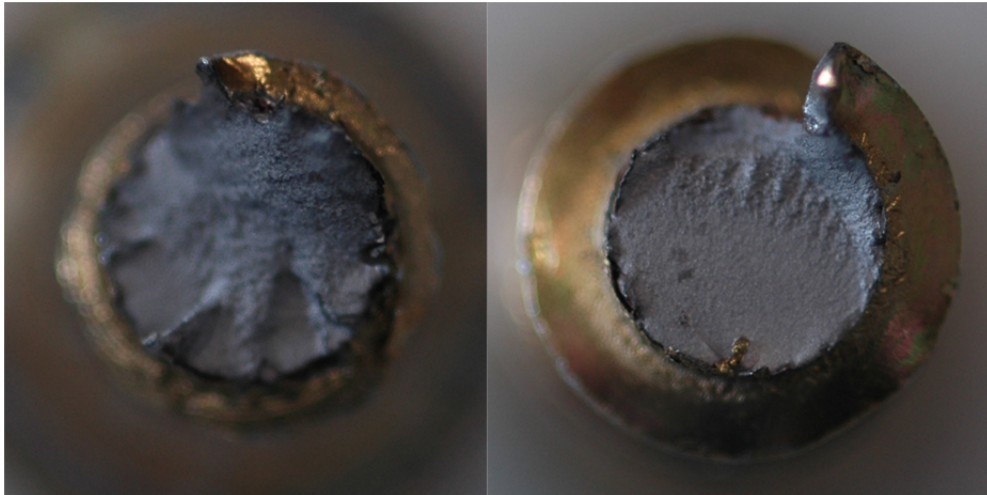
Tabelle 4-2: Prüfergebnisse zur Zugfestigkeit der Schrauben

	Mittelwert	Standardabweichung [N]	Variationskoeffizient [%]	5 % - Quantilwert [N]
Zugfestigkeit	30433	98,4	0,32	30284
Steifigkeit	13255	175	1,32	13026

## 4-2 ERMÜDUNGSTRAGFÄHIGKEIT DER SCHRAUBEN

### 4-2.1 BRUCHDOKUMENTATION

Abbildung 4-3 enthält jeweils eine representative Darstellung der Bruchbilder aus den Kurzzeit- sowie Langzeitversuchen.



**Abbildung 4-3: Gegenüberstellung der Bruchbilder aus Kurzzeitversuch (links) und Langzeitversuch (rechts)**

Wie hier ersichtlich, weist das in Abbildung 4-3 rechts dargestellte Bruchbild eines Langzeitversuchs im Gegensatz zum hier links dargestellten Bruchbild eines Kurzzeitversuchs eine viel schönere Bruchfläche auf. Das lässt sich darauf zurückführen, dass bei Langzeitversuchen der Riss länger Zeit hat um sich auszubreiten als bei Kurzzeitversuchen.

### 4-2.2 ERGEBNISSE

Alle ermittelten Prüfergebnisse aus den durchgeführten Ermüdungsversuchen für das Spannungsverhältnis  $R = 0,56$  sind dem Anhang B1 zu entnehmen. Dieses weicht aufgrund der Prüfmaschinenspezifikation des Hochfrequenzpulsators geringfügig vom Zielwert 0,50 ab. Tabelle 4-3 enthält die Mittelwerte der Prüfergebnisse, die aus den Ermüdungsversuchen bestimmt wurden. Die in Tabelle 4-3 und im Anhang B1 ausgewiesenen Spannungen  $\sigma_i$  wurden gemäß Hübner [27] wie folgt ermittelt:

$$\sigma_i = \frac{F_i}{A_s} = \frac{4 \cdot F_i}{k_A \cdot d_k^2 \cdot \pi} \quad (4.1)$$

mit:

- $A_s$  ... Spannungsfläche des Schraubenquerschnitts;
- $k_A$  ... Faktor in Abhängigkeit der spezifischen Schraubengeometrie (hier: 1,20).

**Tabelle 4-3: Ermittelte Mittelwerte der Prüfergebnisse aus den Ermüdungsversuchen**

Horizont	F <sub>0</sub>	N	log <sub>10</sub> F	σ	log <sub>10</sub> σ	log <sub>10</sub> N	Bereich
10 <sup>0</sup>	30,4	1	1,48	1131	3,05	0	LCF
10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>	30,2	2181	1,48	1124	3,05	3,24	LCF
10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>	28,0	4258	1,45	1041	3,02	3,63	HCF
10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup>	16,0	39383	1,20	595	2,77	4,58	HCF
10 <sup>5</sup>	9,60	142140	0,98	357	2,55	5,15	HCF
2*10 <sup>6</sup>	5,42	2000000	0,73	201	2,30	2,00	HCF

Bei den Versuchen im LCF-Bereich mit der Prüfmaschine lignum\_uni\_275 wurde die Frequenz innerhalb des Horizontes in Abhängigkeit der gewählten F<sub>0</sub> geringfügig variiert (f = 0,13 ÷ 0,14). Grund hierfür ist die konstante Prüfgeschwindigkeit der hierbei verwendeten Prüfmaschine von 4,5 kN / Sekunde (kraftgesteuert).

In Tabelle 4-4 und Tabelle 4-5 sind die Spannungshorizonte, die für das angewandte Treppenstufenverfahren zur Ermittlung der ertragbaren Spannung bei 2 \* 10<sup>6</sup> Lastwechseln verwendet wurden, dargestellt.

**Tabelle 4-4: Treppenstufenverfahren für 2 \* 10<sup>6</sup> Lastwechsel**

Spannungs- horizont i	Oberlast [kN] F <sub>0</sub>	Ergebnis der Versuche						
		x = gebrochen bei n < 2 * 10 <sup>6</sup> o = nicht gebrochen bei n = 2 * 10 <sup>6</sup>						
3	7,00		x					
2	6,00			x		x		
1	5,50				o		x	
0	5,00	o						o

**Tabelle 4-5: Auswertung Treppenstufenverfahren bei  $2 * 10^6$  Lastwechsel**

Spannungs- horizont i	Aufsummierung		Häufigkeit der nicht gebrochenen Proben		
	gebrochen	nicht gebr.	$H_i$	$i * H_i$	$i^2 * H_i$
3	1	0	0	0	0
2	2	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1
0	0	2	2	0	0
Summen	4	3	$\Sigma H_i = 3$	$\Sigma i * H_i = 1$	$\Sigma i^2 * H_i = 1$

Setzt man hier in die von D. Radaj und M. Vormwald [8] vorgeschlagenen Formeln (2.27) und (2.28) die entsprechenden Werte ein, erhält man für  $N = 2 * 10^6$  folgende Ergebnisse:

$$F_{\text{mean}} = 5,00 + 0,50 \left( \frac{1}{3} + \frac{1}{2} \right) = 5,42 \text{ kN} \quad (4.2)$$

$$s_d = 1,62 * 0,50 \left[ \frac{3 * 1 - (1)^2}{(3)^2} + 0,029 \right] = 0,203 \text{ kN} \quad (4.3)$$

### 4-3 MODELLBILDUNG UND VERGLEICH

In Abbildung 4-4 sind zusammenfassend sämtliche Prüfergebnisse, die auf Basis der Mittelwerte der unterschiedlichen Lasthorizonte ermittelt wurden, in Form eines Wöhlerdiagramms mit doppellogarithmischer Skalierung dargestellt. Zudem erfolgt in dieser Abbildung eine Gegenüberstellung dieser Ergebnisse mit unterschiedlichen Prognosemodellen der Zeitfestigkeit, welche im weiteren Verlauf näher diskutiert wird. Auf Basis der Lage der Prüfpunkte im Diagramm, die bei einer Frequenz von ca. 0,2 und 8 Hz ermittelt wurden, konnte kein Frequenzeinfluss festgestellt werden.

