

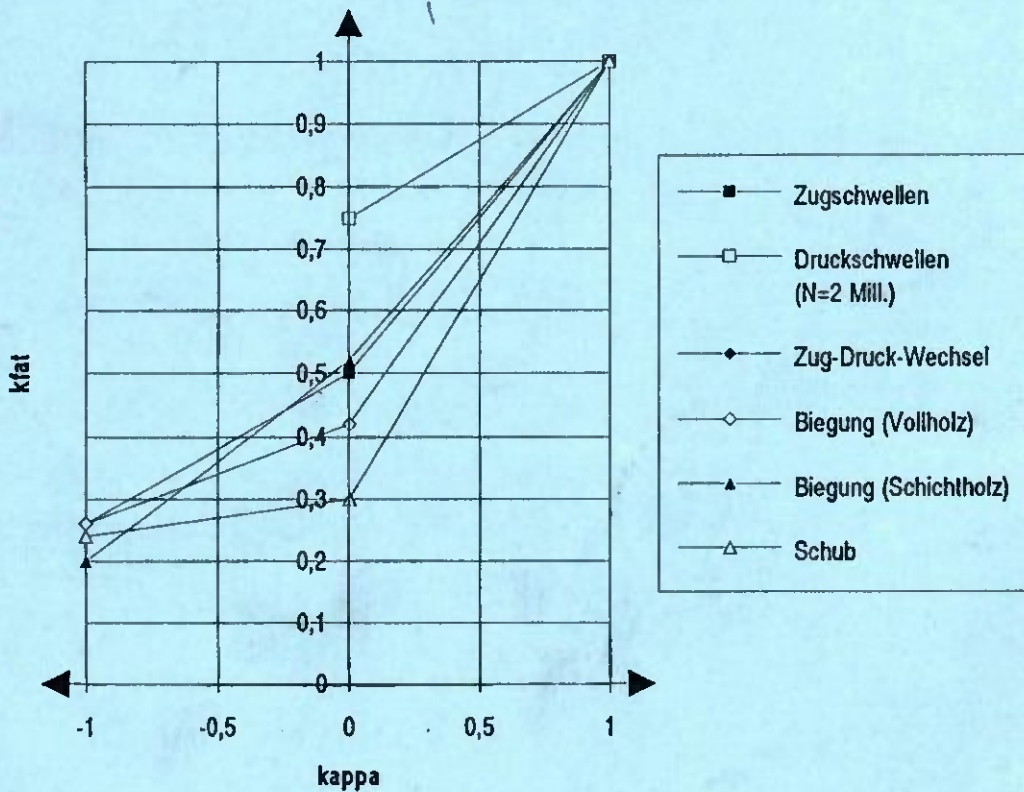
1x Day, Oberbergamt, Ehlbeck, Moser, Charlie E - 92/8
 Becker KJ., 302, Arge, RB, 30F, Jüml.
 Felyl.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
 INSTITUT FÜR TRAGWERKSBAU
FACHGEBIET HOLZBAU
 Arcisstraße 21, 80333 München, Tel. :089/2105-2096



Prof. Dr.-Ing. H. Kreuzinger
 Dipl.-Ing. B. Mohr

Holz und Holzverbindungen unter nicht vorwiegend ruhenden Einwirkungen



k_{fat} -Werte bei 10^7 Lastspielen in Abhängigkeit von κ

- Abschlußbericht -
 Mai 1994

Dieses Forschungsvorhaben wurde durchgeführt für die Entwicklungsgemeinschaft Holz (EGH) in der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung (DGfH) und mit Mitteln des Bayerischen Oberbergamtes.

Übersicht:

Holz und Holzverbindungen unter nicht vorwiegend ruhenden Einwirkungen

Die Lasten werden in der deutschen Norm DIN 1055 Teil 3 nach "vorwiegend ruhenden" und "nicht vorwiegend ruhenden" Lasten unterschieden. Für nicht vorwiegend ruhende Lasten sind dann z.T. andere Bemessungsvorschriften anzuwenden. Der Begriff "nicht vorwiegend ruhend" wird in diesem Forschungsbericht weiter unterschieden in "oft wiederholte Einwirkungen", "stoßartige Einwirkungen", "Erdbeben" und "Einwirkungen an schwingungsanfälligen Bauten". Der Schwerpunkt dieses Forschungsvorhabens behandelt die "oft wiederholten Einwirkungen". Wenn Holz, Holzwerkstoffe und Holzverbindungen oft wiederholt beansprucht werden, versagt das Material schon bei einer deutlich geringeren Beanspruchung als die statische Kurzzeitfestigkeit. Dies wird auch Ermüdung genannt.

Aus der umfangreichen vorliegenden Literatur, die mit Recherchen an nationalen und internationalen Datenbanken ermittelt worden ist, werden die Versuchsergebnisse zusammengetragen und zusammenhängend ausgewertet. Dabei ergibt sich, daß bei einer schwellenden Beanspruchung i.d.R. ca. die Hälfte und bei einer wechselnden Beanspruchung i.d.R. ca. ein Viertel der statischen Festigkeit oft wiederholt ertragen werden kann. Diese Ermüdungsfestigkeit ist teilweise von der Beanspruchungsart und dem Material abhängig. Es zeigt sich beispielsweise, daß die Ermüdungsfestigkeit der Verbindungsmittel von der Ermüdungsfestigkeit des verwendeten Metallteils abhängig ist.

Es wird ein Bemessungskonzept entworfen, das die oft wiederholten Einwirkungen berücksichtigt. Darin wird vorgeschlagen, daß bei oft wiederholten Einwirkungen die erreichbaren Festigkeiten mit einem "Ermüdungsfaktor" k_{fat} , der dem Modifikationsfaktor k_{mod} ähnlich ist, abgemindert werden. Diese "Ermüdungsfaktoren" werden aus den Versuchsergebnissen der vorliegenden Literatur gebildet. Das Bemessungskonzept kann sowohl in den Eurocode 5 als auch in die deutsche Holzbaunorm DIN 1052 eingefügt werden.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	7
1.1.	Themenstellung.....	7
1.2.	Arbeitsweise für die Literaturrecherche.....	7
1.3.	Geschichte der Dauerfestigkeitsversuche im Holzbau.....	8
1.4.	Verwendete Formelzeichen.....	9
2.	Allgemeines	11
2.1.	Nicht vorwiegend ruhende Einwirkungen.....	11
2.1.1.	Oft wiederholte Einwirkungen.....	11
2.1.2.	Stoßartige Einwirkungen.....	11
2.1.3.	Erdbeben.....	12
2.1.4.	Einwirkungen bei schwingungsanfälligen Bauten.....	12
2.2.	Begriffe.....	12
2.3.	Prüfverfahren zur Dauerfestigkeit.....	16
	1) Wöhlerverfahren.....	16
	2) Prüfung der Restfestigkeit.....	17
	3) Treppenstufenverfahren ("stair case"-Verfahren).....	17
2.4.	Besonderheiten im Holzbau.....	18
2.4.1.	Dauerstandfestigkeit.....	18
2.4.1.1.	Experimentelle Untersuchungen.....	18
	1) Dauerstandversuche.....	18
	2) Restfestigkeit nach einem Dauerstandversuch.....	19
	3) Parameter.....	21
2.4.1.2.	Theorien für die Dauerstandfestigkeit.....	22
2.4.1.3.	Schadensakkumulationshypothesen.....	22
	1) Einführung.....	22
	2) "Canadian Model".....	23
	3) "U.S.-Model".....	24
	4) Vergleich der beiden Modelle.....	24
	5) Anwendung der Hypothesen.....	25
2.4.1.4.	Bemessung.....	25
	1) Eurocode 5 (EC 5).....	25
	2) DIN 1052.....	26
2.4.2.	Schädigungen (Kerben).....	27
2.5.	Sonstiges.....	28
2.5.1.	Schlagversuche.....	28
2.5.2.	Oft wiederholte Schlagversuche.....	28
3.	Zeit- und Dauerfestigkeit.....	29
3.1.	Ergebnisse aus der Literatur.....	29
3.1.1.	Dauerfestigkeit von Vollholz, Schichtholz, Furnierholz, Sperr- und Sternholz.....	31
3.1.1.1.	Zugschwellen.....	31
3.1.1.2.	Druckschwellen.....	33
3.1.1.3.	Zug-Druck-Wechsel.....	37
3.1.1.4.	Biegeschwellen.....	39
	1) Vollholz.....	40
	2) Schichtholz.....	41

3.1.1.5.	Biegewechsel.....	43
1)	Vollholz.....	43
2)	Schichtholz.....	44
3)	Sperr- und Sternholz.....	46
3.1.1.6.	Schub /Abscheren.....	47
1)	Holz und Holzwerkstoffe.....	47
2)	Abscheren in der Leimfuge unter schwellender Beanspruchung.....	48
3)	Abscheren in der Leimfuge unter wechselnder Beanspruchung.....	49
3.1.1.7.	Querdruck, Querkzug, Biegung senkrecht zur Faser.....	49
1)	Querdruck.....	49
2)	Querkzug.....	50
3)	Biegung senkrecht zur Faser.....	51
3.1.1.8.	Torsion.....	52
3.1.2.	Dauerfestigkeit der Verbindungsmittel.....	53
3.1.2.1.	Stabdübel, Paßbolzen, Bolzen.....	53
3.1.2.2.	Nägels.....	55
3.1.2.3.	Nagelplatten.....	58
1)	Schäftungen.....	60
2)	Stoßfugen.....	61
3)	Keilzinken.....	62
4)	Rahmenecke.....	64
5)	Verleimte Dübel.....	65
6)	Leimverbindungen, die senkrecht zur Leimfuge beansprucht werden.....	65
7)	Sonstige Ergebnisse.....	66
8)	Zusammenfassende Bewertung.....	66
3.1.2.5.	Dübel.....	67
1)	Dübeltyp A nach DIN 1052 Teil 2.....	67
2)	Dübeltyp B nach DIN 1052 Teil 2.....	68
3)	Dübeltyp E nach DIN 1052 Teil 2.....	69
4)	Einpreßdübel "Krallenband".....	69
3.1.2.6.	Schrauben.....	70
3.1.3.	Dauerfestigkeit von Spanplatten und Hartfaserplatten.....	71
3.1.3.1.	Spanplatten.....	71
1)	Biegewechsel.....	71
2)	Biegeschwellen.....	72
3)	Zugschwellen in Plattenebene.....	73
4)	Zugschwellen senkrecht zur Plattenebene.....	73
5)	Zug-Druck-Wechsel.....	74
6)	Schub /Abscheren.....	74
7)	Zusammenfassung.....	74
3.1.3.2.	Hartfaserplatten.....	75
3.1.4.	Holzkonstruktionen unter einer oft wiederholten Beanspruchung.....	76
3.1.5.	Restfestigkeit.....	77
1)	Druck- und Zugschwellen.....	77
2)	Biegeschwellen.....	79
3)	Biegewechsel.....	81
4)	Zug-Druck-Wechsel.....	82
5)	Verbindungsmittel.....	82
6)	Stabwerkträger mit geleimten Knoten.....	83
7)	Sonstige Ergebnisse.....	83
8)	Zusammenfassung.....	84

3.2.	Zusammenstellung nach bestimmten Kriterien	85
3.2.1.	Wöhlerlinien	85
3.2.1.1.	Existenz einer Dauerfestigkeitsgrenze.....	85
3.2.1.2.	Form der Wöhlerlinien	87
3.2.2.	Parameter der Zeit- und Dauerfestigkeit.....	89
3.2.2.1.	Frequenz.....	89
3.2.2.2.	Rohdichte	90
3.2.2.3.	Holzarten.....	92
3.2.2.4.	Güteklasse	93
3.2.2.5.	Feuchtigkeit	94
3.2.2.6.	κ -Wert.....	96
3.2.2.7.	Probengröße	98
3.2.2.8.	Nichtparalleler Rand-Faser-Verlauf.....	99
3.2.2.9.	Klimawechsellagerung.....	100
3.2.2.10.	Vorbehandlung mit Holzschutzmitteln.....	101
3.2.2.11.	Temperatur.....	102
3.2.3.	Anwendung einer Schädigungshypothese	103
	1) Schädigungshypothese nach Palmgren-Miner.....	103
	2) Palmgren-Miner im Holzbau	104
	3) Erweiterte Schadensakkumulationshypothesen aus der Zeitstandfestigkeit	105
	4) Rechnung mit Palmgren-Miner	106
3.2.4.	Verformungen	108
	1) Verhalten des Elastizitätsmoduls	108
	2). Verformungen von Verbindungsmitteln	110
	3) Zusammenfassende Bewertung.....	111
3.2.5.	Bruchmechanik	112
3.2.6.	Einfluß von Holzunregelmäßigkeiten auf die Zeit- und Dauerfestigkeit.....	115
3.2.7.	Einfluß oft wiederholter Einwirkungen auf die Dämpfung	118
3.2.8.	Sonstige Erkenntnisse im Holzbau	119
	1) Einfluß der Amplitudenform der oft wiederholten Beanspruchungen.....	119
	2) Temperaturverlauf während der Dauerfestigkeitsprüfung	120
	3) Schädigungen an den Fasern	120
3.3.	Nachweise aus der Literatur.....	121
3.3.1.	DIN-Normen	121
	1) DIN 1052 Teil 1: Holzbautragwerke.....	121
	2) DIN 1052 Teil 2: Holzbauwerke - Mechanische Verbindungen.....	121
	3) DIN 1052 Teil 3: Holzbauwerke in Tafelbauart - Berechnung und Ausführung	122
	4) DIN 1074: Holzbrücken	122
	5) DIN 4178: Glockentürme - Berechnung und Ausführung	123
	6) DIN 18900: Holzmastenbauart - Berechnung und Ausführung	123
	7) DIN 4112: Fliegende Bauten - Richtlinien für Bemessung und Ausführung.....	123
	8) DIN 4024 Teil 1: Maschinenfundamente - Elastische Stützkonstruktionen	123
	9) Zusammenfassende Bewertung.....	124
3.3.2.	Ausländische Normen und Standards.....	124
3.3.3.	Sonstige Literatur	125
3.3.4.	Zusammenfassende Bewertung	127
4.	Anpralllasten und Stöße	128
5.	Zusammenfassung.....	131
5.1.	Ergebnisse.....	131
5.2.	Noch ausstehende Untersuchungen.....	135

6.	Bemessungskonzepte für oft wiederholte Beanspruchungen.....	137
6.1.	Allgemeines	137
6.2.	Theoretische Grundlagen und Annahmen.....	138
6.3.	Anpassung an Eurocode 5	142
6.3.1.	Allgemeines	142
6.3.2.	Statischer Nachweis	142
6.3.3.	Nachweis mit oft wiederholten Einwirkungen.....	144
6.4.	Ergänzung zur DIN 1052 und DIN 1074	146
6.5.	Bemessungsbeispiel.....	148
6.5.1.	Statisches System, Schnittgrößen.....	148
6.5.2.	Bemessung mit oft wiederholten Einwirkungen	148
	1) Biegung und Normalkraft	149
	2) Schub.....	151
6.5.3.	Bewertung.....	152
6.6.	Bewertung der DIN 1052 Teil 1 und 1074.....	153
6.6.1.	Vorbemerkungen.....	153
6.6.2.	Regelungen der DIN 1052 Teil 1	153
6.6.3.	Regelungen der DIN 1074	154
6.6.4.	Vorgeschlagenes Bemessungskonzept.....	154
6.6.5.	Diskussion.....	155
6.6.6.	Vergleich und Bewertung der Ergebnisse	156
7.	Literatur.....	157
7.1.	Allgemeine Hinweise.....	157
7.2.	Literatur.....	157
7.3.	Nicht zu beschaffende Literatur.....	177
7.4.	Zitierte Normen und Standards.....	179
7.4.1.	Deutsche Normen (DIN) und ihre Erläuterungen.....	179
7.4.2.	Ausländische und internationale Normen	179
8.	Anlagen.....	181
8.1.	Tabellen zur Auswertung der Wöhlerlinien	181
8.2.	Ermittlung der k_{fat} -Werte aus den Ergebnissen.....	211
8.2.1.	Vorbemerkungen.....	211
8.2.2.	Beispiel für die Ermittlung von k_{fat}	213
8.2.3.	Zugschwellen	214
8.2.4.	Druckschwellen.....	215
8.2.5.	Zug-Druck-Wechsel	216
8.2.6.	Biegeschwellen.....	218
	1) Vollhölzer.....	218
	2) Schichthölzer.....	219
8.2.7.	Biegewechsel.....	220
	1) Vollhölzer.....	220
	2) Schichthölzer.....	221
8.2.8.	Schub	222
	1) Schub bei Hölzern unter schwellender Beanspruchung.....	222
	2) Schub bei Leimfugen unter schwellender Beanspruchung.....	222
	3) Schub bei Leimfugen unter wechselnder Beanspruchung.....	223

1. Einleitung

1.1. Themenstellung

Der allgemeine Holzbau und der moderne Ingenieurholzbau findet seinen Anwendungsbereich in erster Linie bei Dach- und Hallenkonstruktionen, die vorwiegend ruhend im Sinne der Lastannahmen für Bauten belastet werden. Es gibt aber auch Bauwerke, bei denen die eingesetzten Materialien und Verbindungen nicht vorwiegend ruhenden Einwirkungen ausgesetzt sind.

Die Dauerfestigkeit von Holz, Holzwerkstoffen und Holzverbindungen ist ein noch unvollständig erforschtes Gebiet. Mangels Erkenntnisse werden daher dem Holzbau Einsatzgebiete mit derartigen Beanspruchungen erschwert (vgl. /Ger3/, /Heil/).

Aus diesen Gründen scheint es geboten, die vorhandenen Kenntnisse zusammenhängend zu bewerten und geeignete Empfehlungen für die Anwendung von nicht vorwiegend ruhenden beanspruchten Holzkonstruktionen und für weitere Untersuchungen auszuarbeiten.

1.2. Arbeitsweise für die Literaturrecherche

1) Der Bericht über die Literatursammlung und -auswertung "Dynamische Beanspruchungen von Holz- und Holzkonstruktionen" von Ehlbeck und Belchior-Gaspard von 1989 /Eh2/ wurde eingesehen und diente als Grundlage und Ausgangspunkt der weiteren Literaturrecherchen und -sammlungen.

2) Die einschlägigen Literatursammlungen des Informationszentrums Raum und Bau (IRB) in Stuttgart wurden eingesehen. Ergänzende Literatur- und Datenbankrecherchen wurden ebenfalls vom Informationszentrum Raum und Bau (IRB) in Stuttgart durchgeführt. Dabei wurden folgende Datenbanken verwendet:

- Datenbanken des IRB Stuttgart:
 - Raumordnung, Städtebau, Wohnungswesen, Bauwesen (RSWB)
 - The CIB International Construction Database (ICONDA)
 - Bauforschungsprojekte (BAUFO)
 - Forschungsprojekte Raumordnung, Städtebau, Wohnungswesen (FORS)
 - Monument Documentation (MONUDOC)
 - Bauobjektdatebank (BODO)

3) Die TU München bietet die Möglichkeit, selbständig Literaturrecherchen an CDROM-Datenbanken durchzuführen. Für dieses Vorhaben wurden Datenbanken aus dem Bereich des Bauingenieurwesens und des Maschinenbaus verwendet. Das waren im einzelnen:

- Datenbanken der TU München:
 - The CIB International Construction Database (ICONDA) von 1976 bis 6/1992
 - Raumordnung, Städtebau, Wohnungswesen, Bauwesen (RSWB) von 1977 bis 1992
 - Zeitschriftendatenbank Science Citation Index (SCI) von 1987 bis 1992
 - Compendex von 1986 bis 1992

4) Von der Datenbank TREECD (Anm.: Der genaue Name ist den Verfassern unbekannt), die Veröffentlichungen bis 1991 zitierte, wurden die jüngeren Titel miteinbezogen.

5) Zitate vorhandener Veröffentlichungen wurden weiterverfolgt.

6) Über den Beuth-Verlag Berlin wurden Holzbaunormen der Länder Großbritannien, Schweiz, Österreich, Frankreich, Australien, Dänemark und Kanada ausgeliehen und eingesehen. Normen, die älteren Datums sind oder bei denen kein Hinweis auf die Thematik zu erwarten war, wurden nicht eingesehen.

Anmerkung:

Die Literatursuche kann keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben, da es möglich ist, daß einschlägige Literatur nicht zitiert wird, sie nicht durch die o. g. Datenbanken erfaßt wird oder daß die bei der Suche verwendeten zahlreichen Stichwörter nicht im Titel oder Abstrakt vorkommen. Aus der Fülle der Literaturangaben wurden nur diejenigen Werke ausgewählt, die durch ihre Titel oder Kurzbeschreibungen einen Hinweis auf die in diesem Forschungsbericht zu behandelnde Problematik erkennen ließen.

1.3. Geschichte der Dauerfestigkeitsversuche im Holzbau

Um die Brüche von Eisenbahnachsen, die unter den zulässigen Beanspruchungen versagten, zu erklären, begann Wöhler Dauerfestigkeitsversuche für den Stahl durchzuführen. Dabei stellte er fest, daß die Festigkeit dieses Werkstoffes bei oft wiederholten Beanspruchungen abnimmt.

Dieses Problem trat für den Holzbau auf, als man begann, Flugzeuge mit Holz und Holzwerkstoffen zu bauen. Aus dieser Zeit stammten viele Ergebnisse, die in diesem Bericht verwendet werden. Daneben wurden vereinzelt noch Versuche für den Ingenieurholzbau durchgeführt. Als während des 2. Weltkrieges der Werkstoff Stahl für die Rüstung eingespart wurde, sah man sich in Deutschland veranlaßt, Holz anstelle des Stahls zu verwenden. In dieser Zeit wurden z.B. Eisenbahnbrücken /Gab1/, Straßenbrücken /Gab2/ und Kranbahnträger /Gab5/ entworfen, auf ihre Dauerfestigkeit untersucht und auch gebaut. Ein neuer Aufschwung für die Untersuchung des Holzes bezüglich seiner Ermüdungsfestigkeit ergab sich aus seinen günstigen Eigenschaften für den Einsatz als Rotor von Windkraftanlagen.

1.4. Verwendete Formelzeichen

1) Hauptzeiger

a	: Rißhalbmesser
A	: Querschnittsfläche
f	: Festigkeit (eines Baustoffes)
k	: Abminderungsfaktor
k_{Erm}	: Abminderungsfaktor für ermüdungswirksame Einwirkungen (Bemess. nach DIN)
k_{fat}	: Abminderungsfaktor für ermüdungswirksame Einwirkungen (Bemess. nach EC 5)
k_F	: Faktor zur Berücksichtigung des Schädigungsbeiwertes γ_{fat}
k_{mod}	: Modifikationsfaktor
k_S	: Abminderungsfaktor für schwellende Einwirkungen nach DIN
$k_{S,W}$: Abminderungsfaktor für schwellende und wechselnde Einwirkungen nach DIN
k_W	: Abminderungsfaktor für wechselnde Einwirkungen nach DIN
k_T	: Faktor zur Berücksichtigung verschiedener Einwirkungszeiten
K	: Spannungsintensitätsfaktor
n	: Zahl der Werte einer Stichprobe (Statistik)
n_j	: bestimmte Betriebslastspielzahl
N	: Lastspielzahl
R	: Beanspruchbarkeit (Bemessungswert des Widerstandes)
s	: Standardabweichung (In der Statistik auch mit σ bezeichnet.)
S	: Schnittgrößen und Schnittkräfte
SH	: Schichtholz
SL	: Abminderungswert der Zeitstandfestigkeit
u	: Feuchtigkeitsgehalt
t	: Einspanntiefe
T	: Zeitdauer
V	: Variationskoeffizient ($V = \frac{\text{Standardabweichung}}{\text{Mittelwert}} = \frac{s}{x}$)
V_1	: Variationskoeffizient der statischen Kurzzeitfestigkeiten
V_2	: Variationskoeffizient der Abminderungswerte
$V_{1,2}$: Variationskoeffizient der Zeitfestigkeiten
VH	: Vollholz
$vorh N$: Schnittgröße nach DIN
$vorh \sigma$: Spannungen aus den Schnittgrößen nach DIN
x	: Wert einer Stichprobe
\bar{x}	: Mittelwert einer Stichprobe
\bar{x}_1	: Mittelwert der statischen Kurzzeitfestigkeiten
\bar{x}_2	: Mittelwert der Abminderungswerte
$\bar{x}_{1,2}$: Mittelwert der Zeitfestigkeiten
$zul \sigma$: zulässige Spannungen nach DIN
$zul \sigma'$: abgeminderte zulässige Spannungen nach DIN
$zul \tau$: zulässige Schubspannung nach DIN
$zul \tau'$: abgeminderte zulässige Schubspannung nach DIN
$zul N$: zulässige Kraft nach DIN
$zul N'$: abgeminderte zulässige Kraft nach DIN
α	: Schädigungsgrad
δ	: Verformung

γ	: Teilsicherheitsbeiwert
γ_{fat}	: Schädigungsbeiwert
γ_F	: mittlerer Teilsicherheitsbeiwert der Einwirkungen
γ_M	: Teilsicherheitsbeiwert des Materials
κ	: Spannungsverhältniszahl
μ	: Ermüdungsbeiwert
ψ	: Überlagerungsbeiwert
ψ_{fat}	: Überlagerungsbeiwert für ermüdungswirksame Einwirkung
ψ_i	: Überlagerungsbeiwert für die i-te veränderliche Einwirkung
ρ	: Rohdichte
σ	: Spannung oder Festigkeit
σ_a	: Spannungsausschlag ($\sigma_a = (\sigma_o - \sigma_u) / 2$)
σ_{fat}	: Spannungen aus ermüdungswirksamen Einwirkungen
σ_m	: Mittelspannung
σ_o	: Oberspannung ($ \sigma_o \geq \sigma_u $)
σ_u	: Unterspannung

2) Häufige Fußzeiger:

B	: Biegung (DIN)
BS	: Biegeschwellen
BW	: Biegewechsel
c	: Druck (compression)
d	: Bemessungswert (design)
D	: Druck (DIN)
DS	: Druckschwellen
D \perp	: Querdruck (DIN)
fat	: Nachweis mit ermüdungswirksamen Einwirkungen
G	: ständige Einwirkung
k	: charakteristisch
N	: nach N Lastspielen
Q	: Schub (DIN)
Q	: veränderliche Einwirkung (EC)
Q _i	: i-te veränderliche Einwirkung (EC)
Q ₁	: führende (1.) veränderliche Einwirkung (EC)
S	: schwellende Beanspruchung
SS	: schwellende Schubbeanspruchung
stat	: statischer Nachweis
t	: Zug (tension)
T	: Torsion
T=50a	: nach 50 Jahren
W	: wechselnde Beanspruchung
ZS	: Zugschwellen
ZDW	: Zug-Druck-Wechsel
05	: 5%-Fraktile eines charakteristischen Wertes
95	: 95%-Fraktile eines charakteristischen Wertes

Anmerkung: Von einzelnen Autoren wurden noch deren Bezeichnungen übernommen. Dies ist im Text gekennzeichnet.

2. Allgemeines

2.1. Nicht vorwiegend ruhende Einwirkungen

Es sind im Ingenieurholzbau verschiedene Bereiche vorhanden, bei denen Holz, Holzwerkstoffe und Holzverbindungen für nicht vorwiegend ruhende Beanspruchungen eingesetzt werden können. Aufgrund der verschiedenartigen Beanspruchungen bezüglich Lastspielzahl, Dauer und Tragwerksreaktion werden diese in vier Bereiche unterteilt:

2.1.1. Oft wiederholte Einwirkungen

Die Konstruktion wird durch große Lastspielzahlen N im Bereich der Zeit- und Dauerfestigkeit ($N > \text{ca. } 10^3 \text{ bis } 10^4$ /Pet2/, /Ro1/) ermüdend beansprucht. Dabei können die Lastamplituden sowohl annähernd gleich (z.B. Massenkräfte nicht ausgewuchteter Maschinenteile), als auch unterschiedlich groß (z.B. Verkehrsbelastung einer Brücke) sein. Für den Holzbau sind folgende Bereiche relevant:

- Verkehrslasten von Straßen- und Gehwegbrücken (DIN 1072)
- Kranbahnen und Kranbahnstützen
- Fliegende Bauten (DIN 4112)
- Glockentürme (DIN 4178)
- Stützkonstruktionen für Maschinen mit rotierenden Massen (DIN 4024)
- Bauten, die durch äußere Anregung (z.B. Wind) schwingen (z.B. Türme, Brücken, Masten)
- Stützen von Seilbahnen

Bei diesen Beanspruchungen tritt die Ermüdungsproblematik auf. Durch die oft wiederholten Beanspruchungen kann die Materialfestigkeit abnehmen, so daß sie nicht nur mit einem statischen Nachweis abgedeckt werden können. Dieser Bereich ist der Schwerpunkt dieses Berichtes.

2.1.2. Stoßartige Einwirkungen

Unter stoßartigen Beanspruchungen versteht man Beanspruchungen, die durch das Abbremsen oder Beschleunigen bewegter Massen entstehen. Sie werden durch statische Ersatzlasten und Stoßbeiwerte berücksichtigt. Die Zahl der auftretenden Lastwechsel reicht vom Ausnahmefall ($N=1$) bis zum häufigen Wiederholungsfall (siehe 2.1.1.). Das sind z.B.:

- Anpralllasten
- Beanspruchungen durch Absturz oder Aufprall
- Brems- und Beschleunigungskräfte
- Heben und Senken von Lasten
- Landung von Hubschraubern

Diese Beanspruchungen werden in zwei Bereiche unterteilt:

1) Der reine Stoß wirkt einmalig auf das Tragwerk. Dabei muß sichergestellt sein, daß dieser Stoß nicht zum Einsturz des Tragwerkes führt. Die Beschädigung kann aber ein Ersetzen des beanspruchten Tragwerkteils erforderlich machen. (z.B. Anprall)

2) Der zweite Bereich deckt Lastfälle ab, bei dem die Beanspruchungen wiederholt auftreten. Im Allgemeinen werden mittels Stoßfaktoren die Beanspruchungen erhöht, um die dynamischen Auswirkungen der Stöße zu erfassen. Danach können sie wie oft wiederholte Beanspruchungen behandelt werden. (z.B. Kranbahnen)

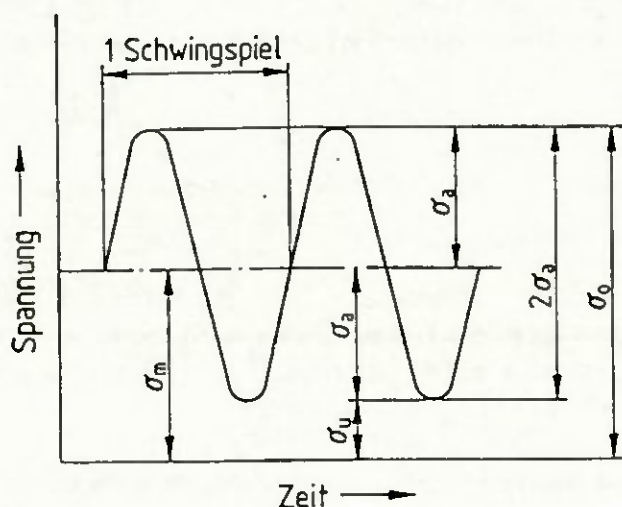
2.1.3. Erdbeben

Sie treten unregelmäßig, ohne Vorankündigung und i.d.R. mit geringeren Lastspielzahlen im Vergleich zu 2.1.1. auf. In diesem Bericht werden Erdbebenbeanspruchungen nicht weiter behandelt. Hierzu wurde 1992 das Vorhaben "Holzbau: Theoretische und experimentelle Untersuchungen für die Anwendung des EC 8" von Becker und Zeitter /Be4/ veröffentlicht.

2.1.4. Einwirkungen bei schwingungsanfälligen Bauten

Durch zeitlich veränderliche Einwirkungen mit Frequenzgehalten im Bereich der Eigenfrequenzen der Bauteile entsteht Resonanz. Neben der Bemessung für die statischen und oft wiederholten Beanspruchungen nach 2.1.1. ist für schwingungsanfällige Bauteile noch ein Nachweis der Sicherheit gegenüber Resonanzschwingungen erforderlich. In diesem Bericht werden Einwirkungen bei schwingungsanfälligen Bauten nicht behandelt.

2.2. Begriffe



- σ_o = Oberspannung σ_u = Unterspannung
 σ_m = Mittelspannung σ_a = Spannungsausschlag
 $2\sigma_a$ = Schwingbreite der Spannung

Bild 1: Spannungs-Zeit-Schaubild beim Dauerschwingversuch (Bild 1 aus DIN 50100)

Lastspielzahl N:

Die Zahl der oft wiederholten Einwirkungen in einer bestimmten Zeit oder während der Lebensdauer einer Konstruktion wird Lastspielzahl genannt (bzw. Zahl der Schwingspiele).

Spannungsverhältnis κ :

Das Verhältnis aus Unter- und Oberspannung wird unabhängig der Vorzeichen mit κ bezeichnet:

$$\kappa = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} \quad (1)$$

Dabei ist σ_o die betragsmäßig größere Spannung ($|\sigma_o| \geq |\sigma_u|$).

Dauerfestigkeit:

Die Dauerfestigkeit (oder Dauerschwingfestigkeit) ist der um eine Mittelspannung σ_m "schwingende" größte Spannungsaussschlag σ_a , den eine Probe oder ein Bauteil "unendlich oft" ohne Bruch und ohne unzulässige Verformung ertragen kann (vgl. DIN 50100).

(Anm.: Die Dauerfestigkeit wird von verschiedenen Autoren mit dem Übergang der Wöhlerlinie in eine horizontale Gerade definiert.)

Zeitfestigkeit:

Die Zeitfestigkeit ist die Beanspruchung, die von einem Körper über eine bestimmte endliche Lastspielzahl (Zeit) ertragen werden kann. Wenn diese überschritten wird, versagt der Körper.

Mit den Zeitfestigkeitseigenschaften wird die Eigenschaft, daß mit zunehmender Lastspielzahl die ertragbaren Beanspruchungen geringer werden, angesprochen. Dies wird hier auch Ermüdung genannt.

Wechselfestigkeit:

Die Wechselfestigkeit ist ein Sonderfall der Dauerfestigkeit für die Mittelspannung Null. Die Spannung wechselt zwischen gleich großen Plus- und Minuswerten. Ihr Zahlenwert ist gleich dem der Ober- und Unterspannung. (vgl. DIN 50100)

Der κ -Wert für die Wechselfestigkeit ist -1. Von einer wechselnden Beanspruchung wird auch gesprochen, wenn $-1 < \kappa < 0$ ist.

Schwellfestigkeit:

Die Schwellfestigkeit ist ein Sonderfall für eine zwischen Null und einem Höchstwert an- und abschwellende Spannung. Die Unterspannung ist Null, die Mittelspannung gleich dem Spannungsaussschlag σ_a und die Schwellfestigkeit gleich der Schwingbreite $2\sigma_a$. (vgl. DIN 50100)

Der κ -Wert beträgt 0. Von einer Schwellbeanspruchung wird auch gesprochen, wenn $0 < \kappa < 1$ ist.

Durchläufer:

Die Dauerfestigkeitsversuche werden bei einer bestimmten Lastspielzahl abgebrochen. Proben, die bei dieser Lastspielzahl nicht gebrochen sind, werden Durchläufer genannt.

Dauerstandfestigkeit:

Die Dauerstandfestigkeit ist die größte zeitlich konstante Beanspruchung, die ein Körper "dauernd" /Spr1/ bzw. unendlich lang permanent ertragen kann, ohne zu versagen .

Zeitstandfestigkeit:

Die Zeitstandfestigkeit ist diejenige konstant einwirkende Beanspruchung, die von einem Körper über einen bestimmten endlichen Zeitraum permanent ertragen werden kann, ohne zu versagen. Dauert die Beanspruchung über diesen Zeitraum hinaus, versagt der Körper.

Mit den Zeitstandfestigkeitseigenschaften wird die Eigenschaft angesprochen, daß mit zunehmender Einwirkungszeit die ertragbaren Beanspruchungen geringer werden.

Restfestigkeit:

Die Restfestigkeit ist diejenige Beanspruchung, die nach einer Vorbeanspruchung durch eine oft wiederholte oder permanente Beanspruchung wie in einem statischen Kurzzeitversuch ermittelt wird.

Unterbrochenene Beanspruchung:

Mit einer unterbrochenen Beanspruchung werden Zyklen mit einer sehr großen Zeit bezeichnet. Sie werden für die Untersuchung der Dauerstandfestigkeitseigenschaften verwendet. Für die Ermüdung spielen sie wegen der großen Zeiten und den geringen Lastspielzahlen keine Rolle.

"ramp-load"-Versuch:

Beim sogenannten "ramp-load"-Versuch wird eine konstante Steigerung der Beanspruchung auf den Probekörper aufgebracht. Dabei kann es sich sowohl um eine Verformung als auch um eine Spannung handeln. Bei den üblichen Kurzzeitversuch handelt es sich um einen "ramp-load"-Versuch. Er wird aber auch mit kleinen Belastungsgeschwindigkeiten für die Prüfung der Dauerstandfestigkeit eingesetzt.

Eigenfrequenz:

Jeder Körper vollzieht auf Grund seiner Beschaffenheit und Größe nach Anregung eine oder mehrere Eigenschwingungen in bestimmten Perioden. Der Kehrwert der Periodendauer wird Eigenfrequenz genannt.

Dämpfung:

Jede Schwingung, die sich selbst überlassen wird, kommt durch innere oder äußere Reibung zum Stillstand. Dieses Abklingen wird Dämpfung genannt.

Resonanz:

Liegen Erregerfrequenz und Eigenfrequenz nahe beieinander, tritt der Resonanzfall auf: Die auftretenden Amplituden werden bei geringer Dämpfung sehr groß.

Abminderungswert:

In diesem Bericht wird das Verhältnis der Zeitfestigkeit (bzw. Zeitstandfestigkeit) zur statischen (Kurzzeit-) Festigkeit als Abminderungswert bezeichnet. Er wird in der verwendeten Literatur auch mit "stress ratio", "load ratio", "percent of average static load" oder ähnlichem bezeichnet. Ein günstiger Abminderungswert bedeutet, daß der Abminderungswert groß und die Abminderung damit gering ist.

Belastungsgrad, Belastungsniveau:

Mit "Belastungsgrad" oder "Belastungsniveau" wird das Verhältnis der aufgebrauchten Beanspruchung zur statischen Kurzzeitfestigkeit benannt. Der Belastungsgrad oder das Belastungsniveau entspricht nur dann dem Abminderungswert, wenn die Probe während des Versuchs bricht, weil dann die Zeitfestigkeit für eine bestimmte Lastspielzahl ermittelt werden kann. Wenn die Probe durchläuft, liegt der Abminderungswert über dem Belastungsgrad bzw. Belastungsniveau.

k_{fat}-Wert:

Für die Bemessung der Bauteile für oft wiederholte Einwirkungen wird aus den Abminderungswerten unter Berücksichtigung verschiedener Streuungen der k_{fat}-Wert gebildet.

Der k_{fat}-Wert wird definiert als das Verhältnis eines bestimmten Fraktilwertes bei einer bestimmten Lastspielzahl N zum entsprechenden Fraktilwert der statischen Kurzzeitfestigkeit.

In der Regel werden 5%-Fraktile verwendet:

$$k_{fat} = \frac{f_{k,N}}{f_k} \quad \text{bzw.} \quad k_{fat} = \frac{R_{k,N}}{R_k} \quad (2 \text{ a, b})$$

f_k bzw.: R_k = charakteristische Festigkeit (i.d.R. 5%-Fraktile) aus dem statischen Kurzzeitversuch

$f_{k,N}$ bzw.: $R_{k,N}$ = charakteristische Festigkeit (i.d.R. 5%-Fraktile bei N Lastspielen)

Lastkollektiv:

Das Lastkollektiv macht Angaben über Größe, Dauer und Häufigkeit der Einwirkungen, die oft wiederholt ein Bauwerk beanspruchen.

Versuchsart:

Zur Ermittlung der Dauerfestigkeit wurden die Versuche auf verschiedene Weise durchgeführt. Es wird hier unterschieden zwischen einem Flachbiege- und einem Rotationsbiegeversuch sowie zwischen Beanspruchungen, die als konstante Spannungen oder als konstante Verformungen aufgebracht werden. Beim Flachbiegeversuch wird ein rechteckiger Querschnitt durch eine oder mehrere Kräfte biegebeansprucht. Die maximalen Biegespannungen treten dabei in den Randebenen auf. Beim Rotationsbiegeversuch wird ein zylindrischer Prüfkörper durch das Verdrehen der Einspannungen oder mit Einspannmomenten biegebeansprucht. Das Drehen um die Längsachse erzeugt dann ein wechselndes Biegemoment. Die maximalen Biegebeanspruchungen treten in der jeweiligen obersten und untersten Faser über die ganze Länge des Prüfkörpers auf.

2.3. Prüfverfahren zur Dauerfestigkeit

1) Wöhlerverfahren

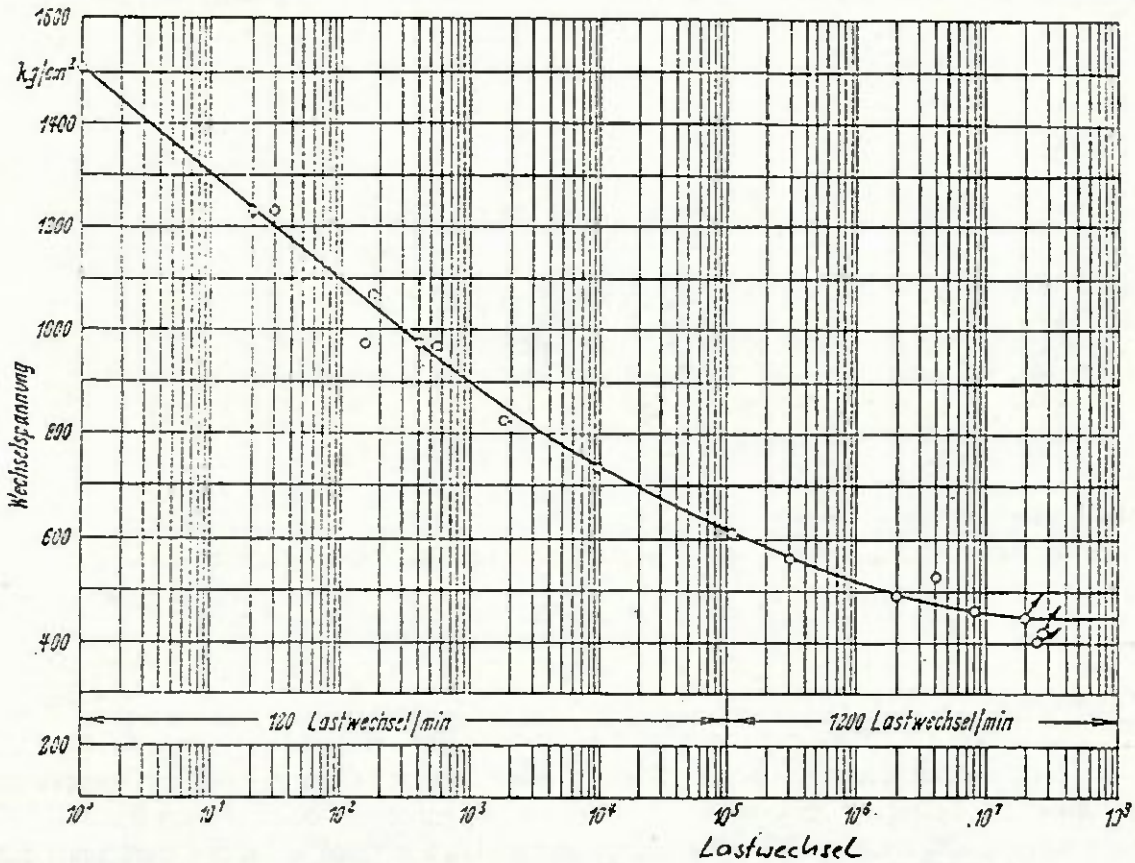


Bild 2: Beispiel eines Wöhlerdiagrammes (Bild 4 aus /Kü5/)

Beim Wöhlerverfahren wird auf den Prüfkörper oft wiederholt eine konstante Beanspruchung aufgebracht und die Zahl der Lastspiele bis zum Versagen des Prüfkörpers gemessen. Die Wöhlerdiagramme entstehen durch das Auftragen der Bruchlastspielzahl an der Abszisse und der Beanspruchungen an der Ordinate (vgl. Bild 2). Die Beanspruchungen werden auch in den Verhältnissen zu den statischen Festigkeiten angegeben.

Die Beanspruchungen sind meist konstante Spannungen oder Kräfte. Es wurden aber Versuche mit konstanten Verformungen durchgeführt. In diesem Fall wird das "Versagen" des Prüfkörpers durch ein vorher festgelegtes Abfallen der ursprünglich aufgebrauchten Spannung oder Kraft definiert.

Durchläufer werden in den Wöhlerdiagrammen meist mit Pfeilen gekennzeichnet.

2) Prüfung der Restfestigkeit

Der Prüfkörper wird mit einer bestimmten, oft wiederholten Beanspruchung und einer bestimmten Lastspielzahl belastet. Nach dem letzten Lastspiel wird der Probekörper wie im statischen Kurzzeitversuch geprüft. Aus der Veränderung im Vergleich zum Kurzzeitversuch der unbeanspruchten Proben wird auf die Wirkung der oft wiederholten Beanspruchung geschlossen.

3) Treppenstufenverfahren ("stair case"-Verfahren)

"Zur Versuchsdurchführung wird der erwartete Dauerfestigkeitsbereich in mehrere (5-6), möglichst äquidistante Spannungsstufen (Anm.: Abstand d in Bild 3) eingeteilt. Zum Beginn des Versuches wird auf einer in der Mitte des Bereiches liegenden Stufe die erste Probe beansprucht.

Je nachdem, ob die Probe bricht oder bis zur gewählten Grenzlastspielzahl durchläuft, wird der nächste Einzelversuch auf der nächst tieferen oder höheren Spannungsstufe ausgeführt. Mit Ausnahme der ersten gewählten Stufe, hängt die Beanspruchungshöhe jeder Probe von dem Ergebnis des zuvor durchgeführten Versuches ab. Die Beanspruchungshöhe aufeinander folgender Proben wird so lange erhöht, bis ein Bruch auftritt, bzw. umgekehrt stufenweise vermindert, bis eine Probe durchläuft (Anm.: vgl. Bild 3).

Auf Grund der Versuchsdurchführung konzentrieren sich die Versuchsergebnisse zwangsläufig um einen zentralen Kennwert. Nur unter gewissen, in der Praxis selten erfüllten Voraussetzungen ist mit diesem Verfahren also eine Abschätzung der Breite des Dauerfestigkeitsbereiches möglich.

Als Nachteil wäre noch erwähnenswert, daß die Versuchsdauer nicht durch Benutzung mehrerer Prüfmaschinen abgekürzt werden kann. Der Versuchsaufwand sollte 20 Probe-
stäbe nicht unterschreiten." /Dor1/

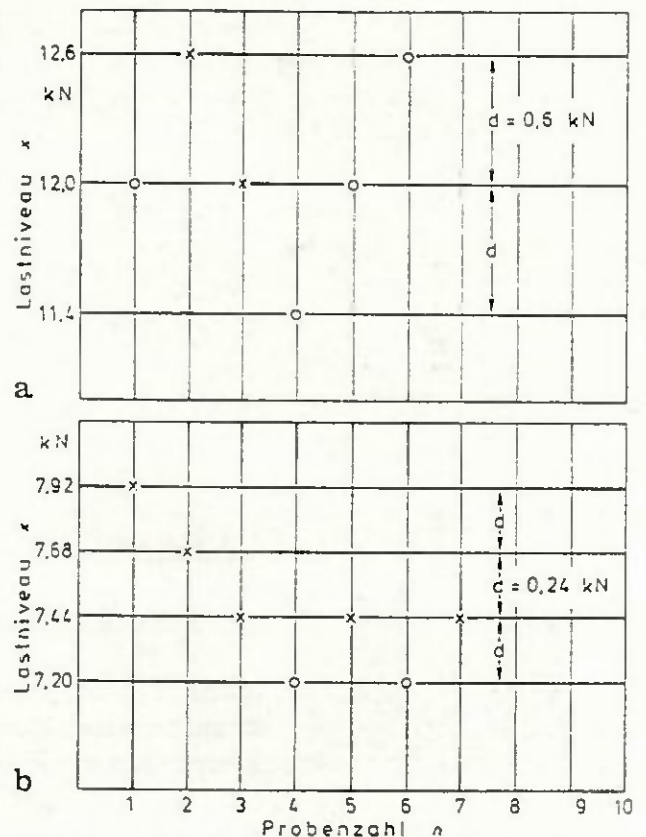


Bild 3: Vorgehen beim Treppenstufenverfahren, Start mit Brüchen (Bild 2b aus /Rot3/) (Anm.: Die Durchläufer werden mit O und die Brüche mit \times dargestellt.)

