

Ermüdungsverhalten von Holz und geklebten Holzbauteilen

Fatigue behavior of wood and glued wood components

Le comportement à l'usure du bois et des éléments en bois collés

Simon Aicher
MPA Universität Stuttgart
DE-Stuttgart



Zachary Christian
MPA Universität Stuttgart
DE-Stuttgart



Ermüdungsverhalten von Holz und geklebten Holzbauteilen

1. Einleitung

Das Ermüdungsverhalten von Holz und hierbei insbesondere von geklebten Holzbauteilen und -verbindungen gewinnt in jüngerer Zeit verstärkt an Bedeutung. Die Gründe hierfür liegen in einer zunehmenden respektive zunehmend beabsichtigten Verwendung geklebter holzbasierter Bauteile in ermüdungsbeanspruchten Tragwerken, wie insbesondere Brücken, Achterbahnen (Abbildung 1), Windrotorblättern und großen Türmen für Windenergieanlagen. Die hohe Leistungsfähigkeit von Holz betreffend Schädigungstoleranz bei Ermüdungsbeanspruchungen wurde im 19. und beginnenden 20. Jahrhundert sehr eindrucksvoll durch imposante Eisenbahnbrückenbauwerke in Nordamerika (Bild 2) und in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts durch den Flugzeugbau (Bild 3) belegt.

Die große Zunahme des Holzbaus in den letzten zwei Jahrzehnten erfolgte zweifelsohne im Bereich von Hochbauten mit vorwiegend ruhender Beanspruchung. In jüngster Zeit hat jedoch die Verwendung von plattenförmigen Holzelementen, insbesondere von Brettspertholz, für hohe Türme von Windkraftanlagen aus mehreren technischen und ökologischen Gründen großes Interesse geweckt. Im Jahre 2012 wurde der erste 100 m hohe Holzturm für eine Multimegawatt-Windkraftanlage (1,5 MW, Vensys 77-Anlage) in Hannover in Brettspertholz-Bauweise erstellt (Bild 4). Zurzeit sind eine Reihe größerer Windenergietürme mit Höhen bis 140 m (2,5 MW), sowohl in hybrider wie in ausschließlicher Holzbauweise in der Projektierung [1], wobei Umsetzungen im Jahr 2016 realistisch sind.

Im Folgenden wird zunächst Allgemeines zur Charakterisierung schwingender Einwirkungen sowie zu Definitionen und Vorgehensweisen betreffend Bestimmung des Ermüdungsverhaltens von Werkstoffen ausgeführt. Im Anschluss wird in knapper Form ein Überblick über den heutigen Stand des Wissens zum Ermüdungsverhalten von Holz und insbesondere von geklebten Holzbauteilen und -anschlüssen gegeben und es werden genormte sowie neuere Berechnungsansätze vorgestellt.

2. Ermüdungsverhalten im Allgemeinen

2.1. Definitionen

Der Begriff Ermüdung ist im Bereich des Stahlbaus DIN EN 1993-1-9 [2] definiert als ein Prozess der Rissbildung und des Rissfortschritts in einem Bauteil, hervorgerufen durch wiederholte Spannungsschwankungen. Ermüdungsbeanspruchungen und sodann Ermü-



Abbildung 1: Ansicht der 2007/2008 aus nicht keilgezinktem kesseldruckimprägniertem Kiefernholz errichteten Holzachterbahn «Mammut» im Freizeitpark Tripsdrill



Abbildung 2: Ansicht der 1932 erbauten Goat Canyon-Jochbrücke in Kalifornien mit 180 m Länge und 61 m Höhe

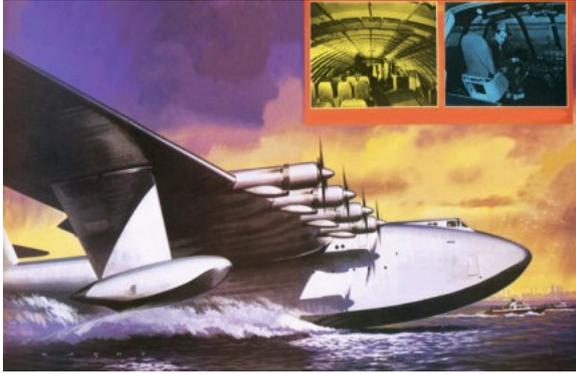


Abbildung 3: Ansicht des größten, mit speziellem Birkenperrholz gebauten Holzflugzeugs, der «SpruceGoose», Erstflug 1947



Abbildung 4: Timber Tower Holzturm mit 100 m Höhe in Hannover-Marienwerder, während der Bauphase (2012)

dungsbrüche sind somit grundsätzlich an Schwingbeanspruchungen gebunden, die im einfachsten Fall mit gleichbleibenden Amplituden oder auch mit zufallsartigen Folgen unterschiedlicher Amplituden und Frequenzen auftreten können.

Bei Ermüdungsversuchen werden die Belastungen, meist als (quasi-)sinusförmig veränderliche Beanspruchungen aufgebracht. Die wesentlichen, die Schwingbeanspruchung charakterisierenden Parameter nach DIN 50100 [3] sind in Bild 5 angegeben. Als Ober-
spannung σ_o wird die absolut maximale aufgebrachte Spannung bezeichnet, die Unter-
spannung σ_u repräsentiert die absolut minimale wirkende Spannung (Zug=+, Druck=-).
Wesentliche weitere Kenngrößen einer Schwingungsbeanspruchung sind

$$\sigma_m = (\sigma_o + \sigma_u)/2 \quad \text{Mittelspannung} \quad (1)$$

$$\Delta\sigma = |\sigma_o - \sigma_u| \quad \text{Spannungsschwingbreite} \quad (2)$$

$$\sigma_A = \Delta\sigma/2 \quad \text{Spannungsamplitude} \quad (3)$$

$$R = \kappa = \sigma_u/\sigma_o \quad \text{Spannungsverhältnis} \quad (4)$$

In den Gleichungen (1) bis (4) sind die Spannungen vorzeichenbehaftet einzusetzen. Der Begriff Schwingspiel(zeit) bezeichnet die Dauer einer vollständigen Schwingung. Bild 6 veranschaulicht die Begrifflichkeiten Schwell- und Wechselversuche/bereiche, die bei einem Schwingversuch in Abhängigkeit vom Vorzeichen bzw. vom Vorzeichenwechsel der einwirkenden Beanspruchung, hier gezeigt für den Fall von Zug- und Druckbeanspruchungen, möglich sind. Der Schwellbereich ist gemäß vorstehenden Definitionen sowohl im Zug- wie im Druckbereich durch einen positiven R-Wert charakterisiert

$$0 < R \leq 1 \quad \text{Schwellbereich} \quad (5)$$

während Ermüdungsbeanspruchungen, bei denen sich das Vorzeichen der (Rand-) Spannung ändert (Zug-Druck, Biegung oder Schub durch 0) sodann als Wechselbeanspruchungen bezeichnet, ein Spannungsverhältnis von

$$-1 < R \leq 0 \quad \text{Wechselbereich} \quad (6)$$

aufweisen.

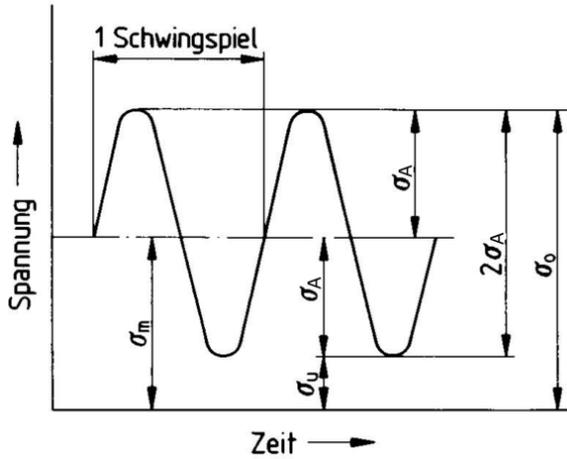


Abbildung 5: Spannungs-Zeit-Schaubild beim Dauerschwingversuch nach DIN 50100 [3]

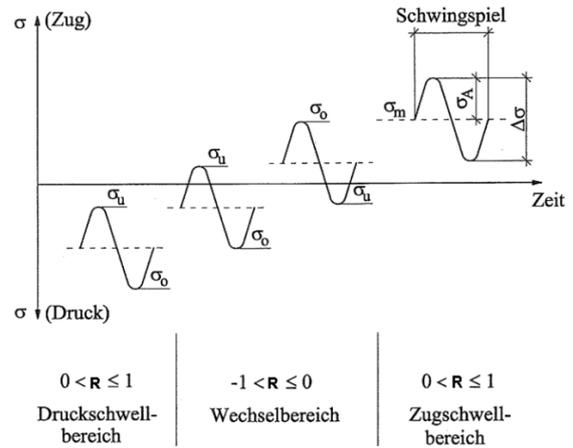


Abbildung 6: Kenngrößen einer periodischen Beanspruchung (Zug, Druck) mit unterschiedlichen Spannungsverhältnissen R nach [4]

2.2. Dauerfestigkeit, Zeitfestigkeit und Wöhlerlinie

Die Begriffe Dauer(schwing)festigkeit σ_D und zugehörige Dauerfestigkeits Schwingspielzahl N_D in Verbindung mit den Abgrenzungen der Dauer-, Zeit- und Betriebsfestigkeitsbereiche lassen sich anschaulich mittels Bild 7 nach [5] darstellen.