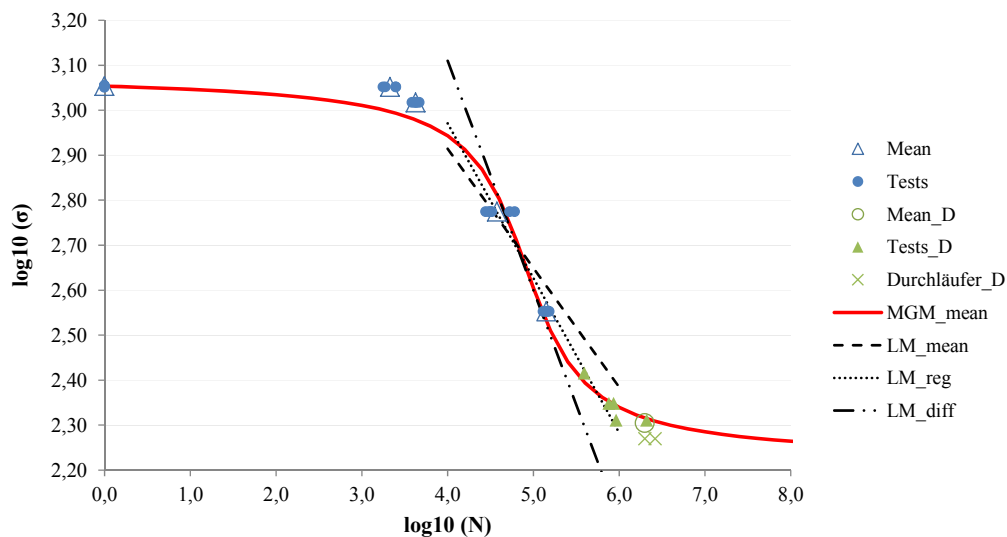


Abbildung 4-4: Wöhlerlinie, ermittelt auf Basis der Mittelwerte der Lasthorizonte

Für die Auswertung der Ergebnisse wurden insgesamt vier modifizierte Vorhersagemodelle (ein nicht lineares Lastmodell, drei lineare Lastmodelle) verwendet. Die in Abbildung 4-4 gezeigte rote Linie (MGM\_mean) wurde anhand eines modifizierten goniometrischen Modelles (nichtlineares Modell in Anlehnung an Schäfer [54]), mit dem Ziel einer stetigen Beschreibung der gesamten Wöhlerkurve ermittelt:

$$\log \sigma = a + b * \arctan \left( \frac{1}{v} * (\log \Omega - \log N) \right) \tag{4.4}$$

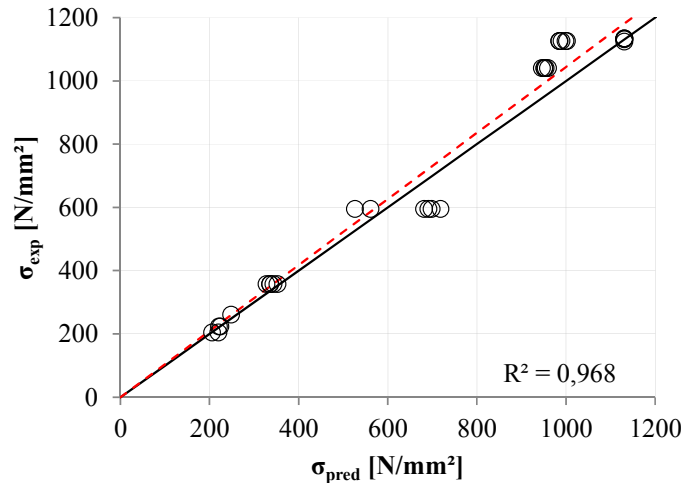
mit:

- a, b, v und logΩ ... Kurvenparameter des Modells.

Dabei wurden die Werte zu **a = 2,65**, **b = 0,27**, **v = 0,51** und **logΩ = 4,91** durch ein nicht lineares Datenfitting ermittelt (Methode der kleinsten Fehlerquadrate): Mit frei gewählten Startwerten dieser Kurvenparameter wurden durch Einsetzen der ermittelten logN (Mittelwerte je Prüfhorizont) erste Schätzwerte für logσ bestimmt, welche den tatsächlich erreichten Spannungswerten (je Prüfhorizont) in



weiterer Folge gegenübergestellt wurden. Als Randbedingung galt, dass die Modell-Zugfestigkeit für  $N = 1$  mit dem experimentell ermittelten Wert exakt übereinstimmen musste. Zusammenfassend lässt sich zur Vorhersagequalität des Modells sagen, dass die ermittelte Kurve im LCF-Bereich die tatsächliche Tragfähigkeit der Schraube zwar geringfügig unterschätzt, aber im HCF-Bereich die ermittelten Prüfpunkte sehr gut erfasst werden, siehe auch Abbildung 4-5.



**Abbildung 4-5: Gegenüberstellung Modell- (MGM) und Prüfergebnisse**

Zur vertieften Betrachtung der linearen Modelle ist der Zeitfestigkeitsbereich ( $10^4 - 10^6$ ) in Abbildung 4-6 genauer dargestellt. Sämtliche, in dieser Abbildung dargestellten Geraden wurden anhand der von Radaj und Vormwald [8] gezeigten Formel ermittelt, welche im nicht-logarithmischen Raum eine Potenzfunktion beschreibt.

$$\sigma = \sigma_D * \left(\frac{N_D}{N}\right)^{1/k} \quad (4.5)$$

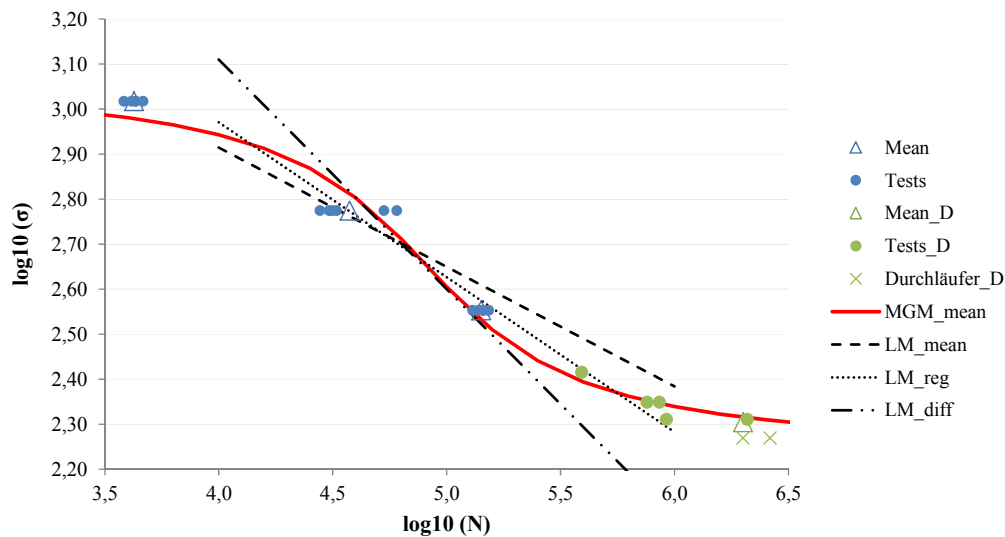
mit:

- $\sigma_D$  ... Bezugsspannung (hier: Spannung bei  $N = 2 * 10^6$ );
- $N_D$  ... Bezugs-Lastwechsel (hier:  $N = 2 * 10^6$ );
- $k$  ... zu bestimmende Neigungskennzahl der Kurve.