2.4. Besonderheiten im Holzbau

2.4.1. Dauerstandfestigkeit

Einleitung:

Wird ein Körper aus Holz und Holzwerkstoffen permanenten Beanspruchungen ausgesetzt, nimmt die Höhe der Beanspruchung, die der Körper ertragen kann, mit zunehmender Einwirkungszeitdauer ab. Dabei ist die Dauerstandfestigkeit, diejenige Beanspruchung, die von einem Körper unendlich lange ertragen werden kann.

Die Dauerstandfestigkeit ist eine besondere Eigenschaft des Holzes, die im Vergleich zu Stahl und Beton i.d.R. auch in der Bemessung einwirkungszeitabhängig berücksichtigt wird. Durch die Abnahme der Festigkeit mit der Zeit unter permanenten Einwirkungen, wirkt sie sich auch auf die Zeit- und Dauerfestigkeit, die Abnahme der Festigkeit aufgrund ermüdungswirksamer Einwirkungen, aus. Diese Einwirkungen benötigen einen gewissen Zeitraum, so daß auch eine Festigkeitsminderung aufgrund der Dauerstandproblematik zu erwarten ist. Die Versuche zur Dauerfestigkeit wurden mit sehr unterschiedlichen Frequenzen (0,1-1000 Hz) durchgeführt, so daß sich auch die Einwirkungszeiten gravierend unterscheiden.

Es besteht eine große Ähnlichkeit der Dauerstandskurven (σ -logT) mit den Dauerfestigkeitskurven (Wöhlerlinien: σ -logN).

Diese Umstände machen es notwendig auch die Dauerstandfestigkeit näher zu untersuchen.

Die Dauerstandfestigkeit wird in der Literatur auch als Dauerfestigkeit bezeichnet.

2.4.1.1. Experimentelle Untersuchungen

1) Dauerstandversuche

Die Abnahme der Festigkeit des Holzes unter konstanter Beanspruchung ist seit 1740 bekannt /Gl3/. Um dies genauer zu erfassen, wurden viele Dauerstandversuche durchgeführt. Dabei wurden auf einen Probekörper eine konstante Beanspruchung aufgebracht und die Zeit bis zum Bruch gemessen. Diese Last wird üblicherweise im Verhältnis zur Kurzzeitfestigkeit angegeben. Die Systematik der Versuche zeigt Bild 4.

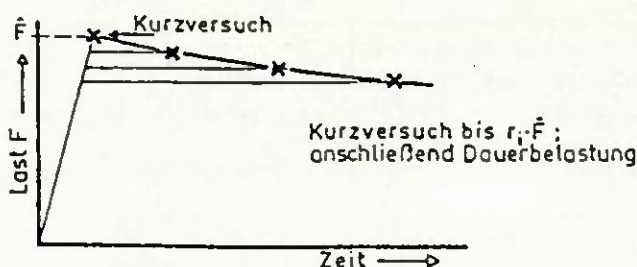


Bild 4: Lastbild für Dauerstandversuche (Bild 2b aus /Ku3/, Anm.: r_1 = "Belastungsniveau")

Allgemein werden solche Ergebnisse im halblogarithmischen Maßstab aufgetragen, weil die Verbindung der Punkte annähernd eine Gerade ergeben. Unterschiede zwischen den einzelnen Autoren können dadurch entstehen, daß sie verschiedene Kurzzeitversuche verwenden.

Pearson /Pe2/ ermittelte aus den Ergebnissen verschiedener Untersuchungen eine Regressionsgleichung.

"Die Gesamtheit aller Werte erfüllt folgende lineare Regressionsgleichung:

$$SL = 91,5 - 7 * \log_{10} T \quad (3)$$

wobei SL := Belastungsstufe = angewandte Biegespannung in % der normalen Bruchlast (Standard Test) (Anm.: Kurzzeitversuch)

T := Zeit bis zum Bruch nach Aufbringung der Maximallast plus Belastungszeit der vorangegangenen Laststufen (hr)" /Pe2/

"Trotz der Unterschiede zwischen Art, Größe, Typ und Feuchtigkeitsgehalt der Proben stimmen die Ergebnisse einer Reihe von Forschern über den Einfluß der Dauerbelastung auf die Biegefestigkeit im allgemeinen überein." /Pe2/

Andere Geradengleichungen: (Biegung)

- aus /Iv2/: $SL = 81,6 - 6,02 * \log T$ (4)

- aus /Su3/: $SL = 90 - 8,9 * \log T$ (5)

- aus /Co6/: $SL = 90,4 - 6,3 * \log T$ (Wood, zit. in /Co6/) (6)

- aus /Co6/: $SL = 87,8 - 5,8 * \log T$ (Gerhards, zit. in /Co6/) (7)

Wegen der langen Versuchszeiten ist es fraglich, ob die abfallenden Geraden bei einem bestimmten Lastniveau in eine Horizontale übergehen. Dies würde bedeuten, daß bei diesem Lastniveau die Dauerstandfestigkeit erreicht wird. In verschiedenen Veröffentlichungen (z.B. /Fo2/, /Nak1/) wird davon ausgegangen, daß unter einem Lastniveau von 50% keine Schädigung mehr eintritt und daraus geschlossen, daß die Dauerstandfestigkeit erreicht worden ist.

Madsen und Johns /Mad3/ dagegen beobachten Brüche bei einem Spannungsverhältnis von 0,50. Sie sahen keine Anzeichen für eine Schwelle des Spannungsverhältnisses, sogar unter einem Wert von 0,40.

2) Restfestigkeit nach einem Dauerstandversuch

Eine andere Versuchsanordnung belastet den Probekörper zunächst unter konstanter Beanspruchung. Nach einer bestimmten Zeitdauer wird dieser Probekörper wie im Kurzzeitversuch zu Bruch gefahren. Dabei wird eine Restfestigkeit gemessen (vgl. Bild 5).

Aus dieser Schemaskizze (Bild 5) ist zu entnehmen, daß die Restfestigkeit mit längerer Einwirkungszeitdauer abnimmt. Das würde bedeuten, die Proben würden durch die permanenten Einwirkungen geschädigt werden.

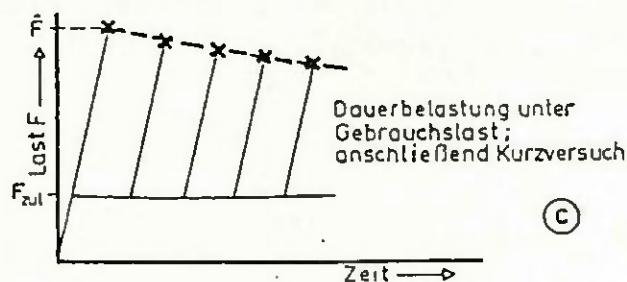


Bild 5 : Lastbild für Messung der Restfestigkeit nach einem Dauerstandversuch (Bild 2c aus /Ku3/)

Kuipers und Leijten /Ku4/ unterschieden zwischen der Linie aus den Dauerstandversuchen ("time-to-failure" Linie; vgl. Bild 4 und 6) und einer Schadenslinie ("damage line"; vgl. Bild 6).

Die Schadenslinie gibt an bis zu welcher Zeitdauer eine permanente Beanspruchung im Gebiet der Zeitstandfestigkeit ertragen werden kann, ohne daß eine Schädigung des Werkstoffes bzw. Bauteils eintritt (Anm.: analog DIN 50100; von der Dauerfestigkeit auf die Dauerstandfestigkeit übertragen). Die Abnahme der Restfestigkeit nach Dauerstandversuchen kann als Indikator für eine Schädigung angesehen werden.

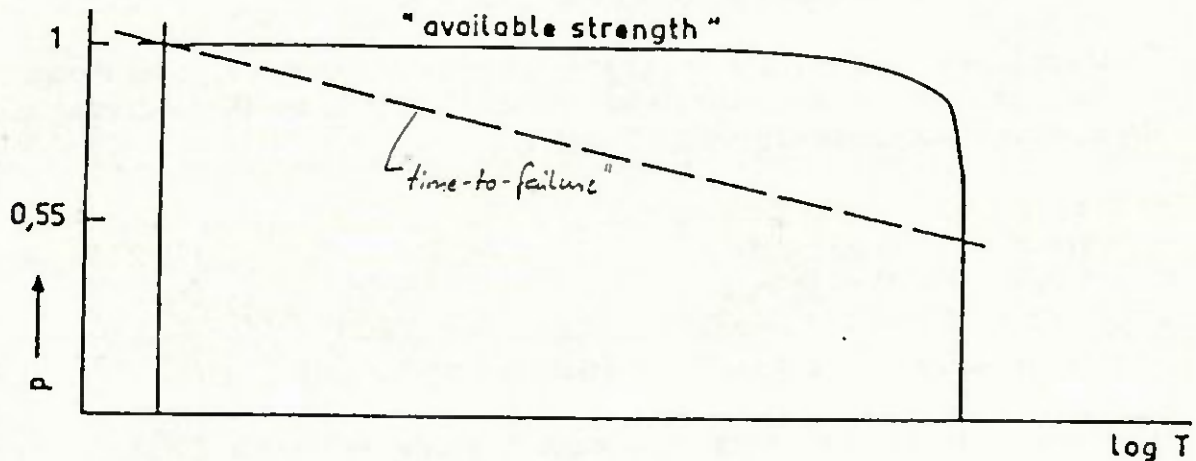


Bild 6 : Schadenslinie und "time-to-failure" -Linie unter einer konstanten Einwirkung in Abhängigkeit von der Einwirkungsdauer (vgl. Bild 4c aus /Ku4/)

Den prinzipiellen Verlauf einer Schadenslinie (hier: "available strength") zeigt Bild 6. Für eine gewissen Zeitdauer verläuft die Schadenslinie horizontal. Das heißt, es tritt keine Schädigung ein. Nähert sich die Einwirkungszeitdauer dem Bruchzeitpunkt, der in Dauerstandversuchen ermittelt wird, fällt die Schadenslinie stark ab. Das bedeutet, daß gegen Ende des Beanspruchungszeitraumes auch die Restfestigkeiten geringer werden. Die Schadenslinie muß abfallen, denn die Beanspruchung, die im Dauerstandversuch zum Bruch führt, kann auch als Restfestigkeit am Ende der Beanspruchungszeit angesehen werden. Dies ist der Schnittpunkt der "time-to-failure"-Linie mit der "available strength"-Linie in Bild 6.

Kuipers und Leijten /Ku4/ schlossen aus ihren Versuchen, daß es keine Restfestigkeitsminderung gab: Zwei Jahre permanenter Beanspruchung mit 50% der ursprünglichen Festigkeit bedingte keine meßbare Schädigung im Bezug auf die Festigkeit. Dafür gibt es zwei Erklärungen:

- Die Einwirkungszeitdauer ist zu kurz, um eine Schädigung zu verursachen, die dann eine Restfestigkeitsminderung bewirkt.
- Das Beanspruchungsniveau liegt unter einem Schwellenwert, unter dem keine Schädigung mehr eintritt. Dieser wird bei ca. 50% angesetzt (siehe oben).

Bewertung:

Für die Bemessung muß sichergestellt sein, daß die permanenten Beanspruchungen das Holz nicht oder nur geringfügig schädigen, damit für Beanspruchungen mit einer geringeren Einwirkungszeitdauer höhere Bemessungswerte zugelassen werden können.

3) Parameter

Einfluß von Unterbrechungen:

Youngs und Hilbrand /Yo1/ führten Dauerstandversuche mit zyklischen Unterbrechungen durch. Die Zyklusdauer wurde mit 2 Wochen sehr groß gewählt, um Ermüdungserscheinungen auszuschließen. Die Einwirkungsdauer entsprach der anschließenden Entlastungsdauer. Dabei wurde festgestellt, daß diese Probekörper die annähernd zweifachen Zeitdauer benötigten, um zu versagen, im Vergleich zu denjenigen mit der gleichgroßen, aber ununterbrochenen Lasteinwirkung. Wenn nur die Einwirkungszeit berücksichtigt wird, haben unterbrochen und ununterbrochen beanspruchte Probekörper die gleiche Dauerstandfestigkeit. /Yo1/

Sugiyama /Su3/ untersuchte ebenfalls die Auswirkungen von unterbrochenen Einwirkungszeiten auf die Dauerstandfestigkeit. Dabei kam er zum Schluß, daß unterbrochene Einwirkungszeiten im Vergleich zur konstanten Einwirkung ein Vorteil für die Festigkeit darstellt.

Nakai /Nak1/ stellte durch seine Versuche fest, daß nichts darauf hindeutete, daß ein Balken mit einer unterbrochenen Beanspruchung im Vergleich zu einer permanenten eine kürzere Lebensdauer hatte.

Die Kriechverformungen durch unterbrochene Beanspruchungen waren allerdings geringer als bei einer permanenten, wenn die Summe der Beanspruchungszeiten gleich war.

Aus diesen drei Untersuchungen läßt sich der Schluß ziehen, daß eine Unterbrechung der Belastung keine Nachteile für die Festigkeit hat. Entscheidend dabei ist die Summe der Belastungszeiten.

Feuchtigkeit:

Die Ergebnisse von Hoffmeyer /Hof1/ zeigen eine signifikante Verkürzung der Zeit bis zum Bruch bei hoher Feuchtigkeit.

Nach den Versuchsergebnissen von Cizek /Ci2/ hängt das Verhältnis der Dauerstandfestigkeit zur Kurzzeitfestigkeit auch von der Feuchtigkeit des Holzes ab. Sie variiert in den Grenzen von 46% (bei einer Holzfeuchte über 30%) bis 90% (darrtrockenes Holz). Dabei wurde angenommen, daß die Dauerstandfestigkeit und die Proportionalitätsgrenze nicht sehr verschieden sind.

2.4.1.2. Theorien für die Dauerstandfestigkeit

1) Kriechen

Die Festigkeit des Holzes verringert sich unter permanenter Einwirkung. Die dabei entstehenden Verformungen nehmen mit der Einwirkungsdauer zu. Dies ist allgemein als Kriechen bekannt. Um eine Verbindung zwischen der Dauerstandfestigkeit und dem Kriechen herstellen zu können, bediente sich Ylinen /Y11/ der St. Venantschen Bruchhypothese. Diese besagt, daß ein Bruch dann eintritt, "wenn die Dehnung einen gewissen Wert, der Bruchdehnung ϵ_B erreicht." /Y11/

Ylinen /Y11/ hatte damit bei seinen Versuchen gute Ergebnisse erreicht. Er wendete sie zusammen mit der Maxwellschen Relaxationstheorie an. Allerdings muß man kritisch bemerken, daß seine Dauerstandversuche nur 20 Tage dauerten.

2) Bruchmechanik

Die Bruchmechanik bietet die Möglichkeit, die Dauerstandfestigkeit dadurch zu erklären, daß sich unter einer Beanspruchung ein vorhandener Riß langsam öffnet, bis er ab einer bestimmten Rißlänge den Bruch herbeiführt. Dies untersuchten z.B. Schniewind et al. /Sc11/, /Sc15/ sowie Nadeau /Nad1/, Johns und Madsen /Jo3/, /Mad3/.

Letztere fanden eine gute Übereinstimmung zwischen den berechneten und den experimentellen Ergebnissen. Nadeau /Nad1/ zeigte, daß seine Ergebnisse und die aus früheren Arbeiten mit einem einfachen Modell und einer mathematischen Analyse, die auf der Bruchmechanik basieren, erklärt werden können.

2.4.1.3. Schadensakkumulationshypothesen

Anmerkung: In diesem Abschnitt werden die Bezeichnungen der Autoren übernommen.

1) Einführung

Diese Abnahme der Festigkeit mit der Zeit bei permanenter Einwirkung kann durch Schadensakkumulationshypothesen und mit entsprechenden Formeln empirisch erfaßt und berechnet werden. Dabei kommt es zum Bruch, wenn der Schädigungsgrad α den Wert $\alpha=1$ erreicht.

Solche Hypothesen bieten theoretisch die Möglichkeit auch verschiedene Beanspruchungszustände zu erfassen.

Der allgemeine Ansatz berücksichtigt auch den Schädigungsgrad $\alpha(t)$:

$$\frac{d\alpha}{dt} = F(\tau(t), \alpha) \quad (8)$$

Diese Formel wird entwickelt zu:

$$\frac{d\alpha}{dt} = F_1(\tau(t)) + F_2(\tau(t))\alpha + \dots + F_n(\tau(t))\alpha^{n-1} \quad (9)$$

(nach /Fo3/)

Diese Gleichung wird zum "Canadian Model" und zum "U.S. Model" weiterentwickelt.

2) "Canadian Model"

Foschi und Yao (zit. in /Fo3/) entwickelten ein Schadensakkumulationsmodell, bei dem sie nur die beiden ersten Terme von Gleichung (9) benützten. Es wurde als das "Canadian Model" bezeichnet.

$$\frac{d\alpha}{dt} = a(\tau(t) - \sigma_0 \tau_s)^b + c(\tau(t) - \sigma_0 \tau_s)^n \alpha \quad (10)$$

mit: a, b, c, n := Konstanten für ein bestimmtes Holz unter bestimmter Beanspruchung; mit Streuungen versehen

σ_0 := Spannungsverhältnis unter dem keine Schädigung mehr eintritt.

τ_s := Kurzzeitfestigkeit ("ramp-load"-Versuch)

$\tau(t)$:= Spannung in Abhängigkeit von der Zeit

Anmerkung: Wenn $\tau(t) - \sigma_0 \tau_s \leq 0$ ist, tritt keine Schädigung auf.

Gleichung (10) konnte schrittweise integriert werden. Dadurch berechnete man den Schädigungsgrad $\alpha(t)$ in Abhängigkeit der Zeit.

Umgekehrt konnte die Zeit bis zum Bruch für eine konstante Einwirkung ebenfalls durch Integration bestimmt werden ($\alpha=1$).

$$T_T = t_c + \frac{1}{c(\tau_c - \sigma_0 \tau_s)^n} \ln \left[\frac{c + a(\tau_c - \sigma_0 \tau_s)^{b-n}}{\alpha_c c + a(\tau_c - \sigma_0 \tau_s)^{b-n}} \right] \quad (11)$$

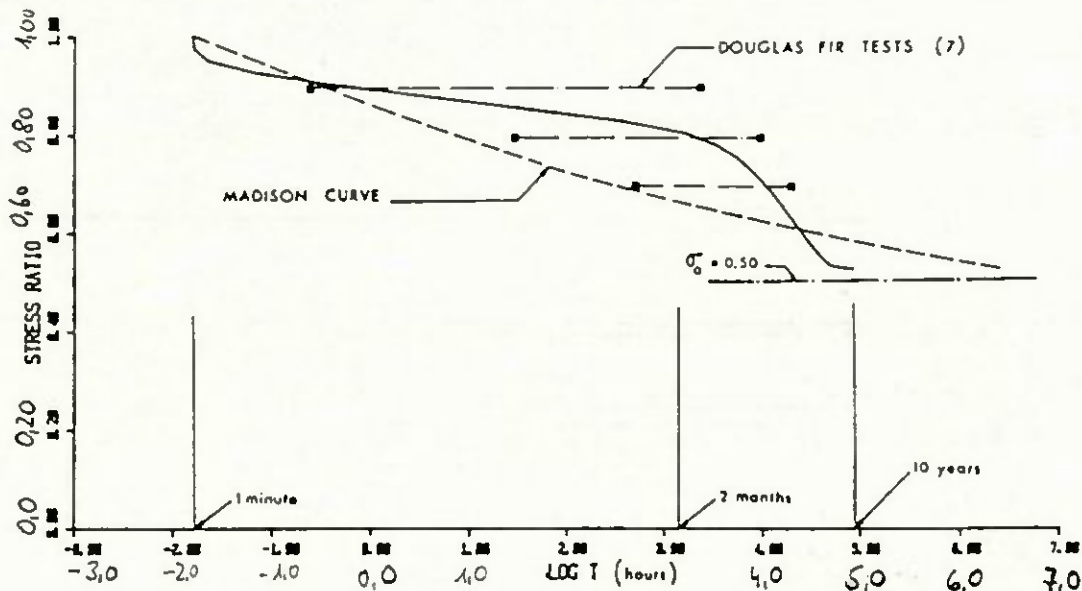


Bild 7: Vergleich der Vorhersage des Modells mit der Madison Kurve und Daten mit Douglas-fir bei konstanten Lasten. (vgl. Bild 8 aus /Fo2/)

Die hiermit ermittelten σ -logT Kurven (vgl. Bild 7) haben einen etwas anderen Verlauf als die bekannte "Madison-Kurve". Ähnliche Kurven fand auch Kuipers /Ku3/.

(Anm.: Die "Madison-Kurve" wurde aus den Ergebnissen der Dauerstandversuche von Wood /Wo3/ und wird von Corotis und Sheenan /Co6/ mit Gleichung (6) beschrieben.)

Die Kalibrierung des "Canadian Model" erfolgte durch Foschi und Yao (zit. in /Fo3/). Mit 2000 Proben wurden die Parameter b , c , n , σ_0 und ihre Streuungen bestimmt.

Tabelle 1: Parameter für die Schadensakkumulationshypothesen (vgl. Tabelle 4.2. aus /Fo3/)

Table 4.2: Parameters of Damage Accumulation Model.

	b		c		n		σ_0	
	Stress is Measured in MPa							
	Mean	COV	Mean	COV	Mean	COV	Mean	COV
Hemlock	37.161	0.281	1.623×10^{-4}	0.574	1.290	0.075	0.533	0.298
S-P-F Q1	77.392	0.174	2.810×10^{-4}	0.824	1.162	0.231	0.420	0.038
S-P-F Q2	158.656	0.009	4.317×10^{-4}	0.745	1.285	0.170	0.365	0.562
	Stress is Measured in psi							
	Mean	COV	Mean	COV	Mean	COV	Mean	COV
	Hemlock	37.161	0.281	2.465×10^{-7}	0.336	1.290	0.075	0.533
S-P-F Q1	77.392	0.174	1.029×10^{-6}	0.057	1.162	0.231	0.420	0.038
S-P-F Q2	158.656	0.009	7.525×10^{-7}	0.042	1.285	0.170	0.365	0.562

Abkürzungen: S-P-F-Q1: Spruce-Pin-Fir Quality 1
 S-P-F-Q2: Spruce-Pin-Fir Quality 2
 Mean: Mittelwert
 COV: Kovarianz

3) "U.S.-Model"

Gerhards (zit. in /Fo3/) beschrieb die Schadensakkumulation mit der Gleichung:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \exp\left(-a + b \frac{\tau(t)}{\tau_s}\right) \quad (12)$$

Die Parameter a, b, \dots waren verschieden im Vergleich zu Gleichung (10).

Mit dieser linearen Schädigungshypothese konnte relativ einfach die experimentell gefundene Geradengleichung der Form $SL = A - B \cdot \log T$ abgeleitet werden. (vgl. /Ger6/)

(Anmerkung: Die Exponentialfunktion in (12) ist der Parabel in (10) "ähnlich"; das zweite Glied, das die aktuelle Schädigung α beinhaltet, ist nicht vorhanden.)

4) Vergleich der beiden Modelle

Für Western Hemlock wurde mit den gleichen Versuchsergebnissen eine Kalibrierung des "U.S.-Model" durchgeführt.

Ein Vergleich der beiden Modelle ergibt für das "Canadian Model" bessere Ergebnisse

Das lineare "U.S.-Model" war nicht flexibel genug um die Trends aus den Versuchen wiederzugeben. /Fo3/

5) Anwendung der Hypothesen

Die Überprüfung der verschiedenen Hypothesen auf ihre Brauchbarkeit und Anwendungen bzw. Anwendungsmöglichkeiten findet sich noch bei mehreren Autoren z.B.: /Bar7/, /Bar8/, /Co6/, /Fo2/, /Fo5/, /Ge2/, /Ger5/, /Ger6/.

2.4.1.4. Bemessung

1) Eurocode 5 (EC 5)

Ausgehend von den experimentellen Ergebnissen (2.4.1.1.) wird die Dauerstandsfestigkeit allgemein bei ca. 60 % der Kurzzeitfestigkeit angenommen. Deswegen wird im Eurocode 5 /N16/ für permanente Einwirkungen und eine geringe Feuchtigkeit ein k_{mod} -Wert von 0,6 vorgeschlagen (vgl. Tabelle 3.1.7 aus EC 5). Für zeitlich begrenzte Einwirkungen bzw. höheren Feuchtigkeiten werden die k_{mod} -Werte je nach ihrer Dauer bzw. Größe eingeführt.

Für permanente Einwirkungen muß das Sicherheitskriterium auch zum Zeitpunkt am Ende der geplanten Nutzungsdauer (z.B. 50 Jahre) erfüllt sein (vgl. Bild 8, Achse T=50 a). Dies wird mit der Gleichung (13) erfaßt.

$$\sigma_d = \sigma_{95, T=50a} * \gamma_F \leq \frac{f_{05, T=50a}}{\gamma_M} \quad (13)$$

Anmerkung: Dies gilt analog auch für andere Fraktilwerte, Zeitspannen und Feuchtigkeiten.

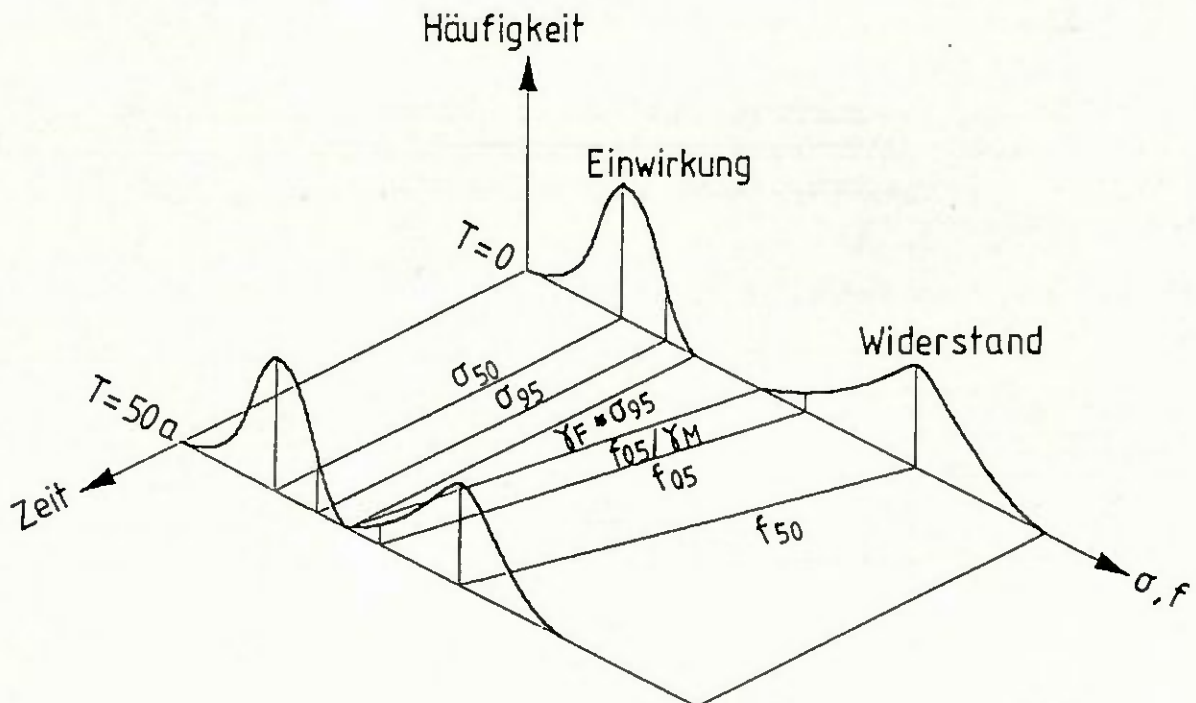


Bild 8: Berücksichtigung der Zeitstandfestigkeit in der Bemessung

Zur Ermittlung der Festigkeit $f_{05,T=50a}$ wird angenommen, daß sich die Verteilung der streuenden Festigkeiten nicht mit der Zeit ändert. Dies läßt sich mit Versuchen von Glos und Kelletshofer /G13/ belegen. Dabei wurde festgestellt, "daß der Einfluß der Belastungsdauer sowohl bei Zug- als auch bei Druckbeanspruchung im gesamten Festigkeitsbereich vorliegt und von der Holzqualität offenbar weitgehend unabhängig ist." Auch Dauerstandbiegeversuche zeigten, "daß nicht angenommen werden kann, daß der Einfluß der Belastungsdauer bei Proben geringerer Festigkeit vernachlässigbar klein ist" (z. B.: Madsen, Barrett 1976 zit. in /G15/).

$$f_{05,T=50a} = f_{05} * k_{mod} \quad (14)$$

aus (13) und (14) ergibt sich:

$$\sigma_d \leq \frac{f_{05} * k_{mod}}{\gamma_M} \quad (15)$$

Anmerkung:

Für die meisten - aber nicht alle Fälle - liegen die Werte der Einwirkungen weit von den Werten der Holzfestigkeit entfernt, so daß durch die permanente Beanspruchung vermutlich keine Schädigung aufgrund der relativ niederen Spannungen auftritt. Das Sicherheitskonzept muß aber auch diejenigen Fälle berücksichtigen, bei denen eine ungewollte Überbeanspruchung mit einer niedrigen Holzfestigkeit zusammentrifft. Das Eigengewicht des Tragwerkes ist in jedem Fall eine permanente Einwirkung. Sie wird nach EC 5, Abschnitt 2.3.3.1 mit einem Teilsicherheitsbeiwert von 1,35 berücksichtigt. Diese unplanmäßige Erhöhung des Eigengewichtes um 35% kann im Holzbau durchaus auftreten: Es ist denkbar, daß die Schotterfüllung einer Holzbalkendecke zu hoch eingebaut wird oder der Estrich auf einer Decke zu stark hergestellt wird.

2) DIN 1052

Die DIN 1052 geht von einer zulässigen Spannung aus, die für die permanenten Einwirkungen gilt und in denen die Abminderungswerte wegen der Dauerstandfestigkeit bereits eingearbeitet sind. Für Einwirkungen mit einer kürzeren Dauer können jedoch die zulässigen Spannungen erhöht werden.

Tabelle 2: Vergleich zwischen DIN 1052 und Eurocode 5

Vergleich	DIN 1052	EC 5 (nach Tab. 3.1.7)
permanente Lasten:	zul $\sigma=0,6$	$k_{mod}=0,6$
Zusatzlasten:	$1,25*0,6=0,75$	$k_{mod}=0,7-0,9$
Transport und Montage:	$1,5*0,6=0,9$	$k_{mod}=0,9$
Erdbeben und Stoßlasten:	$2*0,6=1,2$	$k_{mod}=1,1$

2.4.2. Schädigungen (Kerben)

Im Stahlbau wirken sich Kerben in besonderem Maße auf die Ermüdung der Bauteile aus, so daß dort verschiedene Kerbfälle unterschieden werden.

Holz hat eine Reihe von Fehlern, die einen "Kerbfall" darstellen können. Das sind z.B.:

- Ästigkeit
- Keilzinkenverbindungen bei Brettschichtholz
- Bohrungen und Fehlflächen durch die Verbindungsmittel
- von der Brettlängsachse abweichende Faserverläufe und angeschnittene Fasern
- Druckholz
- Harzgallen und sonstige Wuchsfehler
- Risse
- Insekten- und Pilzbefall

2.5. Sonstiges

2.5.1. Schlagversuche

Mit dem Schlagbiegeversuch wird die Arbeit gemessen, die ein Probekörper beim Bruch aufnimmt. Er dient zur Beurteilung verschiedener Materialeigenschaften, insbesondere der Zähigkeit. Die Zähigkeit ist auch für oft wiederholte Beanspruchungen von Bedeutung.

Kollmann /Kol16/ stellte bei einem Flachbiegeversuch mit konstanten Verformungen für Holz, das eine größere Bruchschlagarbeit besitzt und deshalb als zäh angesehen werden kann, einen deutlich geringeren Spannungsabfall als bei weniger zähem Holz fest. Für oft wiederholte Versuche mit konstanten Verformungen diente diese Abnahme der Zähigkeit zur Bestimmung der Dauerfestigkeit. Somit kann gesagt werden, daß zähes Holz mit seiner größeren Bruchschlagarbeit eine größere Zeit- und Dauerfestigkeit besitzt.

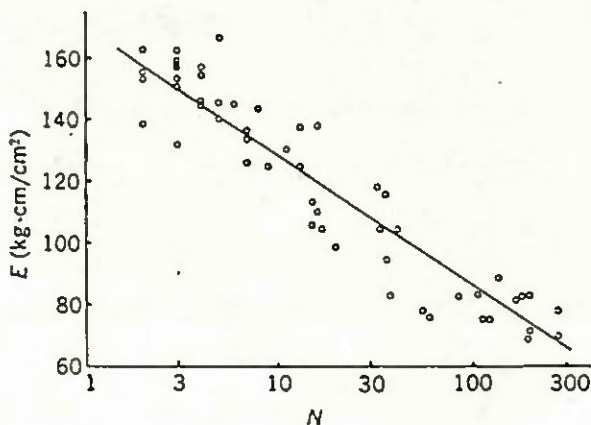
Genauere Zusammenhänge zwischen der Bruchschlagarbeit und der Zeit- bzw. Dauerfestigkeit sind den Verfassern dieses Berichtes nicht bekannt.

Ebenso waren in der Literatur keine quantitativen Angaben zwischen der Bruchschlagarbeit und der Fähigkeit des Holzes, Anpralllasten und Stöße aufzunehmen, zu finden.

Weitere Angaben zu Schlagversuchen von Holz und Holzwerkstoffen finden sich neben anderen auch in /Brö2/, /Dos2/, /Fr6/, /Kol14/, /Kol16/, /Kra4/, /Kre1/, /Kre2/, /Krp1/, /Mc2/, /Miy1/, /Miy2/, /Miy8/, /Nar2/, /Oku4/, /Ös1/, /Par6/, /Sa4/, /Sc1/, /Sc9/, /Sk1/, /Win1/.

2.5.2. Oft wiederholte Schlagversuche

Es sind eine Reihe von Veröffentlichungen von Miyakawa und Mori /Miy3/, /Miy4/, /Miy5/, /Miy6/, /Miy7/ aus Japan bekannt, die nicht die Bruchschlagarbeit beim Bruch aufnahmen, sondern mit gleicher Schlagenergie den Probekörper oft wiederholt bis zum Bruch beanspruchten. Sie stellten unter anderem fest, daß eine negative geradlinige Beziehung zwischen der Schlagenergie, die auf den Probekörper aufgebracht worden war, und dem Logarithmus der Anzahl der Schlagwiederholungen $\log N$ bis zum Bruch besteht. (vgl. Bild 9)



Aus Bild 9 ist zu entnehmen, daß eine Abnahme auf 50 % der Schlagbeanspruchung sehr schnell erfolgt und bei ca. 100 Wiederholungen liegt. Im Vergleich zu einer Beanspruchung, die nicht schlagend aufgebracht wird, sind die oft wiederholten schlagenden Beanspruchungen deutlich ungünstiger.

Bild 9: Beziehung zwischen der Schlagenergie (E), die auf einen Probekörper aufgebracht wird und der Anzahl der Wiederholungen (N) bis zum Bruch. (Fig. 3 aus /Miy4/)

3. Zeit- und Dauerfestigkeit

Die Ergebnisse aus der Literatur werden unterteilt in Angaben für Vollholz, Schichtholz und Sperrholz sowie Span- und Faserplatten. Bei Sperrhölzern liegen die Verhältnisse in ähnlichen Größenordnungen wie bei Vollholz. Für den konstruktiven Ingenieurholzbau wird die Verwendung von Span- und Faserplatten in Bauteilen unter oft wiederholten Beanspruchungen zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht in Erwägung gezogen (vgl. /Eh1/)

3.1. Ergebnisse aus der Literatur

Vorbemerkungen:

Die Versuche zur Zeit- und Dauerfestigkeit mit Holz und Holzwerkstoffen, die seit ca. 70 Jahren gemacht worden sind, sind sehr unterschiedlich (vgl. Bild 10). Es wurde folgendes Konzept gewählt, um sie dennoch weitgehend zusammenhängend auswerten zu können.

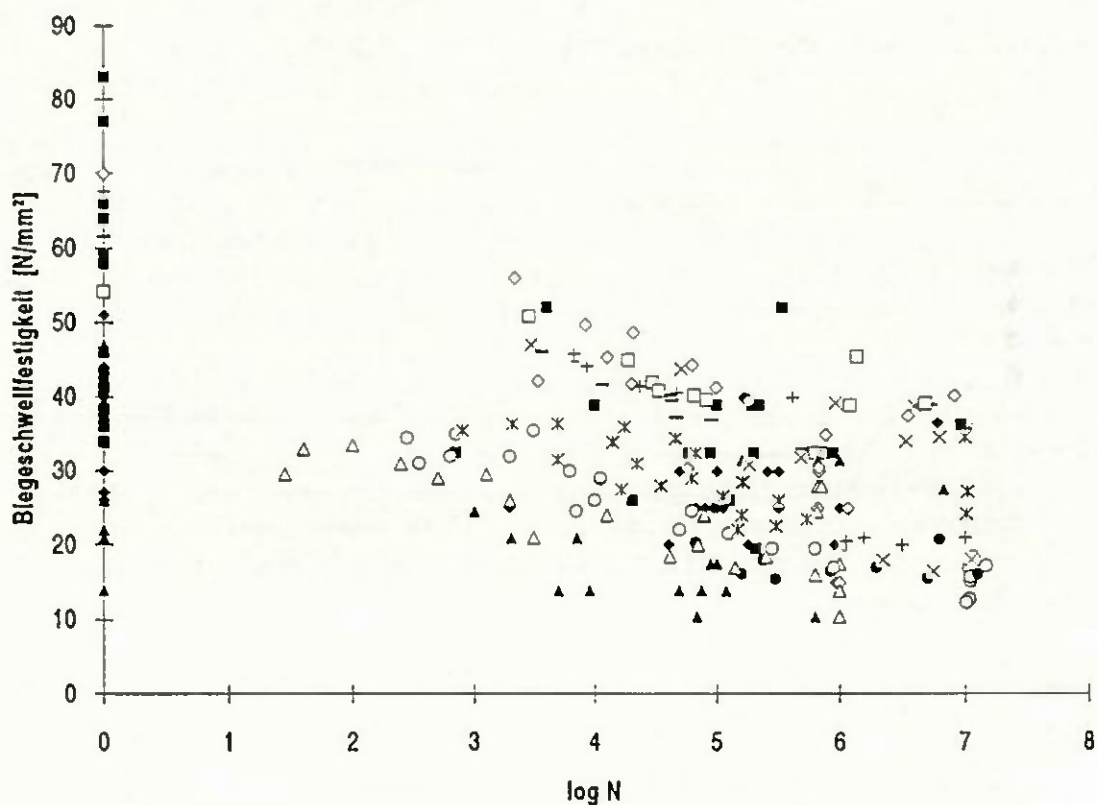


Bild 10: Biegeschwelfestigkeit bei Voll- und Brett-schichtholz (Proben mit großen Abmessungen)

(Anmerkung zu Bild 10: An der Achse $\log N=0$ sind statische Versuche angetragen. Auf die Angabe einer Legende wird aus Übersichtlichkeitsgründen verzichtet.)

- Die Meßergebnisse werden, soweit möglich, als Wöhlerdiagramme dargestellt. Um sie besser vergleichen zu können, werden sie auf die statische Kurzzeitfestigkeiten oder auf die entsprechenden zulässigen Spannungen bzw. zulässigen Kräfte nach DIN 1052 Teil 1 und 2 bezogen. Die Kurven werden dann in diesen relativen Verhältnissen angegeben. Die Verhältnisse zur statischen Kurzzeitfestigkeit werden in diesem Bericht als Abminderungswerte bezeichnet. Die Notwendigkeit dieses Vorgehens zeigt Bild 10, in dem die Ergebnisse mehrerer Autoren zusammengefaßt sind. Die Zeitfestigkeiten, die in den absoluten Spannungen angegeben werden, zeigen eine sehr starke Streuung. Diese Streuungen resultieren auch aus den unterschiedlichen statischen Kurzzeitfestigkeiten, die ebenfalls streuen. Zur Ermittlung der Kurzzeitfestigkeit wurden je nach Autor auch unterschiedliche Versuche durchgeführt. Daneben werden die Meßergebnisse in 8.1. in den Anlagen 1-5 in Tabellenform dargestellt und ausgewertet.
- Durch die Verhältnisbildung, die die Abminderungswerte ergeben, werden die Streuungen weitgehend aufgehoben.
- In begründeten Fällen werden Ergebnisse nicht zur Auswertung herangezogen.
- Die meisten Forscher verwendeten einen halblogarithmischen Maßstab. Die Festigkeiten werden linear, die Lastwechsel in $\log N$ angetragen. Dieser Maßstab ergab bei verschiedenen Autoren eine Wöhlerlinie mit einer abfallenden Geraden und wird in diesem Forschungsbericht verwendet. Es ist nicht erkennbar, daß ein anderer Maßstab (z.B. $\log \sigma$ - $\log N$ oder σ - N) Vorteile bietet oder Gesetzmäßigkeiten erkennen läßt.
- Aus den vorliegenden Berichten wurden die Meßergebnisse oder die Regressionsgeraden übernommen. Die Regressionsgeraden waren entweder angegeben oder mußten aus den vorliegenden Kopien herausgemessen werden. Eine Überprüfung der einzelnen Regressionsgeraden, die von den einzelnen Forschern angegeben bzw. gezeichnet wurden, auf ihre Richtigkeit und Genauigkeit erfolgt nicht.
- Die Ergebnisse sind auf die entsprechende statische Festigkeit bezogen; Ausnahmen werden angegeben. Es ist nicht immer klar, ob bei den statischen Prüfungen die gleichen Probenformen und -abmessungen wie bei den Ermüdungsprüfungen verwendet wurden. Die statischen Festigkeitsprüfungen der einzelnen Autoren unterscheiden sich ebenfalls. Die Auswertung geht aber davon aus, daß dadurch keine großen Unterschiede entstehen. Eine genaue Untersuchung dieser Faktoren erschwert die Auswertung bzw. macht sie u.U. sogar unmöglich.
- Eine Unterscheidung der Forschungsberichte nach der Zahl der Dauerfestigkeitsproben für eine Wöhlerlinie erfolgt nicht.
- Die Auswertung erfolgt unabhängig von der Frequenz, der Rohdichte, der genauen Probengröße und der Temperatur und der Versuchsart. Bei der Feuchtigkeit wird zwischen trockenen Proben ($u \leq 18\%$), feuchten ($18\% < u < 30\%$) und nassen bzw. wassergesättigten Proben ($u \geq 30\%$) unterschieden. Die Proben werden in den Anlagen 1-5 in 8.1. grob in große Proben (Querschnittsfläche $A > 40 \text{ cm}^2$), kleine Proben ($0,6 \text{ cm}^2 < A < 40 \text{ cm}^2$) und sehr kleine Proben ($A \leq 0,6 \text{ cm}^2$) unterteilt.

- Die Umrechnung der verschiedenen κ -Werte erfolgt mit einer linearen Beziehung (vgl. hierzu auch 3.2.2.6. und 8.1.). Die Umrechnung erfolgt für die Auswertung in den Tabellen; nicht aber für die Darstellung in den Wöhlerdiagrammen.
- Die Ergebnisse werden -soweit vorhanden- für $\log N = 1,2,3,4,5,6,7,8$ und besondere Punkte (Anfang, Knick, Ende) aus den einzelnen Wöhlerlinien entnommen. Diese werden dann linear verbunden. Die statische Kurzzeitfestigkeit wird an der Stelle $N=1$ bzw. $\log N=0$ angetragen. Die Verbindung mit $N=1$ und dem nächsten Punkt der Wöhlerlinie erfolgt aus Übersichtlichkeitsgründen nicht immer.
- Das Rechenprogramm für die Auswertung der Tabellen gibt Werte mit mehreren Stellen an. Es ist zu berücksichtigen, daß die Eingabewerte nicht dieser Rechengenauigkeit entsprechen. Die Mittelwerte \bar{x} und Standardabweichungen s in den Anlagen 1-5 wurden mit Funktionen des Excel-Programmes "Mittelwert(Zahl1, Zahl2,...)" bzw. "Stabw(Zahl1, Zahl2,...)" erstellt. Das Handbuch zum Programm /Exc1/ gibt an, daß für die Ermittlung der Standardabweichung folgende Formel verwendet wird:

$$\text{Standardabweichung } s = \sqrt{\frac{n \sum x^2 - (\sum x)^2}{n(n-1)}} \quad (16)$$

3.1.1. Dauerfestigkeit von Vollholz, Schichtholz, Furnierholz, Sperr- und Sternholz

Anmerkung:

Wegen der ähnlichen Dauerfestigkeitseigenschaften werden Holzwerkstoffe mit Ausnahme von Span- und Faserplatten in diesem Kapitel behandelt. Verleimte Furniere werden als Schichthölzer behandelt. Eine weitere Unterscheidung wird durchgeführt, wenn genügend Versuchsergebnisse vorliegen.

3.1.1.1. Zugschwellen

Das Zugschwellen an verschiedenen Holz und Holzwerkstoffen untersuchten mehrere Autoren /Bon1/, /Eg6/, /Fa2/, /Ger8/, /Gill1/, /Kü5/, /Lew2/, /Lew3/, /Mar2/, /Noa1/, /Noa2/, /Oku7/, /Ro3 bzw. Ro4/. Daneben wurden Zugschwellversuche zu verschiedenen Keilzinkenverbindungen und Schäftungen durchgeführt /Boh1/, /Eg4/, /Lew2/.

Folgende Versuche können nicht verwertet werden:

- die Versuche von Noack und Stöckmann /Noa1/, Noa2/ und Gerstetter /Ger8/, weil sie keine Wöhlerlinien enthielten und eine andere Zielsetzung hatten.
- die Versuche von Faddoul /Fa2/, weil sie erst bei Abschluß des Berichtes vorlagen.

Es liegen so insgesamt 14 verschiedene Ergebnisse von 8 verschiedenen Autoren vor, die in Anlage 1 in 8.1. zusammengestellt wurden. Die verschiedenen Wöhlerlinien sind in Bild 11 dargestellt. Darin sind die Werte von Okuyama et al. /Oku7/ und Gillwald /Gill1/, weil der Bezug zu den statischen Kurzzeitfestigkeiten unsicher oder nicht vorhanden war, nicht enthalten.