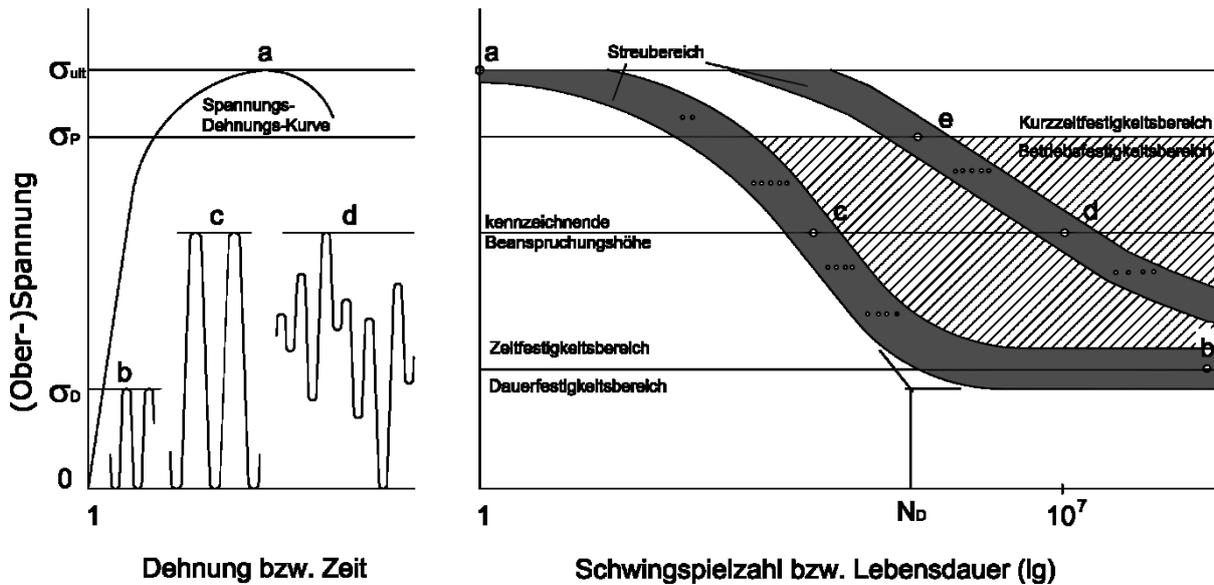


Abbildung 7: Graphische Erläuterung der Begriffe Dauer-, Zeit- und Betriebsfestigkeit nach [5]

Die im linken Teil des Bildes angegebene Spannungs-Dehnungslinie charakterisiert das Materialverhalten bei statischer Kurzzeitbeanspruchung, wobei instantanes Versagen bei Erreichen der Festigkeit σ_{ult} nach vorherigem Überschreiten der Proportionalitätsgrenze σ_p ($= R_e$ bei Metallen) auftritt. Bei schwingender Beanspruchung kennzeichnet die Dauerfestigkeit σ_D den (Ober-)Spannungswert, bis zu dessen Niveau die wiederholte Beanspruchung unendlich oft ohne Versagen ertragen werden kann. Im Bereich des Stahlbaus wird für die Charakterisierung des σ -lgN-Ermüdungsverhaltens und die diesbezügliche Bemessung nicht die Oberspannung sondern die Schwingbreite $\sigma = \Delta\sigma$ verwendet, womit $\Delta\sigma_D$ der versagensfrei ertragbaren Schwingbreite entspricht. Im Falle variabler Spannungsschwingbreiten müssen sodann alle Schwingbreiten unter dieser Grenze liegen. Im Bereich des Holzbaus erfolgt die Beschreibung des σ -lgN Verhaltens dagegen meist unter Verwendung der Oberspannung (vgl. Bild 7).

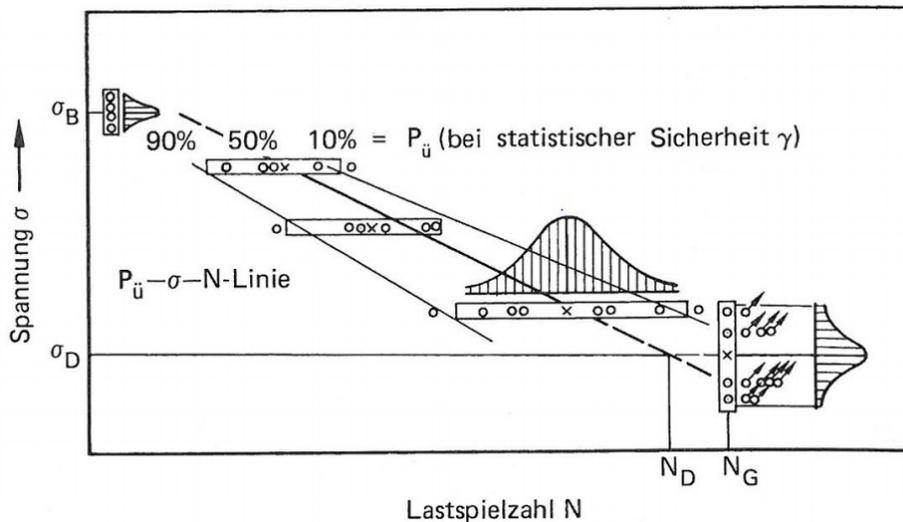


Abbildung 8: Definition der Wöhlerlinie für ausgezeichnete Überlebenswahrscheinlichkeiten $P_{\ddot{U}}$ (aus [6])

Oberhalb von σ_D führt sodann eine endliche Anzahl von Schwingspielen zum Bruch, der umso eher eintritt, je höher der Beanspruchung ist. Im Falle einer Schwingbeanspruchung mit gleichbleibenden Amplituden wird die σ - N -Abhängigkeit durch die Zeitfestigkeitslinie (= geneigter Teil der Wöhlerkurve) charakterisiert. Die vollständige nichtlineare Wöhlerlinie erstreckt sich über drei ausgezeichnete Bereiche von der Kurzzeitfestigkeit über die Zeitfestigkeitslinie zur Dauerfestigkeitsgrenze (vgl. [5]). Im Falle einer Schwingbeanspruchung mit einer zufallsartigen Folge unterschiedlicher Amplituden, die sodann maximal den Höchstwert der Schwingbeanspruchung mit gleichbleibenden Amplituden erreichen dürfen, wird die Zeitfestigkeitslinie sodann zu größeren Lebensdauern bzw. Schwingspielzahlen hinüberschritten. Abhängig vom jeweiligen Lastkollektiv der Betriebsbeanspruchung erfolgt das Versagen dann bei Erreichen der spezifischen Lebensdauerlinie der speziellen Lastkollektivs. Der gesamte σ - N -Bereich rechts der Wöhlerlinie wird auch als Betriebsfestigkeitsbereich bezeichnet.