Die Neigungskennzahl  $k$  ist laut Radaj und Vormwald [8] „[...] vom Werkstoff und von der Kerbschärfe abhängig“. Übliche Werte von  $k$  sind in Tabelle 4-6 angeführt.

**Tabelle 4-6: Übliche Werte für  $k$  gemäß [8]**

Kerbfall bzw. Detail	$k$
ungekerbte Probe aus Stahl	15
milde Kerbe	5
scharfe Kerbe oder Anriss	3
Schweißverbindungen	3-4



**Abbildung 4-6: Zeitfestigkeitsbereich der anhand von Mittelwerten der Spannungshorizonte ermittelten Wöhlerkurve**

Für die Kurve mit der Bezeichnung LM\_mean wurde ein  $k$  von **3,77** ermittelt. Grund für die vergleichsweise geringe Steigung dieser Funktion (hohes  $k$ ) ist die Randbedingung, dass die Gerade (im logarithmischen Raum) dabei zwingend durch den Bezugspunkt mit  $N = 2 \cdot 10^6$  laufen muss. Bei der durch Regression von den Modellergebnissen von  $10^4$  bis  $10^6$  Lastwechseln ermittelten Gerade mit der Bezeichnung LM\_reg wurde eine Neigungskennzahl  $k$  von **2,91** ermittelt. Für das Modell mit der Bezeichnung LM\_diff wurde eine Neigungskennzahl  $k$  von **1,96** bestimmt. Diese Gerade beschreibt die Steigung der nichtlinearen Kurve (MGM) in der Mitte des Zeitfestigkeitsbereichs ( $N = 10^5$ ).

Je nach Definition und besserer bzw. schlechterer Anpassung an die Prüfergebnisse und/oder die nichtlineare Funktion resultieren somit  $k$ -Werte zwischen 2 und 4. Bei vergleichender Betrachtung,

erscheint die Regressionsgerade LM\_reg am besten, da diese sowohl für die Prüf- als auch für die Modellergebnisse eine adäquate Anpassung ergibt.

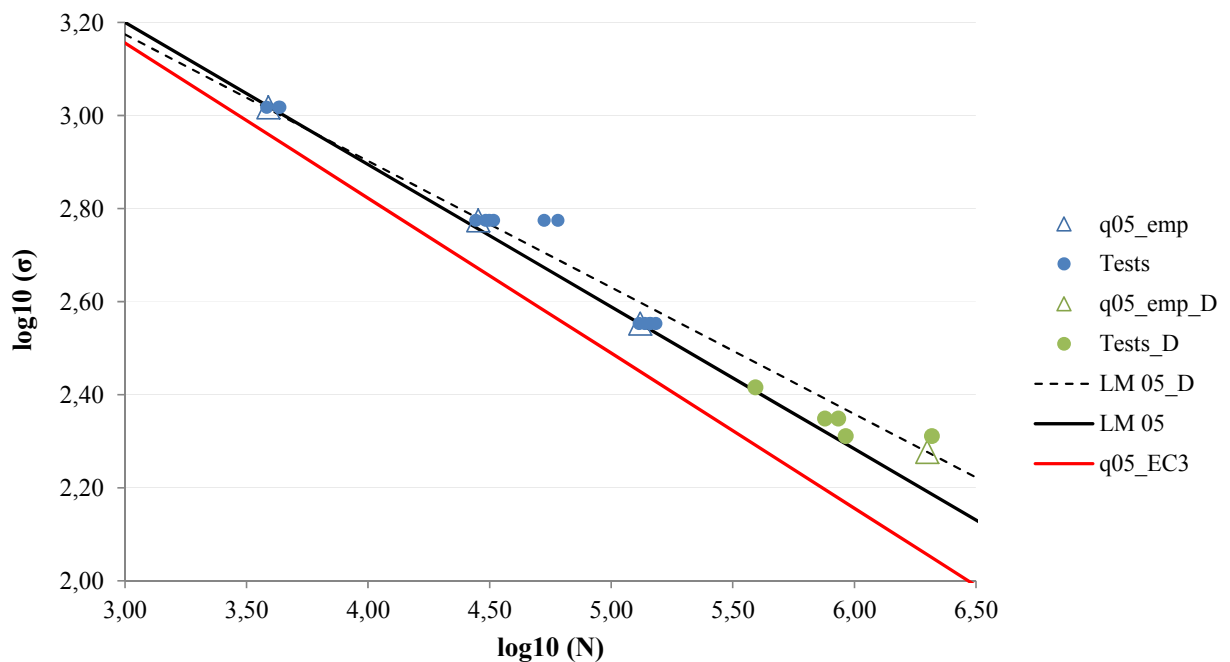
In Abbildung 4-7 sind 5 % - Quantilwerte der Prüfergebnisse, deren Beschreibung mit zwei weiteren, nach Gleichung (4.5) ermittelten Modellansätzen (LM 05 und LM\_05\_D) sowie der nach EN 1993-1-9 [10] für zugbeanspruchte metrische Stahlschrauben maßgebende Kerbfall 50 dargestellt.

Unter der Annahme einer Gauß'schen Normalverteilung ergibt sich für den bis dato noch nicht eingeführten Wert  $F_{05|N=2 \cdot 10^6}$  folgender Ausdruck:

$$F_{05|N=2 \cdot 10^6} = F_{\text{mean}} \cdot \left(1 - 1,645 \cdot \frac{s_d}{F_{\text{mean}}}\right) = 5,42 \cdot \left(1 - 1,645 \cdot \frac{0,203}{5,42}\right) = 5,09 \quad (4.6)$$

mit:

- $F_{\text{mean}}$  ... Mittelwert, errechnet nach [8] aus (2.27);
- $s_d$  ... Standardabweichung, errechnet nach [8] aus (2.28).