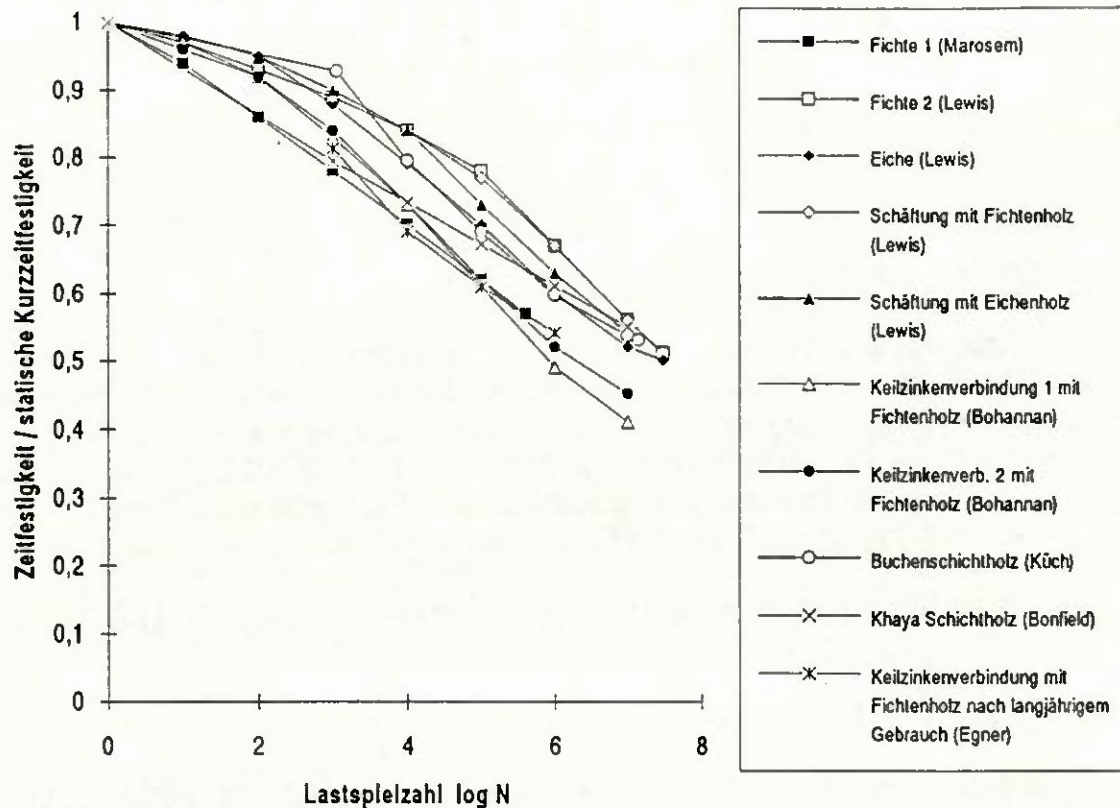


Bild 11: Zugschwellfestigkeit bei Holz und Holzwerkstoffen

Zusammenfassung:

Die Abminderungswerte reichen nach Umrechnung wegen unterschiedlichen κ -Werte bei 10^7 Lastspielen von 0,47 bis 0,54 bei einem Mittelwert von 0,50 und einer Varianz von 0,05. Somit kann man von einer guten Übereinstimmung bei dieser Lastspielzahl ausgehen.

Die Ergebnisse mit den Keilzinkenverbindungen liegen etwas niedriger. Sie werden in Bild 11 mitangegeben. Sie sind niedriger. Der Mittelwert liegt nach der Umrechnung wegen κ bei 0,37 für 10^7 Lastspiele.

Anmerkung:

Egner und Jagfeld /Eg4/ führten Zugschwellversuche mit Keilzinkenverbindungen aus einer Brücke nach einer neunjährigen Verkehrsbelastung und anschließender zweijähriger freien Bewitterung durch. Nach 10^6 Lastspielen ergab sich eine stark streuende Wöhlerlinie mit einer unteren Grenze von 54 % (13,3 N/mm²) der statischen Zugfestigkeit. Diese untere Grenze wurde in Bild 11 und in Anlage 1 eingetragen.

Sonstige Ergebnisse:

Rose /Ro4/ machte nach seinen Versuchen mit $3,5 \cdot 10^6$ Lastspielen die Feststellung, daß "Belastungsgrade über 60% häufig und über 65% in allen Fällen zum Bruch führen".

Lewis /Lew3/ beanspruchte zwei Zugproben aus Fichte mit 50% der Kurzzeitfestigkeit. Während eine Probe nach über $8 \cdot 10^6$ Lastspielen zum ersten Mal brach, überstand die zweite $32 \cdot 10^6$ Lastspiele ohne Bruch.

Egner und Rothmund /Eg6/, zitiert in /Kol6/, führten Zugschwellversuche an spezifisch leichtem und schwerem Fichtenholz durch. Die Zeitfestigkeit für $2 \cdot 10^6$ Lastspielen lag beim schweren Holz ($\rho=0,54 \text{ g/cm}^3$) bei ca. 60% der statischen Zugfestigkeit; bei leichtem Holz ($\rho=0,42 \text{ g/cm}^3$) bei ca. 52%.

Die Ergebnisse von Okuyama et al. /Oku7/, die aus der dort angegebenen Gleichung resultieren und für 10^7 extrapoliert wurden, liegen zwar in diesem Bereich, werden aber nicht zur Mittelwertbildung mitherangezogen.

Bewertung:

Die Ermittlung in 8.2.3. bzw. Anlage 1 ergibt für eine Lastspielzahl von $N=10^7$ und einem κ -Wert von 0,0 einen k_{fat} -Wert von 0,50. Dieser Wert wird von 2 der 6 Versuchsreihen ($\cong 33\%$) unterschritten.

3.1.1.2. Druckschwellen

Das Problem des Druckschwellens wurde in folgenden bekannten Veröffentlichungen /Bon1/, /Eg1/, /Eg5/, /Gr7/, /Oku7/, /Ro4/, /Rot1/ behandelt.

Obwohl mit Ausnahme von /Oku7/, /Eg1/ und /Bon1/ keine Wöhlerlinien vorliegen, lassen sich dennoch Aussagen treffen, die durch alle sechs Berichte belegt werden.

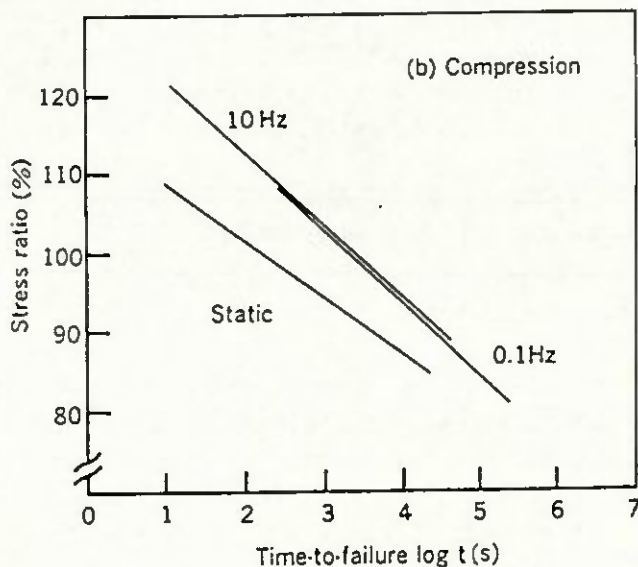


Bild 12: Beziehung zwischen dem Spannungsverhältnis und der Zeit bis zum Bruch bei Ermüdungs- und statischen Versuchen. (fig. 4 b aus /Oku7/)

mit der Zeitstandfestigkeit, die nach Pearson /Pe2/ für diesen Zeitraum noch ca. 70% beträgt, verhält sich das Druckschwellen eindeutig günstiger.

Als die Lastamplitude geringfügig in den Zugbereich wechselte, trat aber eine deutliche Abminderung der Zeitfestigkeit auf. Für $\kappa=-0,1$ und $\kappa=-0,5$ betragen diese Werte noch ca. 70% bzw. 60% der statischen Druckfestigkeit.

Okuyama et al. /Oku7/ gab das Spannungsverhältnis in Abhängigkeit der Lastspielzahlen an. Dabei nannte er keine absoluten Spannungswerte. Aus Bild 12 wird deutlich, daß die Zeit bis zum Bruch der Probe bei gleichem Spannungsverhältnis für eine schwelende Beanspruchung deutlich größer war, als bei der statischen Beanspruchung, die mit gleichen Belastungsgeschwindigkeiten ("ramp-load"-Versuch) durchgeführt wurde. Also "schädigte" die Druckschwellbeanspruchung das Holz weniger als die Beanspruchung mit konstanter Laststeigerung und damit auch konstanter Last.

Bonfield und Ansell /Bon1/, die Khaya-Furniere verwendeten, stellten eine Wöhlerlinie mit über 10^7 Lastspielen, einer Frequenz von ca. 2 Hz und einem κ -Wert von 0,1 auf. Dabei betrug die noch ertragbare Oberspannung noch ca. 87% der statischen Druckfestigkeit. Vergleicht man dies

Roth /Rot1/ untersuchte Eiche und Tanne unter einer schwellenden Druck- und Biegebeanspruchung. Bei einer Druckbeanspruchung von 75% der statischen Festigkeit stellte Roth keine Unterschiede zwischen den Versuchen zur Dauerstandfestigkeit und der Dauerfestigkeit fest: "Bei wechselnder Druckbeanspruchung, die zwischen einer kleinen Vorspannung und einem Wert von 75% der statischen Druckfestigkeit hin und her wandert, verhält sich Eichen- und Tannenholz genau wie bei entsprechender Druckbeanspruchung. Es treten auch große bleibende Zusammendrückungen auf und die Federung wird in der selben Weise verändert."

"Bei der Dauerdruckbeanspruchung kann bei normal feuchtem, gleichartigem Material die Ermüdungsgrenze mindestens bei 60% der statischen Druckfestigkeit angenommen werden." "Kurzen bis insgesamt eintägigen Überlastungen in beliebiger Form bis 75% an die statische Druckfestigkeit heran wird bei dauernder Vergrößerung der Federung und größerer bleibender Verformung auch noch standgehalten, wenn sie zentrisch wirken. Länger andauernde Überlastungen bis 75% an die statische Druckfestigkeit heran sind höchst bedenklich." /Rot1/ Die statischen Bruchversuche nach Beendigung der Dauerschwellbeanspruchung mit Lasten im Bereich der zulässigen ergeben keine signifikant geringeren Werte als vor der Schwellbeanspruchung.

Graf /Gr7/ führte Druckschwellversuche mit Tanne und Eiche durch, indem er nach ca. 10000 Lastwechseln die Spannung erhöhte. Die Brüche traten bei der 5. Lasterhöhung bei 0,84 bzw. 0,81 der statischen Bruchlast ein. Die Schwellbeanspruchung mit der größten Last und einem Lastwechsel/Minute dauerten ca. 166 Stunden. Damit läßt sich eine nach Pearson /Pe2/ eine Abminderung infolge der Zeitstandfestigkeit auf nur noch 76% ermitteln. Dieser Wert ist geringer als diejenigen der Dauerschwellbeanspruchung.

Rose /Ro4/ bzw. /Ro3/ führte seine Versuche an Kiefernholz mit Frequenzen von 41 bis 42 Hz durch. Sie dauerten wegen der verwendeten Lastspielzahl von $3,5 \cdot 10^6$ ca. 23,4 h. Damit ergibt sich eine Abminderung nach Pearson /Pe2/ auf 82% der Kurzzeitfestigkeit. Er stellte fest: "Die Druckschwellbeanspruchung konnte in der Regel bis 75 % der statischen Kurzzeitfestigkeit gesteigert werden, ohne daß innerhalb von $3,5 \cdot 10^6$ Lastwechseln Probenbrüche eintraten. Dagegen kam es bei höheren Belastungen sehr häufig zu vorzeitigen Brüchen, und nur sehr feuchte Proben, die sich sehr zäh verhalten, konnten mit einem Belastungsgrad (Verhältnis der Oberspannung zur statischen Bruchfestigkeit) von mehr als 82% (bis 90%) über die gesamte Versuchsdauer beansprucht werden." /Ro3/

Egner /Eg5/, zitiert in /Wa1/, stellte Wöhlerlinien für die Druckschwellbeanspruchung bei wassergesättigtem Fichtenholz auf. "Die Druckschwellfestigkeit betrug bei diesen Versuchen 70% der statischen Druckfestigkeit." Die Wöhlerlinien zeigt Bild 12. Diese Ergebnisse finden sich auch in /Eg1/. Die nach Pearson berechnete Abminderung wegen der Zeitstandfestigkeit ergibt bei der verwendeten Lastspielzahl und der Frequenz von ca. 2 Hz einen Wert von 0,74.

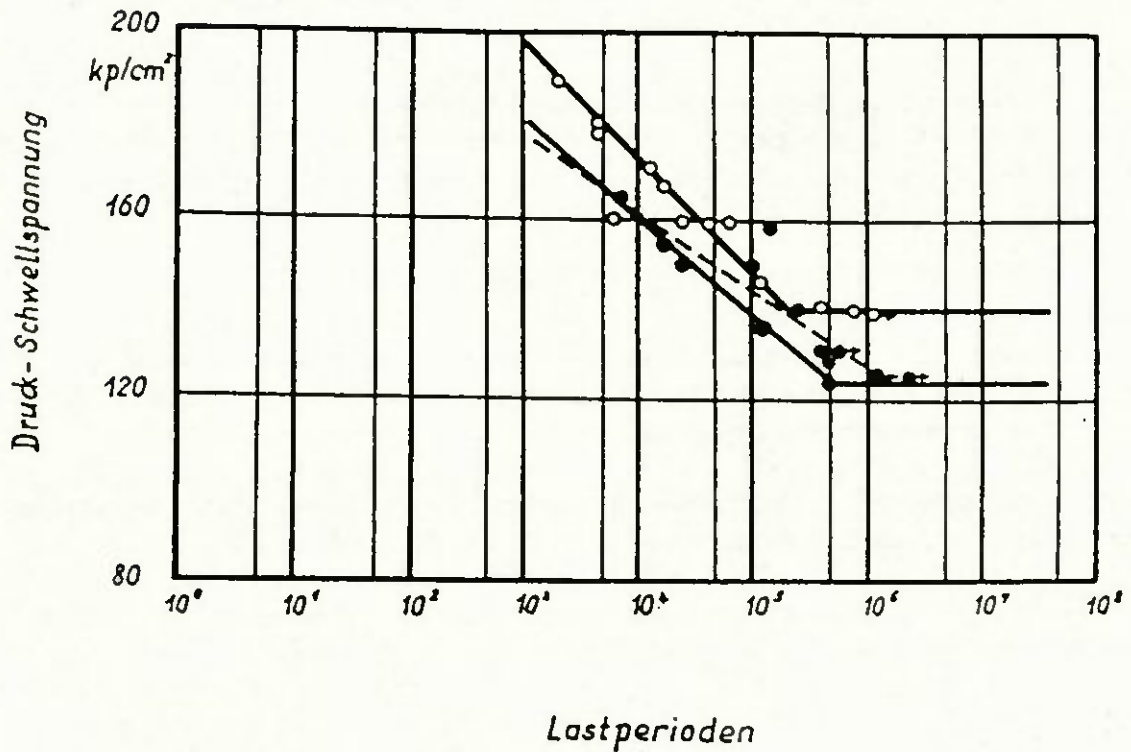


Bild 13: Wöhler-Kurve für Druckschwellbeanspruchung bei wassergesättigtem Fichtenholz verschiedener Rohdichte nach Untersuchungen von Egner /Eg5/. (Bild 34 aus /Wal1/)

Zusammenfassung:

In Bild 14 wird versucht, einen Gesamtüberblick über die Druckschwellversuche zu geben. Darin sind die Ergebnisse von Okuyama /Oku7/ nicht enthalten, weil die eindeutige Bestimmung der statischen Festigkeit nicht möglich war.

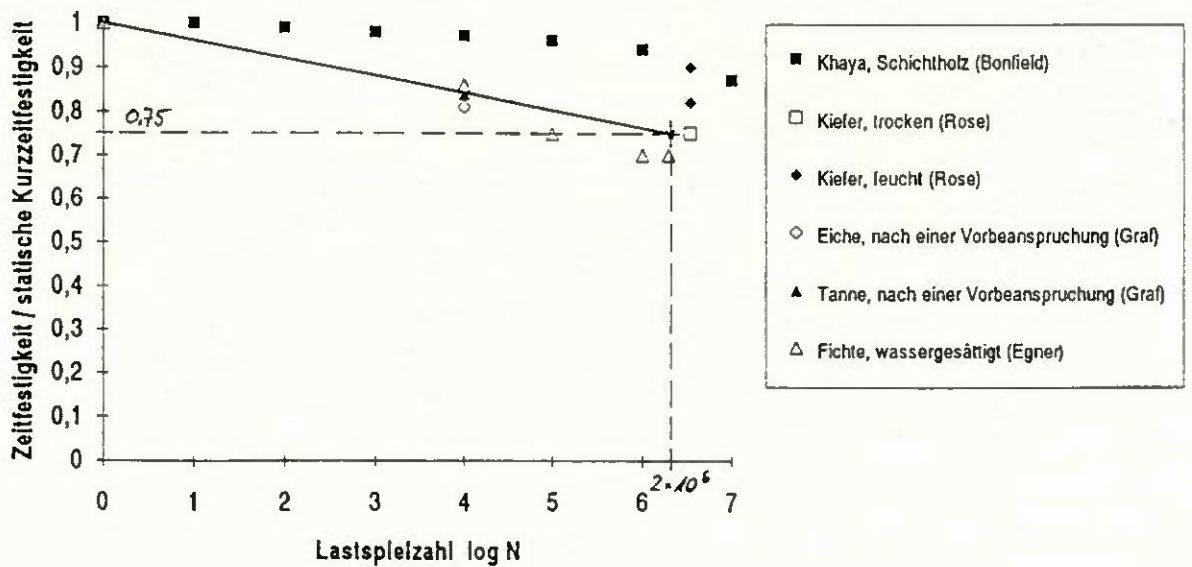


Bild 14: Druckschwellfestigkeit bei Holz und Holzwerkstoffen

Bewertung:

Es erscheint vertretbar, den k_{fat} -Wert bei $2 \cdot 10^6$ Lastspielen mit $\geq 0,75$ festzulegen. Dies berücksichtigt noch nicht den Einfluß des Zeitstandverhaltens.

Vergleicht man diese Abminderung mit dem Zeitstandverhalten ergibt sich Folgendes:

Da nur Rose und Egner bei der Dauerschwellbeanspruchung Brüche unter geringfügig kleineren Lasten im Vergleich zur Zeitstandfestigkeit feststellten, erscheint eine zusätzliche Lastabminderung zum k_{mod} -Wert nicht erforderlich.

Knicken:

Für das Problem des Knickens findet sich die Aussage von Rose /Ro4/, daß "die reinen Knickbrüche (Bruchstelle in Probenmitte) bei verhältnismäßig kleinen Lastwechselzahlen (einige 10^4), vor allem an Proben mit unregelmäßigem und schrägem Faserverlauf eintraten, (...)."

Egner /Eg1/ untersuchte 35 m lange genagelte Vollwandträger. Dabei wurde unter oft wiederholten Beanspruchungen ein Ausknicken des Obergurtes festgestellt.

Das Problem des Knickens unter oft wiederholten Beanspruchungen muß noch näher untersucht werden.

3.1.1.3. Zug-Druck-Wechsel

Die Zug-Druck-Wechselbeanspruchung an verschiedenen Holz und Holzwerkstoffen untersuchten drei bekannte Autoren /Bon1/, /Dos1/, /In1/. Es liegen insgesamt 12 verschiedene Ergebnisse vor, die in Anlage 2 in 8.1. zusammengestellt wurden. Die verschiedenen Wöhlerlinien sind in Bild 15 dargestellt. Darin sind auch die Ergebnisse aus Eberswalde /In1/ enthalten, obwohl keine statische Kurzzeitfestigkeit angegeben war. Aus dem Forschungsbericht aus Eberswalde lassen sich diese nicht entnehmen. Um Anhaltswerte aber dafür zu bekommen, werden die Wöhlerlinien, die erst bei einer Lastspielzahl von 100 Lastspielen beginnen, im Bereich noch geringerer Lastspiele linear extrapoliert. Dies erscheint in diesem Falle vertretbar, weil nur über einen kleinen Bereich (von $N=100$ auf $N=1$) extrapoliert wird und die daraus resultierenden Ergebnisse zwischen den Werten von Bonfield und Ansell /Bon1/ und Dosoudil /Dos1/ liegen und somit eine gute Übereinstimmung erreicht wird.

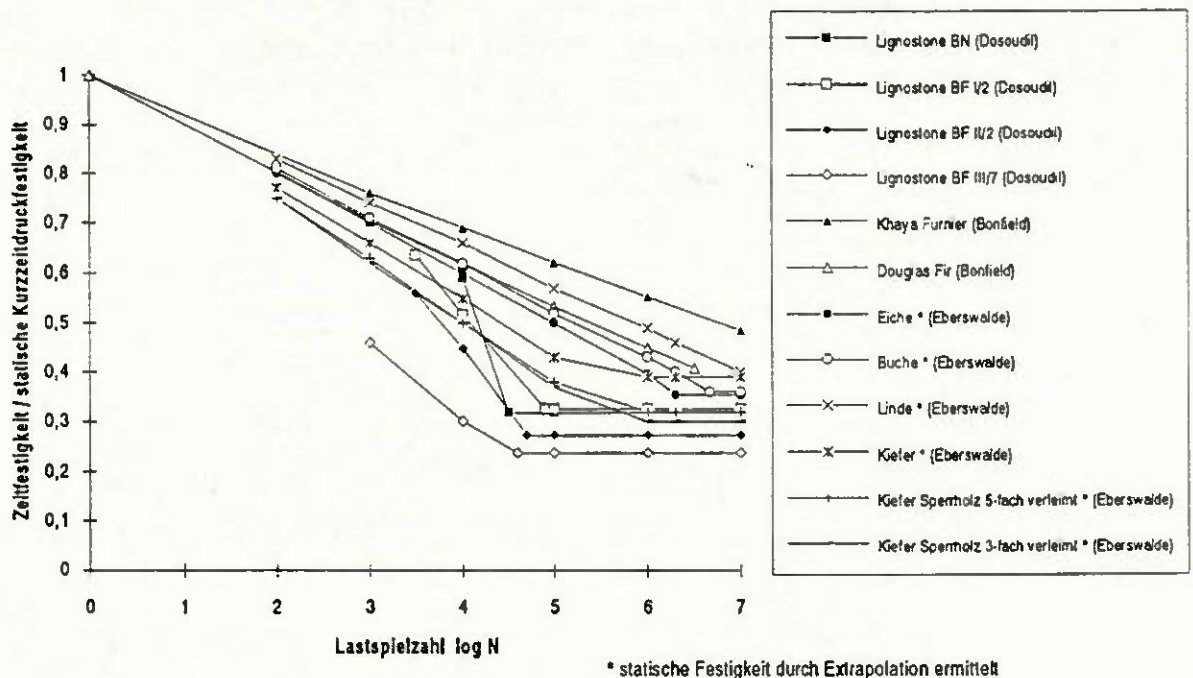


Bild 15: Zug-Druck-Wechselfestigkeit bei Holz und Holzwerkstoffen

Zusammenfassung:

Die Abminderungswerte reichen bei 10^7 Lastspielen von 0,24 bis 0,48 bei einem Mittelwert von 0,35 und einer Varianz von 0,19. Somit kann man von einer mäßigen Übereinstimmung der verschiedenen Versuche ausgehen. Die Ergebnisse unterscheiden sich von Autor zu Autor deutlich.

An diesen Ergebnissen ist der Rohdichteinfluß (vgl. 3.2.2.2.) auf die Form der Wöhlerlinie erkennbar: Die Proben aus Lignostone, einem Holzwerkstoff mit einer Rohdichte von ca. $1,4 \text{ kg/dm}^3$, zeigen einen sehr frühen Übergang zu einer horizontalen Geraden.

Sonstige Ergebnisse:

In Eberswalde wurde eine Ähnlichkeit des Verhaltens von Biegewechsel- und Zug-Druck-Wechselbeanspruchung festgestellt: "Paralleluntersuchungen (...) zeigen, daß die bei der Feststellung der Wechselbiegefestigkeit gemessenen charakteristischen Unterschiede, die sich durch die Rohdichte der verschiedenen Holzarten ergeben, auch bei der Dauerbeanspruchung gegenüber Zug und Druck festzustellen waren, (...)" /In1/

Bewertung:

Die großen Unterschiede zwischen den einzelnen Autoren, die auch sehr unterschiedliche Holz und Holzwerkstoffe untersuchten, machen eine Auswertung schwierig. In 8.2.5. bzw. in Anlage 2 wird dennoch versucht, k_{fat} -Werte abzuschätzen.

Das Problem des Zug-Druck-Wechsels bedarf noch weiteren Untersuchungen, die aber nicht vordringlich sind, weil Werte vorhanden sind.

Mit dem gewählten Auswertungsschema wird in 8.2.5. für 10^7 Lastwechsel einen k_{fat} -Wert von 0,26 bezogen auf die Zugfestigkeit ermittelt. Dieser wird bei 2 von 12 Versuchsserien (\cong 17%) unterschritten.

3.1.1.4. Biegeschwellen

Das Biegeschwellen an Holz und verleimten Hölzern untersuchten mehrere Autoren (/Dor2/, /Fr2/, /Gil3/, /Hay2/, /Kol1/, /Kü6/, /Lew3/, /Lew4 bzw. Lew5/, /Ste7/, /Ts1/). Deren Ergebnisse sind in einer Tabelle in Anlage 4.1 bis 4.3. zusammengestellt. Es wurde ein zusammenhängendes Wöhlerdiagramm (Bild 16) erstellt. Darin sind Ergebnisse von Sterr /Ste7/, Gillwald /Gil3/, Ota et al. /Ota3/ und Kolb /Kol1/ wegen fehlender eindeutiger statischer Festigkeiten nicht enthalten.

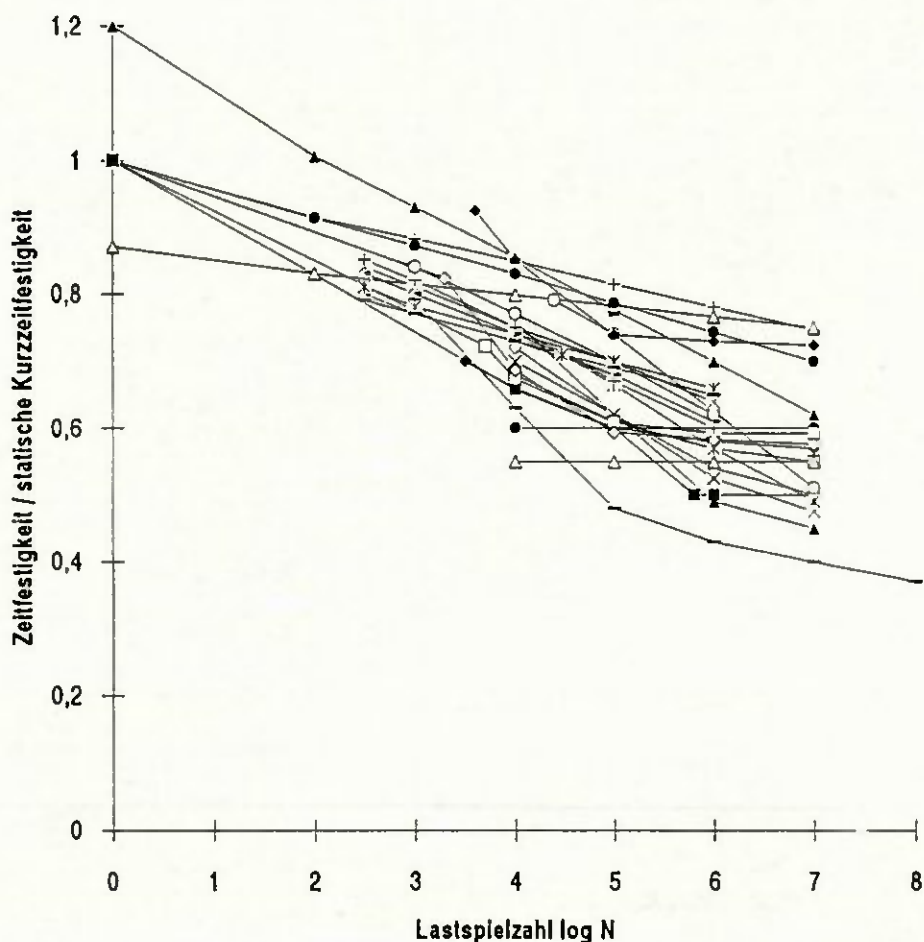


Bild 16: Biegeschwellfestigkeit bei Vollhölzern und Schichthölzern (Anm.: Auf die Abbildung einer Legende wurde aus Übersichtlichkeitsgründen verzichtet.)

Das Bild 16 zeigt eine sehr große Streubreite. Es kann hier nicht davon ausgegangen werden, daß alle Wöhlerlinien einheitlich verlaufen. Deswegen ist es notwendig, die Fülle der Daten nach bestimmten Kriterien zu ordnen. Sie werden zunächst nach Vollholz und Schichtholz unterteilt.

Anmerkung:

Die Werte 1,2 und 0,87 auf der Ordinate, die von Tsai und Ansell /Ts1/ ermittelt wurden, sind so aus der Literatur übernommen worden und weisen auf eine Kurzzeitfestigkeitsprüfung hin, die eine Verhältnissbildung nicht zuläßt. Deswegen werden die Ergebnisse dieser Versuche im weiteren nicht in die Auswertung einbezogen.

1) Vollholz

Die Ergebnisse für Vollholz sind in Bild 17 dargestellt und in Anlage 4.1. in 8.1. zusammengestellt:

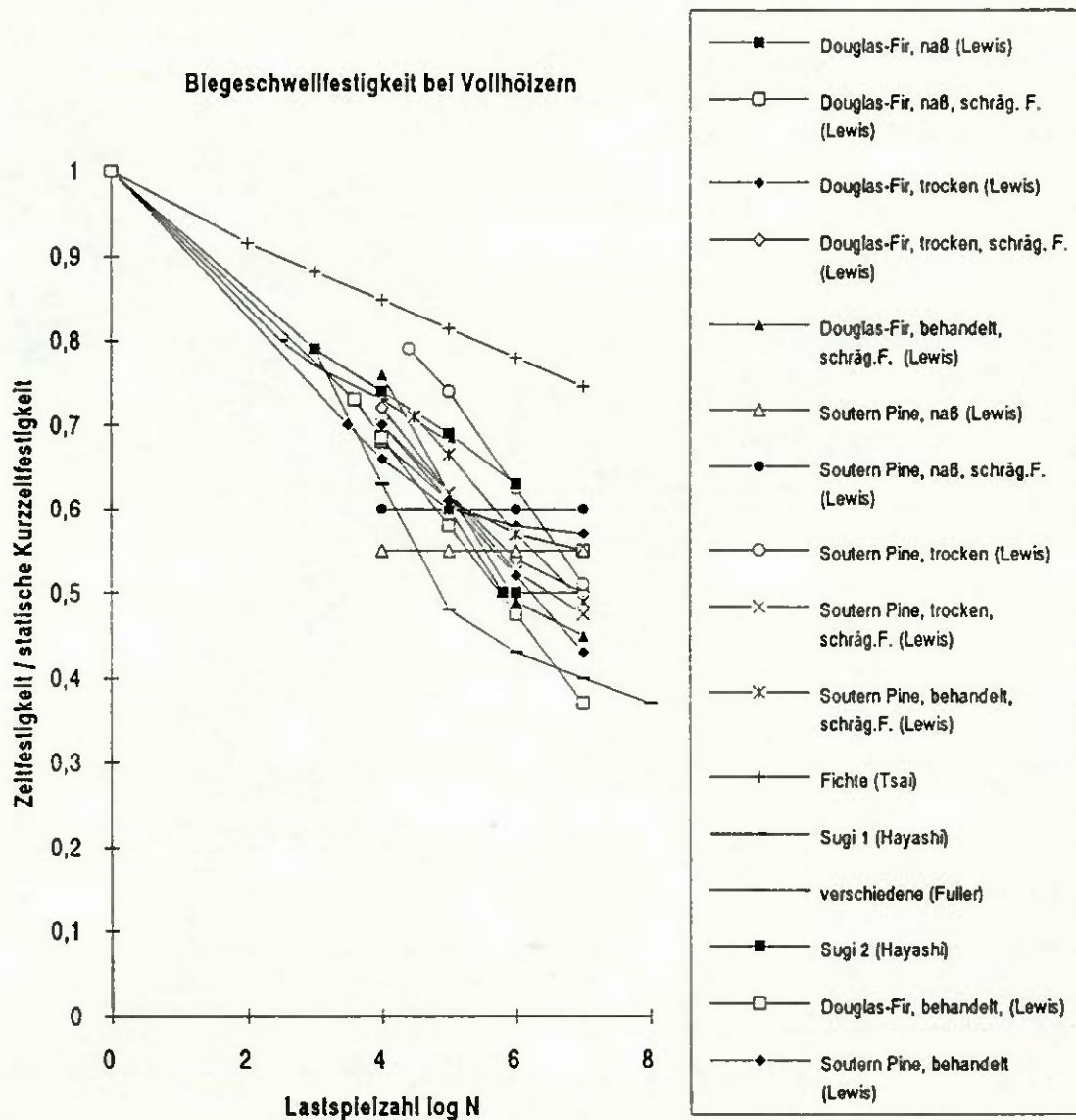


Bild 17: Biegeschwellfestigkeit bei Vollhölzern

Die Wöhlerlinien zeigen einen weit streuenden Verlauf. Das Ergebnis von Tsai und Ansell /Ts1/ (Fichte) kann wegen der Unsicherheit bei den statischen Versuchen (s.o.) herausgenommen werden; ebenso die Versuche mit nassem (wassergesättigtem) und behandeltem Holz von Lewis /Lew4/ bzw. /Lew5/, die z.T. horizontal verlaufen. Die Angaben für verschiedene Hölzer und Holzwerkstoffe (Fuller und Oberg /Lew3/) sind z.T. unvollständig. Damit verbleiben in erster Linie die 4 Versuchsreihen in Bauteilgröße mit trockenen Proben von Lewis zur Auswertung. Die Werte von Hayashi /Hay2/ sind nur für eine geringe Lastspielzahl angegeben. Sie liegen über den Werte, die von Lewis ermittelt wurden. Sie werden nicht miteinbezogen, um nur Proben mit größeren Querschnitten auswerten zu können.

Bewertung:

Die Ermittlung in 8.2.6.1. bzw. Anlage 4.2. ergibt für einen κ -Wert von 0,0 und eine Lastspielzahl von $N=10^7$ einen k_{fat} -Wert von 0,42. Es tritt auch bei hohen Lastspielzahlen noch eine deutliche Minderung der Abminderungswerte und damit der k_{fat} -Werte auf. Dieser k_{fat} -Wert wird von einer der vier Versuchsreihen (=25%), die einen nichtparallelen Rand-Faser-Verlauf hatte, unterschritten.

Da Versuche mit Bauteilabmessungen bekannt sind, können Holz und Holzwerkstoffe für eine Biegeschwellbeanspruchung unter Beachtung entsprechender Abminderungsfaktoren (k_{fat} -Werte) eingesetzt werden. Zur Ermittlung dieser Werte können nur 4 Versuchsreihen mit Nadelhölzern, die unbehandelt waren und eine Rohdichte von 0,48 bis 0,56 kg/dm³ hatten, herangezogen werden.

Sonstige Ergebnisse:

Kolb /Koll/ untersuchte Vollhölzer, die nach Güteklassen sortiert waren, mit einem Spannungsverhältnis $\kappa=0,33$ und den Abmessungen 8×12×120 cm. Dabei stellte er Brüche bei einem Beanspruchungsniveau mit den 1,5-fachen zulässigen Spannungen nach DIN 1052 Teil 1 und Lastspielzahlen von ca. 15000 bis ca. 160000 fest. Eine 1,5-fache Sicherheit ist nach Meinung der Verfasser zu gering, weil darin die Teilsicherheitsbeiwerte der Materialseite und der Einwirkungen und ein Modifikationsfaktor enthalten sein sollten.

2) Schichtholz

Die Ergebnisse von 3 Autoren /Hay2/, /Ste7/, /Ts1/ und ihren 13 Versuchsreihen zeigt Bild 18.

Die Wöhlerlinien zeigen einen deutlich einheitlicheren Verlauf als Bild 17. Die Werte für Brett-schichtholz liegen bis auf den "Ausreißer" /Ste7/ (BSH 3 in Bild 18) nahe zusammen im unteren Bereich. Die Ergebnisse von Hayashi /Hay2/ sind ebenfalls gebündelt. Für die Ergebnisse von Tsai und Ansell /Ts1/ gilt die Anmerkung unter Bild 16. Sie werden nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse sind in einer Tabelle in Anlage 4.3. in 8.1. aufgeführt und weiter in Anlage 8.2.6.2. ausgewertet.

Sonstige Ergebnisse:

Freas und Werren /Fr2/ untersuchten verleimte Brett-schichtholzbalken aus Eiche unter einer wiederholten Biegebeanspruchung. Die Balken wurden mit 3, 6, $9 \cdot 10^6$ Lastspielen und 50% der statischen Bruchlast beansprucht. Dabei brach keine der 9 trockenen Proben. Von den wassergesättigten Proben brachen 3 von 9 Proben, die mit 50% der statischen Bruchlast für wassergesättigte Proben beansprucht wurden.

Dorn und Egner /Dor2/ untersuchten ehemalige Brückenträgergurte, die längere Zeit Verkehrsbeanspruchungen und der Witterung ausgesetzt waren, unter einer Biegeschwellbeanspruchung. Die 6 Proben, die mit einer Oberspannung von ca. 61% der statischen Festigkeit zwischen $4,3$ und $6,7 \cdot 10^5$ Lastspielen beansprucht wurden, brachen während dieser Beanspruchung nicht.

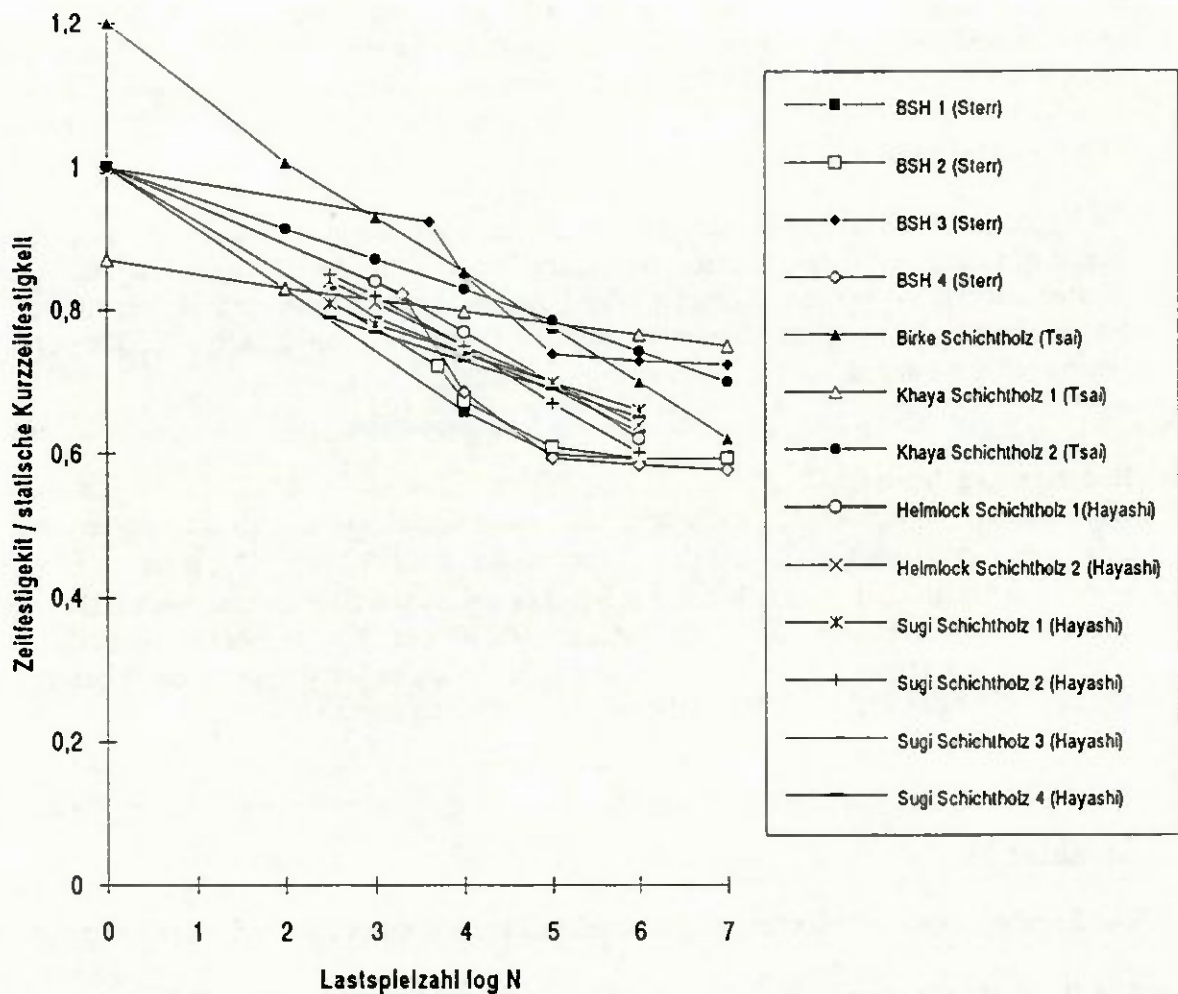


Bild 18: Biegeschwellfestigkeit bei Schichthölzern

Bewertung:

Die Ermittlung in 8.2.6.2. bzw. Anlage 4.3. ergibt für eine Lastspielzahl von $N=10^7$ und einem κ -Wert von 0,0 einen k_{fat} -Wert von 0,52. Bei dieser Lastspielzahl konnten nur noch die Versuche eines Autors (Sterr) herangezogen werden. Er verwendete aber Brettschichtholz mit großen Abmessungen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Freas und Werren für trockene Proben, sowie denjenigen von Dorn und Egner.

3.1.1.5. Biegewechsel

Hier wird ebenfalls zwischen Voll-, Schicht- und Sperrholz unterschieden.

1) Vollholz

Biegewechselversuche mit Vollhölzern führten viele Autoren (/Ang1/, /Bur2/, /Fu1/, /Gil1/, /Gil3/, /Göh1/, /Göt2/, /Ib1/, /Im7/, /In1/, /Kol16/, /Kra2/, /Kra5/, /Lew4/, /Mak2/, /Mo2/, /Pan1/, /Per1/, /Sc5/, /Sek3/, /Sek4/, /Si1/, /Sta2/, /Wa1/, /Y12/) durch.

Für die Auswertung werden die Ergebnisse von folgenden Berichten aus folgenden Gründen nicht berücksichtigt:

- Bei Stanton /Sta2/ fehlte die Wöhlerlinie. Er erhielt für $8,1 \cdot 10^8$ Lastwechsel und 24% der statischen Festigkeit noch keinen Bruch der Probe.
- Die Auswertung der Ergebnisse von Sekhar und Shukla /Sek3/ und /Sek4/ ist mit dem gewählten Schema nicht möglich.
- Bei Pana et al. /Pan1/, Angström /Ang1/, Gillwald /Gil1/ bzw. /Gil3/, Götze /Göt2/, Kollmann /Kol16/ sind die entsprechenden statischen Werte nicht enthalten.
- Verschiedene Proben von Moore und Kommers /Mo2/ waren feucht oder naß.
- Verschiedene Ergebnisse aus Eberswalde /In1/ hatten keine gesicherte Zuordnung zu den statischen Kurzzeitfestigkeiten.
- Perkitny /Per1/ verwendete nur eine geringe Lastspielzahl und untersuchte hauptsächlich die Verformungen.
- Die Wöhlerlinien von Imayama /Im1/, /Im2/, /Im3/ beschränkten sich auf Untersuchung der Jahrringe.
- Burmester /Bur2/ verwendete ein anderes Versuchsverfahren an. Er ermittelte eine Biegewechselfestigkeit von 30% der statischen Biegefestigkeit für Buche und 27,5% für Kiefer.

Die verwendeten Ergebnisse sind in Bild 19 und in einer Tabelle in Anlage 5.1. in 8.1. zusammengestellt.

Zusammenfassung:

Die Abminderungswerte reichen bei 10^7 Lastspielen von 0,18 bis 0,38 bei einem Mittelwert von 0,31 und einer Variationskoeffizient von 0,17. Somit kann man von einer mäßigen Übereinstimmung der verschiedenen Versuche ausgehen.

Die Wöhlerlinien zeigen einen weitgehend einheitlichen Verlauf. Es ist auch zu sehen, daß bei einigen Linien der Übergang in einen nahezu horizontalen Verlauf sehr früh erfolgt, während bei anderen Kurven dieser Übergang auch bei hohen Lastspielzahlen noch nicht erfolgte. An diesen Ergebnissen ist der Rohdichteinfluß (vgl. 3.2.2.2.) auf die Form der Wöhlerlinie erkennbar. Insgesamt wird die Kurvenschar mit höheren Lastspielzahlen flacher.

Bei diesen Versuchen gibt es keine Ergebnisse mit Proben in großen Abmessungen.

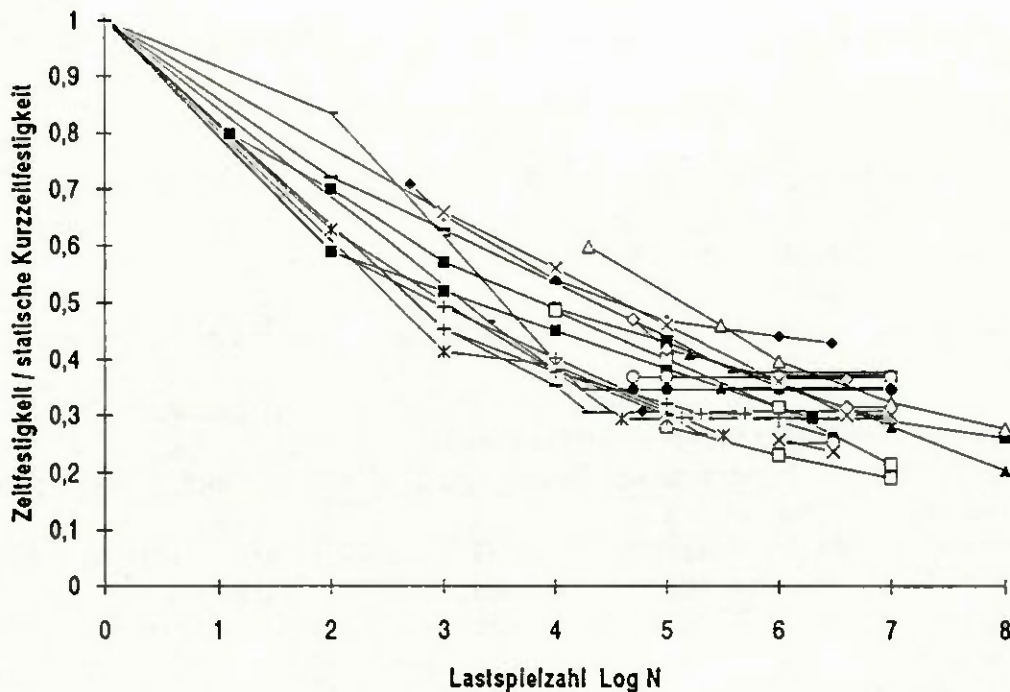


Bild 19: Biegewechselfestigkeit bei Vollhölzern

(Anmerkung zu Bild 19: Auf die Abbildung einer Legende wird verzichtet, weil durch die vielen Daten die Übersichtlichkeit nicht mehr gewährleistet ist. Es sind auch die Ergebnisse, bei den nur eine "Dauerfestigkeitsgrenze" ohne eine Lastspielzahl angegeben war, nicht berücksichtigt.)

Bewertung:

Die Ermittlung in 8.2.7.1. bzw. Anlage 5.1. ergibt für eine Lastspielzahl von $N=10^7$ bei der Biegewechselbeanspruchung für Vollhölzer einen k_{fat} -Wert von 0,26. Diesen Wert unterschreiten 3 von den 18 Versuchsreihen ($\cong 17\%$), die bis zu dieser Lastspielzahl durchgeführt wurden.

Die Übertragung dieser k_{fat} -Werte auf Hölzer in Bauteilgröße ist nicht gesichert, weil keine Versuche in großen Abmessungen vorliegen.

2) Schichtholz

Biegewechselversuche mit Schichthölzern finden sich in verschiedenen Berichten (/Di2/, /Fu1/, /Ib1/, /Kü5/, /Kü6/, /Mak2/, /Per3/, /Re3/, /Th2/, /Ts1/, /Yl2/).

Es werden für die Auswertung die Ergebnisse von folgenden Berichten aus folgenden Gründen nicht berücksichtigt:

- Thum und Jakobi /Th2/ untersuchten die Dauerbiegefestigkeit von stahlbewehrtem Panzerholz. Es handelt sich hier um ein außergewöhnliches Material. Die Abminderungswerte werden mit 0,26 bis 0,40 angegeben.
- Perkitny und Steller /Per3/ verwendeten nur eine geringe Lastspielzahl und untersuchten hauptsächlich die Verformungen.