Die Ermittlung von Wöhlerkurven erfolgt im Regelfall dadurch, dass bei Einhaltung konstanter Spannungsverhältnisse, z. B. $R=0,1, 0,5$ oder $-0,5$ Schwingversuche mit jeweils mehreren Prüfkörpern mit unterschiedlichen absoluten Schwingbreiten bzw. Oberspannungen bis zum Versagen durchgeführt werden. Als Beanspruchungsniveau wird sodann das Verhältnis der Oberspannung σ_o des jeweiligen Lastniveaus bezogen auf den Mittelwert bzw. den 5%-Quantilwert der Kurzzeitfestigkeit

$$SL_{\text{mean}} = \sigma_o / f_{\text{mean}} \text{ bzw. } SL_{05} = \sigma_o / f_{05} \quad (7)$$

verwendet. Auf jedem Lastniveau werden hierbei infolge der streuenden Materialeigenschaften und der hierdurch beeinflussten Mikro-Makroschädigungsprogressionen bzw. Rissfortschritte auch bei sehr homogenen Materialien, wie z. B. Stahl, unterschiedliche Bruchschwingspielzahlen erhalten (vgl. Bild 8). Die Wöhlerkurven werden daher für unterschiedliche statistische Überlebens(\ddot{U})- oder Versagens(D) wahrscheinlichkeiten bestimmt, z. B. die $P_{\ddot{U}=50\%}$ -Kurve (= Median-Überlebens/Versagens-Wöhlerlinie) oder die $P_{\ddot{U}=97,5\%}$ -Kurve oder die $P_{D,05}$ -Kurve, d. h. die 5%-Quantil-Wöhlerlinie. Es ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass bei dem Werkstoff Holz infolge der sehr großen Streuungen der Kurzzeitfestigkeitswerte sowie der Bruch-Lastspielzahlen häufig eine mathematisch stringente Herleitung der 5%-Quantil Wöhlerlinie schwierig und sodann unter Einbezug zusätzlicher ingenieurmäßiger Plausibilitätsbetrachtungen abzuschätzen ist.

Die Ermittlung der Lebensdauer respektive der Versagensschwingspielzahl für variable Lastkollektive mit unterschiedlichen Amplituden (und Frequenzen) wird materialübergreifend vereinfacht häufig mittels der sogenannten Palmgren-Miner Rechenvorschrift

$$D_{\text{fat}} = \frac{n_1(\sigma_1)}{N_1} + \frac{n_2(\sigma_2)}{N_2} + \frac{n_3(\sigma_3)}{N_3} + \dots = \sum \frac{n_i(\sigma_i)}{N_i} < 1 \quad (8)$$

mit

n_1, n_2, n_3, n_i Zahl der aufgetragenen Lastwechsel für eine Oberspannung $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ bzw. σ_i

N_1, N_2, N_3, N_i Zahl der aufnehmbaren Lastwechsel für eine Oberspannung $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ bzw. σ_i

vorgenommen.

3. Ermüdungsverhalten von Holz und geklebten Holzbauprodukten

3.1. Allgemeines

Das Ermüdungsverhalten von Holz- und geklebten Holzprodukten ist infolge der anisotropen, inhomogenen Materialstruktur und sodann infolge des ausgeprägt nichtlinear viskoelastischen Verhaltens, das richtungsabhängig zu unterschiedlichem Kriechrischwachstum führt, im Vergleich zu quasi homogenen und isotropen Werkstoffen wie z. B. Stahl höchst komplex. Diesbezüglich besteht mit Blick auf überschaubare Nachweisführungen im Holzbau einerseits die Notwendigkeit die wesentlichen richtungs- und beanspruchungsabhängigen Einflüsse herauszuarbeiten. Andererseits dürfen jedoch die erforderlichen Verallgemeinerungen die detailspezifischen Aspekte nicht zu sehr überdecken, damit i) standsicherheitsrelevant sichere und ii) wirtschaftliche, ermüdungsbeanspruchte Holzbaukonstruktionen möglich sind.

Der wesentlich erhöhte Umfang der bei der Ermüdungsthematik im Vergleich zu vorwiegend ruhender Beanspruchung zu berücksichtigenden Punkte folgt unmittelbar daraus, dass die wichtigsten Festigkeitseigenschaften stab- und plattenförmiger Bauteile – Zug und Druck parallel und rechtwinklig zur Faserrichtung, Biegung und Schub parallel zur Faserrichtung – nun mehr bei Schwell- und Wechselbeanspruchung meist deutlich unterschiedliche Ermüdungsabhängigkeiten von der Schwingspielzahl N und dem Spannungsverhältnis R aufweisen. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass der Einfluss von Klebefugen und geklebten Stößen, der bei statischen Beanspruchungen im Allgemeinen – ausgenommen von auf- oder eingeklebten Verstärkungen – verschmiert in die globalen Materialeigenschaften eingeht, bei Ermüdungsbeanspruchung geklebter Stöße, z. B. Keilzinkenverbindungen in Vollholz oder Universalkeilzinkenverbindungen gesondert zu betrachten ist.

3.2. Abriss literaturbekannter Ermüdungsuntersuchungen

Grundlegende frühe und neuere Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten von Holz und zu geklebten Holzverbindungen werden in [7-24] berichtet. In [25], [26] wurde der Versuch unternommen, die in der Literatur zu findenden Versuchsergebnisse zusammenzufassen und hierauf aufbauend sodann allgemein gültige Beschreibungen und Bemessungsansätze für ermüdungsbeanspruchtes Holz bzw. geklebte Holzbauteile und –verbindungen abzuleiten. Bei der Zusammenfassung der Literaturdaten, die häufig mit unterschiedlichen Spannungsverhältnissen durchgeführt wurden, wurden in [26] plausible erscheinende Anpassungen und Vereinfachungen vorgenommen. Die Bilder 8-12 zeigen wichtige Literaturzusammenstellungen und -auswertungen nach [26] für unterschiedliche Beanspruchungsarten.

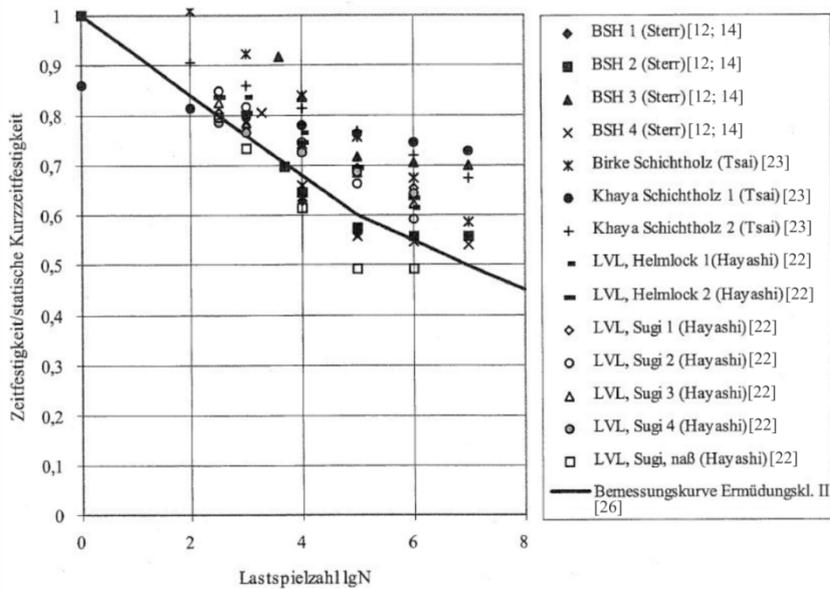


Abbildung 8: SL-IgN Zusammenstellung literaturbekannter Ergebnisse für Biegeschwellbeanspruchung geklebter Schichthölzer sowie Bemessungskurve (Ermüdungsklasse II) nach [26]

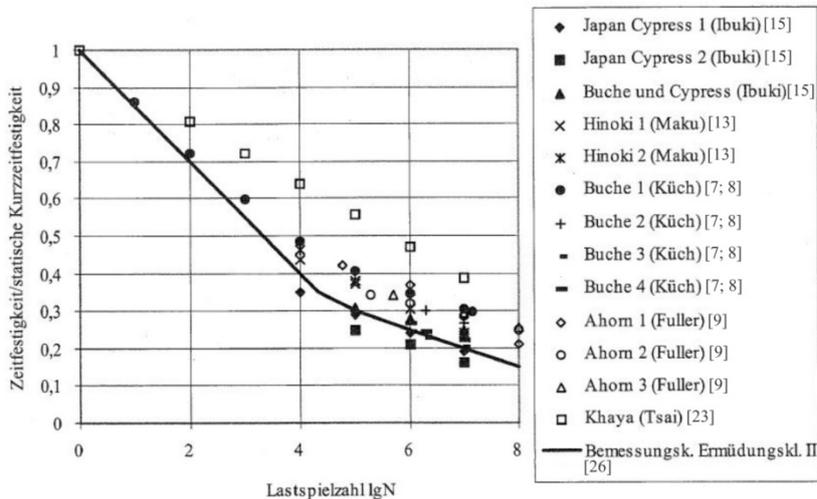


Abbildung 9: SL-IgN Zusammenstellung literaturbekannter Ergebnisse für Biegewechselbeanspruchung geklebter Schichthölzer sowie Bemessungskurve (Ermüdungsklasse II) nach [26]