**Abbildung 4-7: Prüfergebnisse, ermittelt anhand der 5 % - Quantilwerte**

Die hier rot dargestellte Gerade mit der Bezeichnung q05\_EC3 wurde anhand der Glg. (2.3) aus der EN 1993-1-9 [10] ermittelt. Setzt man in die Glg. (2.3) die entsprechenden Werte (hier:  $\Delta\sigma_C = 50 \text{ N/mm}^2$  für Kerbfall 50 und  $m = 3$  lt. EN 1993-1-9 [10]) erhält man folgenden Ausdruck:

$$\Delta\sigma_R^3 = 50^3 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{N_R} \quad (4.7)$$

Formt man die Formel für das Spannungsverhältnis  $R$  (hier:  $R = 0,56$ ) um, erhält man den in Glg. (4.8) dargestellten Ausdruck.

$$R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} = 0,56 \rightarrow \Delta\sigma_R = \sigma_o - \sigma_u = 0,44 \cdot \sigma_o \quad (4.8)$$

Aus (4.7) und (4.8) ergibt sich:

$$\sigma_o = \sqrt[3]{50^3 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{N_R} \cdot \frac{1}{0,44}} \quad (4.9)$$

Für die Kurve mit der Bezeichnung LM 05\_D wurde ein  $k$  von **3,68** ermittelt. Für die Beschreibung der sich im logarithmischen Raum daraus ergebenden Gerade wurden alle aus den Ermüdungsversuchen ermittelten Punkte (auch der nach dem Treppenstufenverfahren ermittelte Bezugspunkt bei  $2 \cdot 10^6$ ) berücksichtigt. Die Beschreibung des Werkstoffverhaltens durch diese Gerade kann als nicht auf der sicheren Seite liegend betrachtet werden, da die ermittelten Punkte aus den Ermüdungsversuchen darunter liegen. Daher wurden für die Darstellung der Gerade mit der Bezeichnung LM 05 der Bezugspunkt bei  $2 \cdot 10^6$  Lastwechseln nicht berücksichtigt. Es ergab sich ein  $k$  von **3,27**. Wie aus Abbildung 4-7 hervorgeht, werden die Prüfpunkte von der genannten Gerade sehr gut erfasst. Des Weiteren lässt sich sagen, dass die beiden Geraden LM 05 und q05\_EC3 nahezu parallel verlaufen. Das hat den Grund, dass die Neigungskennzahlen  $k$  der beiden Geraden fast identisch sind.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die nach EN 1993-1-9 [10] dargestellte Gerade mit der Bezeichnung q05\_EC3 auf der sicheren Seite liegt. Aufgrund des unterschiedlichen  $d$ -Wertes ( $y = k \cdot x + d$ ) auf der  $\log_{10}\sigma$ -Achse werden die ermittelten Prüfpunkte von der Geraden nach EN 1993-1-9 [10] unterschätzt. Durch eine Verschiebung der nach EN 1993-1-9 [10] ermittelten Kurve auf einen „fiktiven“ Kerbfall 60 ( $\sigma_c = 60 \text{ N/mm}^2$ ) könnte eine sehr gute Übereinstimmung der beiden genannten Geraden LM 05 und q05\_EC3 erzielt werden.

Abschließend lässt sich ein  $k_{\text{fat}}$ -Wert von **0,17** für  $2 \cdot 10^6$  Lastwechsel (rückblickend auf Abbildung 3-1) aus Glg. (4.10) ermitteln.

$$k_{\text{fat}} = \frac{F_{05|N=2 \cdot 10^6}}{F_{05|N=1}} = \frac{5,09}{30,284} = 0,17 \quad (4.10)$$

In Abbildung 4-8 erfolgt ein Vergleich der  $k_{\text{fat}}$ -Werte aus der Arbeitshypothese aus Abschnitt 3-1 und dem aus (4.10) ermitteltem  $k_{\text{fat}}$ -Wert für  $R = 0,56$ .

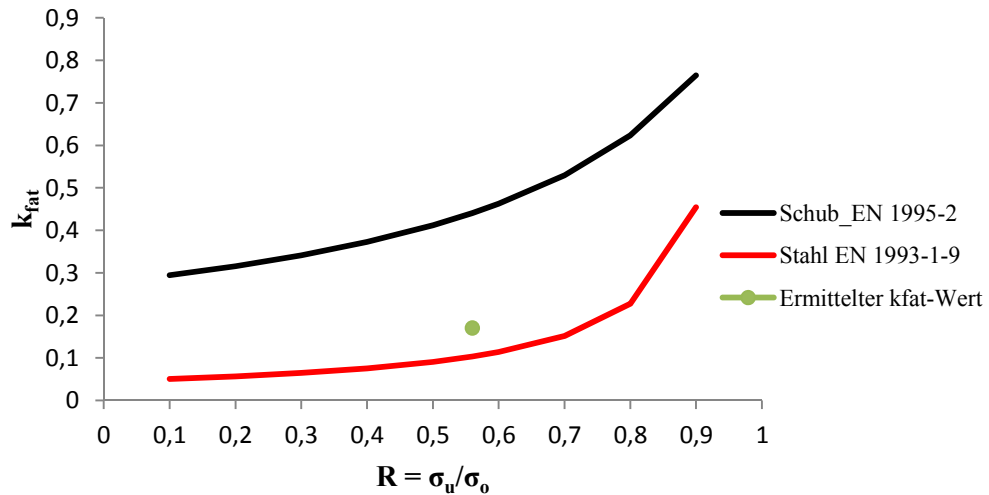


Abbildung 4-8: Vergleich der  $k_{fat}$ -Werte aus Hypothese mit Ermittlung, aus (4.10)

Wie aus Abbildung 4-8 hervorgeht, liegt der aus (4.10) ermittelte  $k_{fat}$ -Wert geringfügig über jenem nach EN 1993-1-9 [10], jedoch aber weit unter dem nach EN 1995-2 [12] dargestellten Wert für Holz (Schub). Das bedeutet, dass die prinzipielle Annahme am Anfang durchaus bestätigt werden kann. Man muss aber anmerken, dass eine Ermittlung der  $k_{fat}$ -Werte für weitere zwei Spannungsverhältnisse ( $R = 0,1$  und  $R = 0,9$ ) sinnvoll ist, um die gesamte Bandbreite an Spannungsverhältnissen im Zugschwellbereich abzudecken.



## KAPITEL 5: ZUSAMMENFASSUNG / AUSBLICK / RESÜMEE

### 5-1 ZUSAMMENFASSUNG

---

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Versuche zur Ermüdungsfestigkeit an axial beanspruchten Schrauben mittels drei verschiedenen Prüfmaschinen (lignum\_uni\_275, Hydraulikpulsator und Rumul Hochfrequenzpulsator) für ein Spannungsverhältnis von  $R = 0,56$  im Zugschwellbereich durchgeführt. Das Ziel war es, auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche, Grundkenntnisse zur Zeitfestigkeit axial beanspruchter Schrauben bzw. vorwiegend axial beanspruchter Schraubverbindungen mittels experimenteller Untersuchungen zu schaffen. Die Ermüdungsversuche erfolgten dabei für vier unterschiedliche Lasthorizonte ( $10^3$ - $10^4$ ,  $10^4$ - $10^5$ ,  $10^5$  und  $2 \cdot 10^6$ ). Unter Verwendung von insgesamt vier modifizierten Vorhersagemodellen (ein nicht lineares Lastmodell, drei lineare Lastmodelle) konnte die in Abbildung 4-4 gezeigte Wöhlerkurve auf Basis der Mittelwerte der unterschiedlichen Lasthorizonte ermittelt werden.

Schlussendlich konnte auf Basis der vorliegenden Prüfergebnisse (5%-Quantilwerte) für ein Spannungsverhältnis von  $R = 0,56$  ein  $k_{fat}$ -Wert von **0,17** für  $2 \cdot 10^6$  Lastwechsel ermittelt werden. Dieser wurden dann mit den in Abbildung 4-8 gezeigten Kurven für Stahl aus EN 1993-1-9 [10] und für Holz aus EN 1995-2 [12] verglichen.