Die verwendeten Ergebnisse sind in einer Tabelle in Anlage 5.1. in 8.1. zusammengestellt und in Bild 20 dargestellt.

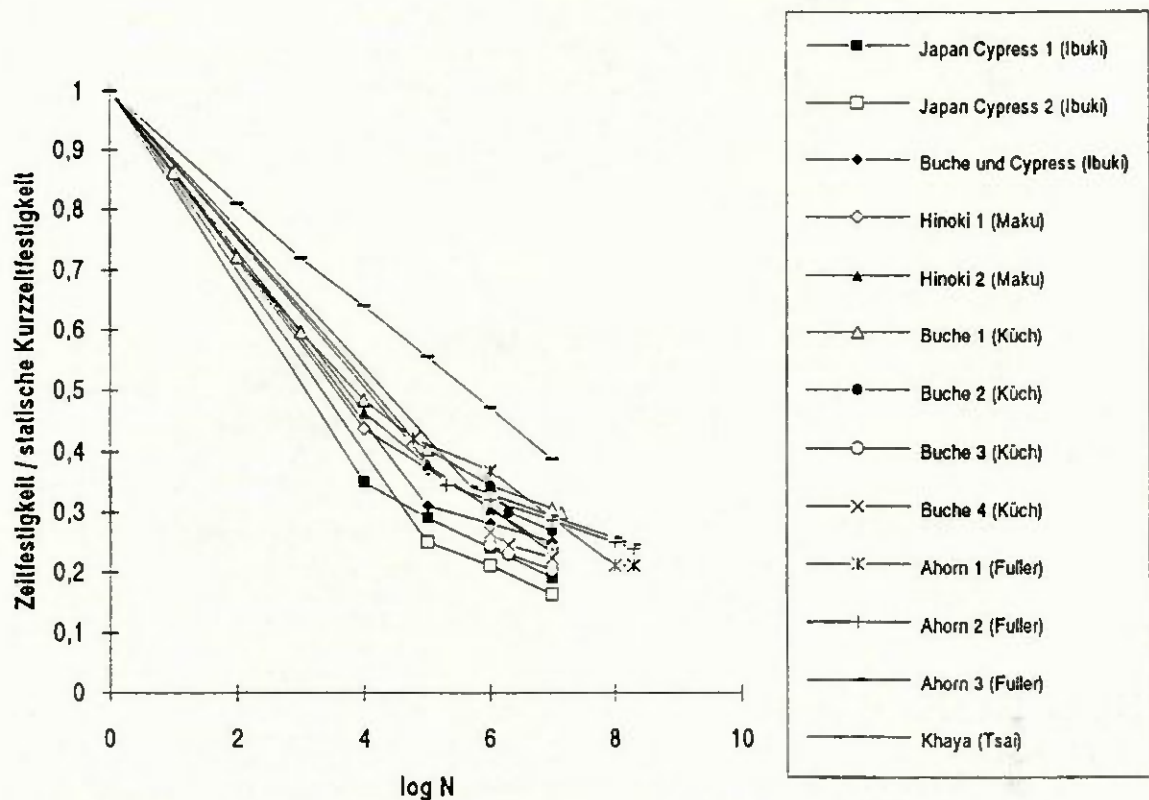


Bild 20: Biegewechselhaftigkeit bei Schichthölzern

Für die weitere Auswertung wurden die Ergebnisse von Tsai und Ansell /Ts1/ nicht berücksichtigt (vgl. 3.1.1.4.).

Zusammenfassung:

Die Abminderungswerte reichen bei 10^7 Lastspielen von 0,16 bis 0,30 bei einem Mittelwert von 0,24 und einem Variationskoeffizienten von 0,17. Hier kann man von einer mäßigen Übereinstimmung bei dieser Lastspielzahl ausgehen.

Die Abminderungswerte der Schichthölzer unterscheiden sich deutlich von denen der Vollhölzer; sie liegen im Vergleich dazu niedriger. Bei der Schwellbeanspruchung ist es umgekehrt. Die Ursache dieses Unterschiedes kann in der Bauteilgröße liegen: Bei der Biegewechselbeanspruchung werden überwiegend kleine, fehlerfreie Proben verwendet, für die Auswertung der Biegeschwellversuche sind Versuche mit Bauteilabmessungen herangezogen worden.

Es liegen keine Ergebnisse mit Proben aus Brettschichtholz, die als Wöhlerlinien dargestellt wurden, vor.

Sonstige Ergebnisse:

Rensburg et al. /Re3/ untersuchten Brettschichtbinder, die zum Teil in den äußeren Lamellen mit eingeleimten Stählen bewehrt waren, unter einer Biegewechselbeanspruchung. Die Beanspruchungshöhe lag bei der 0,7-, 1,0- und 1,5-fachen Gebrauchslast, die noch durch den "load-duration-faktor" dividiert wurde. Nach 3000 Lastspielen wurde unter den 30 Proben (2x 3 Serien mit je 5 Stück) kein Bruch gezählt und kein erkennbarer Anstieg in der Verformung festgestellt. Bei den nächsten 2 Serien (je 4 Stück) mit 15000 Lastspielen und der 1,5-fachen Gebrauchslast brach sowohl ein unbewehrter Körper bei 13500 Lastspielen als auch ein bewehrter bei 7000 Lastspielen.

Bewertung:

Die Ermittlung in 8.2.7.2. bzw. Anlage 5.2. ergibt für eine Lastspielzahl von $N=10^7$ bei der Biegewechselbeanspruchung für Vollhölzer einen k_{fat} -Wert von 0,20. Diesen Wert unterschreiten 2 von den 13 ($\cong 15\%$) Versuchsreihen, die bis zu dieser Lastspielzahl durchgeführt wurden.

Die Übertragung dieser k_{fat} -Werte auf Brettschichthölzer in Bauteilgröße ist nicht gesichert, weil keine Versuchsergebnisse in großen Abmessungen vorliegen.

3) Sperr- und Sternholz

Es liegen im Vergleich zu den Schichthölzern weniger Ergebnisse, die in Anlage 5.3. in 8.1. abgedruckt sind, vor. Weil sich in der Veröffentlichung von Küch /Kü5/ die Ergebnisse der Sperrhölzer nicht von denen der Schichthölzer im Mittel unterscheiden, wird empfohlen, diese wie Schichthölzer zu behandeln. Die Sperr- und Sternhölzer zeigen gute Zeit- und Dauerfestigkeitseigenschaften; d.h. deren Abminderungswerte liegen bei denen der Voll- und Schichthölzer.

3.1.1.6. Schub / Abscheren

In diesem Bericht werden Schub- und Scherspannungen zur Versuchsauswertung und zur k_{fat} -Wertermittlung gleich behandelt.

1) Holz und Holzwerkstoffe

Das Schub- bzw. Scherverhalten unter einer schwellenden Beanspruchungen untersuchten Lewis /Lew5/ sowie Bonfield und Ansell /Bon1/. Lewis verwendete dafür große Proben aus Douglas-fir und Southern Pine, die in den Bereichen der größten Schubspannungen seitlich gekerbt waren. Bonfield verwendete verleimte Proben aus Khaya und benützte einen Probekörper, der oben und unten gezogen wurde und durch 2 versetzte seitliche Kerben bis zur Probenmitte eine Scherbeanspruchung in der Mitte erzeugte.

Die Ergebnisse sind in Bild 21 und in Anlage 3.1. in 8.1. dargestellt.

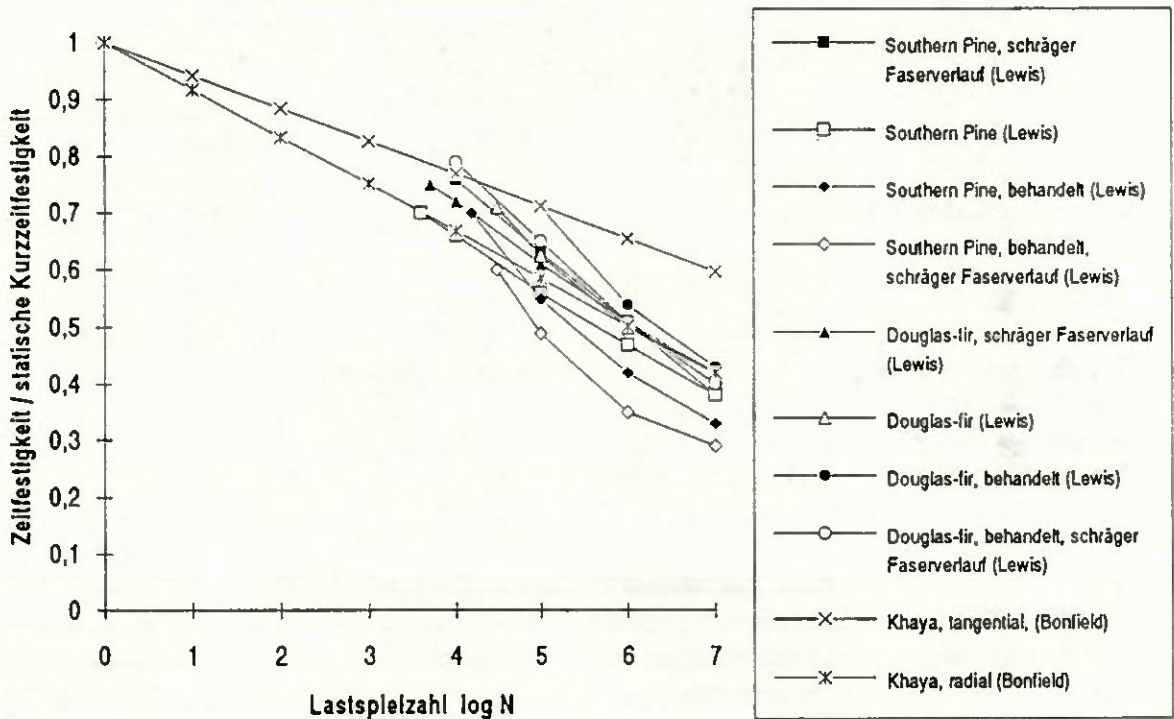


Bild 21: Schub- bzw. Scherfestigkeit im Schwellbereich bei Holz und Holzwerkstoffen

Da auch Lewis eine radiale Richtung verwendete, wird eine Auswertung nur für diese Richtung durchgeführt. Eine Beanspruchung in tangentialer Ebene ergab die deutlich günstigeren Werte. Somit liegt der Ansatz der Werte für die radiale Ebene auf der sicheren Seite. Für die Auswertung in Anlage 3.1. wird auf die Berücksichtigung der vorbehandelten Proben verzichtet, weil sie erkennbar schlechtere Werte lieferten (vgl. 3.2.2.10.). Nicht berücksichtigt wird, daß bei dieser schwellenden Schubbeanspruchung sich die Werte von den Holzarten Southern Pine und Douglas-fir unterscheiden.

(Anmerkung: Bei der Prüfung in radialer Richtung liegt die planmäßige Scherfläche in einer radialen Ebene parallel zu den Fasern.)

Bewertung:

Die Auswertung ergibt bei 10^7 Lastspielen und $\kappa=0$ einen k_{fat} -Wert von 0,30. Dieser wird von einem der 5 vorhandenen Werte ($\cong 20\%$) unterschritten. Die Abminderungswerte von Douglasfir liegen im Vergleich zu Southern Pine höher.

Eine schwellende Schubbeanspruchung wirkt sich ungünstiger auf die Abminderungswerte aus als die entsprechenden Biege-, Zug- und Druckbeanspruchungen.

2) Abscheren in der Leimfuge unter schwellender Beanspruchung

Die Ergebnisse von Lewis /Lew5/ und Sterr /Ste7/ sind in Anlage 3.2. in 8.1. in Tabellenform zusammengestellt.

Sonstige Ergebnisse:

Kolb /Kol1/ untersuchte Brettschichtholzträger im Biegeschwellversuch ($\kappa=0,33$), "die so dimensioniert waren, daß unter der Höchstlast ein Scherbruch auftritt. (...) Die Dauerbiegeschwingfestigkeit ergibt sich aus den Schaubildern zu rund 45 kp/cm^2 (Anm.: $\cong 4,5 \text{ N/mm}^2$). Damit wird das Verhältnis von statischer Biegescherfestigkeit zur Dauerschermfestigkeit im Schwellbereich = 0,56." /Kol1/

Die maßgebende Scherfläche lag in einer Leimfuge. Der Wert 0,56 bei 10^6 Lastspielen liegt nach einer Umrechnung auf $\kappa=0$ mit 0,34 bei dem in Anlage 3.2. ermittelten k_{fat} -Wert.

Küch /Kü6/ verwendete Birken- und Buchensperrholz sowie Kasein- und Kauritleime, um die Scherfestigkeit unter einer Schwellbeanspruchung ($\kappa=0$) in der Leimebene zu untersuchen. Die von Küch ermittelten drei Abminderungswerte lagen zwischen 0,49 und 0,50.

Lewis /Lew2/, der auch das Abscheren in einer Leimfuge untersuchte, stellte fest, daß es keinen Beweis dafür gibt, daß Leimverbindungen eine Tendenz zeigen, schneller durch Ermüdung geschädigt zu werden als das Holz um die Leimfuge.

Moslemi /Mo3/ untersuchte das Abscheren in der Leimfuge. Der Probekörper bestand aus drei zusammengeleimten Holzteilen aus Ahorn. Das mittlere Teil war rechtwinklig zu den äußeren angebracht und diente als Hebelarm zur Krafteinleitung. Moslemi stellte fest, daß die Ermüdungsbeanspruchung die Leimfuge schädigt, aber nicht oder nur im geringem Umfang zum Bruch des Holzes führt. Diese Ergebnisse werden wegen der außergewöhnlichen Versuchsanordnung bei der k_{fat} -Wertermittlung nicht berücksichtigt.

Bewertung:

Die Auswertung ergibt bei 10^7 Lastspielen und $\kappa=0$ einen k_{fat} -Wert von 0,34. Dieser wird von einem der 5 vorhandenen Werte ($\cong 20\%$) unterschritten.

Das Verhalten von Leimverbindungen unter oft wiederholten Abscherbeanspruchungen ist im Vergleich zum Holz günstiger. Der Ansatz der Werte für Holz bei Abscheren in radialer Ebene liegt für Leimverbindungen auf der sicheren Seite. Damit stellen Leimverbindungen, die auf Abscheren beansprucht werden, keine Schwachpunkte dar.

3) Abscheren in der Leimfuge unter wechselnder Beanspruchung

Für diese Beanspruchungsart liegen nur Ergebnisse von Sterr /Ste7/ vor, die in Anlage 3.3. in 8.1. zusammengestellt wurden. Er untersuchte Fichtenhölzer, die mit drei verschiedene Leimen verbunden worden waren.

Bewertung:

Die Auswertung ergibt für eine reine Wechselbeanspruchung ($\kappa=-1$) bei 10^7 Lastspielen einen k_{fat} -Wert von 0,24.

3.1.1.7. Querdruck, Querzug, Biegung senkrecht zur Faser

1) Querdruck

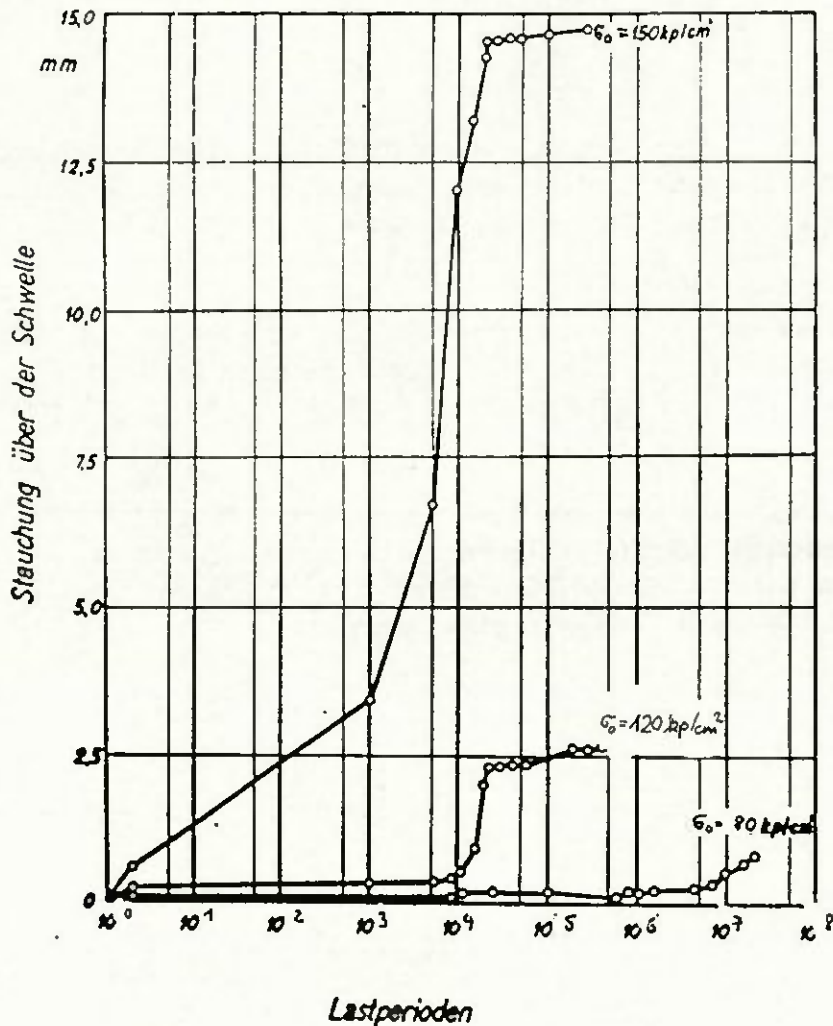


Bild 22: Bleibende Verformung bei Schwingbeanspruchung an Roteichen-Schwellen (Bild 31 aus /Wal/)

Zum Querdruckproblem ist eine Veröffentlichung /Wal/ bekannt. Hier wurden Roteichenschwellen mit einer Schwellbeanspruchung ($\kappa=0,125, 0,083$ und $0,067$) bei einer konstanten Unterspannung von 1 N/mm^2 beansprucht. Bild 22 zeigt bei den höheren Belastungsniveaus größere Verformungen. Mit der niedrigsten Oberspannung von 8 N/mm^2 wurden bis zu einer Lastwechselzahl von $4 \cdot 10^6$ geringe Verformungszunahmen festgestellt.

Bewertung:

Die zulässigen Querdruckspannungen *zul* $\sigma_{D\perp}$ nach DIN 1052 betragen 3 bzw. 4 N/mm^2 , also deutlich weniger als die im Versuch angewendete niedrigste Oberspannung (8 N/mm^2), so daß die zulässige Spannung der DIN 1052 auch für die Druckschwellbeanspruchung senkrecht zur Faser zugelassen werden kann, um ein Versagen auszuschließen ($\Rightarrow k_{\text{fat}}=1$).

Die Verformungen aufgrund der Dauerschwellbeanspruchung müssen berücksichtigt werden, da die bleibenden Verformungen auch bei geringen Spannungen zunehmen.

2) Querzug

Lewis /Lew2/ versuchte auch Körper mit einer oft wiederholten Zugbeanspruchung senkrecht zur Faser zu prüfen. Dabei war es ihm nicht möglich eine Wöhlerlinie aufzustellen, weil bereits bei den statischen Versuche sehr starke Streuungen auftraten und es auch versuchstechnische Probleme gab.

Lewis /Lew5/ stellte in einer anderen Untersuchung fest, daß Probekörper mit einem nichtparallelen Rand-Faser-Verlauf (vgl. 3.2.2.8.) durch Querzugversagen zu Bruch gingen. Dies war aber im Aussehen ähnlich dem Versagen der Vergleichsproben, die statisch geprüft worden waren.

Die Eigenschaften des Holzes unter einer oft wiederholten Wechselbiegebeanspruchung senkrecht zur Faser (s. unten), d.h. Querzug und Querdruck an den beiden Rändern, die mit Abminderungswerten von im Mittel $0,380$ und $0,295$ günstig bzw. im Rahmen des üblichen liegen, lassen vermuten, daß sich dies für den Querzug übertragen läßt.

Bewertung:

Die wenigen Ergebnisse, die die Beanspruchungsart Querzug behandeln aber nie direkt prüften, lassen vermuten, daß sich die Abminderungswerte für den Querzug unter oft wiederholten Beanspruchungen nicht wesentlich schlechter verhalten.

3) Biegung senkrecht zur Faser

Walter /Wal/ machte ausführliche Versuche an kleinen Proben. Die Anlagen 6.1. und 6.2. in 8.1. geben die Versuchsergebnisse wieder.

Zusammenfassung:

Für die Biegung mit einer radial wirkenden Beanspruchung wurde bei 15 Versuchsreihen mit 12 verschiedenen Holzarten ein Abminderungswert von 0,38 und ein Variationskoeffizient von 0,03 festgestellt; für die Biegung mit einer tangential wirkenden Beanspruchung bei 9 Versuchsreihen mit 6 verschiedenen Holzarten ein Abminderungswert von 0,295 bei einem Variationskoeffizient von 0,05.

Bewertung:

Diese Versuche haben für den baupraktischen Einsatz wenig Bedeutung.

Es geht von einer unplanmäßigen Biegung senkrecht zur Faser keine Gefahr für die Standsicherheit aus, weil die hier ermittelten Abminderungswerte größer sind als diejenigen für eine Biegewechselbeanspruchung parallel zur Faser, wenn die Biegewechselbeanspruchung parallel zur Faser entsprechend berücksichtigt wird.

3.1.1.8. Torsion

Wegen der geringen Bedeutung der Torsionsbeanspruchung für den Holzbau gibt es mit dieser Beanspruchungsart wenig Dauerfestigkeitsuntersuchungen. Es liegen nur die Arbeiten von Walter /Wal/, Sekhar et al. /Sek1 bzw. Sek7/ und Dobraszcyk /Dob1/ vor.

Walter stellte Wöhlerlinien unter einer reinen Torsionswechselbeanspruchung ($\kappa=-1$) auf. Dabei prüfte er die Hölzer Robinie und Roteiche mit konstanten Verformungen. Die Ergebnisse sind in Bild 23 dargestellt. Darin ist für Eiche eine Dauerfestigkeitsgrenze bei ca. 37 kp/cm² ($\cong 3,7$ N/mm²) angegeben. Dies entspricht dem ca. 2,3-fachen von $\text{zul } \tau_T = 1,6$ N/mm² für Eiche nach DIN 1052 Teil 1. "Der Bruch der Torsionsstäbe erfolgt durch feine Längsrisse im Bereich der größten Verdrehung der Probe." /Wal/

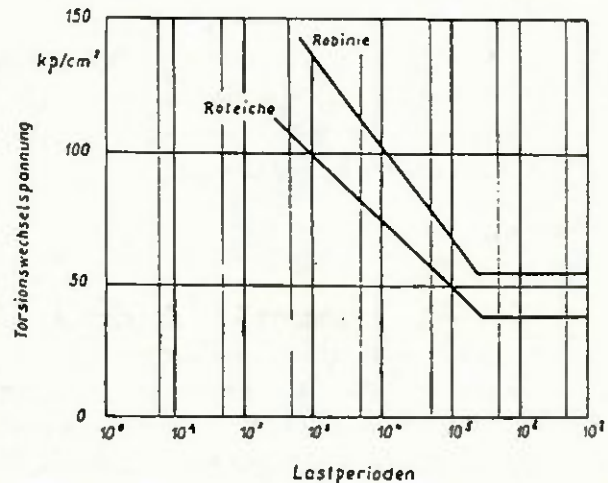


Bild 23: Wöhlerkurven bei Torsionwechselbeanspruchung (Stabachse = Faserrichtung), (Bild 64 aus /Wal/)

Sekhar untersuchte mehrere Holzarten mit sehr unterschiedlichen Feuchtigkeiten und maß bei einer Beanspruchung mit gleichbleibender Verformung den Verlauf des Momentes und die Lastspielzahl bis zum Bruch.

Es wurde für diesen Bericht versucht, die unterschiedlichen Versuchsergebnisse durch die Zuordnung zu bestimmten Feuchtigkeiten auszuwerten. Diese Auswertung ergab keine verwertbaren Tendenzen oder Ergebnisse.

Dobraszcyk /Dob1/ beanspruchte die Probekörper mit ca. 50% der Kurzzeitfestigkeit und zwischen 10³ und 10⁶ Lastspielen. Obwohl keine Brüche auftraten, sind umfangreiche Schäden aufgetreten.

Bewertung:

Solange keine genaueren Untersuchungen, die günstige oder gesicherte Dauerfestigkeitseigenschaften bei der Torsionsbeanspruchung belegen, vorliegen, sollte auf eine solche Lastabtragung verzichtet werden.

3.1.2. Dauerfestigkeit der Verbindungsmittel

3.1.2.1. Stabdübel, Paßbolzen, Bolzen

Die DIN 1052 Teil 2 behandelt Stabdübel, Paßbolzen und Bolzen wegen ihrer gleichen Tragwirkung in einem Abschnitt. Bolzen unterscheiden sich von den Stabdübeln und Paßbolzen dadurch, daß das Bohrloch einen um bis zu 1 mm größeren Durchmesser hat. Die Paßbolzen und Stabdübel werden mit den gleichen Bohrlochdurchmessern eingesetzt.

Es liegen 4 Berichte (/Ab1/ bzw. /Ye1/, /Are1/, /Mö6/), die die Dauerfestigkeit untersuchten, vor.

1) Bolzen:

Das Committee 7-Wood Bridges and Trestles /Are1/ untersuchte Bolzenverbindungen für den Anschluß von Streben an Stützen. Es wurden zwei verschiedene Hölzer (Douglas-fir und Southern Pine), verschiedene Strebendicken (7,6 und 10,2 cm), eine vorherige Behandlung der Hölzer und vier Bolzenstärken sowie die Kombination eines Bolzens mit einem Dübel verwendet.

Die Proben wurden statisch und oft wiederholt bis zu 500000 Lastspielen beansprucht. Dabei geht aus dem Bericht nicht eindeutig hervor, ob es sich dabei um eine Schwell- oder eine Wechselbeanspruchung handelte. Der Begriff "repeated" wird allerdings in erster Linie für Schwellbeanspruchungen verwendet. Die verwendeten Hölzer waren sorgfältig ausgewählt mit einem Minimum an Ästen, fast parallelen Fasern und einer nahezu gleichen Dichte. Der Feuchtigkeitsgehalt schwankte (8,5-43,0%). Die Streben wurden mit einem Bolzen in einem Winkel von 45° an die Stützen angeschlossen.

Die Ergebnisse sind in Bild 24 zusammengefaßt:

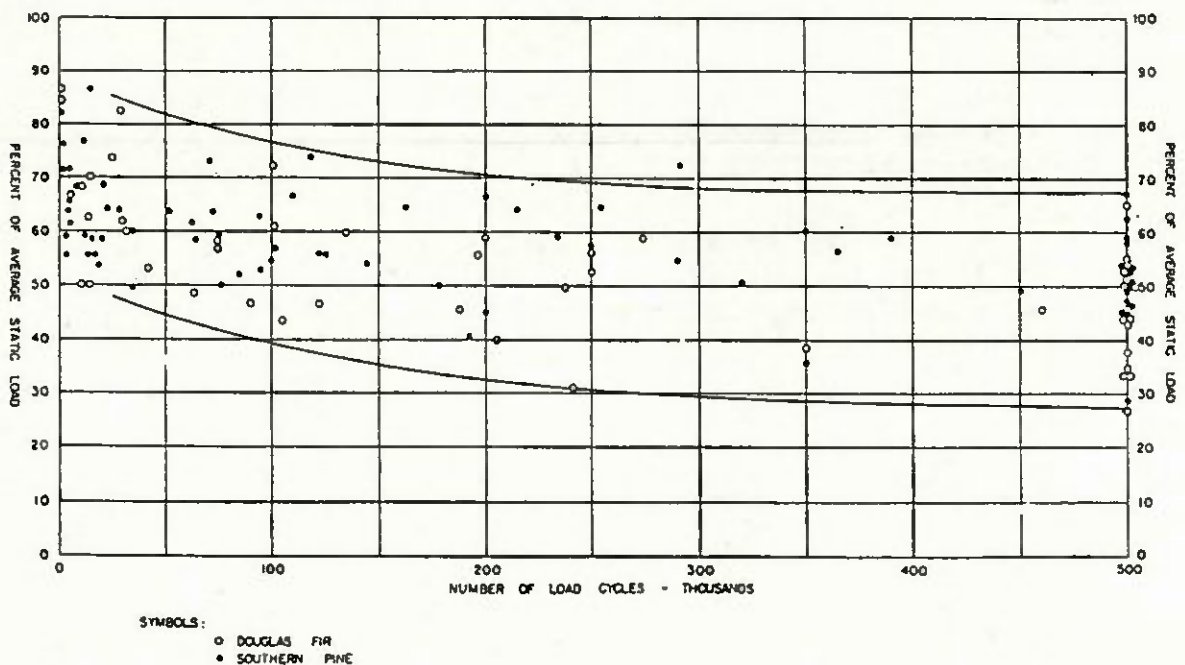


Bild 24: Festigkeiten bei Bolzenverbindungen unter oft wiederholten Beanspruchungen im Verhältnis zur statischen Festigkeit (fig. 37 aus /Are1/)

Ergebnisse aus dem Bericht /Are1/:

- Die durchschnittliche Tragfähigkeit von oft wiederholten Beanspruchungen mit einer Lastspielzahl von $5 \cdot 10^5$ beträgt 48% der statischen Festigkeit. Die Streuungen sind sehr groß; sie reichen von 27% bis zu 67% der statischen Festigkeit.
- Die statische Festigkeit und Zeitfestigkeit von einfachen Bolzenverbindungen steigt mit wachsendem Bolzendurchmesser und größerer Strebendicke an.

Die Ergebnisse werden hier noch auf eine andere Weise ausgewertet, indem sie mit den zulässigen Belastungen der DIN 1052 Teil 2 für Bolzen verglichen werden (vgl. Bild 25). Dabei wird die Verformungsbedingung ($\delta \leq 1,5$ mm) nicht berücksichtigt.

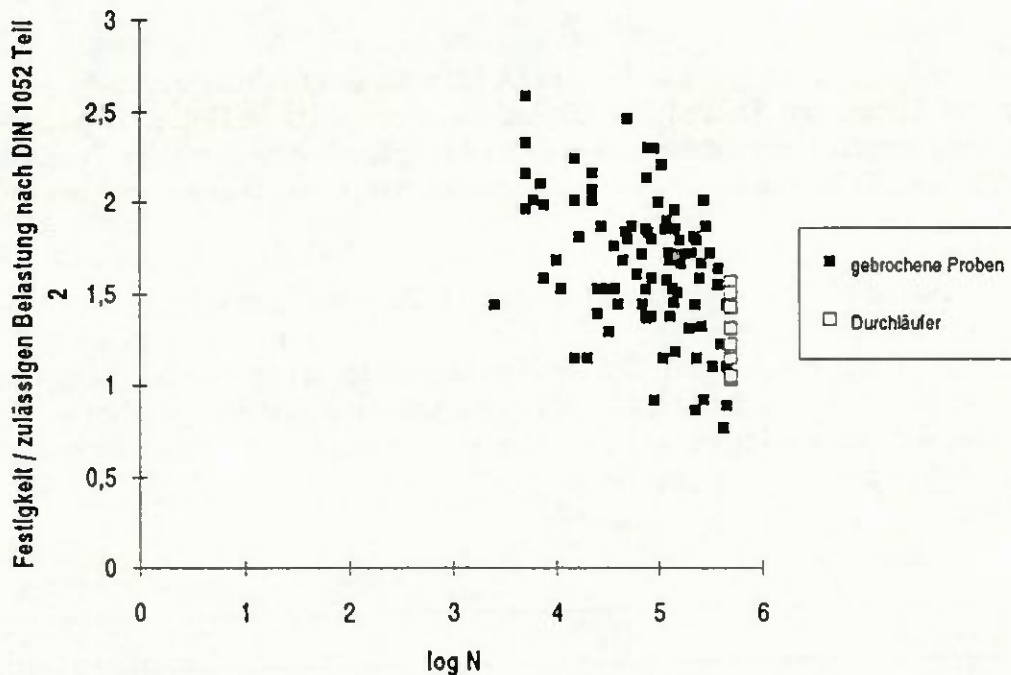


Bild 25: Festigkeit bei Bolzenverbindungen unter oft wiederholten Beanspruchungen im Verhältnis zur zulässigen Belastung nach DIN 1052 Teil 2

Auch diese Auswertung zeigt sehr große Streuungen. Eine Dauerfestigkeitsgrenze ist nicht erkennbar. Die kleinste Belastung, die zum Bruch führt, beträgt 78%, bei den Durchläufern 105% der zulässigen Belastung nach DIN 1052 Teil 2. Bei den Versuchen traten oft sehr große Verformungen auf.

Abendroth und Wipf /Ab1/, die Bolzenverbindungen auf der Grundlage der Arbeit von Yeh /Ye1/ untersuchten, benutzten zweischrittige Bolzenverbindungen mit einem Bolzendurchmesser von 1 inch (25,4 mm) und zwei seitlichen Stahlteilen. Die beiden Hölzer waren aus Southern Pine und trocken. Die oft wiederholten Beanspruchungen betragen 75% der durchschnittlichen Proportionalitätsgrenze. Das entsprach ca. 30% der Bruchlast oder dem ca. 1,33-fachen der zulässigen Belastung nach DIN 1052 Teil 2. Der κ -Wert betrug 0,10. Bei dem verwendeten Belastungsniveau von 0,30 traten Brüche ab einer Lastspielzahl von $N=2 \cdot 10^5$ auf. Bei $2 \cdot 10^6$ Lastspielen waren 5 der 10 Proben (=50%) gebrochen.

Zusammenfassung Bolzen:

Die Bolzenverbindungen zeigen mäßige Zeit- und Dauerfestigkeitseigenschaften; d.h. die Mittelwerte der Abminderungswerte unter einer Schwellbeanspruchung betragen 0,48 bei $N=5 \cdot 10^5$ /Arel/ und 0,30 bei $N=2 \cdot 10^6$ /Ab1/ und sind somit geringer als die Abminderungswerte für Zug- und Biegeschwellen bei Vollholz.

2) Stabdübel:

Möhler und Maier /Mö6/ führten Schwellversuche ($\kappa \approx 0,15$) mit Stabdübeln $\varnothing 12$ mm durch und prüften nach einer bestimmten Lastspielzahl die Restfestigkeit. Vier Stabdübel waren im Rechteck angeordnet. Der Bohrlochdurchmesser war um 0,5 mm geringer als der Stabdübel-durchmesser. Das verwendete Holz (Fichte Güteklasse I/II) war bei Normalklima 20/65 bis zur Gewichtskonstanz gelagert worden. Die Frequenzen betragen 2,5 bis 5,0 Hz.

Die drei Proben wurden mit der nach der DIN 1052 zulässigen Belastung beansprucht. Nach der erreichten Lastspielzahl ($1,27 \cdot 10^6$, $0,1 \cdot 10^6$ bzw. $0,70 \cdot 10^6$) wurden die Proben statisch geprüft. Außer einer ansteigenden Verformung wurde bei keiner Probe Anzeichen von Schädigungen festgestellt. Die Sicherheiten gegen Bruch nach Ende der oft wiederholten Beanspruchungen betragen noch 3,78; 2,86 bzw. 3,34; die Sicherheit beim statischen Bruchversuch dagegen 3,24. Eine versehentliche Überlastung einer Probe auf die zweifache zulässige Kraft ergab keine Festigkeitsminderung.

Dies weist darauf hin, daß die Schwellbeanspruchung zwar größere Verformungen, die auch durch Kriechvorgänge zu erklären sind, hervorruft, aber die Festigkeit nicht beeinträchtigt wird.

Die Verformungen nach Ende der oft wiederholten Beanspruchung betragen 0,78; 0,585 bzw. 1,05 mm.

Die Ergebnisse sind in 8.1. in Anlage 7 wiedergegeben.

Zusammenfassung Stabdübel:

Die Untersuchung von Möhler und Maier /Mö6/ deutet auf gute Zeit- und Dauerfestigkeitseigenschaften von Stabdübeln hin.

Für den gesicherten Einsatz von Stabdübeln unter schwellender und wechselnder Beanspruchung sind noch weitere Versuche notwendig, weil nur wenige Versuche bekannt sind.

3.1.2.2. Nägel

Gaber /Gab6/ und Marten /Mar3/ untersuchten zweiseitige Nagelverbindungen unter schwellenden, Möhler und Maier /Mö6/ unter schwellenden und wechselnden Beanspruchungen, Tokuda /To7/ unter wechselnden Beanspruchungen. Der κ -Wert war bei allen Schwellversuchen, die mit einer Ausnahme als Druckversuch durchgeführt wurden, fast gleich (ca. 0,15). Bei Gaber schwankte er zwischen 0,02 und 0,26. Eine Umrechnung auf $\kappa=0$ erfolgte nicht.

Die verwendeten Nägel üblicher Herstellung hatten einen Durchmesser von 4,2-6 mm. Aus den Versuchsergebnissen wurde ein Wöhlerdiagramm (vgl. Bild 26) in Abhängigkeit der zulässigen Kraft nach DIN 1052 Teil 2 ermittelt.

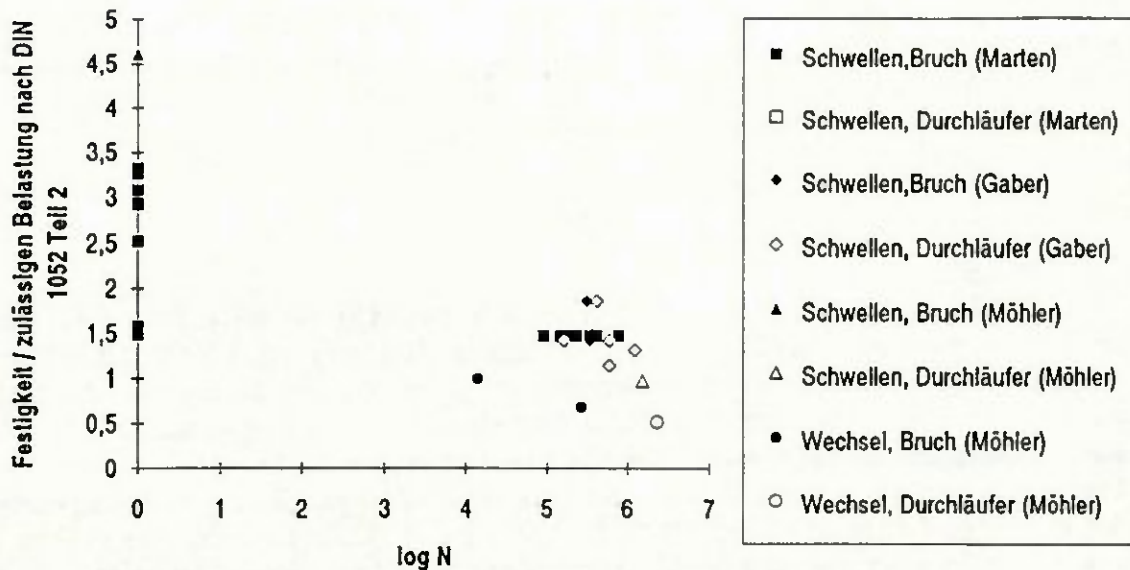


Bild 26: Festigkeit bei Nagelverbindungen unter schwellenden und wechselnden Beanspruchungen im Verhältnis zur zulässigen Belastung nach DIN 1052 Teil 2

Das Wöhlerdiagramm berücksichtigt nur das Bruchverhalten und nicht unzulässige Verformungen. Die Ergebnisse von Tokuda sind hier nicht berücksichtigt, weil die entsprechenden zulässigen Beanspruchungen nach DIN 1052 Teil 2 nicht ermittelt werden können.

Bruchursache:

Bei allen Versuchen traten Dauerbrüche der Nägel teilweise an mehreren Stellen auf. Durch das Versagen einzelner Nägel nahmen dann die Verformungen zu, bis die gesamte Verbindung brach. Dies kann mit der Herstellung der Nägel und den daraus entstandenen inneren Spannungszuständen erklärt werden. Durch der Verwendung "ermüdungsfester" Nägel könnte eine Steigerung der Ermüdungsfestigkeit erreicht werden.

Verformungen:

Möhler und Maier /Mö6/ stellten bei ihren Versuchen mit schwellenden Beanspruchungen von $1,0 \cdot N$ eine Verschiebung von $\delta = 0,89$ mm fest, die damit kleiner als die maximale zulässige Verschiebung von 1,5 mm blieb.

Marten /Mar3/ bekam mit den 1,5-fachen zulässigen Belastungen sehr große Verformungen von mehreren Millimetern.

Bei Gaber /Gab6/ fanden sich Verformungsentwicklungen, die die Bedingung $\delta \leq 1,5$ mm sowohl einhielten, aber aufgrund der hohen Belastung auch überschritten.

Zusammenfassung:

Für die Nagelverbindungen sind keine Wöhlerdiagramme mit Abminderungswerten vorhanden. Deswegen können so keine k_{fat} -Werte gebildet werden.

Für eine schwellende Beanspruchung mit der zulässigen Kraft nach DIN 1052 Teil 2 trat bei keiner der 17 Proben ein Bruch auf.

Die Bruchursache lag bei allen drei Versuchsstellern in den Nägeln.

Sonstige Ergebnisse:

Tokuda /To7/ prüfte Nagelverbindungen mit Holzwerkstoffen unter einer wechselnden Beanspruchung. Dabei stellte er fest, daß das Verhältnis Ermüdungsfestigkeit zur statischen Festigkeit bei Sperrholz und 10^4 Lastspielen ca. 30 % betrug (vgl. Bild 27). Dies entspricht der Last für eine Verformung von ca. 1 mm. Die Ermüdungsfestigkeit für Beplankungen aus Spanplatten und "hardboard" war geringer als für Sperrholz. Das Nageln in feuchtes Holz sollte vermieden werden, weil durch das Schwinden die Ermüdungsfestigkeit absinkt./To7/

Bei größeren Lastspielzahlen werden die Abminderungswerte noch ungünstiger. Sie liegen dann unter 20%.

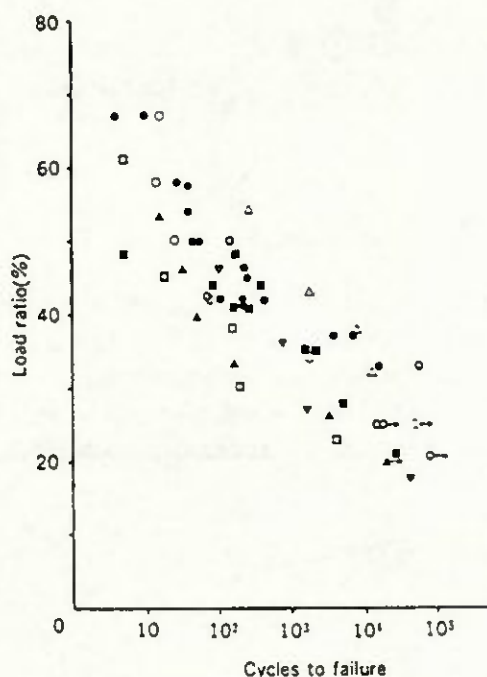


Bild 27: Lastverhältnis in Abhängigkeit der Lastspielzahl (fig. 6 aus /To7/)

(Anm. zu Bild 27: Die Bedeutung der Symbole konnte der vorliegenden Kopie nicht entnommen werden.)

Borchard /Bor1/ berichtete über eine Bahnbrücke in Holznagelbauweisen im vierten Jahr nach der Erstellung. Er stellte "kleine Risse, von Nagellöchern ausgehend, in den Knoten und Decklaschen der Stöße" fest und führte dies auf die ungünstige Wirkung der Nägel unter oft wiederholten Beanspruchungen zurück.

Da die Risse im Holz auftraten, lag die Vermutung nahe, daß auch die Umgebungsbedingungen der offenen Brücke und weitere Einflüsse nicht nur die Nägel, sondern auch das Holz schädigten.

Bei Ehlbeck und Belchior-Gaspard /Eh2/ findet sich eine weitere Auswertung der Versuche mit Nagelverbindungen unter einer schwelenden Beanspruchung von Gaber /Gab6/. Hier werden Abminderungswerte von 0,44 bis 0,55 bei den vorhandenen κ -Werten angegeben. Eine Umrechnung auf $\kappa=0,0$ ergibt dann Werte von ca. 0,4 bis 0,5.

Bewertung:

Nagelverbindungen können oft wiederholt beansprucht werden, wenn dies durch geeignete k_{fat} -Werte in der Bemessung berücksichtigt wird. Diese können bei ca. 0,4 bis 0,5 für eine schwelende und bei ca. 0,15 bis 0,2 für eine wechselnde Beanspruchung abgeschätzt werden.

Für eine schwelende Beanspruchung mit der zulässigen Kraft nach DIN 1052 Teil 2 trat bei drei verschiedenen Untersuchungen kein Bruch auf.

Für die Wechselbeanspruchung liegen wenige Versuchsergebnisse vor.

Die Bruchursache liegt in der Regel bei den verwendeten Nägeln.

Noch ungeklärt ist die Auswirkung des Vorbohrns, das Verhalten einschnittiger Verbindungen und die Größe der Verformungen.

3.1.2.3. Nagelplatten

Die Dauerfestigkeit untersuchten in mehreren vorliegenden Berichten Hayashi et al. /Hay6/, /Hay3/, /Hay4/, /Hay5/, /Hay7/ sowie Möhler und Maier /Mö6/.

Die Ergebnisse der Dauerfestigkeitsuntersuchungen für Nagelplatten sind in Bild 28 zusammengefaßt. Darin werden verschiedene Beanspruchungsarten dargestellt. Der Abstand d war dabei die Lücke zwischen den zwei Hölzern, die mit Nagelplatten verbunden waren.

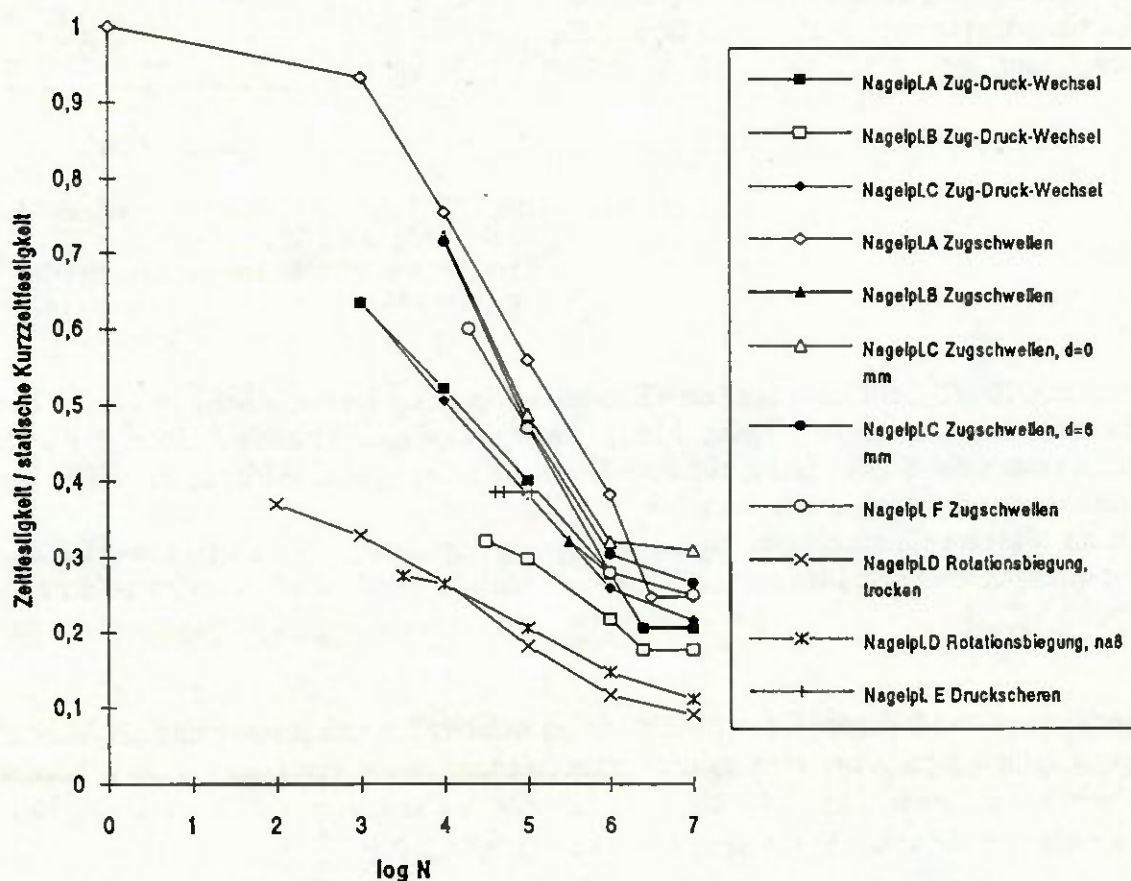


Bild 28: Zeitfestigkeit bei Nagelplattenverbindungen unter verschiedenen oft wiederholten Beanspruchungen

Zusammenfassung:

Die Wöhlerlinien bei Nagelplatten zeigten eine deutlich schlechtere Tragfähigkeit unter oft wiederholten Beanspruchungen im Vergleich zu Vollholz bei der jeweiligen Beanspruchungsart.