Die Bilder 8 und 9 veranschaulichen die SL-IgN-Zusammenhänge der Literaturdaten für geklebte Schichthölzer, im wesentlichen Brettschichtholz, für die Fälle Biegeschwell- und Biegewechselbeanspruchung. Mit eingezeichnet sind die in [26] abgeleiteten sogenannten Bemessungskurven, die weitgehend den Minimal- bzw. 5%-Quantilbereich der Bruchschwingpielzahlen auf dem jeweiligen Lastniveau abdecken. Die signifikante Abminderung des Versagensbeanspruchungsniveaus SL zwischen Biegeschwell- und Biegewechselbeanspruchung ist hierbei unmittelbar ersichtlich. So liegt z. B. die «Bemessungskurve», d. h. das Verhältnis von Oberspannung zu Kurzzeitfestigkeit bei 10^5 Schwingspielen bei Biegeschwellbeanspruchung bei $SL=0,6$, während im Falle der Biegewechselbeanspruchung lediglich $SL=0,3$, d. h. der halbe Wert erhalten wird.

Bild 10 zeigt die in [26] zusammengestellten SL-IgN-Literaturergebnisse für Zug-Schwellbeanspruchung von Vollholz (Fichte, Eiche), Furnierschichtholz, Buchenschichtholz, Schäftungs- und Keilzinkenverbindungen. Mit angegeben sind die Bemessungskurven für die Ermüdungsklassen II und III. Wie ersichtlich, repräsentiert die Bemessungskurve für die Ermüdungsklasse II eine gute untere Abschätzung der meisten Versuchsergebnisse, ausgenommen der Keilzinkenversuchswerte nach [16], die niedriger liegen, und die sodann durch die Bemessungskurve für die Ermüdungsklasse III umhüllt werden.

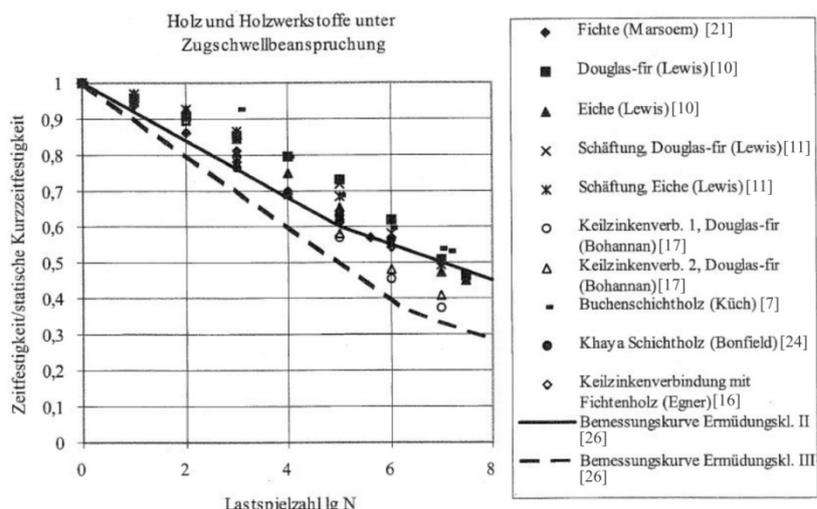


Abbildung 10: SL-IgN Zusammenstellung literaturbekannter Ergebnisse für Zugschwellbeanspruchung sowie Bemessungskurven (Ermüdungsklassen II und III) nach [26]

Bild 11 veranschaulicht die ermüdungsbedingte Festigkeitsabminderung von Vollholz, Furnierschichtholz und Brettschichtholz bei Schubschwellbeanspruchung zufolge Literaturdaten. Die Versuchsergebnisse werden hierbei mit Ausnahme einiger Ergebnisse in [11], die jedoch einen schrägen Faserverlauf aufwiesen, gut durch die Rechenwerte für die Ermüdungsklasse III abgedeckt. Für Schubwechselversuche sind in [26] keine Literaturauswertungen angegeben. Für eine diesbezügliche Abschätzung der Festigkeitsabminderung liegen jedoch die von [12; 14] ermittelten Klebfugen- Scherversuchsergebnisse bei Scherwechselbeanspruchungen kleiner BSH-Blockscherproben vor, die in Bild 12 dargestellt sind. Vergleichbar den Biegewechselversuchsergebnissen liegen auch bei Schub- bzw. Scherbeanspruchung die Ergebnisse der Wechselversuche deutlich unterhalb der Resultate der Schwellversuche.

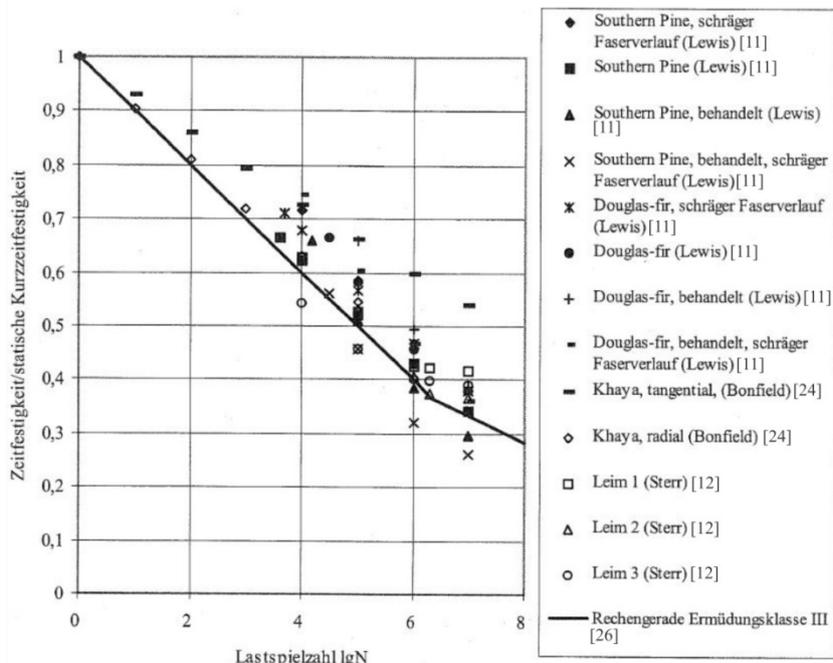


Abbildung 11: SL-IgN Zusammenstellung literaturbekannter Ergebnisse für Blockscher-Schwellbeanspruchung sowie Bemessungskurve (Ermüdungsklasse III) nach [26]

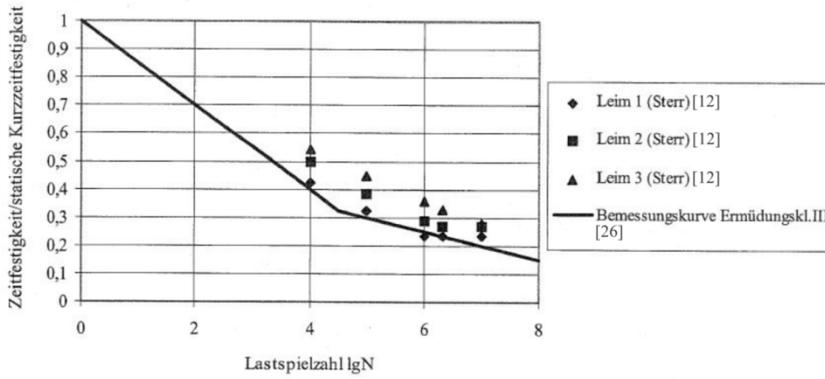


Abbildung 12: SL-IgN Zusammenstellung literaturbekannter Ergebnisse für Blockscher-Wechselversuche an Brettschichtholz nach [12] sowie Bemessungskurve (Ermüdungsklasse III) nach [26]

In den Bildern 13 und 14 sind die Versuchsergebnisse nach [16] und [17] an keilgezinkten Groß- und Kleinproben dargestellt.