Daraus geht hervor, dass der durch die experimentellen Untersuchungen ermittelte  $k_{fat}$ -Wert geringfügig über jenem nach EN 1993-1-9 [10], jedoch aber weit unter dem nach EN 1995-2 [12] dargestellten Wert für Holz (Schub) liegt. Das bedeutet, dass die prinzipielle Annahme am Anfang dieser Arbeit durchaus bestätigt werden kann.

### 5-2 AUSBLICK

---

Auf Basis der Ergebnisse aus den gemachten experimentellen Untersuchungen wäre es sinnvoll, Untersuchungen für weitere zwei Spannungsverhältnisse ( $R = 0,1$  und  $R = 0,9$ ) zu machen, um die gesamte Bandbreite an Spannungsverhältnissen im Zugschwellbereich abdecken zu können.

Darüber hinaus wäre es sinnvoll, auch Schrauben mit geringerer Festigkeit bzw. höherer Duktilität zu untersuchen, um diesbezügliche Auswirkungen auf die Zeitfestigkeit evaluieren zu können.

Der nächste Schritt im Hinblick auf den Einsatz von axial beanspruchten Schrauben unter dynamischen Einwirkungen wäre, ein wie in Abbildung 5-1 gezeigtes Detail einer Stahlblech-Holz-Schrägschraub-Verbindung auf seine Ermüdungsfestigkeit zu prüfen.

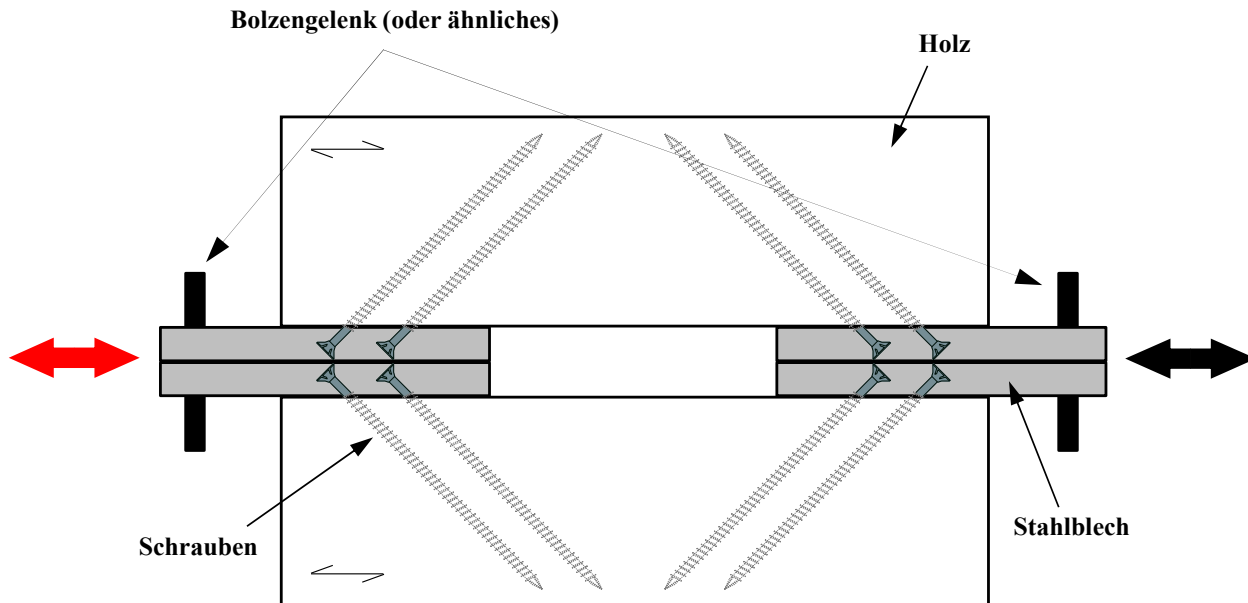


Abbildung 5-1: Mögliches Prüfkonzept für eine Stahlblech-Holz-Schrägschraub-Verbindung

Sofern sich aus den Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeit des Details kein zusätzlicher, schlimmerer Kerbfall ergeben würde, kann als erster Vorschlag bzw. als erste Abschätzung der folgende  $k_{fat}$ -Wert für  $10^7$  Lastwechsel (für EN 1995-2 [12]) angegeben werden:

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_1} = \frac{10^{\left[ \frac{2,63 + 0,29 \cdot \arctan\left(\frac{1}{0,57} \cdot (4,92 - 7)\right)}{1131} \right]}}{1131} = \frac{179}{1131} = \mathbf{0,16} \quad (5.1)$$

Dabei wurden die Kurvenparameter aus Gleichung (4.4) auf die 5-Quantilwerte der jeweiligen Prüfhorizonte angepasst:  $a = 2,63$ ,  $b = 0,29$ ,  $v = 0,57$  und  $\log\Omega = 4,92$ .



## ANHANG A VERZEICHNISSE

### A-1 Literaturverzeichnis

- [1] A. Ringhofer, R. Brandner und G. Schickhofer, „Entwicklung einer optimierten Schraubengeometrie für hochbeanspruchte Stahl-Holz-Verbindungen,“ *Bautechnik*, Januar 2014.
- [2] A. Ringhofer, *Joints with Self-tapping Screws and Dowel Type Fasteners in CLT Structures*, Tallin: Technische Universität Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie, 2014.
- [3] W. Schütz, „Zur Geschichte der Schwingfestigkeit,“ in *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik Volume 24*, Weinheim, 1993 Verlag GmbH & Co. KGaA, 1993, pp. 203-232.
- [4] H. Kreuzinger, „Holz und Holzverbindungen unter nicht vorwiegend ruhenden Einwirkungen,“ München, 1994.
- [5] C. Seeßelberg, *Kranbahnen*, Berlin: Bauwerk Verlag GmbH, 2006.
- [6] H. Unterweger und R. Greiner, „Stahlbau GL Skript,“ Technische Universität Graz, Institut für Stahlbau und Flächentragwerke, Graz, 2010.
- [7] R. Brandner, „Ermüdungsverhalten von Holz und Holzwerkstoffen,“ Graz, 2011.
- [8] D. Radaj und M. Vormwald, „Ermüdungsfestigkeit,“ Stuttgart und Darmstadt, ISBN 978-3-540-71458-3 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, Februar 2007, p. 688.
- [9] E. Haibach, *Betriebsfestigkeit, Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*, Wiesbaden: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [10] ÖNORM EN 1993-1-9, *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung*, 2013.
- [11] H. Unterweger, „Stahlbau Skript,“ Graz, Technische Universität Graz, Institut für Stahlbau, 2012.
- [12] ÖNORM EN 1995-2, *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 2: Brücken*, 1020 Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2006.
- [13] W. Küch, „Heimische Werkstoffe des Flugzeugbaues,“ in *DVL-Jahrbuch*, 1937, pp. 317-339 (ref. in Kreuzinger und Mohr, 1994).
- [14] W. C. Lewis, „Fatigue Resistance of Quarter Scale Bridge Stringers in Flexure and Shear,“ Forest Products Laboratory, Madison WI, Report Nr. 2236 (ref. in Kreuzinger und Mohr, 1994), 1962.
- [15] W. C. Lewis, „Fatigue of Wood and Glued Joints Used in Laminated Construction,“ in *Proceedings Forest Products Research Society Vol. 5*, 1951, pp. 221-229 (ref. in Kreuzinger und Mohr, 1994).
- [16] H. Kolb, „Das Verhalten verleimter und unverleimter Bauhölzer im Biegeschwellversuch,“ in *Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung, Heft 55*, 1968 (ref. in Kreuzinger