Der Einfluß der zu verbindenden Hölzer und Holzwerkstoffe ist nicht näher untersucht.

Begründung für die schlechten Ermüdungseigenschaften:

Aus Bild 29 geht die Versagensursache hervor. Mit abnehmender Last und damit zunehmender Lastspielzahl steigt die Zahl der abgescherten Zähne. Das bedeutet, daß mit zunehmender Lastspielzahl die Versagensursache vom Holz auf die Nagelplatte verschoben wird. Die Nagelplatte hat eine geringere Zeitfestigkeit als das Holz.

Bei den gestanzten Nagelplatten sind hohe Eigenspannungszustände in der Nagelplatte (Übergangsbereich Platte-Zähne) vorhanden, die sich maßgebend auf die Ermüdungsfestigkeit auswirken.

Empfehlung:

Die Nagelplatten sind für oft wiederholte Beanspruchungen wenig geeignet. Solange keine genauen Untersuchungen vorliegen, die die Eignung belegen, und entsprechende gesicherte Bemessungswerte vorhanden sind, sollte auf eine Anwendung für oft wiederholte Beanspruchungen verzichtet werden.

Sonstige Ergebnisse:

Der Abstand d zwischen den beiden Hölzern, die mit Nagelplatten verbunden waren, hatte einen geringen Einfluß auf die statische Zugfestigkeit und auch auf die Zeitfestigkeit unter Zugschwellbeanspruchung. Sie wirkten sich aber deutlich tragfähigkeitsmindernd in der Nähe der Dauerfestigkeitsgrenze und bei wechselnder Beanspruchung aus. /Hay6/

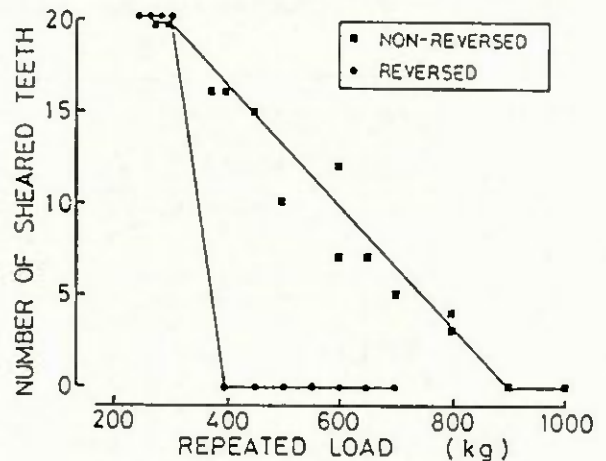


Bild 29: Beziehung zwischen den wiederholten Beanspruchungsniveaus und der Anzahl der abgescherten Zähne im Typ A (fig. 9 aus /Hay7/)

Möhler und Maier /Mö6/ führten ihre Versuche mit Nagelplatten auf Abscheren durch. Sie stellten bereits bei geringen Lastspielzahlen Brüche von Nägeln fest. Die Zahl der gebrochenen Nägel nahm mit weiterer Beanspruchung zu, bis der Versuch abgebrochen werden mußte. Dabei stellten sie fest, daß "der Bruch der Nägel stets zuerst an den Nägeln auftrat, die in unmittelbar in der Nähe der Anschlußfuge lagen".

3.1.2.4. Leimverbindungen

1) Schäftungen

Lewis /Lew2/ untersuchte Stäbe aus Eiche und Douglas-fir, die mit Schäftungen verbunden waren, unter einer Zugschwellbeanspruchung. Dabei stellte er das gleiche Ermüdungsverhalten wie bei Proben ohne eine Schäftung fest. (vgl. auch 3.1.1.1.)

Maku und Sasaki /Mak2/ untersuchten verschiedene verleimte Hölzer mit dem Rotationsbiegeversuch. Dabei verwendeten sie neben Stoßfugen auch Schäftungen, die sie in verschiedenen Zonen der verleimten Hölzer anordneten. Aus Bild 30 ist zu entnehmen, daß die Schäftungen keine Auswirkung auf die Dauerfestigkeit hatten. Die gesamten Meßergebnisse lagen nahezu auf einer Linie; darunter waren auch die Vergleichskörper ohne Schäftung.

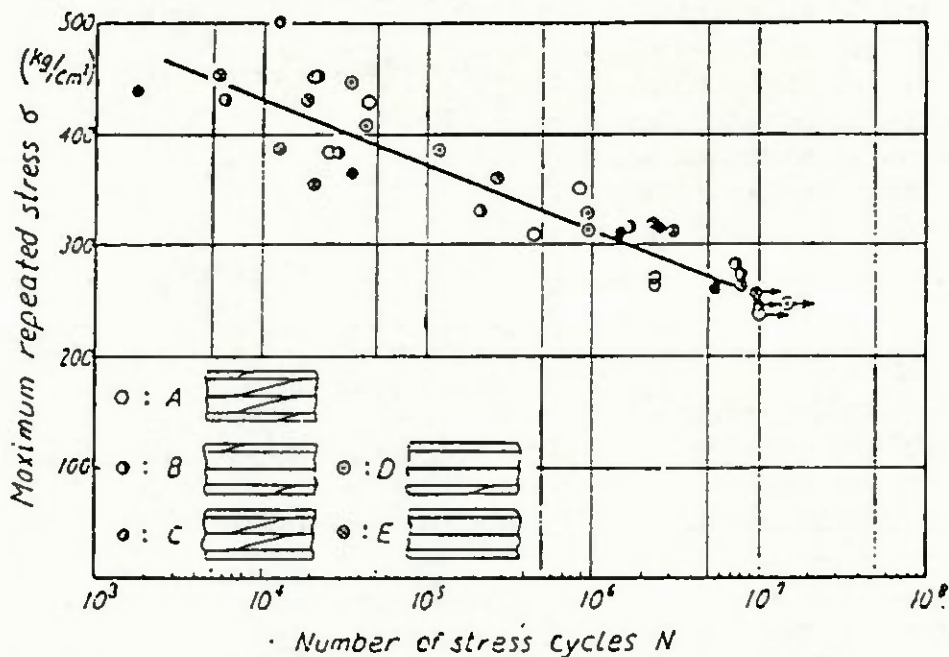


Bild 30: Wöhlerlinie für Hölzer, die mit Urearesin verleimt wurden und Schäftungen besitzen (Fig. 10 aus /Mak2/)

Küch /Kü6/ untersuchte Schäftungen unter einer Wechselbiegebeanspruchung. Die Planbiegeversuche mit einer Neigung von 1:4 ergaben Abminderungswerte von 0,15 bis 0,17; die Rotationsbiegeversuche (Neigung: 1:5) einen Wert von 0,28. Küch führte diesen Unterschied auf "die etwas ungünstigeren Beanspruchungsverhältnisse bei der Planbiegung sowie auf das unterschiedliche Schäftungsverhältnis" zurück. Im weiteren empfahl er ein "höheres Schäftungsverhältnis".

Bewertung:

Die Abminderungswerte der Schäftungen verhalten sich unter oft wiederholten Beanspruchungen wie das Holz.

2) Stoßfugen

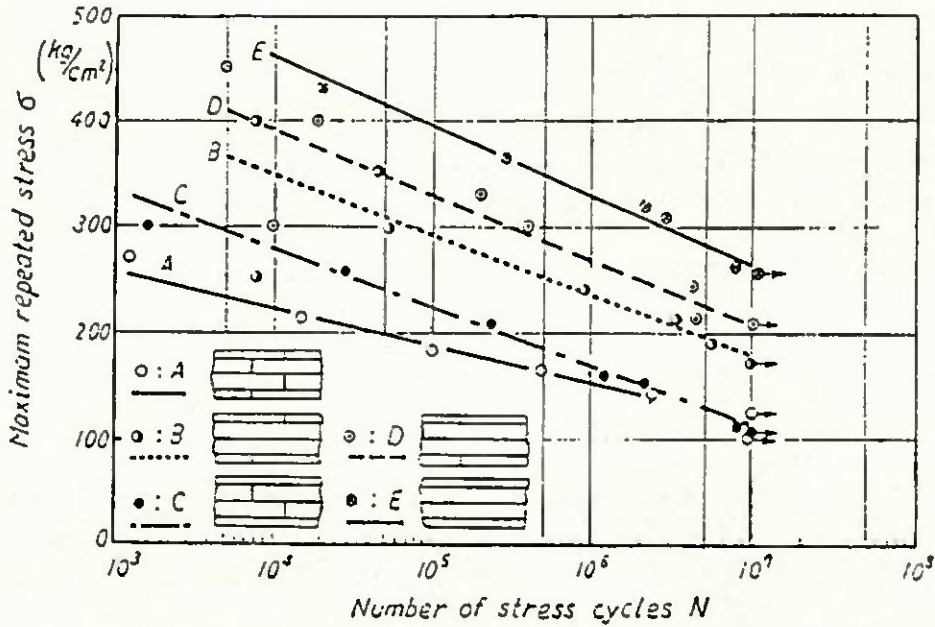


Bild 31: Wöhlerlinie für Hölzer, die mit Urea-Resin verleimt worden sind und Stoßfugen besitzen (Fig. 11 aus /Mak2/)

Maku und Sasaki /Mak2/ stellten bei ihren Untersuchungen von verleimten Hölzern mit Stoßfugen Unterschiede bezüglich der Dauerfestigkeit fest. Die Werte der gestoßenen Proben lagen deutlich unter denen der nicht gestoßenen Vergleichskörper (vgl. Bild 31).

Der Bezug der Dauerfestigkeitsergebnisse auf die Ergebnisse der statischen Versuche ergab, daß die geringere Beanspruchbarkeit bereits bei der statischen Prüfung deutlich war und die Abminderungswerte durch die oft wiederholte Beanspruchung nahezu gleich waren (vgl. Bild 32).

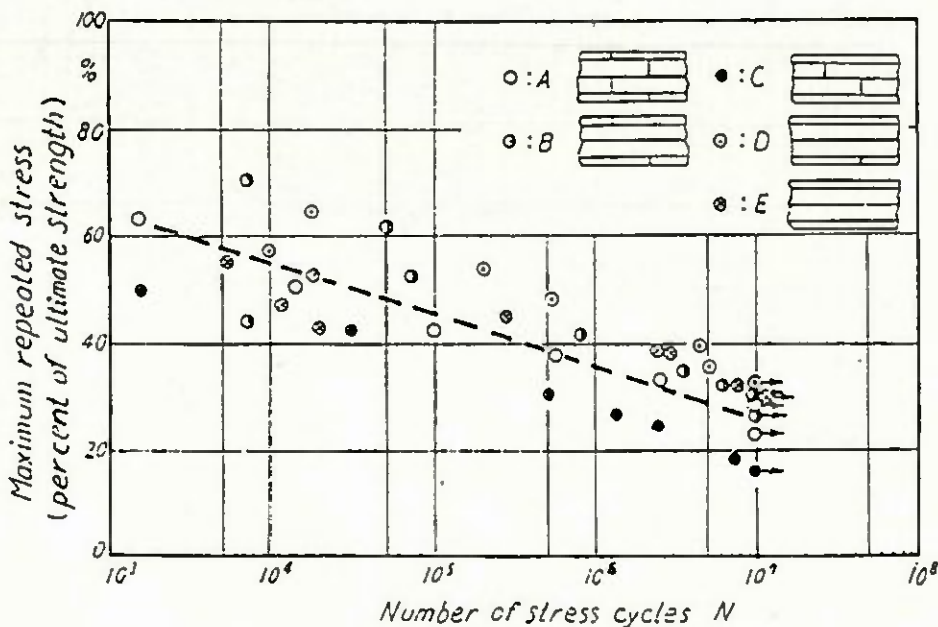


Bild 32: Wöhlerlinie für Hölzer, die mit Urea-Resin verleimt worden sind und Stoßfugen besitzen. (fig. 12 aus (Mak2/).

Bewertung:

Die Abminderungswerte der Schichthölzer mit Stoßfugen verhalten sich unter einer oft wiederholten Beanspruchung wie das verleimte Holz.

Anmerkung:

Obwohl keine geringeren Abminderungswerte durch oft wiederholte Beanspruchungen bei Stoßfugen zu erwarten sind, sollten sie wegen ihrer geringen statischen Tragfähigkeit nicht oder nur in niedrig beanspruchten Zonen eingesetzt werden.

3) Keilzinken

Bohannan und Kanvik /Boh1/ untersuchten Keilzinkenverbindungen unter einer Zugschwellbeanspruchung. Wie in 3.1.1.1. bereits erwähnt ergaben sich im Vergleich zu Vollholz und Schäftverbindungen ungünstigere Abminderungswerte. Dieser Unterschied, der in Anlage 1 zahlenmäßig zusehen ist, wird mit Bild 33 nochmals verdeutlicht.

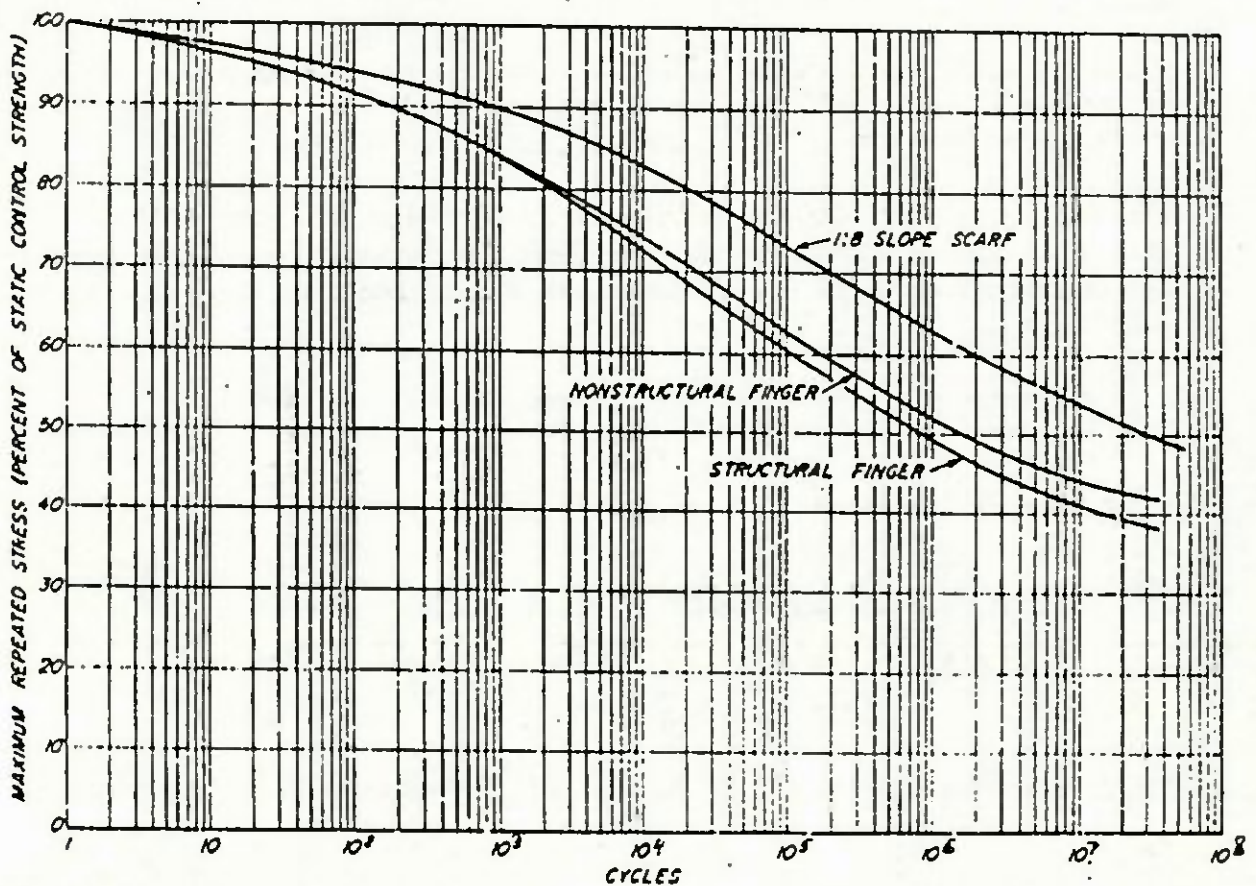


Bild 33: Wöhlerlinien für Probekörper, die mit einer Schäftung ("1:8 slope scarf") oder zwei verschiedenen Keilzinkenverbindungen ("nonstructural finger" und "structural finger") verbunden waren und parallel zur Faser auf Zug beansprucht wurden (fig. 6 aus /Boh1/)

Sonstige Ergebnisse:

Wischer /Wis1/ stellte bei der Prüfung von keilzinkenverleimten Buchenholzschwellen nach einer oft wiederholten Beanspruchung keine Abnahme der Restfestigkeit fest. "Ein schädigender und damit festigkeitsmindernder Einfluß war nicht feststellbar." Die Keilzinkungen brachten im Vergleich zur Kurzzeitfestigkeit keine Nachteile.

Roth /Rot4/ untersuchte Rahmenecken aus gekrümmtem lamellierten Holz unter einer Schwellbeanspruchung mit dem Treppenstufenverfahren. Bei dem von ihm verwendeten Typ 2 mit Keilzinkenvollstößen traten die Brüche bei der statischen Prüfung, wie auch bei der Prüfung mit oft wiederholten Beanspruchungen in den Keilzinkungen auf. (s. u.)

Bewertung:

Die ungünstigeren Abminderungswerte im Vergleich zu Vollholz und Schäftungen müssen bei Zugschwellbeanspruchungen berücksichtigt werden.

Werden die Keilzinkenstöße versetzt angeordnet, ist nach Meinung der Verfasser wegen der geringfügigen Unterschiede zum normalen Holz keine weitere Abminderung vorzunehmen.

Für die Keilzinkenverbindung, die nur auf Zug oft wiederholt beansprucht wird, ist in 3.1.1.1. ein Mittelwert der Abminderungswerte von 0,37 ermittelt worden. Der k_{fat} -Wert kann dann mit 0,35 abgeschätzt werden.

4) Rahmenecke

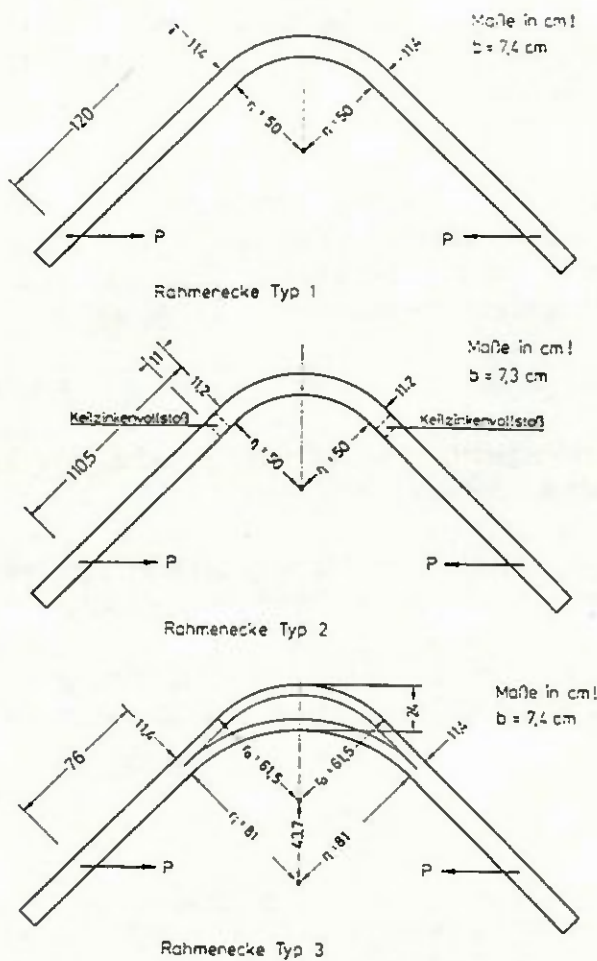


Bild 33: Untersuchte Rahmenecktypen und Lasteintragung bei den Untersuchungen mit Querdruckspannung (Bild 1 aus /Rot4/)

Roth und Noack /Rot4/ untersuchten 3 Typen von gekrümmten Rahmenecken aus lamellierten Schichtholz (Sipo). Sie verwendeten dabei das Treppenstufenverfahren und eine Lastspielzahl von $2 \cdot 10^6$. Die Schwellbeanspruchungen wurden so aufgebracht, daß im gekrümmten Bereich Querdruck- und Querkzugspannungen auftraten. Die drei Typen sind in Bild 34 dargestellt.

Bei Rahmentyp 1 zeigte sich ein deutlicher Einfluß der Querdruck- bzw. Querkzugspannungen im Krümmungsbereich auf die Dauerfestigkeit. Während die Dauerfestigkeit bei querdruckerzeugender Beanspruchung bei 60% der statischen Festigkeit lag, sank sie bei querkuzerzeugender auf 51% ab. Beim Typ 2 wurde die Festigkeit durch die Keilzinkenverbindung außerhalb des Krümmungsbereiches bestimmt. Hier war der Einfluß der Beanspruchungsart (Querdruck bzw. Querkzug) nicht nachweisbar und die Dauerfestigkeit lag bei ca. 51% der statischen Festigkeit. Beim Typ 3 war der Einfluß der Beanspruchung ebenfalls nicht nachweisbar, da die Brüche in den querspannungsfreien geraden

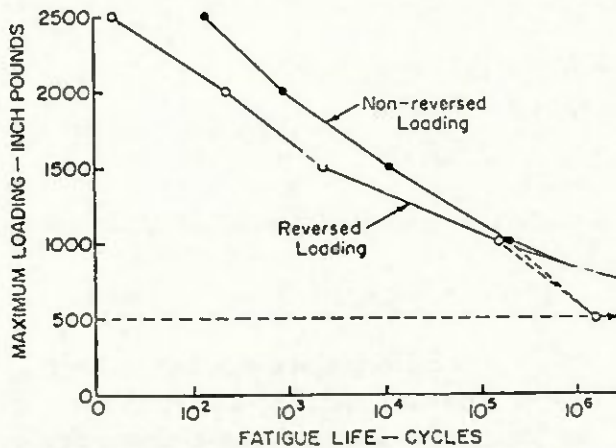
Schenkeln lagen. Die Dauerfestigkeit betrug hier ca. 66% der statischen Festigkeit. /Rot4/

(Anmerkung: Von einer "Dauerfestigkeit" kann bei diesen Versuchen nicht gesprochen werden, weil die Proben nicht "unendlich oft" beansprucht wurden. Hier wurde aber der Text von Roth und Noack /Rot4/ weitgehend übernommen.)

5) Verleimte Dübel

Eckelmann /Ec1/ untersuchte Holzdübel, die als Verbindungsmittel zwischen zwei Hölzern eingeleimt wurden. Dabei wurde ein Holz senkrecht und das andere parallel zur Faser beansprucht. Diese Versuche sind weniger für den Ingenieurholzbau sondern mehr für den Möbelbau relevant; sie werden aber der Vollständigkeit wegen aufgeführt. Die Wöhlerlinien für die Schwell- und Wechselfestigkeit sind in Bild 33 dargestellt:

Aus Bild 34 kann man entnehmen, daß sich die beiden Kurven bei höheren Lastspielzahlen annähern und fast kein Unterschied zwischen der Wechsel- und Schwellfestigkeit mehr auftritt. Bei einem Spannungsverhältnis von 31% traten noch Brüche auf, während bei 16% die Probe nicht mehr brach.



Während die Brüche beim statischen Versuch wie beim Schwellversuch auf einem Herausziehen der Dübel beruhte, brach im Wechselversuch einer der Dübel. Dies kann als Hinweis angesehen werden, daß die Ermüdungsfestigkeit des Leimes nicht geringer als die der verwendeten Dübel war.

Bild 35: Wöhlerlinien für die Schwell- (non-reversed loading) und Wechselfestigkeit (reversed loading). (fig. 5 aus /Ec1/).

6) Leimverbindungen, die senkrecht zur Leimfuge beansprucht werden

Eine wechselnde Beanspruchung senkrecht zur Leimfuge untersuchten Ishihara et al. /Is1/ und Nagasawa et al. /Nag1/, /Nag2/. Ishihara verwendete den in Bild 36 dargestellten Prüfkörper und Nagasawa einen mit nur einer Überlappung. Bei Ishihara /Is1/ wurde festgestellt, daß der Phenol- und der modifizierte Urealim eine Zeitfestigkeit von 1/4 bis 1/3 der statischen Festigkeit hatten. Nagasawa et al. erreichten unter einer Beanspruchung, die durch oft wiederholte konstanten Verformungen erzeugt wurde, 1/5 bis 1/3 der statischen Festigkeit (bei 10^7 Lastspielen). Die Wöhlerlinien waren als Geraden angegeben.

Bewertung:

Diese Versuche sind ein Hinweis dafür, daß Leimverbindungen grundsätzlich auch für oft wiederholte Beanspruchungen geeignet sind. Die Abminderungswerte lagen in den Bereichen derjenigen für Vollhölzer und Schichthölzer unter einer Biegewechselbeanspruchung.

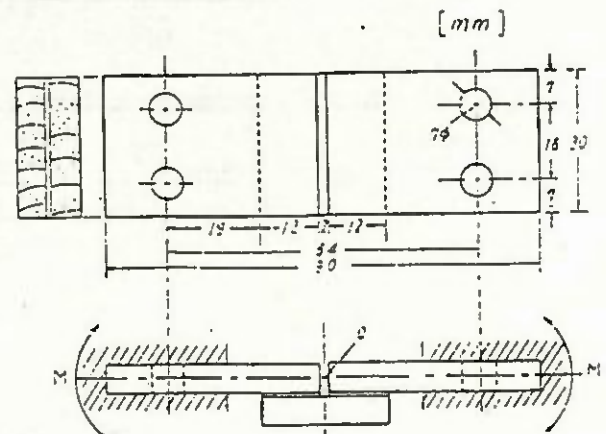


Fig. 2. Specimen.

Bild 36: Prüfkörper für eine Beanspruchung senkrecht zur Leimfuge (fig. 2 aus /Is1/)

7) Sonstige Ergebnisse

Lewis /Lew2/ stellte in seiner Zusammenfassung fest, daß es keine Tendenz für Leimfugen gibt, sich durch Ermüdung schneller als das Holz selber zu verschlechtern, wenn die Zugspannungen senkrecht zur Faser- und Leimrichtung auftreten.

Freas und Werren /Fr2/ untersuchten verleimte Brettschichthölzer aus Eiche unter einer oft wiederholten Biegebeanspruchung im trockenen und wassergesättigten Zustand. Bei den gebrochenen Proben stellten sie keine Anzeichen dafür fest, daß Brüche in den Leimfugen ihren Ursprung hatten. Die Leimfugen zeigten keinen Festigkeitsverlust.

"Kennzeichnende Unterschiede (...) zwischen den 4 Leimarten konnten im Hinblick auf ihr Festigkeitsverhalten nicht festgestellt werden." /Kol1/

"Ein wesentlicher Einfluß der Leimsorte auf die Dauerfestigkeit von Schichtholz balken konnte nicht festgestellt werden." /Ste7/

Ota und Tsubota /Ota4/ untersuchten zweifach verleimte Hölzer, die mit unterschiedlichen Leimen verleimt worden waren, unter einer oft wiederholten Biegebeanspruchung. Die Leimfuge lag in der Mitte des Querschnittes. Bei kleineren Beanspruchungen zeigte sich kein Unterschied im Ermüdungsverhalten.

8) Zusammenfassende Bewertung

Mit Ausnahme der Keilzinkenverbindung zeigen Leimverbindungen keine schlechteren Zeit- und Dauerfestigkeitseigenschaften als das Holz selber, denn die Abminderungswerte sind nicht ungünstiger.

Von den Leimfugen in trockenen Hölzern sind keine negativen Auswirkungen zu erwarten.

Für die Keilzinkenverbindung, die auf Zug oft wiederholt beansprucht wird, ist in 3.1.1.1. ein Mittelwert der Abminderungswerte von 0,37 ermittelt worden. Der k_{fat} -Wert kann dann mit 0,35 abgeschätzt werden.

3.1.2.5. Dübel

1) Dübeltyp A nach DIN 1052 Teil 2

Diesen Dübeltyp untersuchten Möhler und Maier /Mö6/ schwellend und wechselnd mit wenigen Proben (vgl. Anlage 7 in 8.1.).

Die Schwellversuche ergaben bei Beanspruchungen mit oberen Kräften, die das 0,71- und 1,0-fache der zulässigen Kraft nach DIN 1052 betragen, keine sichtbare Zerstörung. Die untere Grenze lag beim 0,11-fachen der zulässigen Kraft. Die Probekörper wurden nach $1,3 \cdot 10^6$ bzw. $1,4 \cdot 10^6$ Lastspielen einer statischen Bruchprüfung unterzogen. Die Restfestigkeiten betragen das 3,2- bzw. 2,8-fache der zulässigen Kraft.

Der Wechselversuch mit einer oberen Kraft gleich der zulässigen Kraft nach DIN 1052 ergab eine große Verformung und ein Abscheren des inneren Holzes im Dübelring der Verbindung. Die Wechselversuche mit der Hälfte der zulässigen Kraft führten nach 2,1 bzw. $2,6 \cdot 10^6$ Lastspielen zu keiner sichtbaren Zerstörung. Die Restfestigkeiten lagen zwischen dem 2,22- und 3,00-fachem Wert der zulässigen Kraft.

Graf /Gr3/ bzw. /Gr2/ untersuchte Tellerdübel, die im Tragverhalten mit den Ringkeildübeln vergleichbar waren.

Aus seinen Ergebnissen und denen von Möhler und Maier wird ein Wöhlerdiagramm (Bild 37) erstellt. Die statischen Festigkeiten bei Möhler werden auf den Mittelwert der statischen Bruchlasten ungebrochener Proben am Ende des Versuches bezogen. Die drei Versuchsserien von Graf werden zu einer zusammengefaßt.

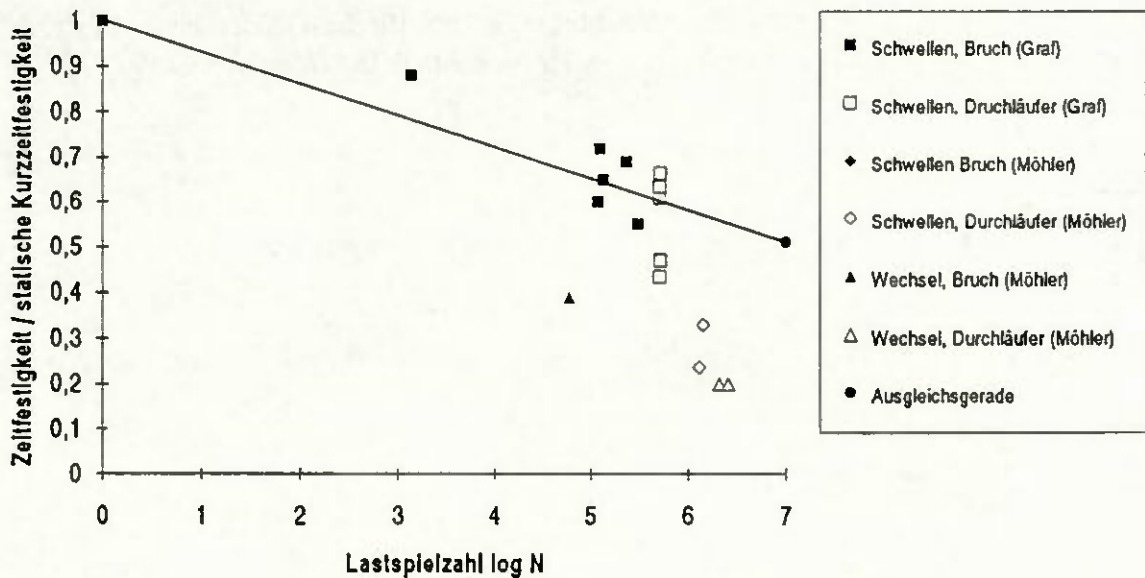


Bild 37: Schwellfestigkeit bei Teller- und Ringkeildübeln

Bewertung:

Um den Wert für 10^7 Lastspiele abschätzen zu können, wird eine Gerade in das Diagramm gelegt und der Wert 0,51 ermittelt. Eine Umrechnung auf einen κ -Wert von 0,1 auf 0,0 ergibt dann einen geschätzten k_{fat} -Wert von 0,45. Die Abschätzung für die Wechselbeanspruchung ergibt einen k_{fat} -Wert $\geq 0,2$.

2) Dübeltyp B nach DIN 1052 Teil 2

Es liegen wiederum nur Ergebnisse von Graf /Gr3/ vor. Die drei Versuchsserien von Graf werden zu einer zusammengefaßt. Diese wird in Bild 38 dargestellt.

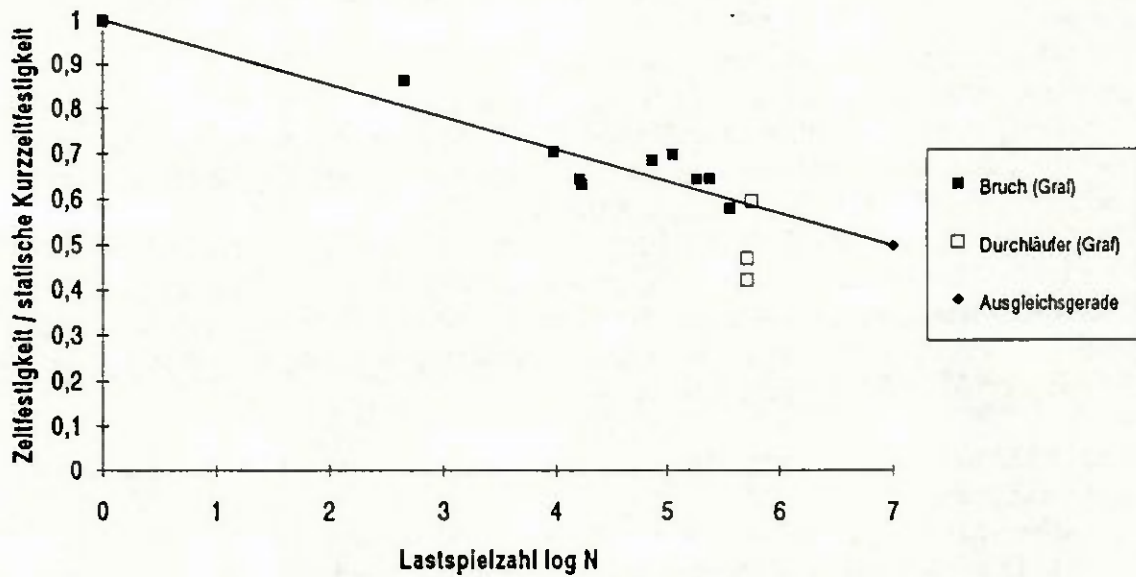


Bild 38: Schwellfestigkeit bei Hartholzdübeln

Bewertung:

Die Abschätzung mittels einer Extrapolation ergibt bei 10^7 Lastspielen einen Wert von 0,50. Bei der Umrechnung auf einen κ -Wert von 0,0 entsteht ein k_{fat} -Wert von ca. 0,45.

3) Dübeltyp E nach DIN 1052 Teil 2

Es liegen keine Ergebnisse von Einlaß-Einpreßdübel vor. Mit diesem Dübeltyp sind aber die Dübel vergleichbar, die Graf /Gr3/ prüfte. Dabei verwendete er mehrere Dübel in einer Zugverbindung, die er oft wiederholt schwelend beanspruchte. Das Verhältnis κ lag bei ca. 0,1. Die Ergebnisse sind in einem Wöhlerdiagramm dargestellt (Bild 39).

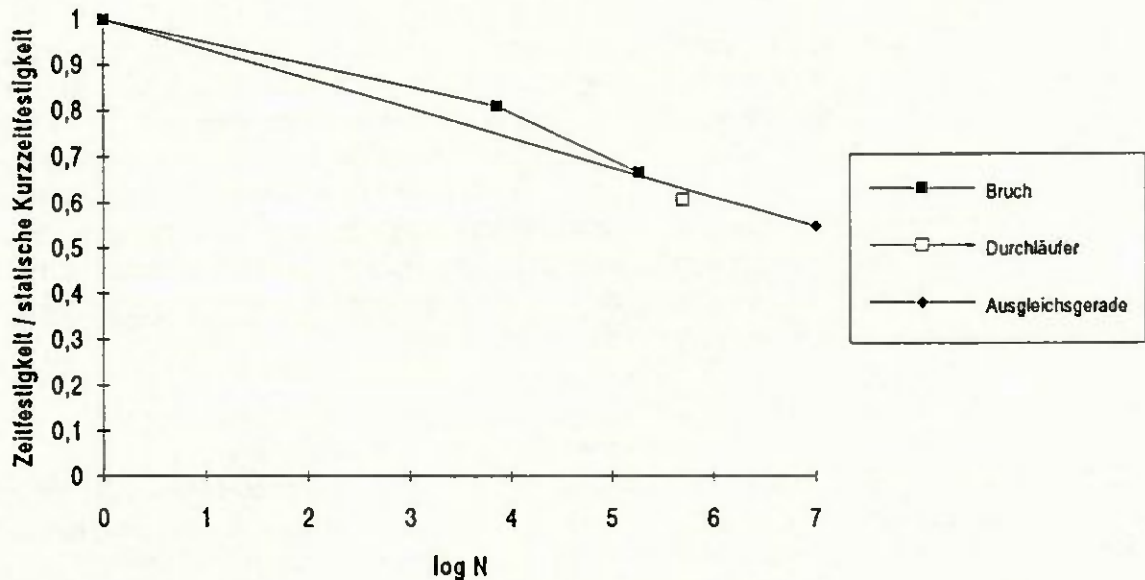


Bild 39: Schwellfestigkeit bei Krallenscheiben

Bewertung:

Die Abschätzung mittels einer Extrapolation ergibt bei 10^7 Lastspielen einen Wert von 0,55. Bei der Umrechnung auf einen κ -Wert von 0,0 entsteht ein k_{fat} -Wert von ca. 0,50.

4) Einpreßdübel "Krallenband"

Gaber /Gab7/ stellte bei diesem Verbindungsmittel, ein Band mit mehreren Einpreßdübeln, die wiederum mehrere Zähne besitzen, keine notwendige Abminderung bei oft wiederholten Beanspruchungen fest: "Bei dynamischer Einwirkung bleibt die zulässige Belastung des 9 cm langen Einpreßdübels $N = 750$ kg." /Gab7/

3.1.2.6. Schrauben

Ausziehverhalten:

Untersuchungen über das Verhalten von Schrauben liegen von drei verschiedenen Autoren vor (Bröker und Krause /Bröl/, Burmester /Bur1/ und Trübswetter /Trül/).

In den Berichten wurde das Ausziehverhalten der Schrauben unter oft wiederholten Einwirkungen behandelt. Die dabei verwendeten Schraubengrößen betreffen mehr den Möbelbau und nicht so sehr den Ingenieurholzbau.

Bröker und Krause /Bröl/ verwendeten neun verschiedene Schrauben in vorgebohrten Löchern und drei verschiedene Trägermaterialien (Flachpreßplatte, Fichtenvollholz, Buchenvollholz) und führten die Versuche nach dem Treppenstufenverfahren mit 10^4 Lastspielen (Schwellen) durch. Die Ergebnisse zeigten große Streuungen. "Die Verhältniszahlen der Mediane (Anm.: Der Median ist im vorliegenden Fall die Tragfähigkeit der Schrauben bei 10^4 Lastspielen.) 'm=Tragfähigkeit bei Zugschwellbelastung' zu den rein statisch ermittelten Ausziehkräften 'x' ergaben eine große Bandbreite von 0,21 bis 0,86; d.h. unter Schwellbeanspruchung erreichten die dynamisch beanspruchten Schrauben folgende Prozentanteile des im statischen Versuch ermittelten Schraubenhaltevermögens:

Flachpreßplatte:	57% bis 83%
Fichte:	21% bis 86%
Buche:	36% bis 86%"

"Die Untersuchungen zeigten einen deutlichen Einfluß des Trägermaterials auf die absolute Höhe des Schraubenhaltevermögens." /Bröl/ So lagen die Werte für Buche deutlich höher als für Fichte und die Spanplatte, wobei die Fichte wiederum mehr trug als die Spanplatte.

Burmester /Bur1/ führte seine Versuche mit einer Zugschwellbeanspruchung bis max. $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln und verschiedenen Belastungsgraden durch. Die ertragbare Beanspruchung lag zwischen 30 und 50 % der statischen Kurzzeitfestigkeit und war abhängig von der Richtung im Holz (tangential oder radial) und der Holzart. Interessant ist die Feststellung, daß die Schraubenfestigkeit unter der oft wiederholten Beanspruchung teilweise unter dem Haltevermögen des Holzes lag. Die Schrauben wurden in diesen Fällen abgerissen und nicht ausgerissen. Dies ist ein weiterer Hinweis darauf, daß bei Holzverbindungsmitteln die Versagensursache unter oft wiederholten Beanspruchungen bei dem verwendeten Metallteil und nicht beim Holz selber liegt.

Trübswetter /Trül/ untersuchte verschiedene Klammern, Schrauben und Schraubnägeln auf ihren Auszieh Widerstand nach einer schwellenden Beanspruchung des Verbindungsmittels in der Scherfuge zwischen zwei Holzbauteilen (Spanplatte und Fichte). Nach $2,1 \cdot 10^4$ Lastspielen betrug der Auszieh Widerstand der Klammern 44-65%, der Schrauben 85% und der Schraubnägeln 52% des Mittelwertes der unbelasteten Vergleichsproben. Hier war eine deutliche Verringerung der Restfestigkeit erkennbar.

Bewertung:

Die oben genannten Versuche sind für den Ingenieurholzbau nicht maßgebend. Sie weisen aber auf eine grundsätzliche Eignung des Holzes hin und zeigen erneut die Problematik von Verbindungsmitteln aus Metall auf. Für den Ingenieurholzbau ist in erster Linie aber das Abscherverhalten der Schraubenverbindungen maßgebend. Die Schraubenverbindungen zeigten in den obengenannten Versuchen keine günstigen Dauerfestigkeitseigenschaften.

3.1.3. Dauerfestigkeit von Spanplatten und Hartfaserplatten

3.1.3.1. Spanplatten

Zahlreiche Autoren /Gil2/, /Gü1/, /Kat1/, /Kol13/, /Lin1/, /Mc3/, /Mc4/, /Oku2/, /Oku3/, /Per1/, /Par2/, /Par3/, /Par4/, /Sek2/, /Suz2/, /Suz3/, /Suz5/, /Tan2/ untersuchten Spanplatten unter verschiedenen oft wiederholten Beanspruchungen.

(Anmerkung: Die Legenden der Wöhlerdiagramme geben den Versuchsteller und verschiedene Leimsorten an. Es kann noch eine Zahl zur besseren Unterscheidung eingetragen sein.)

Nicht enthalten sind:

- Die Ergebnisse von Perkitny und Garczynski /Per1/, weil sie nur eine geringe Lastspielzahl verwendeten und hauptsächlich die Verformungen untersuchten.
- Die Ergebnisse von Günther /Gü1/, weil er die Wöhlerlinien auf die Spannungsamplitude bezog.
- Die Ergebnisse von Okuma und Lin (/Oku2/, /Lin1/), die die Spanplatten einer Dampfbehandlung unterzogen.
- Die Ergebnisse von Kato et al. /Kat1/ sowie Park und Mataka /Par2/, /Par3/, /Par4/, die keine verwertbaren Wöhlerlinien angaben und sich mit der Bruchtheorie beschäftigten.
- Verschiedene Ergebnisse von Suzuki und Saito /Suz2/, /Suz2/, /Suz5/, die auch den Einfluß des Umgebungsklimas auf die Zeitfestigkeit untersuchten.

1) Biegewechsel

Die Ergebnisse von Biegewechselversuchen mit Spanplatten sind in Bild 40 dargestellt:

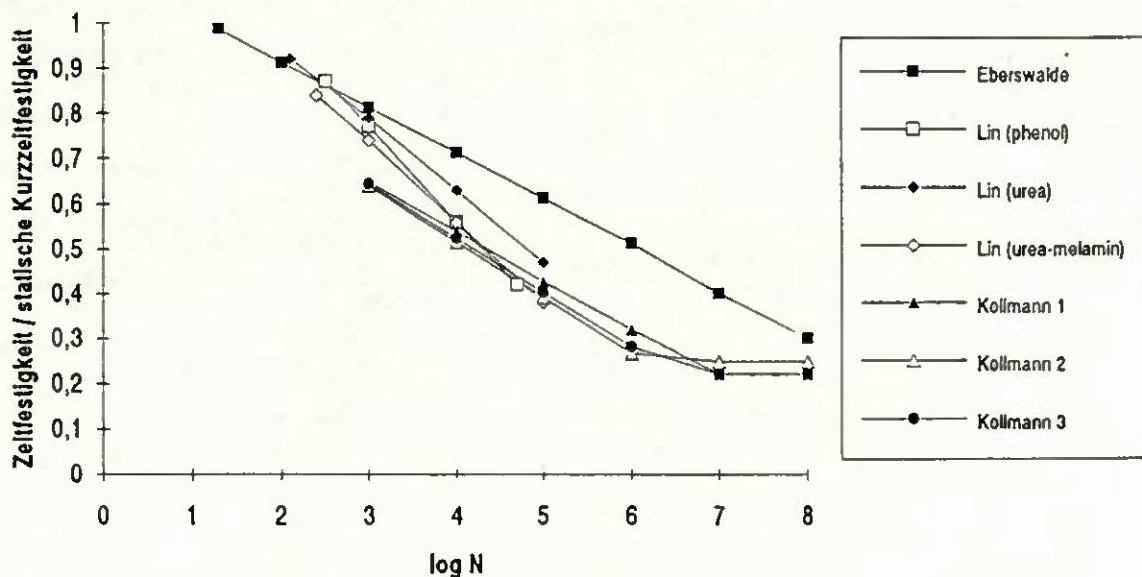


Bild 40 : Biegewechselfestigkeit bei Spanplatten

Die Biegewechselversuche wurden von Lin /Lin1/ und Kollmann /Kol13/ durchgeführt. Bei einer Lastwechselzahl von 10^8 ergab sich als Dauerfestigkeit im Schnitt nur noch 23% der statischen Festigkeit. Lins Versuche /Lin1/ sind mit einer geringeren Lastwechselzahl durchgeführt worden, bestätigen aber das Ergebnis in diesem Bereich. Die Existenz einer Dauerfestigkeitsgrenze ist nicht eindeutig. Die Wöhlerlinien von Kollmann nähern sich bei einer sehr hohen Lastspielzahl einer Horizontalen, die aus Eberswalde wiederum nicht.