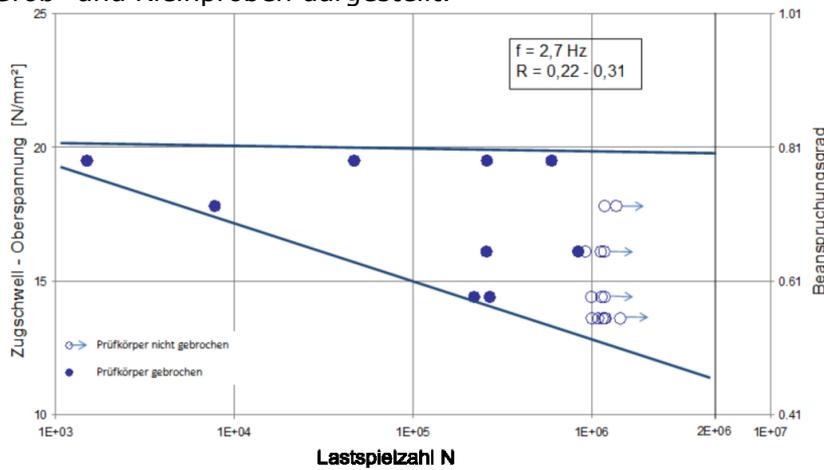


Abbildung 13: σ - bzw. SL-IgN Zusammenstellung [27] der Ergebnisse der Dauerschwell-Zugversuche an keilgezinkten Vollholzbohlen [16]

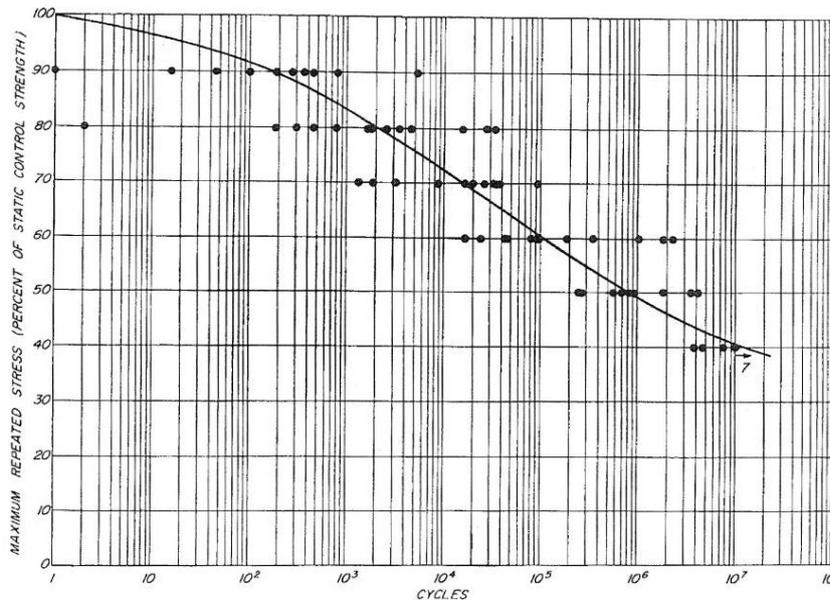


Abbildung 14: Ergebnisse der Dauerschwellversuche an keilgezinkten Kleinproben aus Douglasienholz unter Verwendung eines nordamerikanischen Keilzinkenprofils für tragende Zwecke [17]

Basierend auf den vorstehend auszugsweise präsentierten Literaturlauswertungen wurden in [26] für die unterschiedlichen Ermüdungsklassen I, II und III $k_{fat}(N,R)$ -Funktionale für die ermüdungsbedingte Abminderung der jeweiligen charakteristischen Kurzzeitfestigkeit abgeleitet. Exemplarisch ergibt sich z. B. für die Ermüdungsklasse III im Bereich $4,5 \leq \lg N \leq 6,3$, die Beziehung

$$k_{fat}(N,R) = 1 - 0,1 \lg N \dots \\ \dots + (0,3815 - 0,009783 \lg N) R \dots \\ \dots - (0,225 - 0,075 \lg N) R^2 \dots \\ \dots - (0,1565 - 0,03478 \lg N) R^3. \quad (9)$$

Bild 15 zeigt exemplarisch den Verlauf der Ermüdungsabminderungsfaktoren nach [26] für $N = \text{konst.} = 10^7$. Für weitere Details wird auf [26; 27] verwiesen.

Abschließend bleibt in sehr grober Verallgemeinerung festzustellen, dass Holz und geklebte monolithische, vollholzbaasierte Bauprodukte wie Brettschichtholz und Furnierschichtholz ein deutlich von der Beanspruchungsart (Druck/Zug/Biegung/Schub) abhängiges Ermüdungsverhalten aufweisen. Des Weiteren ist es von großer Bedeutung, ob sich bei der Beanspruchung ein Vorzeichenwechsel der Spannungen ergibt. Wechselbeanspruchungen führen bei allen genannten Belastungsarten zu meist wesentlich größeren Ermüdungsabminderungen.

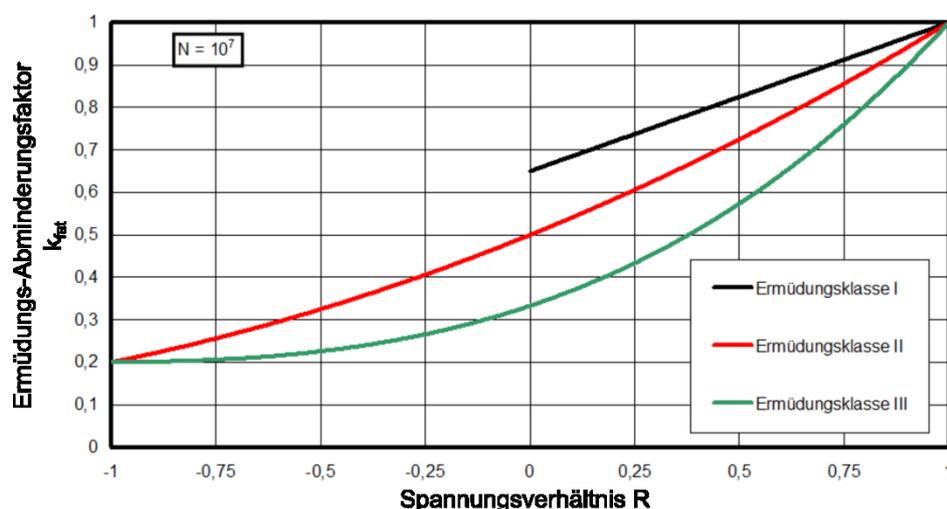


Abbildung 15: Verläufe des Ermüdungsabminderungsfaktors k_{fat} nach [26] für $N = \text{konst.} = 10^7$

4. Ermüdungsbemessung nach Eurocode 5, Teil 2

Zufolge DIN EN 1995-2 [29] darf ein vereinfachter Ermüdungsnachweis auf der Basis einer ermüdungswirksamen Einwirkung mit gleichbleibender Amplitude geführt werden, welche gleichwertig die ermüdungswirksamen Einwirkungen des vollen Spektrums von Belastungsfällen ersetzt. Ein zutreffenderer Ermüdungsnachweis für veränderliche Spannungs- bzw. Kraftamplituden kann auf der Grundlage einer kumulativen linearen Schadenstheorie (Palmgren-Miner-Regel) erfolgen. Die Spannungen und Kräfte infolge ermüdungswirksamer Einwirkungen dürfen am linear elastischen System berechnet werden, wobei die Nachgiebigkeit von Verbindungen berücksichtigt werden sollte.

Ein Ermüdungsnachweis ist normativ dann erforderlich, wenn das Verhältnis κ , hier festigkeitsnormierte Bemessungsschwingbreite genannt, gemäß

$$\kappa = \frac{\left| \sigma_{d,\max} - \sigma_{d,\min} \right|}{\frac{f_k}{\gamma_{M,\text{fat}}}} = \frac{\Delta \sigma_d}{f_k} \quad (10)$$

mit

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

die in Tabelle 1 für Holz/Holzwerkstoffe bei unterschiedlichen Beanspruchungen sowie für Ver-bindungsmittel angegebenen Grenzwerte übersteigt.

Tabelle 1: Festigkeitsnormierte Bemessungsschwingbreite κ gemäß DIN EN 1995-2 [29] in Abhängigkeit von der Beanspruchungsart für Holz und Holzwerkstoffe sowie für mechanische Verbindungsmittel in Holzbauteilen.