- und Mohr, 1994).
- [17] R. Sterr, „Untersuchungen zur Dauerfestigkeit von Schichtholzbalken,“ in *Dissertation*, 1962 (ref. in Kreuzinger und Mohr, 1994).
- [18] A. A. Moslemi, „To Shear Fatigue Stressing,“ in *Forest Products Journal 11 Nr.3*, 1961, pp. 115-119 (ref. in Kreuzinger und Mohr, 1994).
- [19] B. W. Bonfield und M. P. Ansell, „Fatigue properties of wood in tension, compression and shear,“ *Journal of Materials Science*, 1991, pp. 26:4765-4773 (ref. in Kreuzinger und Mohr, 1994).
- [20] R. J. Bainbridge, C. J. Mettem, K. Harvey und M. P. Ansell, „FATIGUE PERFORMANCE OF BONDED-IN RODS IN GLULAM,“ in *INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION*, United Kingdom, 2000.
- [21] U. Kuhlmann und P. Aldi, „PREDICTION OF THE FATIGUE RESISTANCE OF TIMBER-CONCRETE-COMPOSITE CONNECTIONS,“ in *INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION*, Stuttgart, 2009.
- [22] L. Bathon, O. Bletz-Mühldorfer, J. Schmidt, M. Weber und M. Weil, „Zur Temperaturbeständigkeit und Ermüdungsfestigkeit von in Holz eingeklebten Gewindestangen und Lochblechen,“ in *Holz-Metall-Klebeverbindungen*, 2010.
- [23] L. Bathon, O. Bletz-Mühldorfer, J. Schmidt und F. Diehl, „Fatigue Performance of Adhesive Connections for Wooden Wind Towers,“ in *Materials and Joints in Timber Structures*.
- [24] F.-W. Bröker und H. Krause, „Orientierte Untersuchungen über das Haltevermögen dynamisch beanspruchter Holzschrauben,“ in *Holz als Roh- und Werkstoff 49*, 1991, pp. 381-384 (ref. in Kreuzinger und Mohr, 1994).
- [25] A. Burmester und A. Hoffmann, „Schraubenhaltevermögen von Kiefern- und Fichtenholz unter langdauernder statischer und dynamischer Belastung,“ in *Holzbearbeitung 17 Nr.5*, 1970, pp. 9-11 (ref. in Kreuzinger und Mohr, 1994).
- [26] T. Trübswetter, „Klammern als Holzverbinder bei wechselnden Lasten,“ in *Holz- und Kunststoffverarbeitung 7 Nr.5*, 1973, pp. 360-363 (ref. in Kreuzinger und Mohr, 1994).
- [27] U. Hübner, „Mechanische Kenngrößen von Buchen-, Eschen- und Robinienholz für lastabtragende Bauteile,“ Technische Universität Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Graz, 2013.
- [28] A. Ringhofer, „Die Ausziehfestigkeit selbstbohrender Holzschrauben in geschichteten Holzprodukten,“ *Holzbau Forschung + Praxis*, 06./07. März 2014.
- [29] EN 1995-1-1:2009, *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*.
- [30] G. Schickhofer, „Holzbau-Nachweisführungen für Konstruktionen aus Holz,“ Technische Universität Graz, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Graz, 2006.
- [31] U. Mahlknecht, „MA - Untersuchung von rechtwinklig zur Faser eingebrachten, axial beanspruchten Schraubengruppen im Vollholz und Brettsperrholz,“ Technische Universität Graz,

- Institut für Holzbau und Holztechnologie, Graz, 2011.
- [32] SFS intec AG, *SFS Selbstbohrende Schrauben WT*, 9435 Heerbrugg (Schweiz): OiB, ETA-12/0063, gültig bis 17.06. 2017.
- [33] SFS intec AG, *SFS Selbstbohrende Schrauben WR*, 9435 Heerbrugg (Schweiz): OIB, ETA-12/0062, gültig bis 17.06. 2017.
- [34] Schmid Schrauben Hainfeld GmbH, *Schmid Schrauben RAPID, STARDRIVE and SP*, 3170 Hainfeld, Österreich: OiB, ETA-12/0373, gültig bis 04.11. 2017.
- [35] SPAX International GmbH & Co. KG, *SPAX Schrauben*, DE-58256 Ennepetal: ETA-Danmark A/S, ETA-12/0114, gültig bis 17.07. 2017.
- [36] HECO-Schrauben GmbH & Co. KG, *HECO-TOPIX-T und HECO-TOPIX-CC Schrauben*, D-78713 Schramberg: DIBt, ETA-12/0132, gültig bis 21.05. 2017.
- [37] HECO-Schrauben GmbH & Co. KG, *HECO-FIX-plus und HECO-TOPIX Schrauben*, D-78713 Schramberg: DIBt, ETA-11/0284, gültig bis 05.09. 2016.
- [38] Adolf Würth GmbH & Co. KG, *Würth Schrauben*, D-74653 Künzelsau: DIBt, ETA-11/0190, gültig bis 27.06. 2018.
- [39] Rotho Blaas s.r.l, *Rotho Blaas HBS, SCH, GHS, HBS+, GHS+, TBS,*, IT-38040 Cortaccia (BZ): ETA-Danmark A/S, ETA-11/0030, gültig bis 05.04. 2016.
- [40] ROTHO BLAAS GmbH, *Schrauben rothofixing und rothofer als Holzverbindungsmittel*, 39040 Kurtatsch (BZ), Italien: DIBt, Z-9.1-731, gültig bis 14.07. 2014.
- [41] SPAX International GmbH & Co. KG, *SPAX-S Schrauben mit Vollgewinde als Holzverbindungsmittel*, D-58256 Ennepetal: DIBt, Z-9.1-519, gültig bis 31.01. 2017.
- [42] Adolf Würth GmbH & Co. KG, *Würth ASSY VG plus Vollgewindeschrauben als Holzverbindungsmittel*, 74650 Künzelsau: DIBt Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, ZN: Z-9.1-614, gültig bis 30.06. 2014.
- [43] V. Läßle, Einführung ist die Festigkeitslehre, Schorndorf, 2011.
- [44] DiBT, *DIN 50100, Werkstoffprüfung, Dauerschwingversuch, Begriffe, Zeichen, Durchführung, Auswertung*, 1978.
- [45] T. Okuyama, A. Itoh und S. N. Marsoem, „Mechanical Responses of Wood to Repeated Loading I,“ in *Journal of Japan Wood Research Society* 30 Nr.19, 1984, pp. 791-798 (ref. in Kreuzinger und Mohr, 1994).
- [46] C. O. Clorius, M. U. Pedersen, P. Hoffmeyer und L. Damkilde, „Compressive Fatigue in Wood,“ in *Wood Science and Technology*, 2000, pp. 34:21-37 (ref. in R. Brandner, 2011).
- [47] C. O. Clorius, „Fatigue in Wood: An Investigation in Tension Perpendicular to the Grain,“ Rapport B4G.DTu R-038, ISBN 87-7877-096-3, 2002, pp. (ref. in R. Brandner, 2011).
- [48] T. Hayashi, M. Masuda und H. Sasaki, „Rotation Bending Fatigue Properties of Timber Butt-Joint with Metal Plate Connectors,“ in *Journal of the Society of Material Science* 28 Nr.7, 1979,