Sonstige Ergebnisse:

Perkitny und Garczynski /Per1/ untersuchten Holz, Span- und Faserplatten unter einer oft wiederholten Biegewechselbeanspruchung, die 60% der entsprechenden statischen Festigkeit betrug und einer Lastspielzahl von 7920 hatte. Aus diesen Versuchen kann der Schluß gezogen werden, daß "bei einer 6stündigen Wechselbiegebeanspruchung - ebenso wie bei der vorher untersuchten 240stündigen konstanten Biegebelastung - sowohl Span- als auch Faserplatten eine deutlich höhere Neigung zum Kriechen als Vollholzproben gleicher Dicke und Feuchte zeigen." /Per1/

2) Biegeschwellen

Die Berichte von Sekino /Sek2/ und Tanaka /Tan2/ sind mit Ausnahme der Zusammenfassung und der Bildunterschriften mit japanischen Schriftzeichen abgefaßt. Deswegen wurde eine Biegeschwellbeanspruchung nur aus den Ergebnissen und dem verwendeten Begriff "repeated" vermutet. Die Ergebnisse sind in Bild 41 dargestellt. Die Festigkeit für 10^7 Lastwechsel beträgt noch 41% der statischen Festigkeit. In Versuchen mit anderen Umgebungsbedingungen als das Normklima ($20^{\circ}\text{C}/65\%\text{RLF}$) und damit höheren Feuchtegehalten wurde eine verstärkte Abnahme der Dauerfestigkeit festgestellt /Sek2/, /Oku3/. Ein signifikanter Unterschied der Leimsorten auf die Abnahme der Dauerfestigkeit konnte nicht festgestellt werden /Sek2/; ebenso /Suz2/. Ein höherer Leimgehalt der Spanplatte führt zu einer höheren statischen Festigkeit, die prozentuale Abnahme durch oft wiederholte Beanspruchungen ist dann aber nahezu gleich /Tan2/.

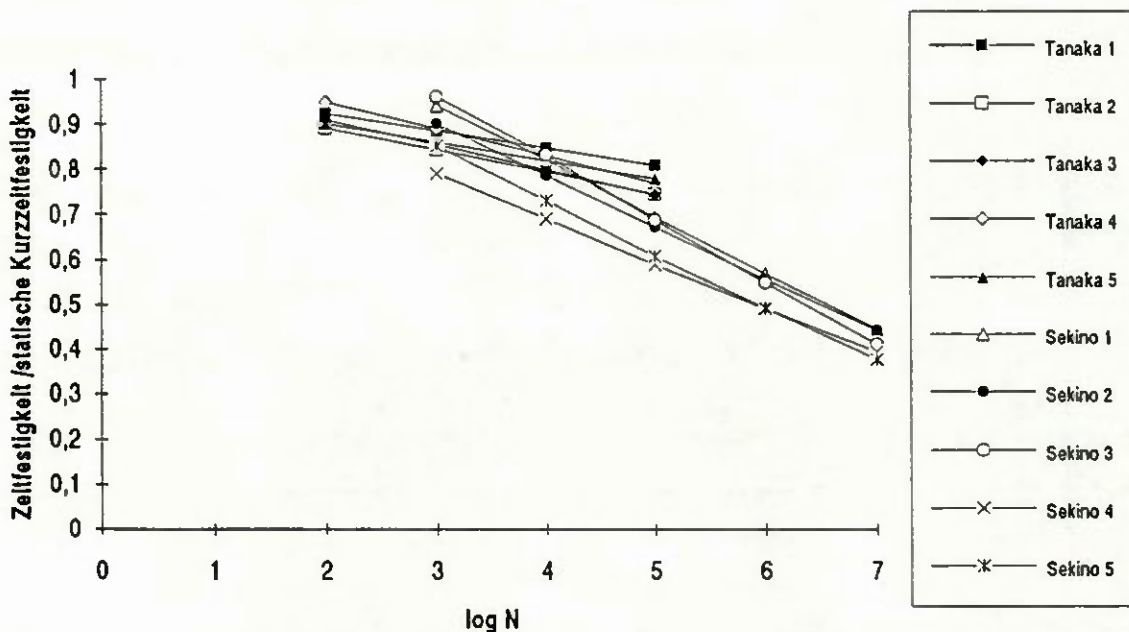


Bild 41: Biegefestigkeit bei Spanplatten (Anm.: vermutlich Biegeschwellfestigkeit)

3) Zugschwellen in Plattenebene

Kollmann und Krech /Kol13/ stellten für 10^8 Lastwechsel noch eine ertragbare Zugschwellbeanspruchung in Plattenebene von im Mittel 39% der statischen Zugfestigkeit fest (vgl. Bild 42). McNatt und Werren /Mc4/ gibt 45% für 10^7 Lastspiele an. Die Ergebnisse von Suzuki und Saito /Suz5/ sind hier nicht aufgenommen. Sie gaben für 10^7 Lastspiele eine Zeitfestigkeit von 43 bis 45% der statischen Festigkeit an.

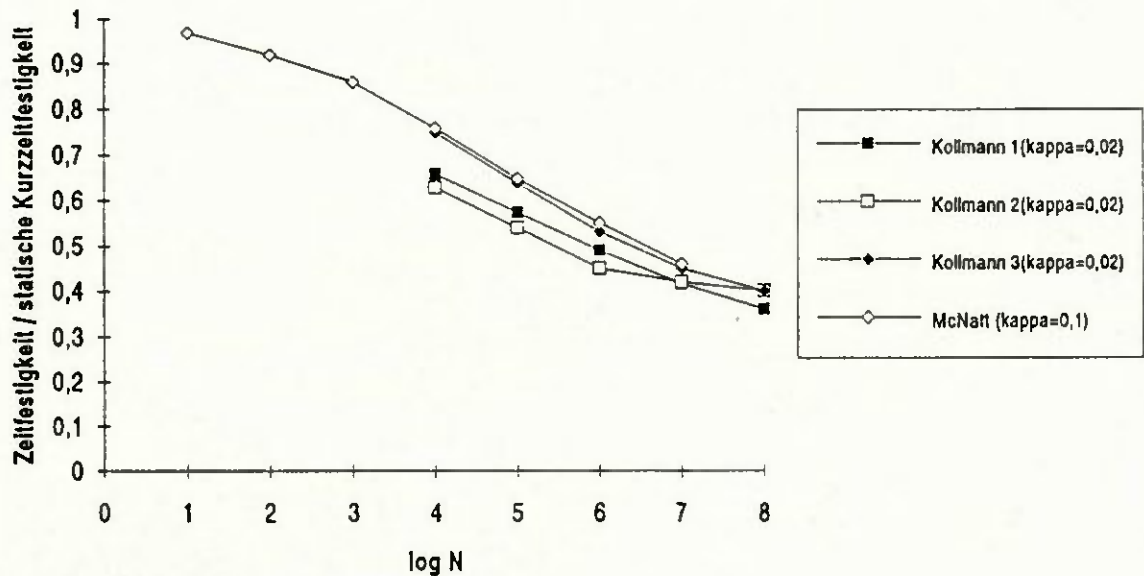


Bild 42: Zugschwellfestigkeit parallel zur Plattenebene bei Spanplatten

4) Zugschwellen senkrecht zur Plattenebene

Senkrecht zur Plattenebene ergibt sich für die Zugschwellfestigkeit nach Suzuki /Suz2/ eine Abminderung von im Mittel 52% für 10^7 Lastwechsel (vgl. Bild 43).

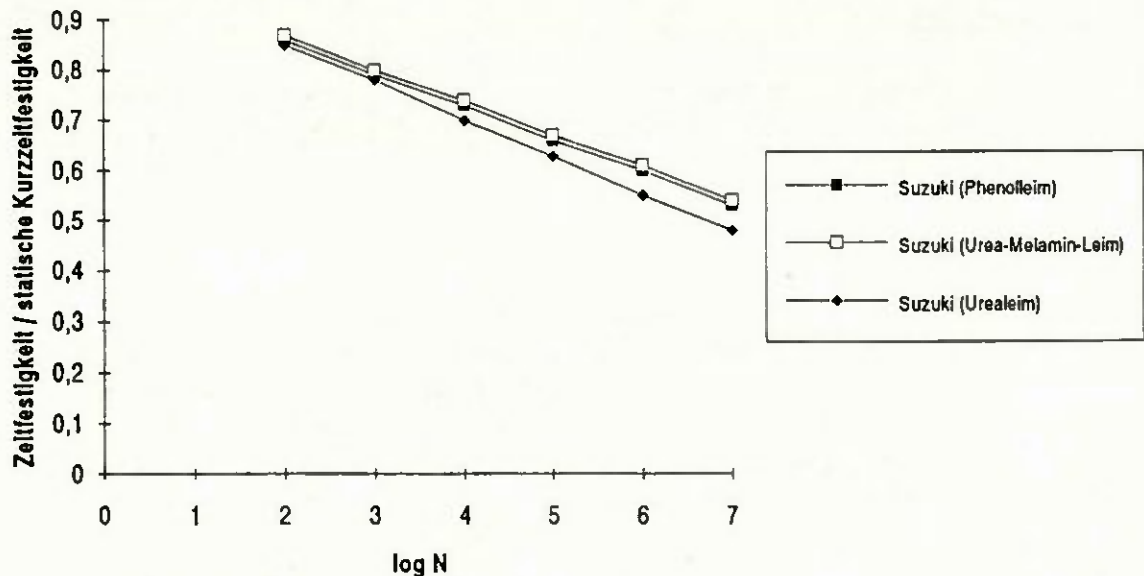


Bild 43: Zugschwellfestigkeit senkrecht zur Plattenebene bei Spanplatten

5) Zug-Druck-Wechsel

In Eberswalde /In1/ wurde für eine Zug-Druck-Wechselfestigkeit noch ca. 30% ermittelt. (Anmerkung: Es ist unklar geblieben, ob dies sich auf die statische Druck- oder Zugfestigkeit bezieht.).

6) Schub

Das Schubverhalten untersuchte McNatt und Werren /Mc4/. Es ergab sich bei 10^7 Lastspielen ein Abminderungswert von 42%. Die Ergebnisse sind in Bild 44 dargestellt.

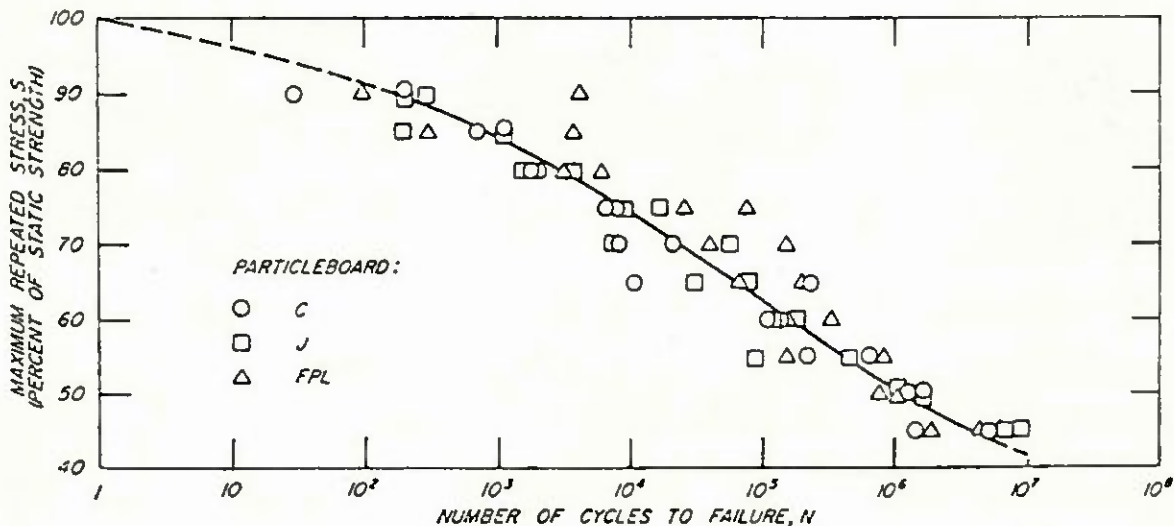


Bild 44: Spanplatten unter einer oft wiederholten Schubbeanspruchung ("interlaminar shear"; fig. 5 aus /Mc4/)

7) Zusammenfassung

Die Abminderungswerte von Spanplatten liegen im Bereich derjenigen von Vollholz und verleimten Hölzern. Der Einfluß der verwendeten Leime spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Größere Feuchtigkeiten der Platten vermindern die Zeit- und Dauerfestigkeiten.

Empfehlung:

Wegen dem großen Kriechen von Spanplatten wird von einem Einsatz bei Konstruktionen, die langandauernden oft wiederholten Beanspruchungen ausgesetzt sind, abgeraten. Bei Verbundkonstruktionen "entzieht" sich die Spanplatte der Belastung. Hier sollte man auf Sperrholz- oder Schichtholzplatten ausweichen, die bezüglich langandauernden und oft wiederholten Beanspruchungen deutlich günstigere Eigenschaften besitzen. Deswegen wird auch keine weitere Auswertung der Wöhlerlinien durchgeführt.

3.1.3.2. Hartfaserplatten

Es wird bei den Hartfaserplatten auf eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse für oft wiederholte Beanspruchungen verzichtet, weil die Hartfaserplatten im Ingenieurholzbau eine untergeordnete Rolle spielen. Aus dem Forschungsbericht von Kollmann und Dosoudil /Koll10/ sind folgende Ergebnisse entnommen: "Es zeigt sich, daß die Wechselbiegefestigkeit von Hartplatten nur 17 bis 28%, im Mittel 23% der statischen Biegefestigkeit beträgt. Bei Vollholz und Lagenhölzer ist das Verhältnis (...) günstiger. (...) Die bei einer Lastwechselzahl von $2 \cdot 10^7$ abgelesene Zugschwellfestigkeit erreichte bei einer geprüften Hartplatte längs 40%, quer 35% der statischen Zugfestigkeit". Weitere Versuche führte McNatt /Mc1/ durch.

3.1.4. Holzkonstruktionen unter einer oft wiederholten Beanspruchung

Anmerkung:

Dieser Abschnitt beschränkt sich auf die Nennung von Versuchen mit Holzkonstruktionen unter einer oft wiederholten Beanspruchung und der Angabe der wichtigsten Daten bzw. Ergebnisse. In der Regel wurden aufgrund der Abmessungen nur wenige Probekörper geprüft, so daß keine Wöhlerdiagramme gebildet werden konnten.

Egner /Eg1/ untersuchte 35 m lange genagelte Vollwandträger unter einer Biegeschwellbeanspruchung. Die Lasten wurden von 20 t stufenweise auf 60 t erhöht. Brüche traten bei einer Belastung von 60 t und Lastspielzahlen von 13 bzw. $35 \cdot 10^3$ auf. Die Träger waren bereits durch andere Laststufen vorbelastet worden. Ein direkter und genauer Vergleich mit der zulässigen Last, die der jetzt gültigen Norm entspricht, wird nicht durchgeführt. Eine Abschätzung mit den im Bericht verwendeten Querschnittswerten ergibt Biege- und Zugspannungen, die zwischen dem 1,2 und 1,9-fachen der zulässigen Spannungen nach der jetzt gültigen DIN 1052 liegen.

Es wurden bei den Drahtstiften wiederholt glatte, dauerbruchähnliche Zerstörungen festgestellt.

Gaber /Gab6/ untersuchte genagelte vollwandige Biegeträger. Dabei stellte er fest, "daß sich schwere Brückenträger unter häufigem Lastwechsel mit kleinen Stützweiten als Vollwandträger zusammennageln lassen."

Möhler /Mö4/ berichtete von einer Reihe von Versuchen mit genagelten Trägern unter einer oft wiederholten Beanspruchung. Es werden einige Ergebnisse dieser Großversuche zitiert:

"Die bei der 1. Belastung bis P_{zul} auftretende bleibende Durchbiegung betrug im Mittel $1/2000$ der Stützweite, die elastische $1/440$. Nach 10000 bis 220000 Lastspielen hatte sich die bleibende Durchbiegung auf $1/1120$ vergrößert, während die elastische Durchbiegung praktisch unverändert geblieben war. (...)

Die Bruchspannungen betragen im Mittel 202 kg/cm^2 ($20,2 \text{ N/mm}^2$), woraus sich eine mittlere Bruchsicherheit von 2,4 gegenüber der nach DIN 1052 zulässigen Zugspannung von 85 kg/cm^2 ($8,5 \text{ N/mm}^2$) ergab. Die Erschöpfung der Tragkraft war in den meisten Fällen durch Zugbrüche im Untergurt, ausgehend von Aststellen, verursacht, in einigen wenigen Fällen war Ausknicken des Obergurtes oder Verwinden des Trägers eingetreten. (...)" /Mö4/

Kufner und Spengler /Ku2/ beanspruchten Stabwerkträger mit geleimten Knotenpunkten im Schwellbereich mit unterschiedlichen Lasten bis zu einer Lastspielzahl von 10^6 . "Eine Tragfähigkeitsminderung infolge dynamischer Dauerbeanspruchung konnte nicht festgestellt werden." /Ku2/

Tokuda /To6/ untersuchte Ständerwände, die mit Sperrholz beplankt und mit Nägeln verbunden waren, unter einer wechselnden Beanspruchung. In seiner Zusammenfassung kam er zum Schluß, daß die "Dauerfestigkeit" dieser Konstruktion bei einem Spannungsverhältnis von ca. 30 bis 35% lag.

Zusammenfassung:

Verschiedene Holzkonstruktionen wurden auch unter einer oft wiederholten Beanspruchung geprüft. Die Holzkonstruktionen verhielten sich dabei nicht ungünstiger, als die verwendeten Hölzer und Verbindungsmittel.

Zahlreichen Bauten für eine oft wiederholte Beanspruchung sind erstellt worden. (vgl. /Bor1/, /Eg1/, /Eg4/, /Gab1/, /Gab2/, /Gab5/, /Hei1/)

3.1.5. Restfestigkeit

Eine wichtige Größe für die Beurteilung oft wiederholter Beanspruchungen ist die Auswirkung auf die Restfestigkeit. Die Restfestigkeit muß am Ende eines Beanspruchungszeitraum noch so groß sein, daß einmalige Beanspruchungsspitzen (aus vorwiegend ruhenden Beanspruchungen) vom Bauwerk noch ertragen werden können.

1) Druck- und Zugschwellen

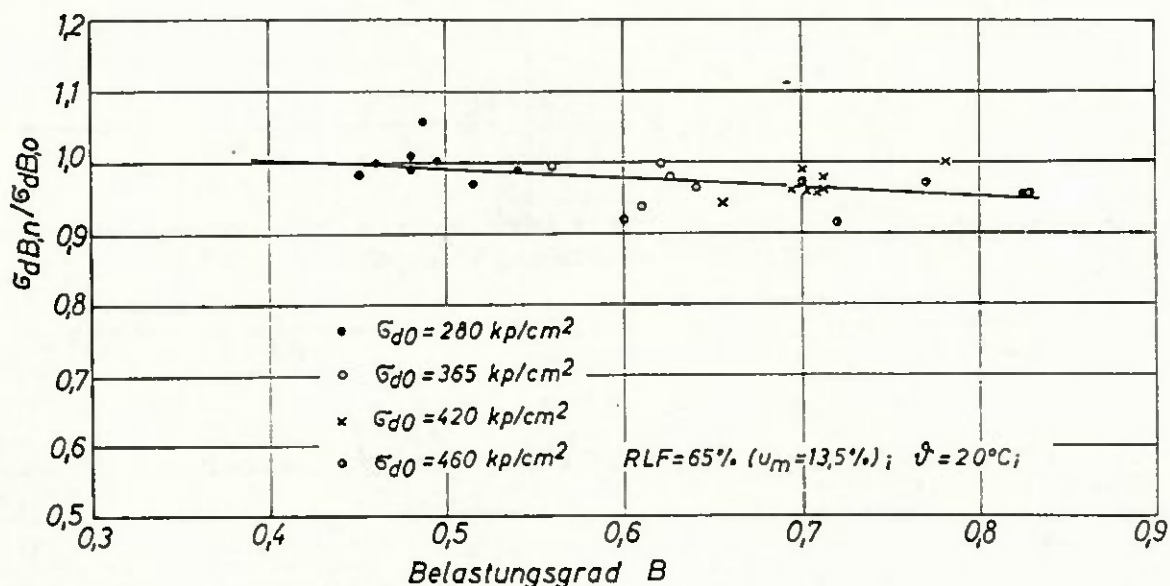


Bild 45: Verhältnis der statischen Druckfestigkeit nach und vor der Druckschwellbeanspruchung in Abhängigkeit des Belastungsgrades bei verschiedenen Beanspruchungen (Bild 45 aus /Ro4/)

Rose /Ro4, bzw. Ro3/ prüfte die Restfestigkeiten von Zug- und Druckproben nach $3,5 \cdot 10^6$ Lastspielen bei verschiedenen Beanspruchungsgraden, Feuchtigkeiten und Temperaturen.

Die Ergebnisse sind in den Bildern 45 und 46 dargestellt. Mit $\sigma_{dB,n}/\sigma_{dB,0}$ wird das Verhältnis der Restfestigkeit (statischer Kurzzeitversuch nach der oft wiederholten Beanspruchung) zur statischen Kurzzeitfestigkeit (vor einer oft wiederholten Beanspruchung) angegeben. Der Belastungsgrad B ist das Verhältnis der oft wiederholten Beanspruchung zur statischen Kurzzeitfestigkeit.

"Die nach der Schwingbeanspruchung gemessenen Werte der statischen Kurzzeitfestigkeit lagen im allgemeinen über den entsprechenden ursprünglichen Werten, was vor allem auf die verringerte Feuchtigkeit zurückzuführen ist. (Anmerkung: Durch die oft wiederholte Beanspruchung nahm der Feuchtigkeitsgehalt in den Proben ab.) Um aus der Festigkeitsveränderung auf die Veränderungen im Gefüge des Holzes schließen zu können, wurden die nach der dynamischen Belastung gemessenen Werte auf die ursprüngliche Feuchte umgerechnet.

Danach änderte sich die statische Kurzzeitfestigkeit bei Druckschwellbeanspruchung zwischen +6% und -15% (bezogen auf den ursprünglichen Wert) und bei Zugschwellbeanspruchung zwischen +10% und -18%." /Ro3/

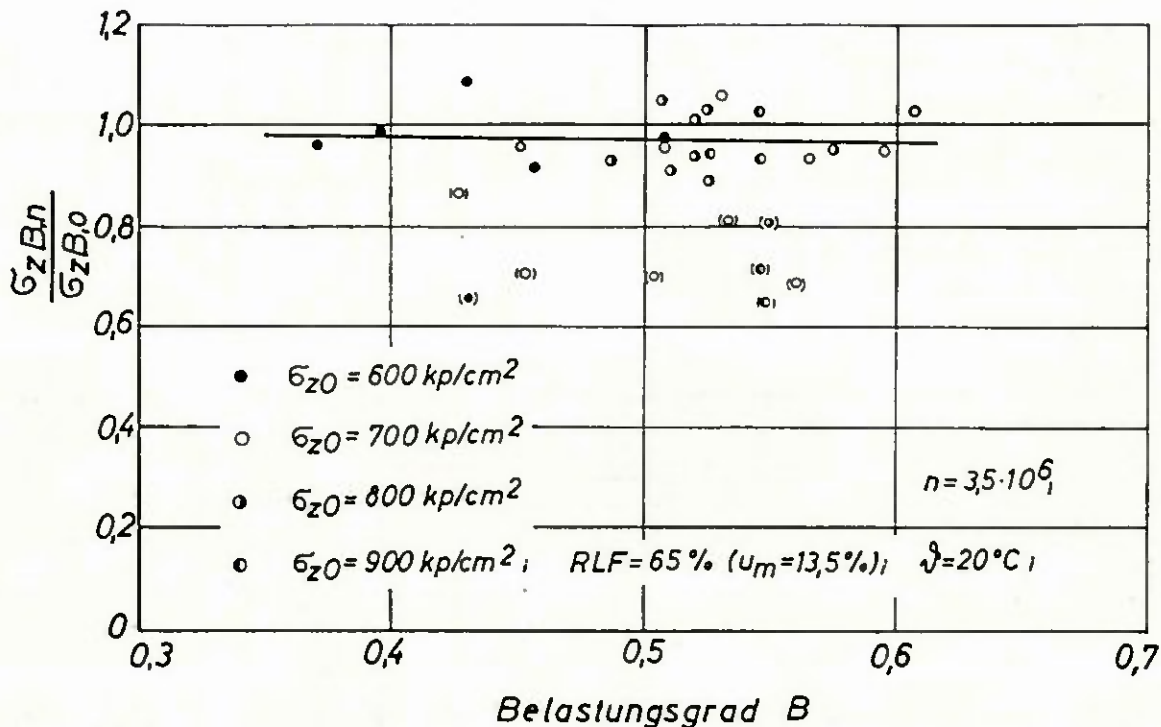


Bild 46 : Verhältnis der statischen Zugfestigkeit nach und vor der Zugschwellbeanspruchung in Abhängigkeit des Belastungsgrades (Bild 70 aus /Ro4/)

Kufner /Ku1/ untersuchte Kiefernholz und maß die Restfestigkeiten nach einer Zug- und Druckschwellbeanspruchung mit $2,2 \cdot 10^6$ Lastspielen bei einer Beanspruchung von 36% bzw. 50% der voraussichtlichen Bruchfestigkeiten. Der Vergleich der Zugproben mit gleichen Feuchtigkeiten und Temperaturen nach der oft wiederholten Beanspruchung zu denen vor der oft wiederholten Beanspruchung ergab geringere Restfestigkeiten von -4,7 und -3,0%; der Vergleich der Druckproben höhere Restfestigkeiten von +9,2 und +17%.

Dobraszczyk /Dob1/ prüfte ebenfalls die Restfestigkeit nach verschiedenen Lastspielzahlen (bis 10^6) und Beanspruchungsniveaus (bis 65% der statischen Bruchdehnung). Die daraus resultierenden Diagramme zeigten für das Zugschwellen keinen allgemeinen Verlust der Tragfähigkeit, die aus der Ermüdung resultierte.

Roth /Rot1/ führte nach der Druckschwellbeanspruchung noch statische Bruchversuche durch, um die Restfestigkeit festzustellen. Es zeigte sich, daß durch die Druckschwellbeanspruchung mit den angegebenen Lastspielzahlen kein Festigkeitsverlust auftrat.

Zusammenfassung:

Es tritt nach einer Schwellbeanspruchung mit Druck- oder Zugbereich keine oder nur eine geringfügige Restfestigkeitsminderung (bis 18% nach /Ro4/) auf.

2) Biegeschwellen

Prüfung der Restfestigkeit in Richtung der Schwellbeanspruchung:

Wischer /Wis1/ prüfte die Restfestigkeit an keilgezinkten Buchenholzswellen. Dabei war die Dauerbeanspruchung gering. Sie betrug 28% der statischen Kurzzeitfestigkeit bzw. 89% der zulässigen Spannung nach DIN 1052 Teil 1. Die mittlere Bruchfestigkeit nach der Dauerbeanspruchung durch 10^7 Lastspiele lag mit $38,0 \text{ N/mm}^2$ sogar um 8% höher als vorher. Auch der Einsatz als Weichschwelle mit $4 \cdot 10^6$ Lastübergängen ergab im Mittel eine leichte Erhöhung der Restfestigkeit. Nach Wischer "können diese Swellen als dauerhaft eingestuft werden."

Dobraszczyk /Dob1/ prüfte ebenfalls die Restfestigkeit nach verschiedenen Lastspielzahlen (bis 10^6) und Beanspruchungsniveaus (bis 65% der statischen Bruchdehnung). Die daraus resultierenden Diagramme zeigten für die Biegung keinen allgemeinen Verlust der Tragfähigkeit, die aus der Ermüdung resultierte.

Gillwald /Gil5/ untersuchte die Restfestigkeit von Holzmasten, die mit einer Biegeschwellbeanspruchung mit $3 \cdot 10^6$ Lastspielen belastet wurden. "Die Festigkeitsminderung liegt zwischen 6,4 und 17,4%, die Verminderung des Elastizitätsmoduls zwischen 4,2 und 12,2%. (...) Es kann demnach als erwiesen gelten, daß durch eine Schwingbeanspruchung, deren Scheitelwert nur 25% der statischen Bruchfestigkeit beträgt, die Biegefestigkeit der Maste verringert worden ist." /Gil5/

Die Festigkeitsminderungen lagen bei trockenen, unbehandelten Proben zwischen 6,4 und 6,8%; bei trockenen, behandelten Proben zwischen 6,7 und 9,8% und bei feuchten, behandelten zwischen 11,6 und 17,4%.

Hayashi /Hay2/ untersuchte Furniere unter einer Biegeschwellbeanspruchung. Er stellte fest, daß die statische Bruchfestigkeit nicht abnimmt, bis der Ermüdungsbruch eintritt.

Freas und Werren /Fr2/ untersuchten verleimte Brettschichtholzbalken aus Eiche unter einer oft wiederholten Biegebeanspruchung. Die Balken wurden mit 3, 6 und $9 \cdot 10^6$ Lastwechseln und 50% der statischen Bruchlast beansprucht. Dabei brach keine der 9 trockenen Proben. Die Prüfung der Restfestigkeiten ergab nach $3 \cdot 10^6$ Lastspielen 97%, nach $6 \cdot 10^6$ Lastspielen 108% und nach $9 \cdot 10^6$ Lastspielen 94% der statischen Festigkeiten vor der wiederholten Beanspruchung. Von den wassergesättigten Proben brachen 3 von 9 Proben, die mit 50% der statischen Bruchlast für wassergesättigte Proben beansprucht wurden. Die Durchläufer erbrachten immer höhere Restfestigkeiten (104 bis 133%) im Vergleich zu den unbeanspruchten wassergesättigten Proben.

Lewis /Lew1/ berichtet von Versuchen zur Restfestigkeit. Hier wurden Biegebeanspruchungen, die 50 % der statischen Festigkeit betragen, 10^7 -mal aufgebracht. Dabei zeigte sich keine meßbare Abnahme der statischen Festigkeit. Bis der Ermüdungsbruch beginnt, wird die Festigkeit des Materials nicht beeinträchtigt. /Lew1/

Prüfung der Restfestigkeit in einer anderen Richtung als die der Schwellbeanspruchung:
 Die oben genannten Versuchsanordnungen prüften die statische Restfestigkeit in der gleichen Beanspruchungsrichtung wie die der vorhergegangene Ermüdungsbeanspruchung.
 Dobraszczyk /Dob1/ prüfte die Restfestigkeit nach einer Biegeschwellbeanspruchung in der entgegengesetzten Richtung. (vgl. Bild 47) Dabei ergaben sich deutlich geringere Restfestigkeiten.

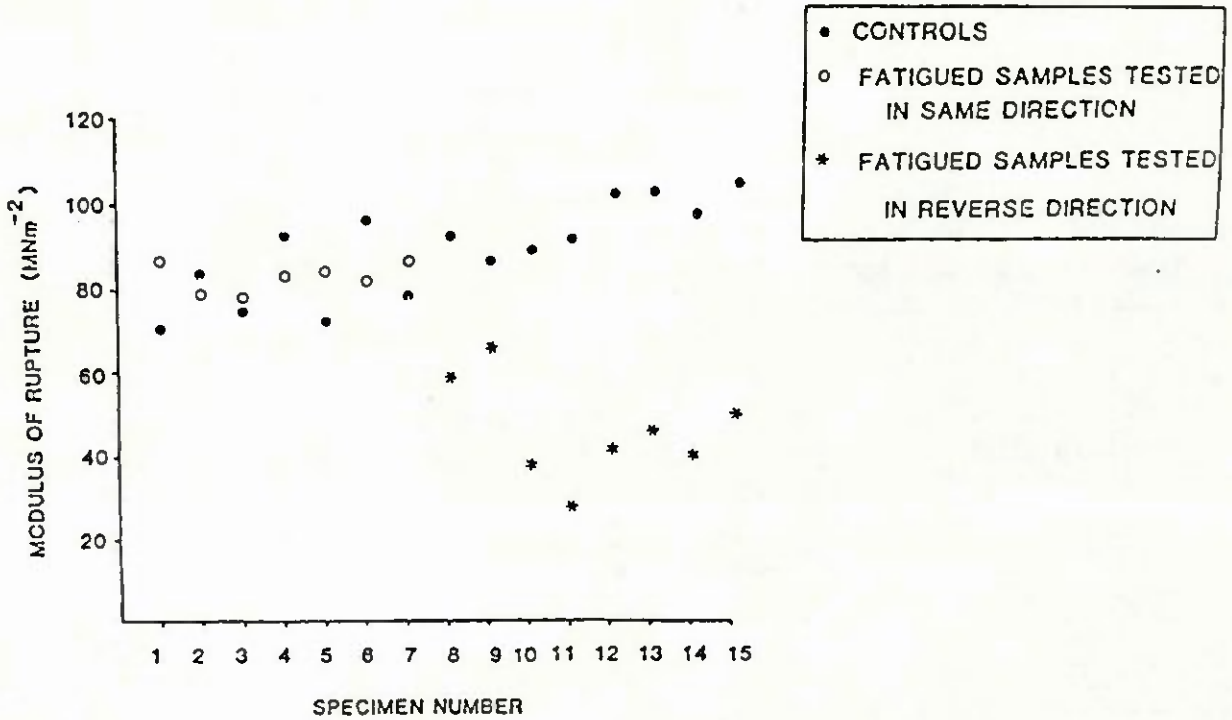


Bild 47 : Veränderung der Restfestigkeit mit Proben, die in der anderen Richtung als die der Ermüdungsbeanspruchung geprüft wurden. (fig. 68 aus /Dob1/)

Zum gleichen Ergebnis kam auch Kommers /Kom2/. Ab einer Biegeschwellbeanspruchung mit ca. 40 bis 50% der statischen Festigkeit trat nach nur 5000 Lastspielen eine deutliche Verringerung der Restfestigkeit auf (vgl. Bild 48).

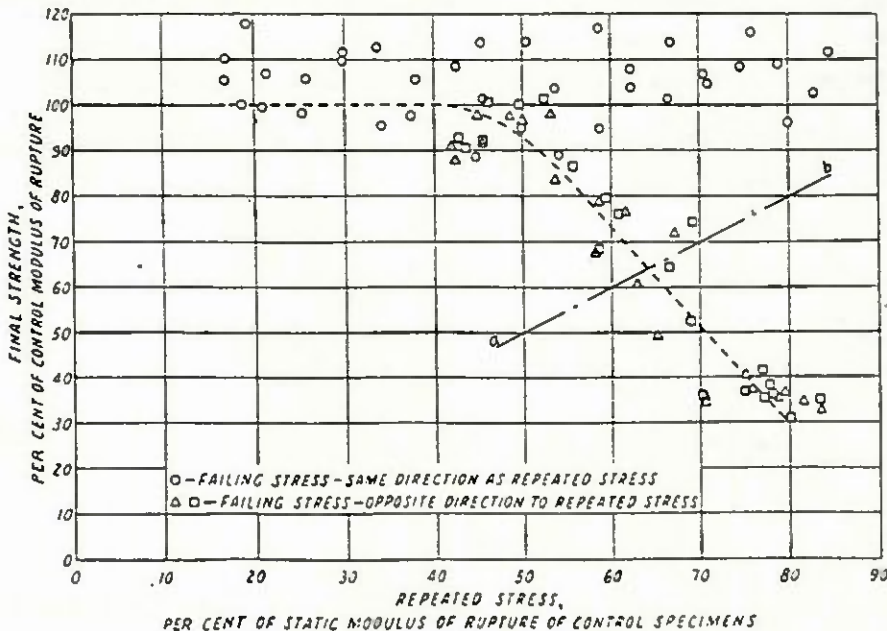


Bild 48: Ergebnisse von Untersuchungen, die die Auswirkungen von 5000 Lastwiederholungen auf die Bruchfestigkeit von fünfjährigem Sperrholz bestimmen. (fig. 13 aus /Lew3/)

Kyanka /Ky2/, zitiert in /Dob1/, berichtete ebenfalls über einen schnellen Abfall der Biegerestfestigkeit bei der Ermüdung in einer vollkommen gewechselten Beanspruchungsrichtung.

Prüfung der Schlagfestigkeit nach einer Biegeschwellbeanspruchung:

Dobraszczyk /Dob1/ stellte nach einer Biegeschwellbeanspruchung (70% der statischen Kurzzeitfestigkeit; 10^3 - 10^5 Lastspiele) eine leichte Abnahme der Bruchzähigkeit mit Hilfe des Schlagversuches fest. Der Grund für diese "Versprödung" kann in einer bereits eingetretenen Schädigung liegen.

Zusammenfassung:

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, daß die oft wiederholten Beanspruchungen den Probekörper verändern bzw. eine Schädigung verursachen. Diese wirkt sich bei einem statischen Bruchversuch mit der gleichen Beanspruchungsrichtung jedoch nicht oder nur geringfügig aus.

Wenn die Beanspruchungsrichtung der Restfestigkeitsprüfung im Vergleich zur Biegeschwellbeanspruchung wechselt, ist ein deutlicher Verlust der Festigkeit festzustellen.

3) Biegewechsel

Kufner /Ku1/ untersuchte Kiefernholz und maß die Restfestigkeiten nach einer Biegewechselbeanspruchung mit $1,85 \cdot 10^6$ Lastspielen bei einer Beanspruchung von 50% der voraussichtlichen Bruchfestigkeit. Der Vergleich der Biegeproben mit gleichen Feuchtigkeiten und Temperaturen nach der oft wiederholten Beanspruchung zu denen vor der oft wiederholten Beanspruchung ergab Restfestigkeiten von -5,6% und +7,5%.

(Anmerkung: Bei dieser hohen Lastspielzahl und hohen Beanspruchung müßten eigentlich viele Brüche auftreten. Der Mittelwert der Abminderungen liegt nach 3.1.1.5. bei 0,31.)

Walter /Wa1/ stellte für seine Versuche mit einer Wechselbiegespannung senkrecht zur Faser bei Durchläufern eine Restfestigkeit fest, die im Vergleich zur statischen Festigkeit vor der Dauerfestigkeitsprüfung bis zu 12,5% größer war.

"Die Schwingbelastung führt bei reiner Wechselbeanspruchung zu Verfestigungen. (...) Die Bestimmung der statischen Festigkeit an Proben, die an der Dauerfestigkeitsgrenze nach einer großen Anzahl von Lastspielen nicht gebrochen waren, ergab die gleiche oder eine höhere Festigkeit als die Prüfung von Proben, die keiner Schwingbelastung ausgesetzt waren." /Wa1/
Dieser Vorgang findet sich nach Walter /Wa1/ vereinzelt in anderer Literatur auch für die Biegewechselbeanspruchung des Holzes in Faserrichtung.

4) Zug-Druck-Wechsel

Götze und Melle /Göt3/ untersuchten den Einfluß einer oft wiederholten Zug-Druck-Wechselbeanspruchung auf die statische Restbiegefestigkeit. Sowohl bei Kiefernholz als auch bei Buchenholz wurde eine oft wiederholte Beanspruchung gewählt, die unterhalb der "Dauerfestigkeitsgrenze" lag. Die Werte betragen ca. 21 bzw. ca. 27 N/mm². "Die statische Biegefestigkeit fiel nach vorausgegangener Dauerschwingbeanspruchung sowohl bei Kiefernholz als auch bei Rotbuche deutlich ab. Zwischen der Schwinglastspielzahl wurde eine Beziehung (Kiefer) festgestellt." /Göt3/ Aus einem Diagramm jenes Berichtes kann die prozentuale Verminderung der statischen Biegefestigkeit nach $2 \cdot 10^6$ Lastspielen mit ca. 20% abgelesen werden.

5) Verbindungsmittel

Möhler und Maier /Mö6/ prüften verschiedene Verbindungsmittel unter oft wiederholten Beanspruchungen. Bei Nägeln und Stabdübeln läßt sich bei einer Schwellbeanspruchung keine Abnahme der Restfestigkeit (Mittelwert) feststellen. Die Prüfungen mit einer Wechselbeanspruchung ergaben jedoch für Nägel und Appeldübel geringere Restfestigkeiten (Mittelwerte) im Vergleich zur statischen Prüfung bzw. nach der schwellenden Beanspruchung. Die einzelnen Ergebnisse sind in Anlage 7 angegeben.

Hayashi und Sasaki /Hay5/ untersuchten Holzverbindungen mit Nagelplatten unter Biegeschwellbeanspruchung, insbesondere auf den Gesichtspunkt eines Festigkeitsverlustes durch eine oft wiederholte Beanspruchung. Sie stellten fest, daß die Restfestigkeit nur leicht mit der anwachsenden Lastspielzahl abnimmt. Er gibt einen Verlust von 5% nach 80% der Lastspielzahl der gesamten Lebensdauer an.

Trübswetter /Trü1/ untersuchte verschiedene Klammern, Schrauben und Schraubnägel auf ihren Auszieh Widerstand nach einer schwellenden Beanspruchung der Verbindungsmittel in der Scherfuge zwischen zwei Holzbauteilen (Spanplatte und Fichte). Nach $2,1 \cdot 10^4$ Lastspielen betrug der Auszieh Widerstand der Klammern 44-65%, der Schraube 85% und des Schraubnagels 52% des Mittelwertes der unbelasteten Vergleichsproben.

Mack /Mac1/ beanspruchte zweiseitige, vorgebohrte Verbindungen mit einer Schwellbeanspruchung von 10^3 und 10^4 Lastspielen. Die Proben wurden mit einer festgelegten Verformung (0,25 mm, 0,38 mm, 1,02 mm und 1,52 mm) beansprucht. Er stellte ein Anwachsen der Verformung mit steigender Last und höheren Lastwechseln fest. Die statischen Bruchlasten nach den schwellenden Beanspruchungen zeigten aber keine signifikanten Unterschiede zu den statischen Bruchversuchen unbeanspruchter Proben. Daraus kann gefolgert werden, daß die Tragfähigkeit bei diesen geringen Lastspielzahlen nicht beeinträchtigt wird, obwohl die Verformung ansteigt.

Soltis und Mtenga /So3/ prüften einschnittige Nagelverbindungen im Hinblick auf ihre Tragfähigkeit bei Erdbeben- und Windeinwirkung. Die dabei verwendete Lastspielzahl von 40 Lastwechseln war für die Ermüdungsfestigkeit uninteressant. Dennoch zeigte sich ein klarer (Rest-) Festigkeitsverlust durch die Wechselbeanspruchung. Die Proben wurden mit mehreren Lastniveaus, die festgelegte Verformungen (0,76 mm; 1,52 mm; 2,54 mm und 3,81 mm) bewirkten, beansprucht. Die Verhältnisse der Lasten, die diese Verformungen bewirkten, zu den Ergebnissen der statischen Versuche, nahmen durch die wechselnde Beanspruchung mit steigender Lastspielzahl, größeren Verformungsniveaus und höherer Frequenz ab; die Verbindungen wurden also "weicher". Dies zeigte sich sowohl bei Holz-Holz- als auch bei Sperrholz-Holzverbindungen.

(Anmerkung: Die aufgetragenen Beanspruchungen in Form von Verformungen sind sehr groß. Sie überschreiten teilweise die zulässigen Verformungen von $\max \delta = 1,5 \text{ mm}$ für Verbindungsmittel.)

6) Stabwerkträger mit geleimten Knoten

Kufner und Spengler /Ku2/ beanspruchten Stabwerkträger mit geleimten Knotenpunkten im Schwellbereich mit unterschiedlichen Lasten bis zu einer Lastspielzahl von 10^6 . "Eine Tragfähigkeitsminderung infolge dynamischer Dauerbeanspruchung konnte nicht festgestellt werden." /Ku2/

7) Sonstige Ergebnisse

Maku und Sasaki /Mak3/ stellten keine Veränderungen der Zug-, Druck- und Scherfestigkeit nach einer 10^6 -mal wiederholten Beanspruchung im Vergleich zur statischen Bruchfestigkeit fest.

8) Zusammenfassung

Restfestigkeitsprüfung in der gleichen Richtung wie die oft wiederholte Beanspruchung:
Die Restfestigkeiten nach einer oft wiederholten Beanspruchung liegen im Bereich der statischen Festigkeit vor der Ermüdungsbeanspruchung, wenn die Ermüdungsbeanspruchung in der gleichen Richtung wie bei der Restfestigkeitsprüfung aufgebracht wird.

Für oft wiederholte Beanspruchungen mit Werten nahe der statischen Kurzzeitfestigkeit treten geringere Werte auf, während für deutlich geringere Beanspruchungen kein Restfestigkeitsverlust auftritt. Durch die Bemessung für oft wiederholte Beanspruchungen werden die Beanspruchungen begrenzt, so daß große Restfestigkeitsverluste nicht mehr auftreten.

Nach Meinung der Verfasser ist mit weiter steigender Lastspielzahl noch ein starker Abfall der Restfestigkeit zu erwarten. Das letzte Lastspiel bei dem Wöhlerverfahren kann auch als Restfestigkeitsprüfung mit dem Wert des Beanspruchungsniveaus interpretiert werden.

Restfestigkeitsprüfung in einer anderen Richtung wie die oft wiederholte Beanspruchung:

Restfestigkeitsprüfungen, die mit einer anderen Beanspruchungsrichtung als die der oft wiederholten durchgeführt wurden, ergaben deutlich geringere Werte als mit der gleichen Beanspruchungsrichtung. Dies muß in der Bemessung gesondert berücksichtigt werden. Hierzu sind noch weitere Versuche notwendig, um die genauen Auswirkungen für die Bemessung zu erfassen.

Die Prüfungen mit einer anderen Beanspruchungsrichtung bzw. Beanspruchungsart weisen auf eine bereits eingetretene Schädigung des Körpers durch eine oft wiederholte Beanspruchung hin.

Empfehlung:

Nach Meinung der Verfasser sind die Restfestigkeitsverluste unter Beanspruchungen, die mit den k_{fat} -Werten nach 8.2. ermittelt werden, so gering, daß sie nicht berücksichtigt werden müssen, wenn die maximale Beanspruchung in der gleichen Richtung wirkt wie die oft wiederholte Beanspruchung.

Höhere Restfestigkeiten:

Höhere Restfestigkeiten können dadurch erklärt werden, daß sich durch die oft wiederholten Beanspruchungen das Gefüge ändert. Dadurch können höhere Beanspruchungen bis zum Ermüdungsbruch ertragen werden.

Oder bei den Durchläufern handelt es sich um "bessere" Proben, die im Vergleich zum Mittel aller Proben auch eine höhere statische Kurzzeitfestigkeit bzw. Restfestigkeit besitzen. Die "schlechteren" Proben brechen bei der oft wiederholten Beanspruchung und können zur Restfestigkeitsprüfung nicht herangezogen werden.

3.2. Zusammenstellung nach bestimmten Kriterien

3.2.1. Wöhlerlinien

3.2.1.1. Existenz einer Dauerfestigkeitsgrenze

Folgende Autoren bzw. Forschungsinstitute geben eine Dauerfestigkeitsgrenze an. D.h. die Wöhlerlinien gehen in eine horizontal verlaufende Gerade über:

Tabelle 3: Autoren, die eine Dauerfestigkeitsgrenze angeben.

Autoren:	Litnr.:	Material:	Beanspruchungsart	Dauerfestigkeit bei ca. [Lastspiele]
Dosoudil	Dos1	Lignostone	Zug-Druck-W.	$1 \cdot 10^5$
Eberswalde	In1	Vollholz	Wechselbiegung	$2 \cdot 10^6$ bis $2 \cdot 10^7$
Gillwald	Gil2	Kiefer	Zug-Druck-W.	$3 \cdot 10^5$
Gillwald	Gil2	Sperrholz	Zug-Druck-W.	$3 \cdot 10^5$
Gillwald	Gil1	Vollholz	Zugschwellen	$5 \cdot 10^5$ bis $1 \cdot 10^6$
Gillwald	Gil1	Vollholz	Biegeschwellen	$3 \cdot 10^5$
Gillwald	Gil3	Vollholz	Biegeschwellen	$1 \cdot 10^6$
Hayashi et al.	Hay6	VB	Zugsch./-wechs.	10^6 bis 10^7
Sterr	Ste7	BSH	Biegeschwellen	$1 \cdot 10^5$
Sterr	Ste7	Leimfuge	Abscheren	10^5 bis 10^7
Walter	Wa1	Vollholz	Bieg. \perp Faser	10^5 bis 10^6
Wegelius	Y12	Vollholz	Biegewechsel	10^5 bis 10^7

Sonstige:

Kyanka /Ky1/ schrieb in seinem Bericht, daß Holz und Holzwerkstoffe eine bestimmte Dauerfestigkeitsgrenze ("endurance limit") haben.

Folgende Autoren geben keine echte Dauerfestigkeitsgrenze an. D.h. die Wöhlerlinien gehen nicht in eine horizontal verlaufene Gerade über:

Tabelle 4: Autoren, die keine echte Dauerfestigkeitsgrenze angeben.