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

Die ermüdungswirksamen Spannungen bzw. Kräfte werden aus den ermüdungswirksamen Einwirkungen berechnet. Für den Ermüdungsnachweis für Einwirkungen mit (quasi) konstanter Amplitude gilt:

$$\sigma_{d,\max} \leq f_{\text{fat},d} \quad (11)$$

wobei

$\sigma_{d,\max} = \sigma_{o,d,\max}$	maximale Bemessungsspannung infolge ermüdungswirksamer Einwirkungen
$f_{\text{fat},d}$	Bemessungswert der Ermüdungsfestigkeit.

Der Bemessungswert der Ermüdungsfestigkeit ergibt sich zu (mit $\gamma_{M,\text{fat}} = 1,0$)

$$f_{\text{fat},d} = k_{\text{fat}} \frac{f_k}{\gamma_{M,\text{fat}}} = k_{\text{fat}} \cdot f_k \quad (12)$$

wobei $k_{\text{fat}} = k_{\text{fat}}(N,R)$ den Beiwert für die Festigkeitsminderung der charakteristischen Festigkeit (Zug, Druck, Biegung, Schub) in Abhängigkeit von der Anzahl der Belastungszyklen N und des Spannungsverhältnisses R darstellt. Formal ist k_{fat} damit völlig analog zu dem in DIN EN 1995-1-1 [30] festgelegten Abminderungsfaktor k_{mod} für die kumulierte Lasteinwirkungsdauer (bei unterschiedlichen Klimabedingungen) bei vorwiegend ruhenden Beanspruchungen.

Der Beiwert für die ermüdungsbedingte Abminderung der statischen charakteristischen Festigkeit f_k ergibt sich nach DIN EN 1995-2 mit R gemäß Gl. (4) zu

$$k_{\text{fat}} = 1 - \frac{1 - R}{a(b - R)} \log(\beta N_{\text{obs}} t_L) \quad (13)$$

mit

a, b Ermüdungsbeiwerte für Holzbauteile in Abhängigkeit von der Beanspruchungsart bzw. für unterschiedliche mechanische Verbindungsmittel in Holzbauteilen gemäß Tabelle 2

β Beiwert für die Konsequenz des Schadens, auch Schadensfolge genannt

N_{obs} Anzahl der konstanten Spannungsspiele je Jahr

t_L Bemessungswert der vorgesehenen Nutzungsdauer des Tragwerks in Jahren

Für den Beiwert β sollte im Falle von

beträchtlichen Konsequenzen	$\beta = 3$
keinen beträchtlichen Konsequenzen	$\beta = 1$

angenommen werden.

Tabelle 2: Ermüdungsbeiwerte a und b zur Bestimmung des Ermüdungsabminderungsfaktors k_{fat} gemäß DIN EN 1995-2 [29].

Bauteile, Verbindungen, Beanspruchung	Beiwerte	
	a	b
Holzbauteile beansprucht auf		
- Druck, parallel oder senkrecht zur Feder	2,0	9,0
- Biegung und Zug	9,5	1,1
- Schub	6,7	1,3
Verbindung mit		
- Dübeln und Passbolzen mit $d \leq 12$ mm	6,0	2,0
- Nägeln	6,9	1,2

Wie aus Gl. (13) ersichtlich, wird in DIN EN 1995-2 ein einfacher linearer Zusammenhang zwischen dem Ermüdungsabminderungsfaktor k_{fat} und der Schwingspielzahl $N = N_{\text{obs}} \cdot t_L$ angenommen, d. h.

$$k_{\text{fat}} = 1 + \alpha \lg N \quad (14)$$

mit

$$\alpha = - \frac{1 - R}{a(b - R)} \quad (15)$$

Eine quantitative Auswertung der Gleichungen (13 bzw. 14, 15) für die unterschiedlichen Beanspruchungsarten der Holzbauteile respektive für die unterschiedlichen Holzverbindungen in Abhängigkeit vom Spannungsverhältnis R und von der Schwingspielzahl N ist beispielhaft für die Spannungsverhältnisse $R=0,8$ und -1 in Bild 16 gezeigt.

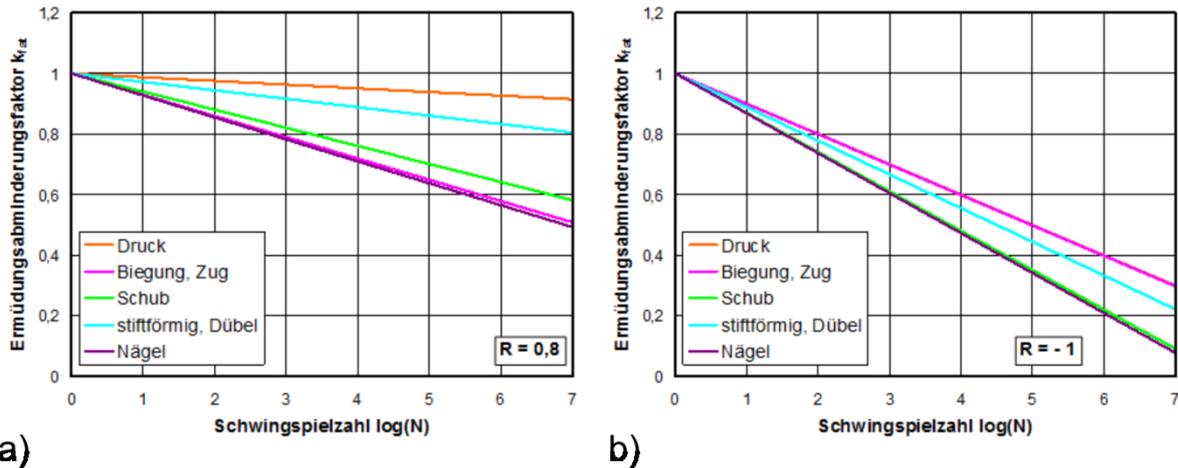


Abbildung 16: Quantitative Auswertung des k_{fat} -Wertes gemäß DIN EN 1995-2 [29] für unterschiedliche Beanspruchungsarten der Holzbauteile respektive für unterschiedliche Holzverbindungen in Abhängigkeit von der Schwingspielzahl N für konstante Spannungsverhältnisse a) $R=0,8$, b) $R=-1,0$.

Vergleicht man die k_{fat} -Werte nach EC5-2 mit den Literaturwerten und hierbei sodann mit den in [26] abgeleiteten Beziehungen, so ergibt sich der in Bild 17 exemplarisch für die Fälle Biegung und Schub bei einem konstanten Spannungsverhältnis von $R=0,1$ dargestellte Sachverhalt, der weitgehend repräsentativ für alle Beanspruchungsarten und Spannungsverhältnisse ausweist, dass die heutigen EC5-Ermüdungsabminderungsfaktoren deutlich auf der sicheren Seite liegen, was zu unwirtschaftlichen Konstruktionen führen kann.

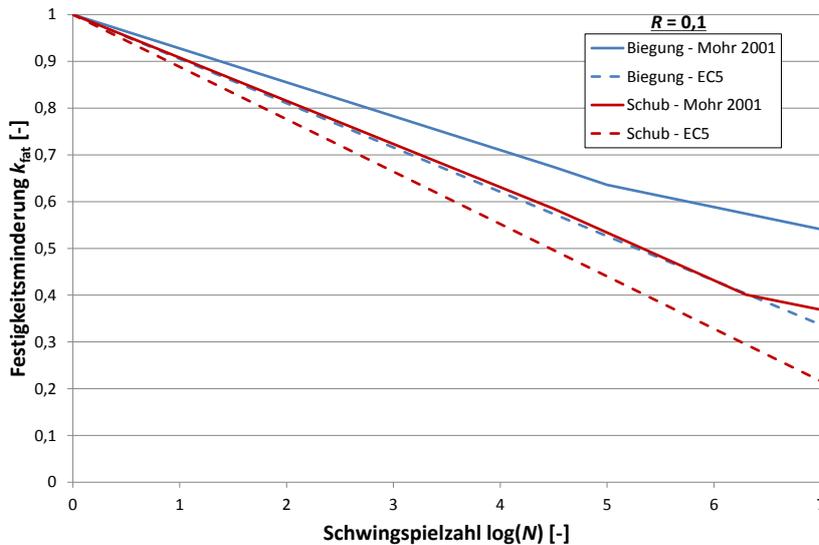


Abbildung 17: Vergleich der k_{fat} -Faktoren für Biegung und Schub nach [26] und [29] für ein konstantes Spannungsverhältnis $R=0,1$.