- pp. 623-628 (ref. in Kreuzinger und Mohr, 1994).
- [49] F. B. Fuller und T. T. Oberg, „Fatigue Characteristics of Natural and Resin-Impregnated, Compressed, Laminated Woods,“ in *Journal of the Aeronautical Sciences* Nr. 3, 1943, pp. 81-85 (ref. in Kreuzinger und Mohr, 1994).
- [50] M. Tokuda, „Fatigue Properties of Nailed Joints under Reversed Cyclic Loading,“ in *Journal of the Japan Wood Research Society* 33 Nr.7, 1987, pp. 605-609 (ref. in Kreuzinger und Mohr, 1994).
- [51] L. A. Soltis und P. V. A. Mtenga, „Strength of nailed wood joints subjected to dynamic load,“ in *Forest Products Journal* 35 Nr. 11/12, 1985, pp. 14-18 (ref. in Kreuzinger und Mohr, 1994).
- [52] T. N. L. Tran, Statistische und numerische Auswertung von Schwingfestigkeits- und Ermüdungsversuchen mit SAFD, Aachen, 2009.
- [53] E. Macherauch und H.-W. Zoch, Praktikum in Werkstoffkunde, Karlsruhe: Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011, 2011.
- [54] H. Schäfer, Auswertalgorithmus auf der Basis einer Modifikation des Goniometrischen Modells zur stetigen, Aachen: Verlagshaus Mainz GmbH Aachen, 2008.
- [55] Produktinformation Russenberger Prüfmaschinen AG, *RUMUL Fractronic 7801, 250 und 100 kN Hochfrequenz-Ermüdungsprüfmaschinen*, CH-8200 Schaffhausen.
- [56] ÖNORM EN 14592, *Holzbauwerke - Stiftförmige Verbindungsmittel - Anforderungen*, 2012.
- [57] G. Schott, Werkstoffermüdung - Ermüdungsfestigkeit, Weinheim, 1997.
- [58] Vinzenz Harrer GmbH, *Sherpa Serien XS, S, M, L, XL und XXL*, A-8130 Frohnleiten: OIB, ETA-12/0067, 2013-2018.
- [59] DIN 969, *Schwingfestigkeitsversuch bei Axialbelastung*, D-10772 Berlin: Deutsches Institut für Normung, 1997.
- [60] *Self-tapping screws for use in timber constructions*, B-1040 BRUSSELS: DIBt, CUAP 06.03/08, 2010.

## A-2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Zug-Laschenverbindung; links: Stahl-Holz-VB; rechts: Holz-Holz-VB, aus [1].....	1
Abbildung 1-2: Anschluss Decke – Wand aus Brettspertholz, aus [2] .....	2
Abbildung 1-3: Holz-Beton-Verbindung .....	2
Abbildung 2-1: Schematische Darstellung einer möglichen zyklischen Beanspruchung, aus [7] .....	6
Abbildung 2-2: Arten von Kerben, aus [8].....	7
Abbildung 2-3: Spannungsverlauf bei einer Formkerbe, aus [9] .....	8
Abbildung 2-4: Erscheinungsbild Gewaltbruch vs. Ermüdungsbruch, aus [6] .....	9
Abbildung 2-5: Ermüdungsfestigkeitslinien bei Normalspannungsbeanspruchung, aus [10].....	12
Abbildung 2-6: Ermüdungsfestigkeitslinien bei Schubspannungsbeanspruchung, aus [10].....	13
Abbildung 2-7: Ausschnitt aus dem Kerbfallkatalog für Kerbfall 50, aus [10] .....	14
Abbildung 2-8: Wöhlerdiagramm zur Schub- bzw. Scherschwellfestigkeit vs. der stat. Kurzzeitfestigkeit von Holz und Holzwerkstoffen, in Abhängigkeit von der Zykluszahl N, aus [7] ...	21
Abbildung 2-9: Ermüdungsbeiwerte $k_{fat}$ nach Kreuzinger und Mohr [4], aus [7].....	23
Abbildung 2-10: Prüfaufbau für die Ermüdungsversuche, aus [20].....	27
Abbildung 2-11: Prüfergebnisse, aus [20].....	28
Abbildung 2-12: Versagen der Stahlbewehrung, aus [21] .....	29
Abbildung 2-13: Vergleich der Prüfergebnisse mit EN 1995-2 [12], aus [21] .....	29
Abbildung 2-14: Prüfkörper für die Ermüdungsprüfungen; links: eingeklebte Gewindestange; rechts: eingeklebtes Lochblech, aus [22] .....	30
Abbildung 2-15: Darstellung der Wöhlerlinie, aus [22].....	30
Abbildung 2-16: Ermüdungsbruch der eingeklebten Gewindestange, aus [22].....	31
Abbildung 2-17: Geschichtliche Entwicklung von Holzschrauben, aus [27].....	34
Abbildung 2-18: Laschenverbindung mit geeigneten selbstbohrenden Holzschrauben, aus [1] .....	37
Abbildung 2-19: Anwendungsgebiete selbstbohrender Holzschrauben, aus [28].....	38
Abbildung 2-20: Ausknicken der Holzschrauben infolge Druckbeanspruchung, aus [30].....	39
Abbildung 2-21: Vollgewindeschrauben, beansprucht auf Herausziehen, aus [30].....	39
Abbildung 2-22: Kopfdurchziehen von Holzschrauben, aus [30].....	40
Abbildung 2-23: Probekörper, der durch Blockscheren versagte, aus [31].....	41
Abbildung 2-24: Nachzuweisende Versagensmodi.....	41
Abbildung 2-25: Ermüdungs-, Schwing- und Betriebsfestigkeit, aus [43] .....	44
Abbildung 2-26: Unterschied zwischen Zeitfestigkeit und Zeitstandfestigkeit, aus [7] .....	47
Abbildung 2-27: Spannungs-Zeit-Schaubild beim Dauerschwingversuch, nach [44] .....	48
Abbildung 2-28: Bereiche der Schwingbeanspruchung, nach [53].....	49
Abbildung 2-29: Erweiterung der Lastniveaus auf zehn Proben, aus [52].....	50
Abbildung 2-30: Treppenstufenverfahren, nach [54].....	51
Abbildung 2-31: Wöhlerlinie, nach [52] .....	52
Abbildung 3-1: Gegenüberstellung Stahlbruch – Herausziehen .....	54