Autoren:	Litnr.:	Material:	Beanspruchungsart	Prüfung bis ca. [Lastspiele]
Bonfield, Ansell	Bon1	Vollh..Furn.	Druckschwellen	$1 \cdot 10^7$
Bonfield, Ansell	Bon1	Vollh..Furn.	Zug-Druck-W.	$1 \cdot 10^7$
Bonfield, Ansell	Bon1	Vollh..Furn.	Zugschwellen	$1 \cdot 10^7$
Fuller, Oberg	Fu1	Vollh.,Schichth.	Biegewechsel	$2 \cdot 10^8$
Fuller, Oberg	Lew3	verschiedene	Biegewechsel	$1 \cdot 10^8$ *)
Fuller, Oberg	Lew3	verschiedene	Biegeschwellen	$1 \cdot 10^8$ *)
Gillwald	Gil2	Spanpl.	Zug-Druck-W.	$1 \cdot 10^8$
Hayashi T.	Hay2	Furnier	Biegeschwellen	$1 \cdot 10^6$
Lewis	Lew3	Douglas-fir	Scheren d. Leimes	$3 \cdot 10^7$ *)
Lin, Okuma	Lin1	Spanpl.	Biegewechsel	$1 \cdot 10^5$
Maku	Mak2	Vollh..Schichth.	Biegewechsel	$1 \cdot 10^7$
Marsoem	Mar2	Fichte	Zugschwellen	$1 \cdot 10^6$
Suzuki, Saito	Suz5	Spanpl.	Zugschwellen	$1 \cdot 10^6$
Tsai, Ansell	Ts1	Vollh..Furn.	Biegeschwellen	$1 \cdot 10^7$

*) Die Kurven zeigen bei größeren Lastspielzahlen eine deutlich erkennbare Abflachung.

(Anmerkung: VB = Verbindungsmittel, BSH = Brettschichtholz)

Diese Angaben sollen einen Überblick über die Diskussion der Dauerfestigkeitsgrenze in der Literatur geben. Diese Tabellen sind deshalb nicht vollständig.

Zusammenfassung:

Die Existenz einer echten Dauerfestigkeitsgrenze wird von verschiedenen Autoren unterschiedlich angegeben. Eine Dauerfestigkeitsgrenze wird von einigen Autoren durch ihre Versuche belegt, so daß auch von ihr gesprochen werden kann. Auf der anderen Seite ergeben die Ergebnisse anderer Autoren noch bei einer hohen Lastspielzahl eine abfallende Wöhlerlinie.

Bewertung:

Die Tatsache, daß verschiedene Autoren keine Dauerfestigkeitsgrenze angeben, kann folgende Ursachen haben:

1. Die verwendeten Lastspielzahlen sind gering, so daß die Dauerfestigkeitsgrenze nicht erreicht wird.
2. Die Interpretation der einzelnen streuenden Punkte eines Wöhlerdiagrammes lassen beide Möglichkeiten zu.
3. Die Dauerfestigkeitsgrenze wird mit unterschiedlichen Lastspielzahlen erreicht und unterscheidet sich je nach Beanspruchung und/oder Holz bzw. Holzwerkstoff. Damit kann erklärt werden, daß einzelne Autoren eine Dauerfestigkeitsgrenze angeben, während andere keine erkennen können. Unterschiedliche Rohdichten (vgl. 3.2.2.2.) beispielsweise führen zu einem unterschiedlichen Übergang in eine horizontale Gerade. Im Stahlbau wurde auch festgestellt, daß der Übergang vom Werkstoff abhängt. Dorff /Dor1/ schreibt, daß der Knick mit steigender Härte früher erfolgt.

Es wird daher empfohlen, die Bemessungswerte k_{fat} für große Lastspielzahlen (10^7) zu verwenden, weil dann eine Annäherung der abfallenden Geraden mit den horizontalen Geraden erfolgt. Die Einflüsse (z.B. Rohdichte), die die Dauerfestigkeit erst bei einer höheren Lastspielzahl erreichen lassen, werden weitgehend ausgeschaltet.

Die Alternative dazu besteht darin, für diese Einflüsse verschiedene Bemessungswerte k_{fat} zu ermitteln. Dies ist nach Meinung der Verfasser für die Bemessung zu aufwendig und ist nur mit einem erhöhten Aufwand an Versuchen durchzuführen.

Anmerkung:

Für das Bemessungskonzept werden die Versuchsergebnisse in Abhängigkeit von der Lastspielzahl, also die Zeitfestigkeiten verwendet. Bei der Mittelwertbildung wird nicht darauf geachtet, ob der einzelne Autor eine Dauerfestigkeit oder eine Zeitfestigkeit angibt. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen werden über den Variationskoeffizienten V_2 berücksichtigt.

Hinweis:

Für die Anwendung einer Schädigungshypothese ist u.U. ein genauer Verlauf der Zeitfestigkeit in Abhängigkeit von der Lastspielzahl und die Dauerfestigkeitsgrenze erforderlich.

3.2.1.2. Form der Wöhlerlinien

Für die Wöhlerlinien werden verschiedene Formen in der Literatur angegeben:

1) Abfallende Gerade

In der halblogarithmischen Darstellung (σ -logN) der Wöhlerlinien gleichen verschiedene Autoren ihre Meßpunkte mit einer abfallenden Gerade aus. Ein Beispiel ist in Bild 49 dargestellt.

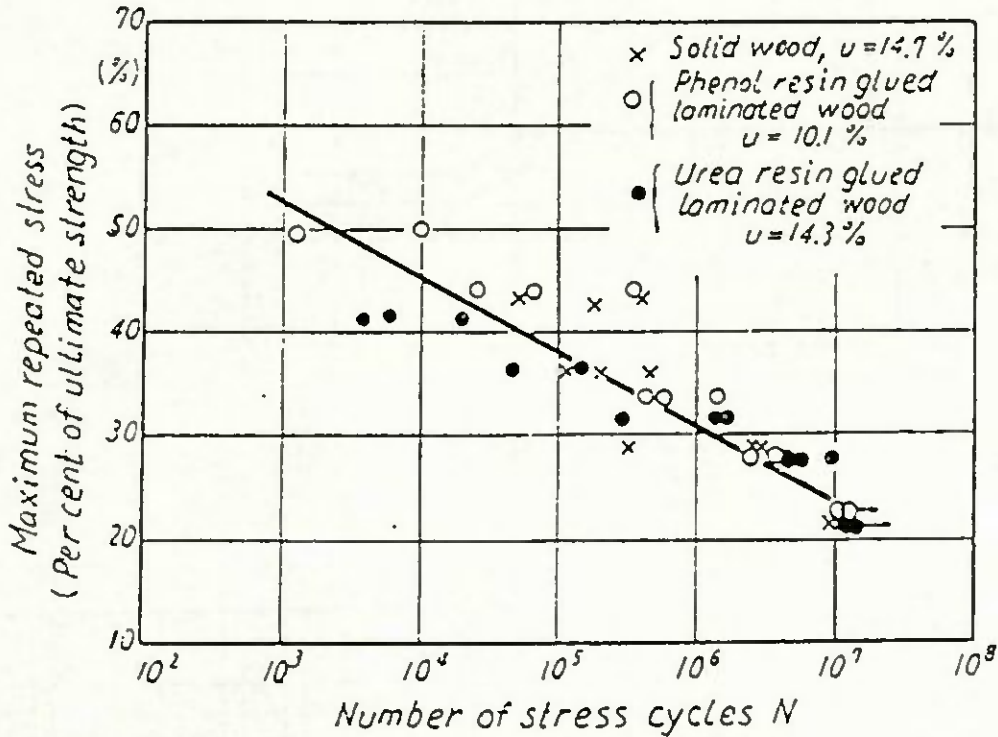


Bild 49: Wöhlerpunkte, die mit einer abfallenden Geraden ausgeglichen wurden (fig. 3 aus /Mak2/).

2) Abfallende Gerade mit Übergang in eine Horizontale

Ein deutliches Beispiel für diese Form findet sich bei Dosoudil /Dos1/. Aus Bild 50 ist erkennbar, daß die abfallende Gerade in eine Horizontale übergeht. Diese Horizontale wird durch Durchläufer eindeutig belegt. Das gleiche findet sich bei Walter /Wa1/. (Bild 51)

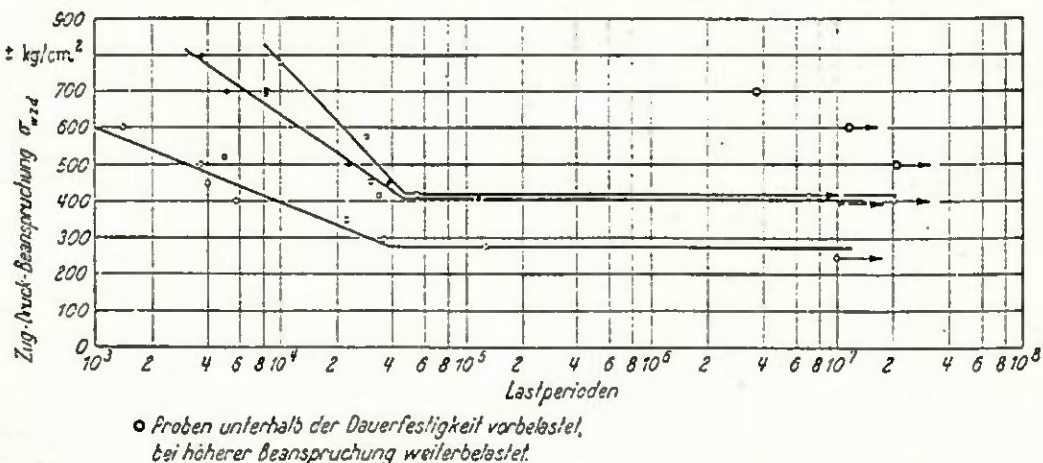


Bild 50: Wöhlerlinien aus Zug-Druck-Wechselversuchen (Bild 2 aus /Dos1/)

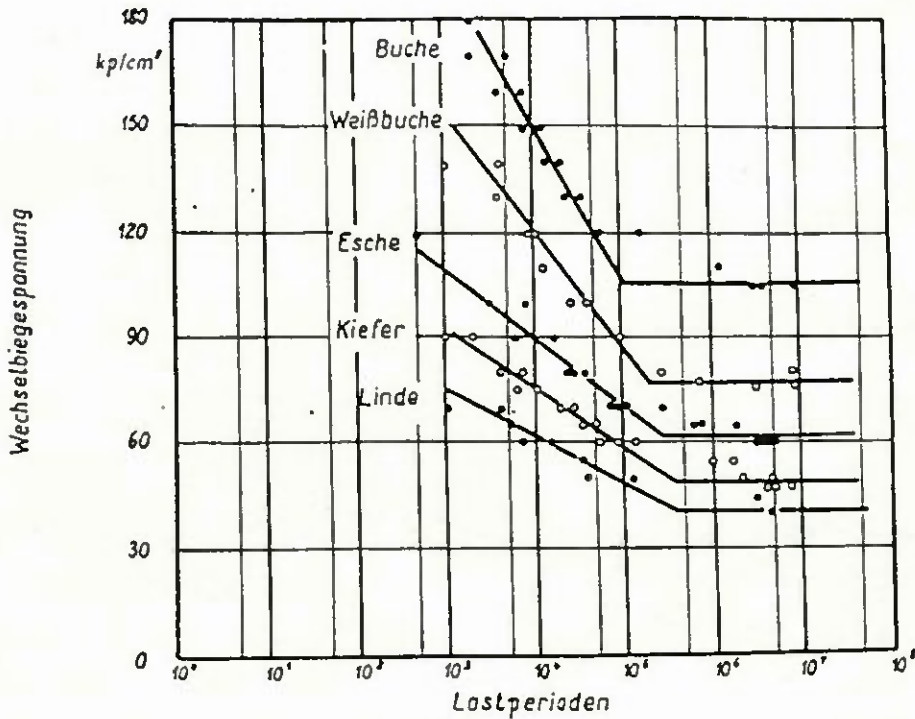


Bild 51: Meßpunkte für radiale Proben durch Geraden ausgeglichen. (Bild 38 aus /Wal/)

3) Geschwungene Formen

Walter /Wal/ wählt zur Verbindung der Punkte im Wöhlerdiagramm einen Ansatz mit Exponentialfunktionen. Er kommt dadurch zu folgender Darstellung im Wöhlerdiagramm (vgl. Bild 52).

Die Meßpunkte waren die gleichen wie in Bild 51 unter 2).

Zusammenfassung:

Die Formen der Wöhlerlinien werden ebenso wie die Dauerfestigkeitsgrenze in der Literatur unterschiedlich angegeben. Die Auswertung der einzelnen Punkte eines Wöhlerdiagrammes lassen mehrere Interpretationen zu.

Wenn ein Übergang in eine Horizontale erkennbar ist, kann man die Meßpunkte durch unterschiedliche Funktionen ausgleichen. Die Streuungen, die im Holzbau auftreten, verhindern eine eindeutige Bestimmung der Funktionen. Damit lassen sich auch keine Gesetzmäßigkeiten aus den Wöhlerlinien ablesen.

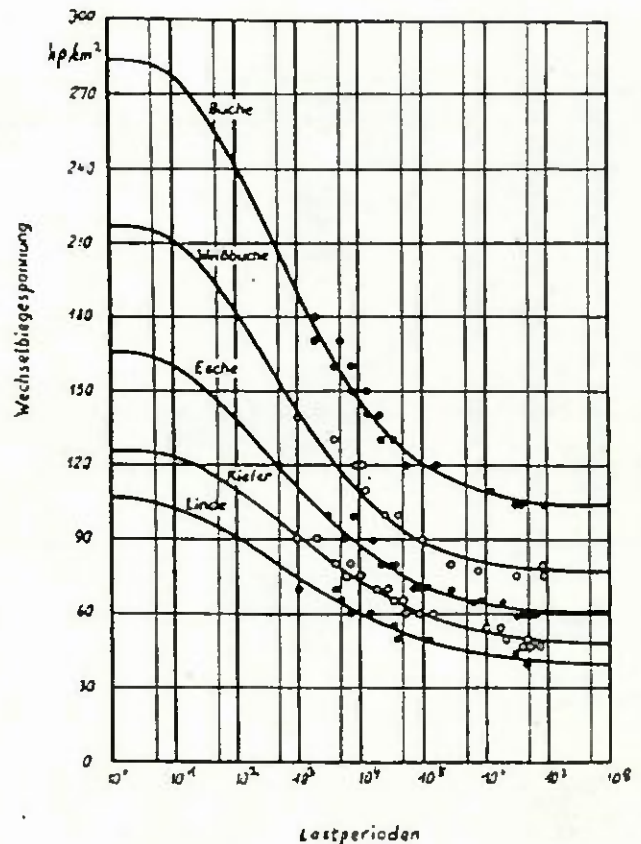


Bild 52: Meßpunkte für radiale Proben durch e-Funktion ausgeglichen. (Bild 40 aus /Wal/)

3.2.2. Parameter der Zeit- und Dauerfestigkeit

3.2.2.1. Frequenz

Der Einfluß der Frequenz während der Dauerfestigkeitsversuche wurde in mehreren vorliegenden Berichten untersucht:

Okuyama et al. /Oku7/ stellten dabei einen Einfluß der Frequenz auf die Dauerfestigkeit fest: Höhere Frequenzen bewirkten bei gleichem Beanspruchungsniveau größere Lastspielzahlen aber eine geringere Zeit bis zum Bruch. (vgl. Bild 53)

Hayashi et al. /Hay3/ untersuchten Nagelplatten. Dabei verwendeten Sie verschiedene Frequenzen (100 Hz und 1000 Hz). Der Frequenzeinfluß war nicht signifikant.

Fuller und Oberg /Fu1/ führten Rotationsbiegeversuche mit zwei unterschiedlichen Frequenzen (57,5 und 177 Hz) durch. Die Prüfungen mit den höheren Frequenzen ergaben bis zu 11% niedrigere Festigkeiten.

Tokuda /To7/ untersuchte Nagelverbindungen mit Holzwerkstoffen unter wechselnden Beanspruchungen. Dabei stellt er fest, daß die Bruchlastspielzahl nicht von den Frequenzen beeinflußt wurde. Es wurden Frequenzen von 0,05 bis 2 Hz verwendet.

Obwohl Soltis und Mtenga /So3/ nur eine geringe Lastspielzahl (max. 40) bei der Prüfung von einschnittigen Nagelverbindungen untersuchten und nach der wiederholten Beanspruchung die Restfestigkeiten prüften, kamen sie zum Ergebnis, daß höhere Frequenzen tragfestigkeitsmindernd wirkten.

Zusammenfassung:

Bei der Prüfung mit verschiedenen Frequenzen wurden unterschiedliche Auswirkungen der Prüffrequenzen festgestellt. Es werden mit höheren Frequenzen größere, gleiche und kleinere Zeitfestigkeiten festgestellt.

Anmerkung:

Höhere Frequenzen führen zu geringeren Versuchsdauern. Es müßten dann höhere Festigkeiten erreicht werden, wenn man nur die Zeitstandeigenschaften des Holzes betrachtet. Der Frequenzeinfluß und die Zeitstandeigenschaften sind gegenläufig. Damit kann man die unterschiedlichen Ergebnisse erklären.

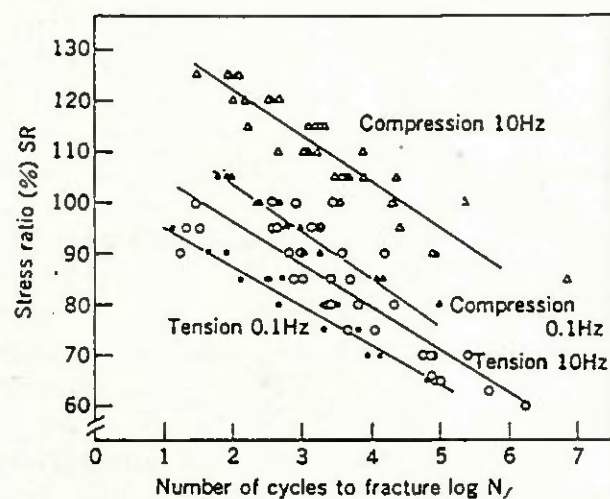


Bild 53: Beziehung zwischen dem Spannungsverhältnis und der Bruchlastspielzahl (Fig. 3 aus /Oku7/)

3.2.2.2. Rohdichte

Es wurde von mehreren Autoren (z.B.: /Sil/, /InI/, /Wal/) eine klare Beziehung zwischen der Rohdichte und der Dauerfestigkeit festgestellt.

"Die Größe der Wechselbiegefestigkeit von Vollholz hängt entscheidend sowohl innerhalb einer Holzart als auch zwischen den einzelnen Holzarten von der Rohdichte und damit von der statischen Biegefestigkeit ab. Bei der Verwendung fehlerfreier Proben ist der Rohdichteinfluß eindeutig bewiesen. Mit abnehmender Rohdichte sind einige typische Veränderungen im Wöhler-Diagramm festzustellen, und zwar wandert der Knickpunkt des im einfachen logarithmischen Maßstab entwickelten Wöhlerdiagrammes zu höheren Lastspielzahlen, so daß bei extrem kleiner Rohdichte eine sehr lange Beanspruchungszeit notwendig wird, um die Dauerschwingfestigkeit zu ermitteln. Weiterhin ist mit abnehmender Rohdichte eine Verkleinerung des Winkels zwischen Zeitfestigkeitslinie und Abszisse zu beobachten." /InI/

Walter /Wal/ arbeitete mit sehr kleinen Proben und einer Biegebeanspruchung senkrecht zur Faserrichtung. Die kleinen Proben ermöglichten eine größere Zahl von Versuchen und ergaben geringere Streuungen. Aus seinen Versuchen war folgendes festzustellen:

Mit steigender Rohdichte und damit auch steigender Festigkeit des Holzes erfolgt der Übergang der Wöhlerlinie in eine (nahezu) horizontale Gerade früher. Die Ausgleichsgerade für die Zeitfestigkeit wird steiler (vgl. Bild 54, 51, 52).

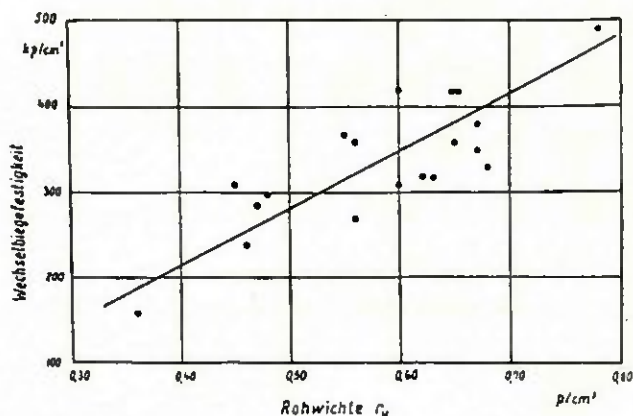


Bild 55: Beziehung zwischen Rohdichte und Umlaufbiegefestigkeit (Bild 61 aus /Wal/)

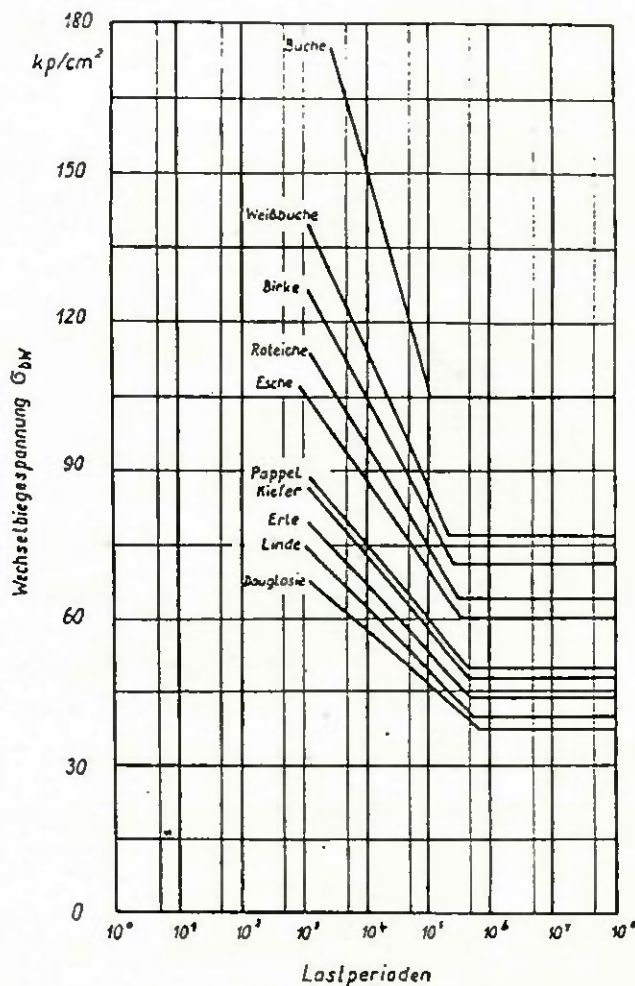


Bild 54: Wöhlerkurve mit den Meßwerten, die Probenlängsachse liegt in der radialen Richtung des Holzes (Bild 42 aus /Wal/)

Obwohl bei den Versuchen mit verschiedenen Holzarten und unterschiedlichen Rohdichten gearbeitet wurde, ergaben sich nur sehr kleine Unterschiede für das Verhältnis Dauerfestigkeit zur statischen Festigkeit (vgl. Anlage 6.1 und 6.2). Die niedrigen Variationskoeffizienten sind für Holz unüblich.

Die Unterschiede bei den Abminderungswerten waren aber von der Beanspruchungsart (hier: tangential bzw. radiale Biegebeanspruchung) abhängig.

Die Auswertung verschiedener Versuchsergebnisse durch Walter /Wal/ ergab das Bild 55, das die Beziehung zwischen Rohdichte und Umlaufbiegefestigkeit (Wechselbiegefestigkeit) belegt.

Kraemer /Kra2/ untersuchte Vollhölzer mit verschiedenen Rohdichten. Aus seinen Ergebnissen wurde folgendes Diagramm (Bild 56) erstellt. Aus ihm ist abzulesen, daß sich die Abminderungswerte bei höheren Lastspielzahlen geringfügig unterscheiden. Der Übergang der Wöhlerlinie in eine horizontale Gerade erfolgt bei verschiedenen Lastspielzahlen. Er erfolgt für Hölzer höherer Rohdichte früher.

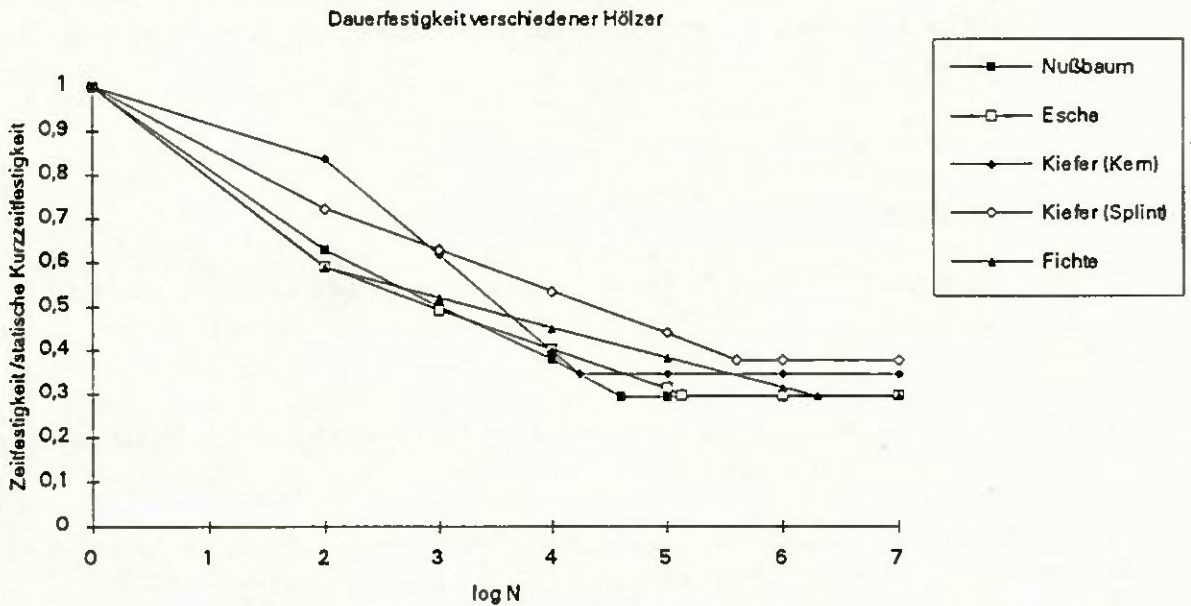


Bild 56: Wöhlerlinien verschiedener Hölzer aus den Versuchen von Kraemer /Kra2/

Zusammenfassung:

Es besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Rohdichte, der Zeit- und Dauerfestigkeit. Mit Zunahme der Rohdichte wächst die Dauerfestigkeit des Holzes linear. Der Kurvenverlauf ist ähnlich. (vgl. /Si1/, /Wal/)

Das Verhältnis Dauerfestigkeit zur statischen Festigkeit wird von der Rohdichte nicht beeinflusst (vgl. Bild 57).

Der Übergang der Wöhlerlinie in eine horizontale Gerade erfolgt für Hölzer mit größerer Rohdichte früher. Die abfallende Kurve wird dann steiler.

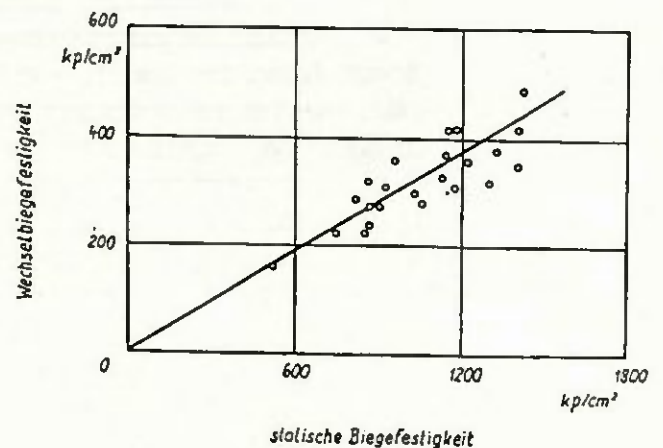


Bild 57: Beziehung zwischen der Wechselbiegefestigkeit und der statischen Biegefestigkeit (Bild 60 aus /Wal/)

Bewertung:

In diesem Bericht werden die Zeit- und Dauerfestigkeiten auf die statische Kurzzeitfestigkeit bezogen, um den Einfluß der Rohdichte zu eliminieren. Mit diesen so gebildeten Abminderungswerten wird der Einfluß der Rohdichte auf die Dauerfestigkeit gering.

Der unterschiedliche Übergang in eine horizontale Gerade bleibt ein Problem.

Es besteht die Möglichkeit, die Bemessungswerte k_{fat} der höheren Lastspielzahlen auch für geringe Lastspielzahlen anzusetzen, um so sicher zu gehen, daß auch im Bereich der Zeitfestigkeit genügend große Sicherheiten vorhanden sind.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, für jede Dichte den Übergang "genau" herauszurechnen.

Um alle Meßergebnisse verwerten zu können, werden in diesem Bericht die Mittelwerte und die Variationskoeffizienten der Abminderungswerte gebildet. Die unterschiedlichen Kurvenverläufe werden mit diesen Variationskoeffizienten berücksichtigt, weil diese in die k_{fat} -Wertermittlung eingehen.

3.2.2.3. Holzarten

Um verschiedene Einflüsse auf die Dauerfestigkeit ausschließen zu können, werden zur Untersuchung des Einflusses der Holzart die Ergebnisse einzelner Autoren, die mit der gleichen Versuchsanordnung mehrere Holzarten prüften, verglichen:

Die Ergebnisse von Dauerfestigkeitsprüfungen mit verschiedenen Holzarten sind bereits in den Bildern 51, 54, 55 und 56 abgebildet.

In Eberswalde /In1/ kommt man zum Schluß, "daß zwischen statischer Festigkeit und dem Wechselbiegeverhalten der einzelnen Holzarten klare Beziehungen bestehen." /In1/ Bild 55 verdeutlicht die Abhängigkeit der Biegewechselfestigkeit von der Rohdichte und gleichzeitig ihre Unabhängigkeit von der Holzart.

Walter /Wa1/ verwendete 15 verschiedene Hölzer bzw. Rohdichten und prüfte sie unter einer radial wirkenden Biegebeanspruchung, die Spannungen wirkten dabei senkrecht zur Faser (vgl. Anlage 6.1.). Die Abminderungswerte (Wechselbiegefestigkeit zur statischen Biegefestigkeit) hatten nur geringe Schwankungen von 0,357 bis 0,391.

Die Prüfung mit einer tangential wirkenden Beanspruchung bei 9 verschiedenen Hölzern ergab ähnliche Ergebnisse (vgl. Anlage 6.2.).

Er stellte in der Zusammenfassung seiner Arbeit fest: "Die Dauerschwingfestigkeit steht zur statischen Festigkeit in einer engen Beziehung. Bei reiner Wechselbeanspruchung kann für alle Hölzer bei den verschiedenartigen Prüfungen zwischen der Wechselfestigkeit und der statischen Biegefestigkeit ein lineares Verhältnis aufgezeigt werden." /Wa1/

"Die einzelnen Holzarten weisen keinen grundsätzlichen Unterschied auf, es tritt bei dieser Beziehung kein Unterschied zwischen einzelnen Holzartengruppen (ring- und zerstreutporige Laubhölzer, Nadelhölzer) in Erscheinung, sondern diese Gruppen sind gleichmäßig in dem Gesamtfeld verteilt." /Wa1/

Der Einfluß der Holzart wird durch die Dichten der verschiedenen Holzarten hervorgerufen (vgl. 3.2.2.2.).

Zusammenfassung:

Ein direkter Einfluß der Holzart auf die Dauerfestigkeit kann nicht festgestellt werden. Es besteht ein indirekter Einfluß über die Dichte, die unter den Holzarten verschieden ist.

3.2.2.4. Güteklasse

Kolb /Kol1/ untersuchte Kiefer- und Fichtenvollhölzer in den Abmessungen 8×12×150 cm unter einer Biegeschwellbeanspruchung mit dem Spannungsverhältnis $\kappa=0,33$. Die Hölzer wurden nach Güteklassen I, II, III unterteilt. Die Streuungen der Einzelergebnisse waren "verhältnismäßig hoch." Um eine Auswertung durchführen zu können, wurde die Oberspannung im Biegeschwellversuch auf die entsprechende zulässige Spannung nach DIN 1052 Teil 2 bezogen. Kolb verwendete Oberspannungen mit den 1,5-, 2,0-, 2,5-fachen usw. zulässigen Spannungen. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind in Bild 58 dargestellt:

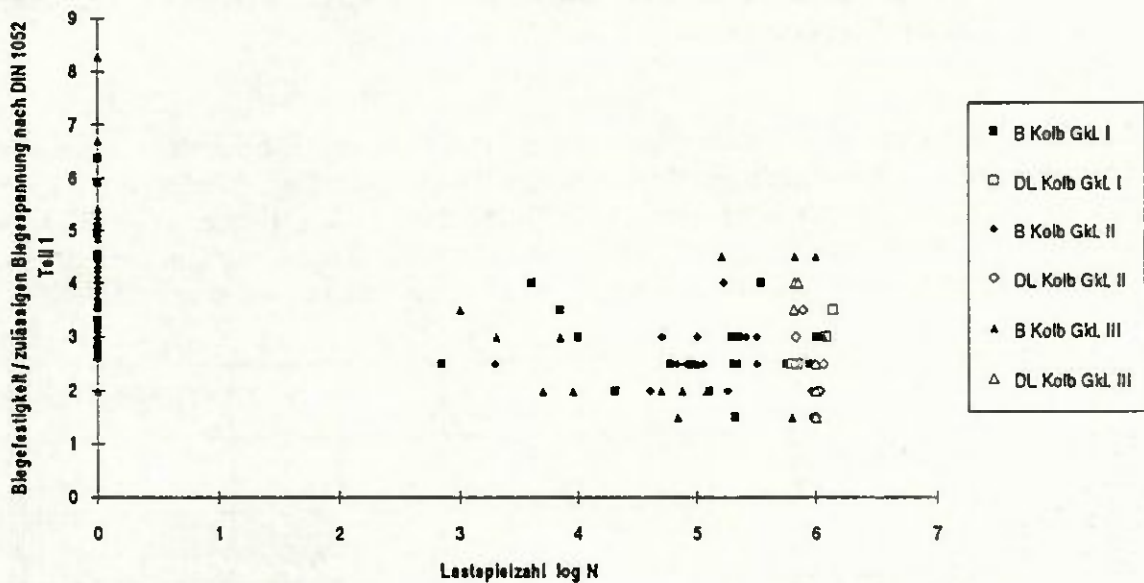


Bild 58: Einfluß der Güteklassen von Vollhölzern unter einer Biegeschwellbeanspruchung

(Anmerkung zu Bild 58: Bei $\log N = 0$ sind die Ergebnisse statischer Versuche angetragen.
DL = Durchläufer, B = gebrochene Probe)

Zusammenfassung:

Aus diesem Bild kann man keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Güteklassen erkennen: Brüche bei der Schwellbeanspruchung mit der 1,5-fachen zulässigen Spannung finden sich für alle Güteklassen.

Anmerkung:

Dies ist ein Hinweis dafür, daß die Holzfehler, die für die Einteilung in verschiedene Güteklassen maßgebend sind, sich nicht auf das Verhältnis der Zeitfestigkeit zur zulässigen und damit indirekt auch zur statischen Festigkeit auswirken.

3.2.2.5. Feuchtigkeit

Verschiedene Autoren stellten mit zunehmender Feuchte eine Verminderung der Dauerfestigkeit fest (z.B.: /Si1/, /Pan1/, /Hay2/).

Auch bei der statischen Festigkeit vermindert sich mit zunehmender Feuchte die Festigkeit. Ob sich die Feuchtigkeit in gleichem Maße auf die Dauerfestigkeit und die statische Festigkeit auswirkt, ist nicht sicher. Von einigen Autoren wurde ein günstiger Abminderungswert mit zunehmender Feuchte festgestellt:

Rose /Ro4/ stellte fest, daß bei einer Druckschwellbeanspruchung für sehr feuchte Proben ein höherer Belastungsgrad (\equiv Abminderungswert) ertragen werden konnte. Er begründete dies mit einem zäheren Verhalten feuchter Hölzer.

Lewis /Lew5/ ermittelte Wöhlerlinien für trockene ("air dry"), behandelte ("treated") und feuchte ("green") Proben aus Southern Pine und Douglas-fir. Dabei verliefen die Kurven für feuchte Proben sehr früh horizontal und schnitten dann andere Kurven (vgl. Bild 59). Das bedeutet, daß für höhere Lastspielzahlen keine zusätzliche Abminderung aufgrund der Feuchtigkeit vorgenommen werden muß. Für geringere Lastspielzahlen wäre dies erforderlich.

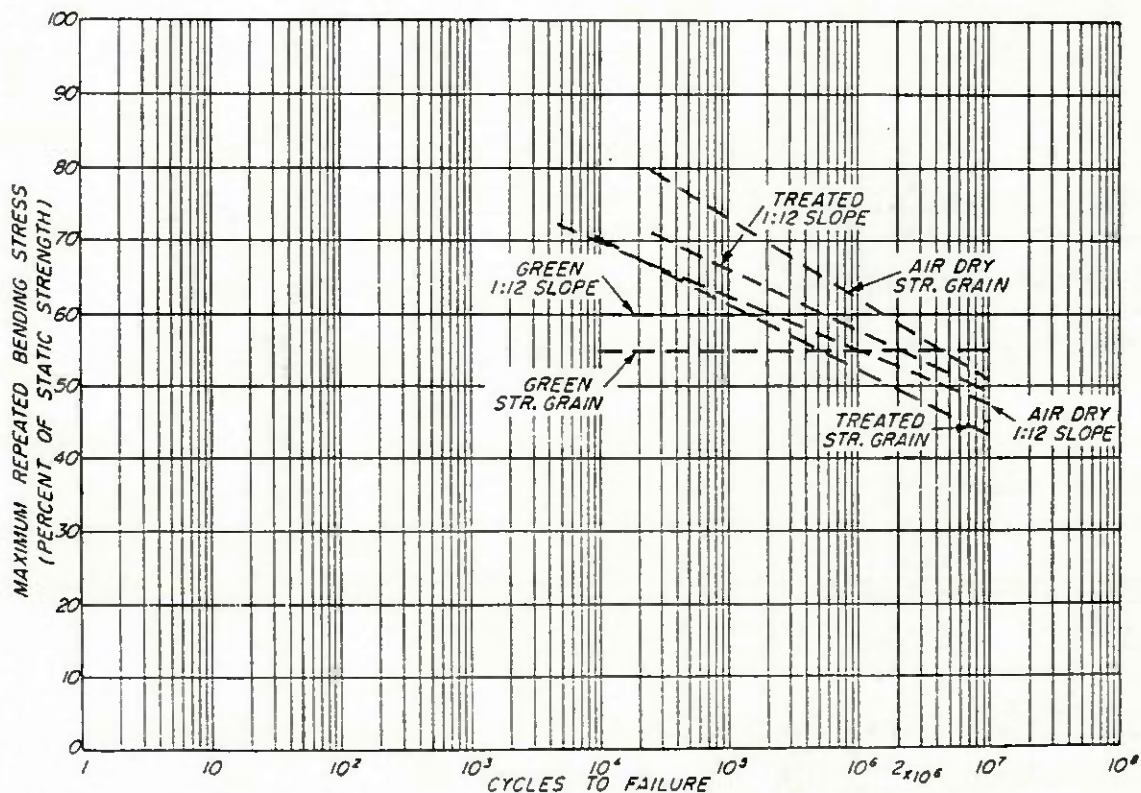


Bild 59: Wöhlerlinien für rechteckige Brückenträger aus Douglas-fir bei $\kappa=0,10$ (fig. 30 aus /Lew5/)

Moore und Kommers /Mo2/ stellten für Proben mit einem höheren Feuchtigkeitsgehalt günstigere Abminderungswerte fest als für Proben, die in einer Trocknungsanlage getrocknet worden waren.

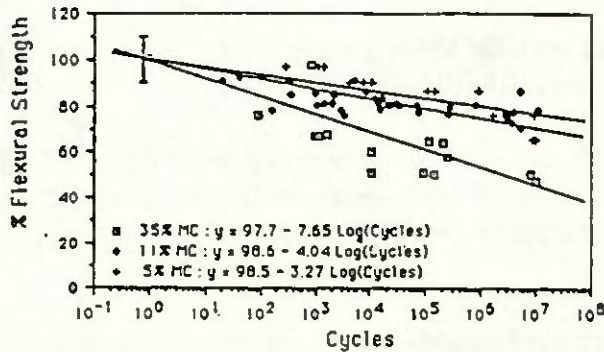


Bild 60: Die Auswirkungen der Feuchtigkeit auf die Abminderungswerte von verleimten Khayafurnieren bei $\kappa=0,1$ (fig. 12 aus /Ts1/)

Tsai und Ansell /Ts1/ dagegen stellten bei ihren Versuchen mit verleimten Khayafurnieren nicht nur einen Festigkeitsverlust, sondern auch eine Verringerung der Abminderungswerte fest (vgl. Bild 60).

Aus diesem Bild ist aber zu entnehmen, daß die Abminderungswerte für nasse verleimte Hölzer noch im Bereich der Abminderungswerte (Mittelwert: 0,52 für $N=10^7$ nach 3.1.1.4.) für verleimte Hölzer liegen.

Freas und Werren /Fr2/ untersuchten verleimte Brettschichtholzbalken aus Eiche unter einer oft wiederholten Biegebeanspruchung. Die Balken wurden mit $3, 6$ und $9 \cdot 10^6$ Lastspielen und 50% der statischen Bruchlast beansprucht. Dabei brach keine der 9 trockenen Proben. Von den wassergesättigten Proben brachen 3 von 9 Proben, die mit 50% der statischen Bruchlast für wassergesättigte Proben beansprucht wurden. Damit schneiden die wassergesättigten Proben schlechter ab. Die Bruchursache lag nicht in der Leimfuge.

Zusammenfassung:

Die Feuchtigkeit wirkt sich auf die Zeit- und Dauerfestigkeit aus. Ihr genauer Einfluß auf die Abminderungswerte ist nicht geklärt. Die Feuchtigkeit scheint bei höheren Lastspielzahlen und Vollholz keinen zusätzlichen Verlust der Tragfähigkeit zu bewirken.

Für verleimte Hölzer sollte der Feuchtigkeitseinfluß auf die Abminderungswerte noch genauer untersucht werden.

3.2.2.6. κ -Wert

Der κ -Wert, in den die Spannungsamplitude und die Mittelspannung bzw. Ober- und Unter-
spannung eingeht, ist ein wichtiger Wert für die Zeitfestigkeit.

Sein Einfluß auf die Zeit- und Dauerfestigkeit, die durch die Oberspannung ausgedrückt wird,
untersuchten drei bekannte Autoren. Tsai und Ansell /Ts1/ machten Biegeversuche, Bonfield
und Ansell /Bon1/ Zug-Druck-Wechselversuche und Sterr /Ste7/ Versuche zum
Abscherverhalten von Leimfugen.

Aus den Ergebnissen, die bei Tsai und Ansell aus Regressionsgeraden entnommen werden, bei
Bonfield und Ansell aus Diagrammen herausgemessen werden müssen und bei Sterr errechnet
werden, läßt sich folgendes Bild 61 erstellen. Dabei wird bei $\kappa=1$ die statische Kurz-
zeitfestigkeit eingesetzt. Der Abminderungswert ergibt dann den Wert 1.

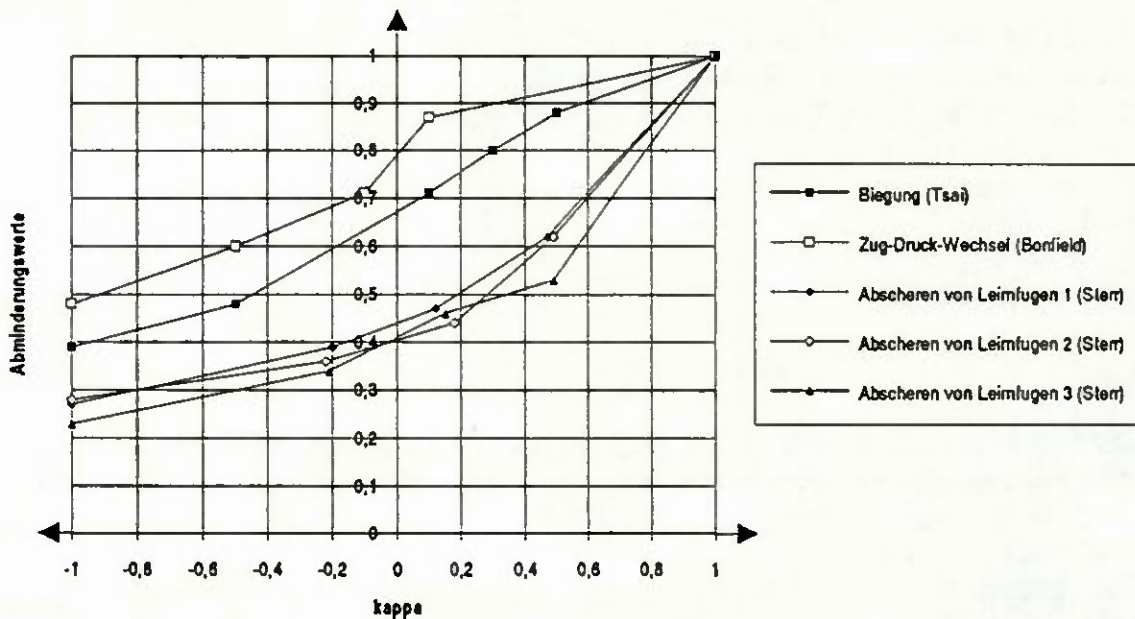


Bild 61: Abhängigkeit einiger Abminderungswerte von dem Spannungsverhältnis κ

Da die Dauerversuche eine bestimmte Zeitdauer haben, nimmt diejenige statische Festigkeit, die dieser Zeitdauer entspricht, aufgrund der Zeitstandfestigkeitseigenschaften ab. Diese Abminderungswerte liegen zwischen dem Wert der statischen Kurzzeitfestigkeit, also 1, und dem Wert der Dauerstandfestigkeit, der bei ca. 0,6 liegt.

Sterr gibt neben den Werten für die statischen Kurzzeitversuche auch die Abminderungswerte für die "Dauerstandfestigkeiten" an. Diese Werte, die zwischen 0,64 und 0,78 liegen, werden im folgenden Bild 62 für $\kappa=1$ eingesetzt.

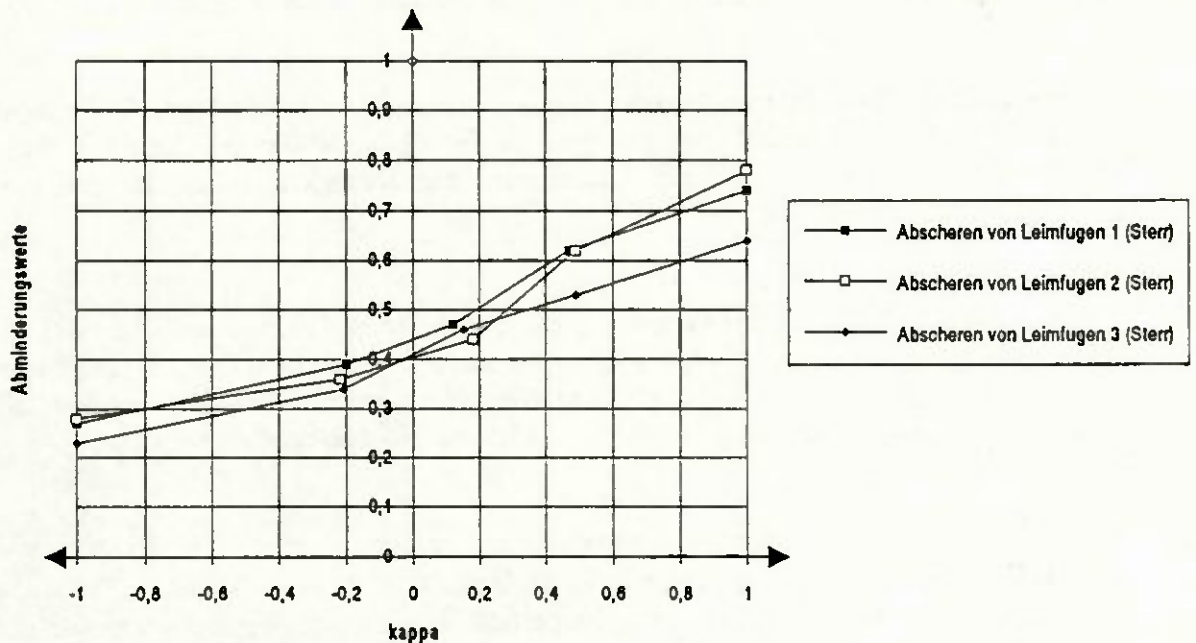


Bild 62: Abhängigkeit einiger Abminderungswerte von dem Spannungsverhältnis κ unter Berücksichtigung von Zeitstandfestigkeiten

Bewertung:

Es wird für vertretbar gehalten, in den Bereichen $-1 \leq \kappa \leq 0$ und $0 \leq \kappa \leq 1$ jeweils einen linearen Verlauf zu verwenden.