5. Neuere Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten von Keilzinkenstößen in Vollholz sowie an LVL-Verbundbauteilen

In einem Forschungsvorhaben zur dynamischen Beanspruchbarkeit von unbehandeltem und imprägniertem keilgezinktem Kiefernvollholz mit Querschnittsabmessungen von 100 mm x 200 mm wurden umfangreiche Biegeschwell-Ermüdungsversuche mit einem Spannungsverhältnis mit $R=0,5$ durchgeführt [27; 28]. Für die Gesamtheit alle 80 Prüfkörper in vier Prüfkörpergruppen A-D, die mit liegenden und stehenden Keilzinken-anordnungen geprüft wurden, wurde für die Wöhlerkurve auf dem Medianlevel unter Einbezug der mittleren Kurzzeitfestigkeit die lineare Beziehung

$$SL_{12}=k_{fat}=0,957-0,073 \cdot \lg N \quad (16)$$

erhalten. Eine bessere Anpassung an die experimentellen Ergebnisse, die durchweg S-förmig zwischen Kurzzeit- und Dauerfestigkeit verlaufen, ergibt sich mittels nichtlinearer oder abschnittsweise (tri-)linearer Beziehungen (vgl. Bild 18).

Hieraus ergibt sich für die experimentell gut abgesicherte Schwingspielzahl von $N=2 \cdot 10^6$ ein k_{fat} -Wert von 0,5. Dieser Abminderungswert liegt deutlich niedriger als der Wert $k_{fat}=0,6$, der mittels der in [26] für zugschwellbeanspruchte Keilzinkenverbindungen vorgeschlagenen Beziehung erhalten wird. Im Vergleich hierzu erhält man mittels der EC5-2-Beziehung für Schubermüdung einen Wert von $k_{fat}=0,41$, der deutlich auf der sicheren Seite liegt. Ob die Gleichungen nach [29], die insbesondere im Bereich $0,5 \leq R \leq 1,0$ eine deutliche Abminderung der Ermüdungsfestigkeit ergeben, auch im Biegewechselbereich noch sichere Abschätzungen liefern, lässt sich ohne weitere Versuche nicht sagen. In diesem Zusammenhang ist auch auf die Ausführungen in [19] hinzuweisen, in denen auf die erhöhte Ermüdungsproblematik und die Erfordernis diesbezüglicher Untersuchungen diskreter scherbeanspruchter Holzverbindungen hingewiesen wurde, vgl. auch [27].

Im Zusammenhang mit projektierten hohen Holztürmen für Windenergieanlagen im Multimegawatt-Bereich (Bild 20) wurden an der MPA Universität Stuttgart in den letzten Jahren umfangreiche Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten spezieller Holz-Kompositaufbauten (Bild 19) durchgeführt.

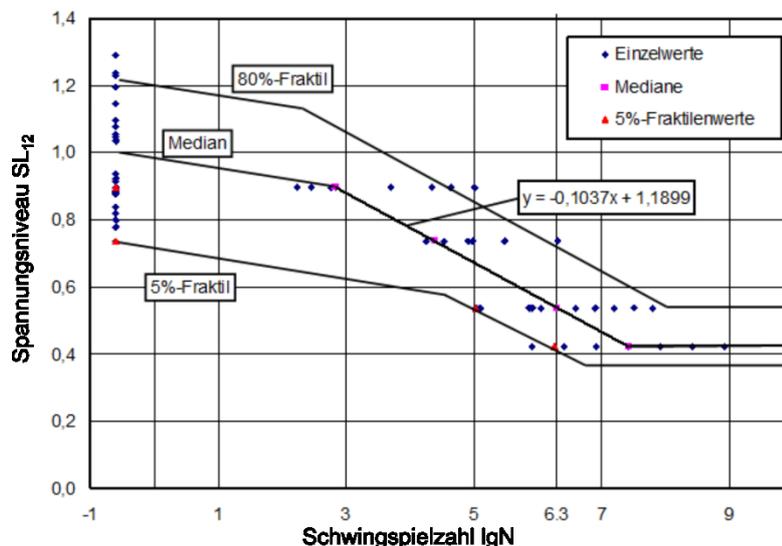


Abbildung 18: SL_{12} - $\lg N$ -Ergebnisse (feuchtenormiert auf 12%) der Biegeschwellversuche ($R=0,5$) an imprägnierten und unbehandelten Kiefernholz-Prüfkörpern der Versuchsgruppen B und C [27]. Mitangegeben sind die Ermüdungskurven auf dem Niveau des Medians, des 5%- sowie des 80%-Quantils (geschätzt).



Abbildung 19: Ansicht eines untersuchten LVL-Kompositaufbaus

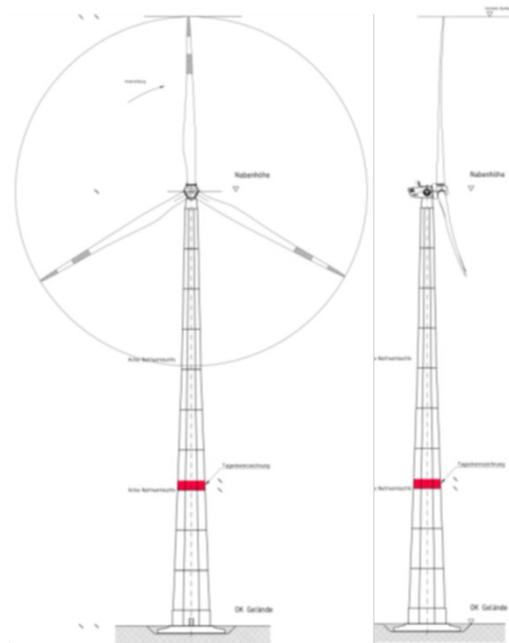


Abbildung 20: Turmdesign eines konzipierten, achteckigen 129 m hohen Holzturms aus bis zu 30 cm dicken und bis zu 17 m langen LVL-Kompositbauteilen

Bild 21 zeigt die Ansicht des realisierten Versuchsaufbaus für vollmaßstäbliche Biege- wechselversuche in geometrischer Anlehnung an EN 408 [31]. Die Auslegung von Versuchen im Biege- und Schubwechselbereich an großformatigen Holzbauteilen ist versuchs- technisch vergleichsweise anspruchsvoll, da u. a. beim Durchfahren der Nulllage kein abrupter schlupfbedingter Lastabfall auftreten darf, der steuerungstechnisch als Bruch und damit als Versuchsabbruchskriterium gewertet wird. Bild 22 zeigt vergleichend die Ermüdungskurven nach EC5-2 [29], [26] und die aus den MPA-Versuchen für $\log(N)=\text{konst.}=7$ an einem speziell untersuchten LVL-Kompositaufbau bestimmten Beziehungen [32]. Die Darstellung veranschaulicht deutlich, dass die Ermüdungskurven des Eurocodes 5-2 für den gesamten Schwellbereich und für den niedrigen Wechselbereich eine deutlich zu konservative Materialausnutzung repräsentieren und damit sehr unwirtschaftlich sind. Im Vergleich dazu stimmen die Ermüdungskurven nach [26] und der MPA Stuttgart-Untersuchungen für den überwiegenden Bereich der Spannungsverhältnisse $-0,5 \leq R \leq 1$ sehr gut überein.

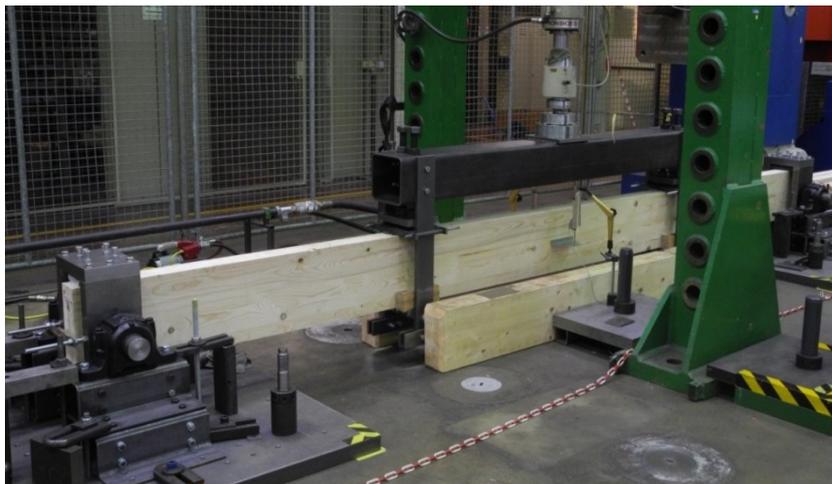


Abbildung 21: Ansicht des realisierten Versuchsaufbaus von Biege- wechselversuchen mit LVL-Kompositbauteilen.