Abbildung 3-2: Lastprotokoll für den statischen Zugversuch .....	55
Abbildung 3-3: Lastmodell für die Ermüdungsversuche mit der Prüfmaschine lignum_uni_275 .....	56
Abbildung 3-4: Lastmodell für die Ermüdungsversuche mit einem Pulsator .....	56
Abbildung 3-5: Grafische Darstellung des Vorgehens anhand der Wöhlerlinie, nach [52] .....	57
Abbildung 3-6: Universalprüfmaschine Lignum_uni_275 .....	58
Abbildung 3-7: Untersuchte Belastungshorizonte .....	59
Abbildung 3-8: Hydraulikpulsator der TVFA .....	60
Abbildung 3-9: Rumul Hochfrequenzpulsator [55] .....	61
Abbildung 3-10: Abmessungen der Schraube .....	63
Abbildung 3-11: Scheibe für die Einspannung am Schraubenkopf .....	64
Abbildung 3-12: Negativform Einspannung .....	65
Abbildung 4-1: Schraubenversagen .....	67
Abbildung 4-2: Prüfergebnisse zur Zugfestigkeit der Schrauben .....	68
Abbildung 4-3: Gegenüberstellung der Bruchbilder aus Kurzzeitversuch (links) und Langzeitversuch (rechts) .....	69
Abbildung 4-4: Wöhlerlinie, ermittelt auf Basis der Mittelwerte der Lasthorizonte .....	72
Abbildung 4-5: Gegenüberstellung Modell- (MGM) und Prüfergebnisse .....	73
Abbildung 4-6: Zeitfestigkeitsbereich der anhand von Mittelwerten der Spannungshorizonte ermittelten Wöhlerkurve .....	74
Abbildung 4-7: Prüfergebnisse, ermittelt anhand der 5 % - Quantilwerte .....	75
Abbildung 4-8: Vergleich der $k_{fat}$ -Werte aus Hypothese mit Ermittlung, aus (4.10) .....	77
Abbildung 5-1: Mögliches Prüfkonzept für eine Stahlblech-Holz-Schrägschraub-Verbindung .....	80

## A-3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Empfehlungen für den Teilsicherheitsfaktor $\gamma_{MF}$ , aus [10].....	15
Tabelle 2-2: Grenzwerte für das Verhältnis R, aus [12].....	16
Tabelle 2-3: Werte der Beiwerte a und b, aus [12].....	17
Tabelle 2-4: Ermüdungsbeiwerte $k_{fat}$ nach Kreuzinger und Mohr [4], aus [7].....	22
Tabelle 2-5: Vergleich der Ermüdungsbeiwerte $k_{fat}$ nach Kreuzinger und Mohr [4] aus [7] mit EN 1995-2 [12].....	24
Tabelle 2-6: Ermüdungsbeiwerte bei Schwellbeanspruchung, aus [4].....	25
Tabelle 2-7: Ermüdungsbeiwerte für Nagelverbindungen, aus [4] .....	26
Tabelle 2-8: Prozentanteile dynamisch zu statisch, aus [4].....	32
Tabelle 2-9: Auszieh Widerstand nach $2,1 * 10^4$ Lastwechseln, aus [4].....	32
Tabelle 3-1: Ermittlung der Prüfdauer .....	57
Tabelle 3-2: Technische Daten des Pulsators, aus [55].....	61
Tabelle 3-3: Übersicht über das Prüfprogramm der Ermüdungsversuche.....	62
Tabelle 3-4: Technische Daten der Schraube.....	63
Tabelle 4-1: Maximale Prüfkraft .....	68
Tabelle 4-2: Prüfergebnisse zur Zugfestigkeit der Schrauben.....	68
Tabelle 4-3: Ermittelte Mittelwerte der Prüfergebnisse aus den Ermüdungsversuchen.....	70
Tabelle 4-4: Treppenstufenverfahren für $2 * 10^6$ Lastwechsel.....	70
Tabelle 4-5: Auswertung Treppenstufenverfahren bei $2 * 10^6$ Lastwechsel.....	71
Tabelle 4-6: Übliche Werte für k gemäß [8] .....	74
Tabelle 5-1: Ermittelte Prüfergebnisse aus den Ermüdungsversuchen .....	XI





# **ANHANG B ERGEBNISSE**

## **B-1 Prüfergebnisse**



**Tabelle 5-1: Ermittelte Prüfergebnisse aus den Ermüdungsversuchen**

H	F <sub>0</sub> [kN]	N [-]	log <sub>10</sub> F	σ [N/mm <sup>2</sup> ]	log <sub>10</sub> σ	log <sub>10</sub> N [-]	DL	f [Hz]	Bereich	
10 <sup>0</sup>	30,4	1	1,48	1132	3,05	0,00	1		LCF	Lignum Uni 275
	30,2	1	1,48	1124	3,05	0,00	1		LCF	
	30,5	1	1,49	1134	3,05	0,00	1		LCF	
	30,5	1	1,48	1134	3,05	0,00	1		LCF	
	30,5	1	1,48	1132	3,05	0,00	1		LCF	
10 <sup>3</sup> - 10 <sup>4</sup>	30,2	1000	1,48	1123	3,05	3,00	0	0,13	LCF	
	30,0	1000	1,48	1115	3,05	3,00	0	0,13	LCF	
	30,3	1884	1,48	1126	3,05	3,28	1	0,14	LCF	
	30,3	2491	1,48	1126	3,05	3,40	1	0,14	LCF	
	30,3	2486	1,48	1126	3,05	3,40	1	0,14	LCF	
	30,3	1766	1,48	1126	3,05	3,25	1	0,14	LCF	
	30,3	2278	1,48	1126	3,05	3,25	1	0,14	LCF	
10 <sup>4</sup> - 10 <sup>5</sup>	28	4660	1,45	1041	3,02	3,67	1	8,00	HCF	Hydraulikpulsator
	28	4150	1,45	1041	3,02	3,62	1	8,00	HCF	
	28	4300	1,45	1041	3,02	3,63	1	8,00	HCF	
	28	4340	1,45	1041	3,02	3,64	1	8,00	HCF	
	28	3840	1,45	1041	3,02	3,58	1	8,00	HCF	
10 <sup>4</sup> - 10 <sup>5</sup>	16,0	60500	1,20	595	2,77	4,78	1	90,0	HCF	Rumol Hochfrequenzpulsator
	16,0	53100	1,20	595	2,77	4,73	1	90,0	HCF	
	16,0	30500	1,20	595	2,77	4,48	1	90,0	HCF	
	16,0	32900	1,20	595	2,77	4,52	1	90,0	HCF	
	16,0	31500	1,20	595	2,77	4,50	1	90,0	HCF	
	16,0	27800	1,20	595	2,77	4,44	1	90,0	HCF	
10 <sup>5</sup>	9,6	145200	0,98	357	2,55	5,16	1	90,0	HCF	
	9,6	153000	0,98	357	2,55	5,19	1	90,0	HCF	
	9,6	137700	0,98	357	2,55	5,14	1	90,0	HCF	
	9,6	130300	0,98	357	2,55	5,12	1	90,0	HCF	
	9,6	144500	0,98	357	2,55	5,16	1	90,0	HCF	
2 * 10 <sup>6</sup> *	5,0	2000000	0,70	186	2,27	6,30	0	90,0	HCF	
	7,0	392200	0,85	260	2,42	5,59	1	90,0	HCF	
	6,0	758300	0,78	223	2,35	5,88	1	90,0	HCF	
	6,0	860400	0,78	223	2,35	5,94	1	90,0	HCF	
	5,5	2088700	0,74	204	2,31	6,32	1	90,0	HCF	
	5,5	922000	0,74	204	2,31	5,97	1	90,0	HCF	
	5,0	2627800	0,70	186	2,27	6,42	0	90,0	HCF	
DL = Durchläufer (1 = Bruch   0 = Durchläufer) LCF = Low Cycle Fatigue   Kurzzeitfestigkeitsbereich HCF = High Cycle Fatigue   Zeitfestigkeitsbereich * Oberlast wurde für die Anwendung des Treppenstufenverfahrens variiert										