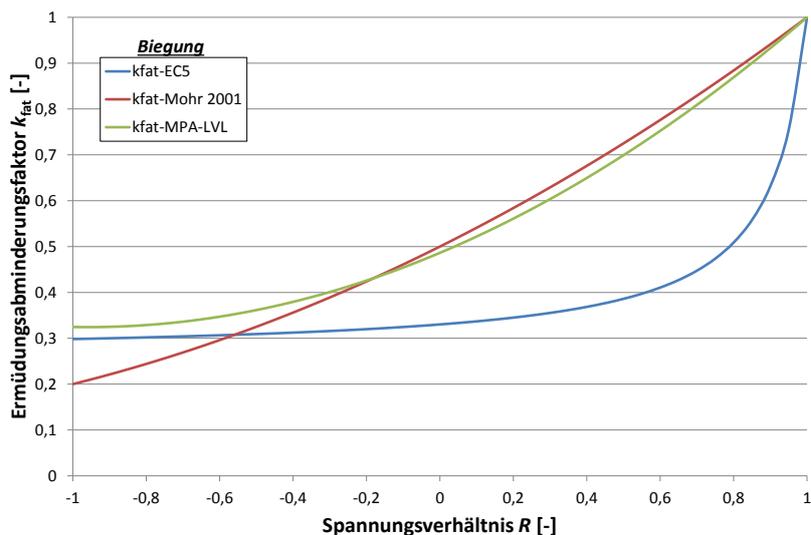


Abbildung 22: Ermüdungskurven nach EC5-2, Mohr und MPA-Versuchen an speziellen LVL-Kompositaufbauten.

6. Literatur

- [1] Brand, S.; Röhm, J.; Kunz, F. (2015): Züblin-Tower: Ein innovativer Holzturm für Windenergieanlagen mit großer Nabenhöhe. In: Tagungsband, 3. Stuttgarter Holzbau-Symposium – Neueste Entwicklungen bei geklebten Holzbauteilen, Stuttgart.
- [2] DIN EN 1993-1-9 (2005) Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung.
- [3] DIN 50100 (1978): Werkstoffprüfung – Dauerschwingversuch – Begriffe, Zeichen, Durchführung, Auswertung.
- [4] Kuhlmann, U.; Dürr, A.; Günther, H. P. (2003): Kranbahnen und Betriebsfestigkeit. Stahlbau-Kalender, 375-496.
- [5] Haibach, E. (2006): Betriebsfestigkeit-Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. 3. Aufl., Springer, Berlin.
- [6] Kostea, D. (1982): Grundlagen für Betriebsfestigkeits-Nachweise. In: Stahlbau Handbuch, Stahlbau-Verlags-GmbH Köln.
- [7] Küch, W. (1937): Heimische Werkstoffe des Flugzeugbaues. DVL-Jahrbuch, Dokumentationsstelle für Luftfahrtforschung, 317-339.
- [8] Küch, W. (1942): Zeit- und Dauerfestigkeit von Lagenhölzern. HolzRoh-Werkstoff 5, Nr. 2/3, 69-73.
- [9] Fuller, F. B.; Oberg, T. T. (1943): Fatigue Characteristics of Natural and Resin-Impregnated, Compressed, Laminated Woods. Journal of the Aeronautical Sciences, Nr. 3, 81-85.
- [10] Lewis, W. C. (1951): Fatigue of Wood and Glued Joints Used in Laminated Construction. In: Proc. Forest Products Research Society, Vol. 5, 221-229.
- [11] Lewis, W. C. (1962): Fatigue Resistance of Quarter Scale Bridge Stringers in Flexure and Shear. In: Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, Report Nr. 2236.
- [12] Sterr, R. (1962): Untersuchungen zur Dauerfestigkeit von Schichtholzbalken. Dissertation.
- [13] Maku, T.; Sasaki, H. (1963): The Rotation Bending Fatigue Test of Glued Laminated Wood. Bulletin Wood Research Institute, Kyoto, Nr. 31, 1-10.
- [14] Sterr, R. (1963): Untersuchungen zur Dauerfestigkeit von Schichtholzbalken. HolzRoh-Werkstoff 21, Nr. 2, 47-61.

- [15] Ibuki, Y.; Sasaki, H; Kawamoto, M; Maku, T. (1963): The Plane Bending Fatigue Strength of Glued Laminated Wood. Bulletin Wood Research Institute, Kyoto, Nr. 31, 11-22.
- [16] Egner, K.; Jagfeld, P. (1964): Untersuchungen an keilgezinkten Bohlen nach langjähriger Gebrauchsdauer – Verhalten bei Zugschwellbeanspruchung. Holz Roh- Werkstoff 22, Nr. 3, 107-113.
- [17] Bohannan, B.; Kanvik, K. J. (1969): Fatigue strength of finger joints. U.S.D.A. Forest Service Research Paper FPL 114, Forest Prod. Lab., Madison, Wisconsin.
- [18] Roth, W. (1978): Festigkeitsuntersuchungen an lamellierten Rahmenecken unter statischer und Dauerschwellbelastung. Dissertation, Universität Karlsruhe.
- [19] Ehlbeck, J. (1982): Dauerschwingfestigkeit von Holz und Holzverbindungen – eine Bestandsaufnahme. In: Ehlbeck, J. und Steck, G., (Ed.) Ingenieurholzbau in Forschung und Praxis. Bruderverlag, Karlsruhe.
- [20] Tsai, K.; Ansell, M. P. (1985): Fatigue testing of wood composites for aerogenerator rotor blades. Garrad, A., (Ed.) In: Wind Energy Conversion – Proceedings of the 1985 7th BWEA Wind Energy Conference. 285–292.
- [21] Marsoem, S. N.; Bordonne, P. A.; Okuyama, T. (1987): Mechanical Responses of Wood to Repeated Loading II. Journal of the Japan Wood Research Society 33, Nr. 5, 354-360.
- [22] Hayashi, T. (1989): Fatigue Properties of Structural Laminated-Veneer-Lumber. Journal of the Japan Wood Research Society 35, Nr. 7, 616-624.
- [23] Tsai, K. T.; Ansell, M. P. (1990): The fatigue properties of wood in flexure. Journal of Material Science 25, 865-878.
- [24] Bonfield, P. W.; Ansell, M. P. (1991): Fatigue properties of wood in tension, compression and shear. Journal of Materials Science 26, 4765-4773.
- [25] Kreuzinger, H.; Mohr, B. (1994): Holz und Holzverbindungen unter nicht vorwiegend ruhenden Einwirkungen. Fraunhofer IRB Verlag.
- [26] Mohr, B. (2001): Zur Interaktion der Einflüsse aus Dauerstands- und Ermüdungsbeanspruchung im Ingenieurholzbau. Dissertation, Technische Universität München.
- [27] Aicher, S.; Stapf, G. (2010): Dynamische Beanspruchbarkeit von keilgezinktem Vollholz aus Kiefer – Biegeschwellfestigkeit vollmaßstäblicher Biegeprüfkörper in Abhängigkeit von relevanten Bauteil- und Beanspruchungsparametern. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben 7357201/060700206 des Holzabsatzfonds der deutschen Forst- und Holzwirtschaft. Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart.
- [28] Aicher, S.; Stapf, G. (2010): Fatigue behaviour of finger jointed lumber. Paper CIB-W18/43-12-1 Proceedings of Int. Council Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W18 -- Timber Structures, Meeting 43 Nelson, New Zealand.
- [29] DIN EN 1995-2 (2010) Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 2: Brücken.
- [30] DIN EN 1995-1-1 (2010) Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.
- [31] DIN EN 408 (2012): Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brett-schichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften.
- [32] Aicher, S. (2014): Gutachtliche Stellungnahme: Ergänzende Auswertung der Ermüdungsversuche an Furnierschichtholz (LVL)- und Brettsperrholz (LENO)-Verbundwerkstoffen betreffend stetiger Abminderungsfaktoren k_{fat} in Abhängigkeit von Schwingspielzahl und Spannungsverhältnis.