3.2.2.7. Probengröße

Sieminski /Si1/ stellte einen Unterschied zwischen zwei verwendeten Hölzern (Holz A: größere Probenstäbe und Holz B: kleinere Probenstäbe) unter nahezu gleichen Versuchsbedingungen fest: Während bei Holz A das Verhältnis der Biegeweichfestigkeit zur statischen Biegefestigkeit von 0,39 bis 0,45 (Mittelwert: 0,42) reichte, war es bei Holz B mit 0,35 bis 0,38 (Mittelwert: 0,36) deutlich geringer.

Die Abweichungen bezüglich Spätholzanteil, Rohdichte erscheinen nach Meinung der Verfasser nicht ausreichend, den Unterschied zu erklären. Übrig bleibt die Größe der Proben und die verschiedenen Prüfeinrichtungen, die zwischen Holz A und B differierten.

Fuller und Oberg /Fu1/ führten Rotationsbiegeversuche mit zwei verschiedenen Probengrößen bei gleichem Material durch. Dabei war zwar für die größere Probe die Dauerfestigkeit geringer als für die kleinere; aber die Verhältnisse der Dauerfestigkeiten zu den statischen Festigkeiten waren vergleichbar.

Bonfield und Ansell /Bon1/ verwendeten für ihre Zug-Druck-Wechselversuche zwei verschiedene Probengrößen. Die größeren Proben hatten die vierfachen Querschnittsflächen. Die Ergebnisse der größeren Proben lagen nahe denen der normalen Proben, eher über als unter ihnen. Ein eindeutiger Einfluß der Probengröße konnte nicht festgestellt werden.

Gillwald /Gil3/ untersuchte verschiedene Hölzer zunächst unter einer Biegeschwellbeanspruchung und einem Querschnitt von 9×9 cm². Danach prüfte er die kleineren Proben, die aus den gebrochenen großen Prüfkörpern hergestellt wurden, im Rotationsbiegeversuch. Die größeren Proben hatten mehr Fehlstellen, die dann zur Festigkeitsminderung führten. Gillwald stellte fest, "daß durch den Asteinfluß die Dauerschwingfestigkeit ganz wesentlich herabgesetzt wird."

(Anmerkung: Auch bei der statischen Prüfung wird die Festigkeit durch den Asteinfluß wesentlich herabgesetzt. Man kann somit nicht auf das Verhalten der Abminderungswerte schließen.)

Zusammenfassung:

Versuche mit kleineren Proben erbringen eine größere Zeit- bzw. Dauerfestigkeit. Der Einfluß auf die Abminderungswerte wird in den vorliegenden Berichten unterschiedlich angegeben.

Bewertung:

Es erscheint so, als bewirke die Probengröße keine großen Veränderungen der Abminderungswerte.

Man sollte jedoch nicht von Ergebnissen zweier unterschiedlicher Kleinproben auf Körper in Bauteilgröße schließen.

Deswegen wird vorgeschlagen, die k_{fat} -Werte nur dann zu verwenden, wenn diese auch durch Versuche mit Proben in Bauteilgröße belegt werden können.

3.2.2.8. Nichtparalleler Rand-Faser-Verlauf

Lewis /Lew5/ untersuchte Vollholzproben mit großen Abmessungen unter einer Biegeschwellbeanspruchung ($\kappa=0,1$). Die Ränder der Proben hatten eine Neigung zur Faser von 1:12 ($\cong 4,8^\circ$). Es konnte bei trockenen Proben neben geringeren ertragbaren Festigkeiten auch geringere d.h. ungünstigere Abminderungswerte im Vergleich zu den Proben mit einem parallelen Faserverlauf festgestellt werden. Lewis gab die Unterschiede bei $2 \cdot 10^6$ Lastspielen folgendermaßen an:

Tabelle 5: Abminderungswerte bei parallelem und nichtparallelem Rand-Faser-Verlauf:

Holzart:	paralleler Verlauf ("straight grain")	nichtparalleler Verlauf ("slope of grain")
Southern Pine	0,60	0,50
Douglas-fir	0,60	0,55

Eine Verringerung der Abminderungswerte durch den nichtparallelen Verlauf konnte auch bei den seitlich gekerbten Proben, die zur Prüfung des Schubverhaltens hergestellt wurden, festgestellt werden.

Lewis beschrieb das gewöhnliche Versagen von Proben, die einen parallelen Verlauf hatten, mit einem Versagen der Druckzone und einem anschließenden Versagen der Zugzone. Die Proben, die einen nichtparallelen Verlauf besaßen, versagten gewöhnlich durch Zug senkrecht zur Faser ohne ein Versagen der Druckzone.

Zusammenfassung:

Ein nichtparalleler Rand-Faser-Verlauf führt zu ungünstigeren Abminderungswerten.

3.2.2.9. Klimawechsellagerung

Kolb /Kol1/ untersuchte den Einfluß einer Klimawechsellagerung vor der Dauerscherfestigkeitsprüfung verleimter Hölzer (vgl. 3.1.1.6.). Nach der Klimawechsellagerung wurden alle Proben entsprechend den Proben der anderen Reihen zurückklimatisiert. "Die Klimawechsella- gerung hatte auf die erreichten Bruchspannungen keinen merklichen Einfluß." /Kol1/

Kollmann und Schmidt /Kol14/ untersuchten Holzteile aus ca. 30 Jahre alten Sendetürmen, die der Witterung und wiederholten Beanspruchungen aus Windlasten ausgesetzt waren. Sie stellten dabei eine größere Sprödhheit des Materials und Zerstörungen des Holzgefüges fest. "Diese Zerstörungen können nur durch die Dauerbeanspruchung (infolge der Windkräfte) der Bauteile des Sendeturms, wahrscheinlich im Zusammenwirken mit wechselnden Schwindspannungen bei den unvermeidlichen Klimaschwankungen über viele Jahre hervorgerufen worden sein. Die Festigkeitseinbuße durch Gefügezerrüttung wurde dann auch durch mechanische Prüfungen (...) nachgewiesen." /Kol14/

Hayashi et al. /Hay3/ verwendeten Nagelplattenverbindungen, die vorher mehreren Feuchtigkeitsänderungen ausgesetzt worden waren. Dabei zeigte sich, daß die Ermüdungsfestigkeit stärker als die statische Festigkeit beeinflußt worden war.

Anmerkung:

Für eine Klimawechsella- gerung während den oft wiederholten Beanspruchungen liegen keine Versuche vor.

3.2.2.10. Vorbehandlung mit Holzschutzmitteln

1) Zeit- und Dauerfestigkeit

Lewis /Lew5/ untersuchte Vollholzproben mit großen Abmessungen unter einer Biegeschwellbeanspruchung ($\kappa=0,1$). Einige Proben wurden mit Holzschutzmitteln behandelt.

-Die Reihenfolge der Vorbehandlung für Proben aus Southern Pine war:

Dampfbehandlung, Vakuum, Druck, Einbringen des Holzschutzmittels unter Druck, Vakuum.

-Die Reihenfolge der Vorbehandlung für Proben aus Douglas-fir war:

Erhitzen und Einbringen des Holzschutzmittels, Druck, Vakuum.

Die Vorbehandlungen wirkten sich ungünstig auf die Zeitfestigkeiten beider Hölzer aus. Auch die Abminderungswerte waren im Vergleich zu trockenen Proben mit einem parallelen Rand-Faser-Verlauf geringer.

Die statische Biegefestigkeit von behandelten Proben aus Southern Pine war im Vergleich zu unbehandeltem Material 9 bis 15% geringer, die Schubfestigkeit um ca. 22%. Die Biegefestigkeit von Douglas-fir wurde nicht so stark reduziert: im Mittel ca. 5% bei der Biege- und ca. 17% bei der Schubfestigkeit. /Lew5/

Bewertung:

Vorbehandlungen, die mit der Kesseldruckimprägnierung vergleichbar sind, wirken sich ungünstig auf die Zeit- und Dauerfestigkeit aus. Es werden durch eine Vorbehandlung sowohl die Festigkeiten geringer als auch die Abminderungswerte ungünstiger. (3.2.2.10.)

2) Restfestigkeit

Gillwald /Gil5/ untersuchte die Restfestigkeit von Holzmasten, die mit einer Biegeschwellbeanspruchung mit $3 \cdot 10^6$ Lastspielen belastet wurden. "Die Festigkeitsminderung liegt zwischen 6,4 und 17,4%, die Verminderung des Elastizitätsmoduls zwischen 4,2 und 12,2%." /Gil5/

Die Holzmasten waren "UA-Salz-getränkt" oder "Steinkohlenteeröl-getränkt". Die Restfestigkeitsminderungen lagen bei trockenen, unbehandelten Proben zwischen 6,4 und 6,8%; bei trockenen behandelten Proben zwischen 6,7 und 9,8% und bei feuchten, behandelten zwischen 11,6 und 17,4%.

"Bei feuchten Mastabschnitten treten größere Unterschiede auf, öl- und salzgetränkte Mastabschnitte unterscheiden sich nur unwesentlich hinsichtlich ihrer Festigkeitsminderung." /Gil5/

Bewertung:

Ein hoher Restfestigkeitsverlust getränkter Proben konnte hier nicht festgestellt werden.

3.2.2.11. Temperatur

Pana et al. /Pan1/ untersuchten den Einfluß größerer Temperaturdifferenzen und stellten ihre Ergebnisse in Bild 63 dar:

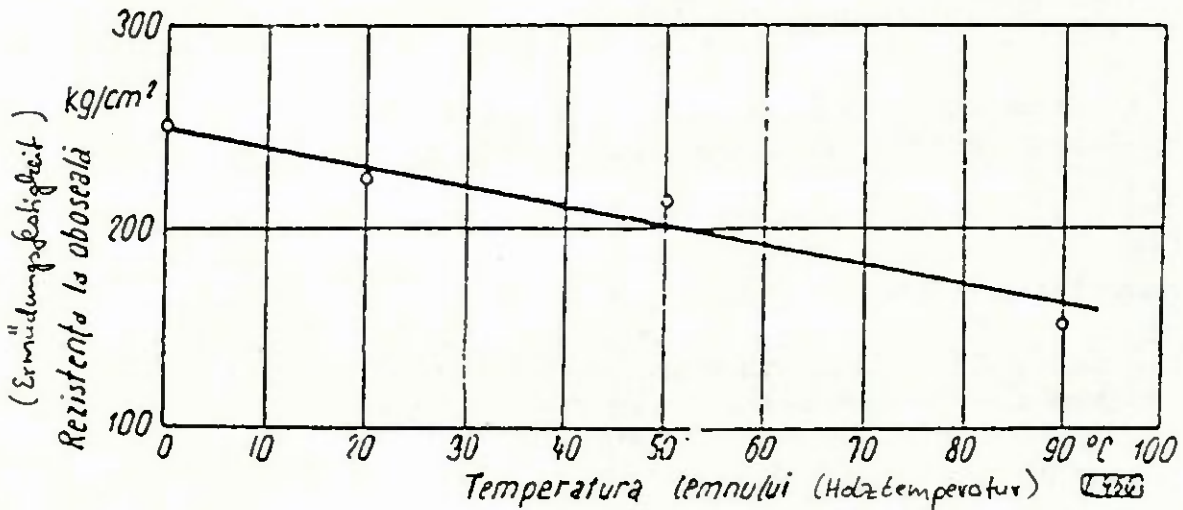


Bild 63: Veränderung der Dauerfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur (fig. 8 aus /Pan1/)

Glos /Gl5/ berichtet von einer Festigkeitsabnahme mit zunehmender Temperatur. Er gibt diese für die Biegefestigkeit mit 5% je 10°C (Basis: +20°C, $u=10-15\%$) an. Das entspricht etwa der in Bild 63 angegebenen Veränderung der Dauerfestigkeit. Es kann somit gesagt werden, daß die Abminderungswerte nicht von der Temperatur abhängig sind.

Sonstige Ergebnisse:

In Eberswalde /In1/ wurde auch der Einfluß von Temperaturänderungen untersucht. Temperaturschwankungen verursachen irreversible Durchbiegungszunahmen und damit eine Verringerung der Bruchlastspielzahl. "Bei der Ermittlung der Wechselbiegefestigkeit nach dem Wöhlerverfahren würden also Temperaturschwankungen während der Beanspruchung zu einer Verschiebung der Wöhlerkurve nach kleineren Lastspielzahlen hin führen. Das besagt jedoch nicht, daß auch die Biegewechselfestigkeit kleiner wird." /In1/

Bewertung:

Die Auswirkungen unterschiedlicher Temperaturen auf die Dauerfestigkeit sind gering. Die Temperatur hat aber keinen Einfluß auf die Abminderungswerte.

3.2.3. Anwendung einer Schädigungshypothese (bzw. Schadensakkumulationshypothese)

Einleitung:

Holz verliert sowohl durch permanente (Zeitstandfestigkeit), wie auch durch oft wiederholte Einwirkungen (Zeitfestigkeit) an Festigkeit.

Mit Hilfe von Schädigungshypothesen versucht man aus den Versuchen mit einer bestimmten Beanspruchungsart, die meist nur mit konstanten Spannungen bzw. Spannungsamplituden durchgeführt werden, auf die Lebensdauerlinie einer regellosen (d.h. die Beanspruchungen haben verschieden große Spannungen und Einwirkungszeiten) und damit realen Betriebsbelastung zu schließen.

Diejenigen, die die Zeitstandfestigkeit des Holzes betreffen sind bereits in 2.4.1.3. erwähnt.

1) Schädigungshypothese nach Palmgren-Miner

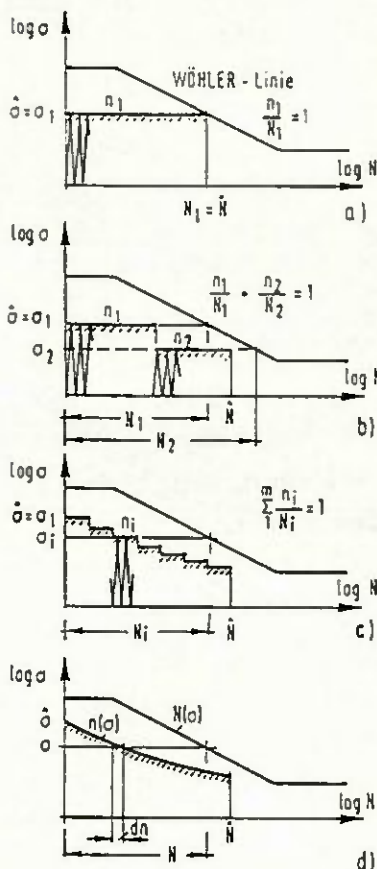


Bild 64 : (Bild 103 aus /Pet2/)

Die älteste und in der Anwendung verbreitetste ist die lineare Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner. Die Hypothese geht von der Überlegung aus, daß bei einstufiger Beanspruchung, die im Wöhlerversuch verwendet wird, eine vollständige Schädigung, d.h. Bruch, dann eintritt, wenn unter der Spannung σ_1 die Betriebslastwechselzahl n_1 die zugehörige Bruchlastwechselzahl N_1 erreicht (vgl. Bild 64 a)). Dieser Fall ist trivial, der Quotient n_1/N_1 ist gleich Eins. Liegt ein zweistufiges Kollektiv mit den Spannungen σ_1 und σ_2 vor, tritt der Ermüdungsbruch unter der gemeinsamen Lastwechselzahl $N=n_1+n_2$ dann ein, wenn die Summe der Schädigungsquotienten n_1/N_1 und n_2/N_2 Eins wird (vgl. Bild 64 b)). Entsprechend wird diese Hypothese bei mehrstufiger und kontinuierlicher Kollektivformen erweitert (vgl. Bilder 64 c) und d)):

m-stufiges Kollektiv mit den Stufen $i=1$ bis $i=m$:

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (17 a)$$

kontinuierliches Kollektiv:

$$\int_{n=0}^N \frac{dn}{N} = 1 \quad (17 b)$$

Dabei wird die Reihenfolge der Beanspruchungen nicht berücksichtigt. Die lineare Schädigungshypothese geht davon aus, daß Spannungen, die unter einer Dauerfestigkeitsgrenze liegen, keine Schädigung bewirken. (nach /Pet2/)

2) Palmgren-Miner im Holzbau

Hayashi und Sasaki /Hay5/ untersuchten Holzverbindungen mit Nagelplatten unter Biegeschwellbeanspruchung:

Die Restermüdungslebensdauer nahm proportional mit der Zahl der Lastwiederholungen der Vorbelastung ab. Die lineare Schädigungshypothese wurde angewandt, um die Restermüdungslebensdauer einschätzen zu können.

Der Durchschnitt der Summe $\sum n_i/N_i$ beim Versagen der Verbindungen reichte von 0,71 bis 0,93 (Anm.: kleiner als 1). Die Differenz zwischen den Werten der ersten und der zweiten Belastung bzw. die Reihenfolge der Beanspruchung hatten keinen Effekt auf dieses Verhältnis. /Hay5/

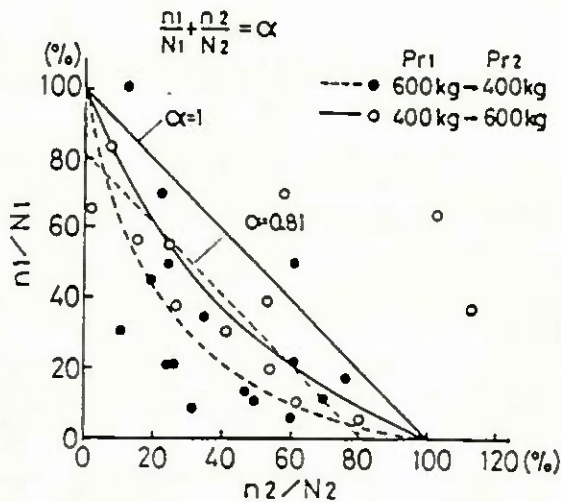


Bild 65: Beziehung zwischen n_1/N_1 und n_2/N_2 und die Anwendung der linearen Schädigungshypothese (fig. 7 aus /Hay5/)

Pr_1, Pr_2 := verwendete Zugbeanspruchungen

In Bild 65 werden Versuchsergebnisse dargestellt. Direkt aus dem Diagramm kann man im Gegensatz zu den Feststellungen von Hayashi und Sasaki feststellen, daß eine zuerst aufgebrachte höhere Belastung ungünstiger wirkte als eine niedere.

Bewertung:

Die Versuche mit Nagelplattenverbindungen, die schlechte Zeit- und Dauerfestigkeitseigenschaften haben (vgl. 3.1.2.3.), erscheinen zum Nachweis einer Schädigungshypothese relativ ungeeignet. Die Durchschnittswerte der $\sum n_i/N_i$ liegen bei dieser Untersuchung kleiner als Eins, so daß der Eindruck entstehen könnte, dieser Ansatz sei für den Holzbau zu ungünstig. In der Literatur (z.B.: /Mi3/) sind teilweise noch kleinere Werte zu finden.

Ergebnis:

Die Anwendbarkeit einer Schädigungshypothese für Holz und Holzverbindungen kann nicht belegt werden. Hier sind noch Versuche notwendig. Durch die in der Praxis auftretenden Beanspruchungen, die nur in Ausnahmefällen näherungsweise als Einstufenbeanspruchung (z.B. Glockentürme) auftreten, ist die Entwicklung einer geeigneten Schädigungshypothese notwendig, um die verschiedenen Lastkollektive erfassen zu können.

3) Erweiterte Schadensakkumulationshypothesen aus der Zeitstandfestigkeit

Barrett und Foschi /Bar8/ versuchten die Schadensakkumulationshypothesen für die Zeitstandfestigkeit (vgl. 2.4.1.3.) auf die Zeitfestigkeit zu übertragen. Dazu wurde die Zeitdauer eines Lastspiel mit einer bestimmten Beanspruchung, die einen bestimmten Schwellenwert überschreitet, als schädigend angesetzt. Damit ließen sich durch weitere Rechnungen die Bruchlastspielzahlen ermitteln.

Bewertung:

Um diese Hypothese bewerten zu können, wird folgende Abschätzung durchgeführt:

Wenn die oft wiederholte Beanspruchung ohne einen weiteren Faktor in die Rechnung eingeht, bedeutet dies, daß sie bei gleichem Beanspruchungsniveau der oft wiederholten Beanspruchung im Vergleich zu der permanenten Beanspruchung eine geringere Zeitdauer einwirkt als die permanente Beanspruchung. Dies resultiert aus dem annähernd sinusförmigen Verlauf der oft wiederholten Beanspruchung. Damit schädigt sie weniger als die permanente Beanspruchung, die einen rechteckigen Verlauf hat, und es ergäbe sich für die oft wiederholte Beanspruchung eine längere Zeit bis zum Versagen.

Für eine permanente Biegebeanspruchung von 60% der Kurzzeitfestigkeit ergibt sich nach Pearson /Pe2/ eine mögliche Einwirkungsdauer von ca. 3,6 Jahren. Für die gleiche oft wiederholte Beanspruchung tritt ein Bruch nach ca. $2 \cdot 10^6$ Lastspielen (Werte von Lewis /Lew5/). Diese Beanspruchungszeit dauert bei einer Frequenz von 8,3 Hz nur 2,8 Tage.

Damit soll gezeigt werden, daß die oft wiederholte Beanspruchung nicht ohne Weiteres mit Hilfe der Schädigungshypothesen der Zeitstandproblematik behandelt werden kann.

Ausblick:

Die Schädigungshypothesen der Zeitstandproblematik (vgl. 2.4.1.3. Gleichung (8)) können durch ein weiteres Glied ergänzt werden, das die oft wiederholte Beanspruchung (Zeitfestigkeit) entsprechend berücksichtigt:

Dieses Glied könnte den Schädigungsgrad α_i , die Beanspruchung mit der Oberspannung σ_o und dem Spannungsverhältnis κ berücksichtigen. Die oft wiederholte Beanspruchung läßt sich auch mit anderen Werten wie dem Spannungsausschlag σ_a und der Mittelspannung σ_m charakterisieren.

$$\frac{d\alpha}{dN} = F(\alpha_i; \sigma_o; \kappa) \quad \text{oder:} \quad \frac{d\alpha}{dN} = F(\alpha_i; \sigma_a; \sigma_m) \quad (18 \text{ a, b})$$

4) Rechnung mit Palmgren-Miner

Die oft wiederholte Beanspruchung in der Praxis entspricht i.d.R. nicht der Beanspruchung des Einstufenversuches sondern tritt als Lastkollektiv auf. Daher ist es notwendig, mit einer Schädigungshypothese zu arbeiten. Für die oft wiederholte Beanspruchung läßt sich eine solche, die durch entsprechende Versuche eindeutig belegt wird, nicht finden. (s. oben)

Es wird mit der Schädigungshypothese nach Palmgren-Miner und unter einfachsten Randbedingungen gerechnet, um die Auswirkungen von Lastkollektiven abschätzen zu können. Zwei Zeitfestigkeitskurven, die aus Werten von verschiedenen Autoren zusammengesetzt worden sind, werden untersucht. Es handelt sich dabei um die Biegeschwell- und Biegewechselbeanspruchung.

Für die Lastkollektive werden Normalverteilungen mit unterschiedlichen Variationskoeffizienten ($V=0,1; 0,2; 0,3$) angenommen. Die Lastkollektive werden in Blöcke mit bestimmten Lastspielzahlen und bestimmten Beanspruchungshöhen unterteilt (vgl. Bild 64c).

Danach wird mit den Wöhlerlinien, die aus dem Mittelwert der Versuchsergebnisse gebildet worden sind, ein Mittelwert der Einwirkungen $\bar{\sigma}$ so gebildet, daß er die Gleichung (17a) näherungsweise erfüllt:

$$0,95 \leq \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \leq 1,05$$

Aus dem Mittelwert $\bar{\sigma}$ wird unter Berücksichtigung des Variationskoeffizienten V die 95%-Fraktile der Einwirkungen σ_{95} errechnet:

$$\sigma_{95} = \bar{\sigma} * (1 + 1,645 * V) \quad (19)$$

(Anm.: Die 95%-Fraktile ist i.d.R. die für die Bemessung maßgebende charakteristische Einwirkung, die in den Lastannahmen angegeben wird. Für andere Fraktilwerte der Einwirkungen müssen andere Schädigungsbeiwerte gebildet werden.)

Das Verhältnis der Zeitfestigkeit bei 10^7 Lastspielen $f_{N=10^7}$, die durch die Wöhlerlinie festgelegt ist, zu dieser 95%-Fraktile der Einwirkungen σ_{95} wird mit dem Schädigungsbeiwert γ_{fat} (fat:=fatigue) bezeichnet:

$$\gamma_{fat} = \frac{f_{N=10^7}}{\sigma_{95}} \quad (20)$$

Mit γ_{fat} berücksichtigt man, daß nicht alle der oft wiederholten Einwirkungen der 95%-Fraktile entsprechen und ein geringer Teil der Einwirkungen oberhalb die Zeitfestigkeit $f_{N=10^7}$ überschreitet und somit das Holz mehr schädigt und damit schneller einen Ermüdungsbruch herbeiführt als die 95%-Fraktile.

Die Anzahl der 5% der Einwirkungen, die die 95%-Fraktile überschreiten, beträgt bei einer Gesamtlastspielzahl von 10^7 bereits $5 * 10^5$ Lastspiele und ist damit sehr groß. Einige Autoren geben bei dieser Lastspielzahl bereits eine "Dauerfestigkeit" an (vgl. 3.2.1.1.). Weil die Größe dieser Lastspiele über der angesetzten 95%-Fraktile liegen, muß die 95%-Fraktile erhöht werden. Der γ_{fat} -Wert wird damit größer als 1.

Die Ergebnisse dieser Rechnung sind in Tabelle 6 abgedruckt:

Tabelle 6: γ_{fat} -Werte, die nach der Palmgren-Miner-Hypothese errechnet werden.

Schädigungsbeiwert γ_{fat}	Biegeschwellen			Biegewechsel		
	V=0,1	V=0,2	V=0,3	V=0,1	V=0,2	V=0,3
γ_{fat} (95%-Fraktile)	1,15	1,28	1,37	1,13	1,25	1,35

Aus Tabelle 6 wird deutlich, daß mit größeren Streuungen der Einwirkungen die Bemessung ungünstiger wird.

Bewertung:

Diese Rechnung dient dazu, für das Bemessungsbeispiel Anhaltswerte zu haben und Größenordnungen zu erkennen. Es sind genauere Untersuchungen notwendig, um eine Schädigungshypothese zu verwenden.

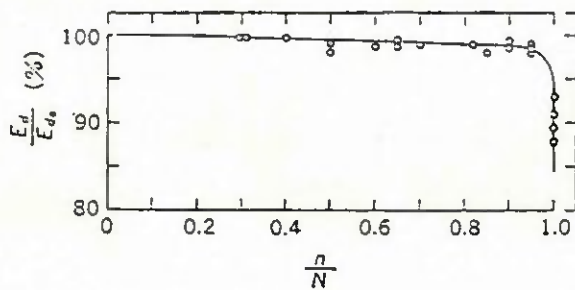
Die so ermittelten γ_{fat} -Werte sind kleiner als der im Eurocode 5, Tabelle 2.3.3.1 (N16/) angegebene Teilsicherheitsbeiwert für die veränderliche Einwirkungen γ_Q , der 1,5 beträgt. Der Grund dafür ist, daß bei einer oft wiederholten Beanspruchung Überlastungen mit einer geringen Lastspielzahl vorkommen dürfen, wenn diese durch den statischen Nachweis im Hinblick auf das Bruchversagen infolge einer einmaligen Überlastung abgedeckt werden.

3.2.4. Verformungen

Es werden nur die wichtigsten Literaturstellen herangezogen, um das Verhalten des Elastizitätsmoduls und der Verformungen unter oft wiederholten Beanspruchungen zu beschreiben.

1) Verhalten des Elastizitätsmoduls

Der Elastizitätsmodul nimmt während der oft wiederholten Beanspruchung immer leicht ab. /Mak3/, /Im7/ (vgl. Bild 66)



E_d/E_{d0} : ratio of dynamic YOUNG's modulus after certain cycles (E_d) to dynamic YOUNG's modulus before test (E_{d0})

n/N : cycle ratio, ratio of number of cycles (n) to number of cycles to failure (N).

Bild 66: Beziehung zwischen dem dynamischen Elastizitätsmodul und dem Lastspielverhältnis (fig. 6 aus /Im7/)

Kurz vor dem Bruch scheint er schlagartig abzunehmen. Dies ist auf den Bruch einzelner Fasern zurückzuführen.

Rose /Ro4/ untersuchte das mechanische Verhalten von Kiefernholz unter einer Zug- und Druckschwellbeanspruchung. "Die Änderung (Anm.: des Elastizitätsmoduls) lag bei der Druckschwelllast zwischen +5% und -10% (Austrocknung korrigiert), wobei sich im Mittel eine Verringerung ergab. Der E-Modul änderte sich bei Zugbelastung zwischen +18% und -5%, was im Durchschnitt eine Vergrößerung bedeutete. Nur bei Druckproben mit großen Feuchtigkeiten und hohen Temperaturen konnte eine Abhängigkeit der E-Moduländerung vom Belastungsgrad statistisch nachgewiesen werden; und zwar dahingehend, daß bei großer relativer Belastung eine stärkere Verringerung eintrat." /Ro4/

"Der Kriechverlauf über die Lastwechselzahl steigt zu Beginn der dynamischen Belastung steil an und nähert sich bei solchen Proben, die während der Schwingbelastung nicht gebrochen sind, asymptotisch einem Endwert. Bei der üblichen Lastwechselzahl von $3,5 \cdot 10^6$ war dieser Endwert allerdings nur bei kleinen Belastungsgraden ($B=0,50$) nahezu erreicht. Bei Druckproben konnte jedoch festgestellt werden, daß bei relativen Beanspruchungen bis 70% die Zunahme nach $13,5 \cdot 10^6$ Lastspielen so gering ist, daß sie praktisch nicht mehr zu messen war (...). Proben, die innerhalb der dynamischen Belastungsperiode gebrochen sind, zeigten eine verhältnismäßig große und vor dem Bruch in der Regel progressiv steigende Kriechgeschwindigkeit. Das dynamische Kriechen verläuft damit analog zu demjenigen bei statischer Dauerbelastung." /Ro4/

Freas und Werren /Fr2/ untersuchten verleimte Brettschichtholz balken aus Eiche unter einer oft wiederholten Biegebeanspruchung. Die Balken waren mit $3, 6$ und $9 \cdot 10^6$ Lastwechseln und 50% der statischen Bruchlast beansprucht worden. Dabei brach keine der 9 trockenen Proben. Die Prüfungen der Elastizitätsmoduln ergaben nach der oft wiederholten Beanspruchung stets größere Werte als vor der oft wiederholten Beanspruchung. Von den wassergesättigten Proben brachen 3 von 9 Proben, die mit 50% der statischen Bruchlast für wassergesättigte Proben beansprucht worden waren. Die Prüfungen der Elastizitätsmoduln für wassergesättigte Proben ergaben nach der oft wiederholten Beanspruchung kleinere und größere Werte (93 bis 120%) als vor den oft wiederholten Beanspruchung.

Eine italienische Untersuchung von Cecotti et al. /Ce2/ ergab, daß bei Brettschichtträgern aus Tanne und Pappel eine oft wiederholte Beanspruchung (50000 Lastspiele im Schwellbereich) keinen Einfluß auf die Verformung und Durchbiegung im Vergleich zur ersten Beanspruchung hatte.

Kufner /Ku1/ untersuchte die Änderung der Festigkeit und des Elastizitätsmoduls von Kiefernholz infolge einer oft wiederholten Beanspruchung. Er stellte in seiner Zusammenfassung fest: "Kiefernholz wurde im Zug- und Druckschwellversuch und im Biegewechselversuch bei Versuchstemperaturen zwischen 20° und 50°C und einem Feuchtegehalt von 7 bis 24% untersucht. Die Lastwechselzahl betrug bei den Zug- und Druckschwellversuchen $2,2 \cdot 10^6$, bei den Biegewechselversuchen $1,85 \cdot 10^6$, die Spannungsamplitude lag bei den Druck- und Biegeversuchen bei 50%, bei den Zugversuchen bei 36% der voraussichtlichen Bruchfestigkeit. Die statistische Auswertung zeigte, daß die Dauerbeanspruchung keinen gesicherten Einfluß auf den Elastizitätsmodul hat." /Ku1/

Götze und Melle /Göt3/ untersuchten den Einfluß einer oft wiederholten Zug-Druck-Wechselbeanspruchung auf den Biegeelastizitätsmodul bei Kiefern- und Rotbuchenholz. "Der statische Elastizitätsmodul wurde durch eine vorausgegangene Dauerschwingbeanspruchung im Bereich $Z=0 \dots 2 \cdot 10^6$ (Anm.: Lastspiele) nicht beeinflusst." /Göt3/

Gillwald /Gil1/ untersuchte die Formänderungen von Buchen- und Kiefernholz unter oft wiederholten Biegebeanspruchungen. Dabei stellte er folgendes fest: "Sowohl bei Kiefer als auch bei Buche ist ein geringes Ansteigen der Dehnung in der Zugzone bei Beanspruchungen zu erkennen, die unterhalb der Dauerfestigkeitsgrenze liegen. Wird die Spannung aber bis in die Nähe der Dauerfestigkeitsgrenze erhöht, so wächst die Formänderung mit zunehmenden Lastwechseln stetig, so daß ein von der Belastungszeit abhängiger Formänderungsverlauf festgestellt werden kann. Es ergibt sich also auch hierbei, daß bei Beanspruchung unterhalb der Dauerfestigkeitsgrenze ein weitgehend elastisches Verhalten in den hauptbeanspruchten Zonen zu erkennen ist, daß aber in der Nähe der Dauerschwingfestigkeit der plastische Anteil ständig wächst." /Gil1/ Dies wird in Bild 67 für Buchenholz, das eine "Dauerfestigkeit" von 430 kp/cm^2 ($\cong 43 \text{ N/mm}^2$) hat, dargestellt.

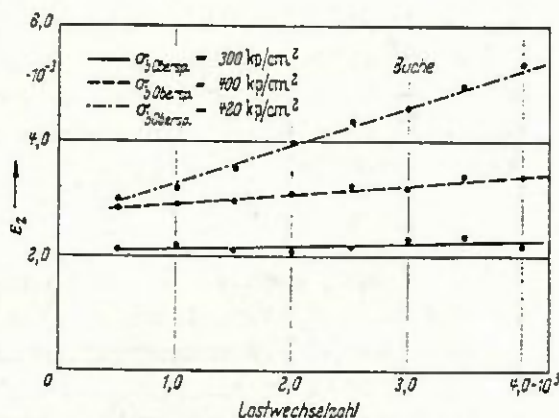


Bild 67: Formänderungen in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl bei verschiedenen oft wiederholten Beanspruchungen für Buche (Bild 26 aus /Gil1/)

Zusammenfassung:

Die Auswirkungen einer oft wiederholten Beanspruchung auf den Elastizitätsmodul und die Verformungen sind solange gering, bis die Probe zu brechen beginnt. Aus der Literatur sind für den Elastizitätsmodul sowohl gleiche, geringfügig niedere und geringfügig höhere Werte zu entnehmen.

Kurz vor dem Bruch treten größere Verformungen auf.

2) Verformungen von Verbindungsmitteln

Möhler und Maier /Mö6/ untersuchten eine Reihe von Verbindungsmitteln unter schwellender und auch wechselnder Beanspruchung.

"Bei Schwellversuchen mit $P_0 = \text{zul } P$ ergab sich mit Ausnahme der Gang-Nail-Platten auch nach 10^6 Lastspielen und mehr keine Zerstörung des Holzes oder des Verbindungsmittels. Die bleibenden und die Gesamtverschiebungen nahmen mit zunehmender Lastspielzahl zu, die elastischen Verschiebungen änderten sich nur wenig. Es muß im allgemeinen damit gerechnet werden, daß die bleibende Verschiebung, die sich bei der 13. Belastung einstellt, mit zunehmender Lastspielzahl auf das Mehrfache, die Gesamtverschiebung auf das 1,5 bis 2-fache anwächst. Obwohl bei den Versuchen der Grenzwert von 1,5 mm für die Gesamtverschiebung nicht überschritten wurde, empfiehlt es sich, bei der Schwellbelastung die zulässigen statischen Belastungen der Verbindungsmittel nicht voll auszunutzen.

Bei den Versuchen mit wechselnder Last mit Nägeln und Appeldübeln traten Dauerbrüche ein, wenn die Lastgrenzen über 50% der zulässigen statischen Belastung lagen. Bei Nägeln ist bei $0,50 \text{ zul } N$ mit verhältnismäßig gleichbleibender Verschiebung und mit einem geringen Verschiebungssprung beim Nulldurchgang zu rechnen, während beim Fräsdübel die Zunahme der Gesamtverschiebung zwar auch im Bereich der zulässigen Verschiebung von $\pm 1,5$ mm bleibt, der Verschiebungssprung beim Nulldurchgang aber verhältnismäßig groß werden kann." /Mö6/

Abendroth und Wipf /Ab1/ untersuchten Holzverbindungen mit Bolzen. Deren Verformungs-Lastspiel-Diagramme ergaben nach einem ersten Anwachsen durch die erste Belastung ein langsames Anwachsen der Verformungen mit steigender Lastspielzahl. Bei den Proben, die unter der oft wiederholten Beanspruchung brachen, zeigte sich vor dem Bruch noch ein starkes Anwachsen der Verformungen.

Aus den Diagrammen (fig. 8) von Tokuda /To7/, der Nagelverbindungen mit Holzwerkstoffen (Sperrholz, Spanplatten, "hardboard") untersuchte, läßt sich entnehmen, daß

- bei Proben, die unter einer geringen Lastspielzahl brechen, die Verformungen von Anfang an stark anwachsen.
- bei Proben, die unter einer höheren Lastspielzahl brechen, die Verformungen bis kurz vor dem Bruch nur geringfügig anwachsen, dann aber deutlich erkennbar zunehmen.
- bei Proben, die nicht brechen, die Verformungen nur geringfügig anwachsen.

Nagasawa et al. /Nag1/ untersuchten Leimverbindungen. Aus ihren Diagrammen (fig. 10) läßt sich entnehmen, daß

- bei Proben, die unter einer höheren Lastspielzahl brechen, die Verformungen bis kurz vor dem Bruch nur geringfügig anwachsen, dann aber deutlich erkennbar zunehmen.
- bei Proben, die nicht brechen, die Verformungen nur geringfügig anwachsen.

Graf /Gr3/ untersuchte mehrere Dübelarten unter einer oft wiederholten Beanspruchung. Aus dem Verformungs-Zeit-Diagramm (Abb. 6 in /Gr3/) ist ein leichtes, stetiges Anwachsen der Verformungen bis kurz vor dem Bruch zu entnehmen. Danach treten dann deutlich erkennbare Verformungszunahmen auf.

Gaber /Gab6/ untersuchte Nagelverbindungen, die mit mehreren Nägeln verbunden waren. Die Verformungen nahmen zunächst stetig aber mit einem geringen Wachstum zu. Das starke Anwachsen der Verformungen vor dem Bruch erstreckte sich über viele Lastspiele. Nach dem Bruch einiger Nägel nahmen die Verformungen rasch zu, bis nacheinander fast alle Nägel gebrochen waren. /Gab6/

"Dynamisch beanspruchte Nagelverbindungen vergrößern weder ihre federnden noch ihre gesamten Formänderungen in unzulässiger Weise." /Gab7/

Das Committee 7-Wood Bridges and Trestles /Are1/ untersuchte zahlreiche Bolzenverbindungen für den Anschluß von Streben an Stützen. Aus den verschiedenen Verformung-Lastspiel-diagrammen sind verschiedene Verläufe abzulesen:

Es tritt nach einem stetigem Ansteigen vor dem Bruch sowohl noch ein deutlich erkennbarer Anstieg der Verformungen ein als auch ein sofortiger Bruch ohne einen erkennbaren Anstieg der Verformungen. Ein eindeutiger Zusammenhang des sofortigen Bruches mit dem Bruch des Bolzens läßt sich hier nicht feststellen.

Zusammenfassung:

Nach dem ersten Anstieg vergrößern sich die Verformungen mit steigender Lastspielzahl.

Wenn die Proben durch oft wiederholte Beanspruchungen bis zum Ermüdungsbruch beansprucht werden, tritt vor dem Bruch meist noch eine deutliche Vergrößerung der Verformungen auf.

Der Bruch der Verbindung kann aber auch ohne diese deutliche Vergrößerung der Verformung eintreten.

3) Zusammenfassende Bewertung

Die Verformungen unter oft wiederholten Einwirkungen nehmen stetig aber in geringem Maße zu, solange die Beanspruchungen unter der einer "Dauerfestigkeitsgrenze" liegen. Erst kurz vor dem Dauerbruch nehmen die Verformungen deutlich zu.

Bei Verbindungsmitteln kann der Bruch auch ohne eine vorherige deutliche Vergrößerung der Verformung eintreten.

3.2.5. Bruchmechanik

1) Rißtheorie bei statischer Beanspruchung

In der Bruchmechanik wird der Einfluß der Risse auf das Bruchverhalten untersucht. Dazu unterscheidet man drei verschiedene Rißöffnungsarten (Modus I, II, III). Es wird der Spannungsintensitätsfaktor K eingeführt (bzw. K_I für Modus I), der von der Höhe der äußeren Spannung sowie von der Rißlänge und Rißgeometrie abhängig ist:

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (21 a)$$

mit: a := Rißlänge
 σ := äußere Spannung

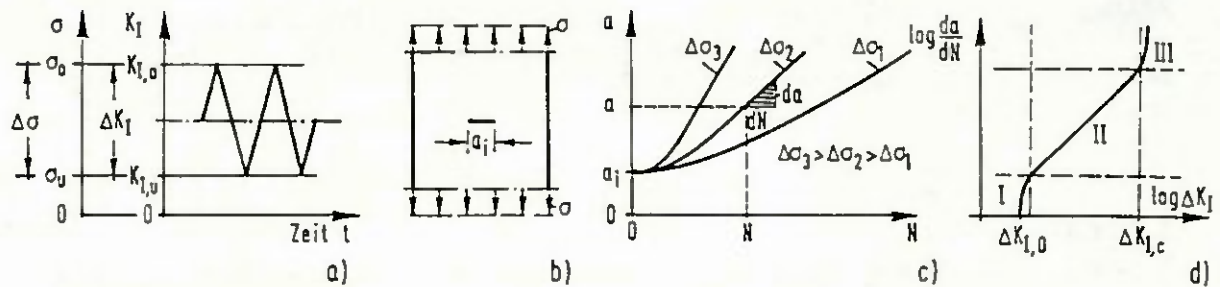


Bild 68: Bilder zur Rißtheorie (Bild 43 aus /Pet2/)

Für Risse in begrenzten Scheiben tritt noch ein Formfaktor Y hinzu:

$$K_I = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (21 b)$$

Es tritt ein Bruch ein wenn:

$$K_I \geq K_{Ic} \quad (22)$$

mit: K_{Ic} := materialabhängige Bruchzähigkeit oder kritischer Spannungsintensitätsfaktor

(nach /Pet2/, /Set1/)

2) Bruchmechanik für oft wiederholte Beanspruchungen

Bei oft wiederholten Beanspruchungen kann man unter gewissen Voraussetzungen davon ausgehen, daß Lastwechsel solange eine Vergrößerung des Risses verursachen, bis nach Erreichen einer kritischen Rißlänge das System bricht. Dieses Rißwachstum ist von der Länge des Risses und dem Spannungsdifferenzintensitätsfaktor ΔK abhängig. Für die Rißöffnungsart I ist er wie folgt definiert:

$$\Delta K_I = K_{I,o} - K_{I,u} = Y \cdot \Delta \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \quad (21 c)$$

mit: $\Delta \sigma = \sigma_o - \sigma_u$ (vgl. Bild 68a) (23)

Die Rißausbreitungsgeschwindigkeit da/dN (Vergrößerung des Risses a um da je Lastwechsel N) kann dann in Abhängigkeit von ΔK_I angegeben werden (vgl. Bild 68c,d). So hat z.B. die Paris-Erdogan-Gleichung folgende Beziehung:

$$\frac{da}{dN} = C * (\Delta K_I)^m \quad (24)$$

mit: $C, m :=$ Konstanten

Vergrößert sich die Rißlänge a um Δa , steigt auch ΔK_I und der Riß weitet sich progressiv aus. Ab einer gewissen kritischen Rißlänge a_c , die aus $K_{I,c}$ ermittelt werden kann, tritt dann der Ermüdungsbruch ein.
(nach /Pet2/, /Set1/)

Durch die Integration der von einer Anfangsrißlänge a_0 bis zu der kritischen Rißlänge a_c kann man die Rißfortschrittslebensdauer N_p ermitteln. /Kos1/

3) Übertragung auf den Holzbau

Diese Gedanken der Bruchmechanik, bei der sich vieles noch im "Forschungsstadium" /Pet2/ befindet, wurden von einzelnen Autoren (z.B.: /Ai1/, /Ans2/, /Bar6/, /Boa2/, /Deb1/, /Im6/, /Pa1/, /Pe1/, /Sc12/, /To2/, /To3/) aufgegriffen und in den Holzbereich übertragen. Aufgrund der Anisotropie des Holzes gibt es zu den drei Rißöffnungsarten noch sechs verschiedene Richtungen; damit ergeben sich insgesamt 18 Parameter /Bod2/. Damit wird eine vollständige Betrachtung ungleich schwieriger als beispielsweise beim Stahl. Eine weitreichende Übersicht über die zur Verfügung stehende Literatur geben Patton-Mallory und Cramer /Pa1/ an.

Der Übergang von den statischen zu den oft wiederholten Beanspruchungen gestaltet sich damit noch schwieriger.

Die Bruchmechanik aber bietet die Möglichkeit, die im Holz zahlreich vorhandenen Fehlstellen (z.B. Schwindrisse und Äste) bruchmechanisch zu erfassen. Pearson /Pe1/ beispielsweise gibt für Äste äquivalente Rißlängen an.

Boatright /Boa2/ untersuchte die Auswirkungen der Ermüdung auf das Wachsen von Rissen und zeigte, daß wiederholte Beanspruchungen mehr schädigen als das langsame, stabile Rißwachstum, das durch statische Beanspruchungen verursacht wird. Er beobachtete, daß Ermüdungsbrüche in fehlerfreien Hölzern dazu neigen, als cumulativer Prozeß zu erscheinen, bei welchem die Risse an mehreren Stellen im Probekörper beginnen und schließlich zusammenwachsen und den Bruch herbeiführen. Statische Brüche und Ermüdungsbrüche haben eine gleiche Erscheinung unter dem Mikroskop,(...), und für einen wachsenden Rißfrontfortschritt, wie er bei Metallen und Polymeren auftritt, wurde kein Beweis gefunden. /Boa2/

Ansell und Tsai /Ans2/ stellten fest, daß die Untersuchungen über den Rißfortschritt schwierig sind.

Imayama /Im6/ führte Untersuchungen an Biegeproben, die seitlich gekerbt waren, durch. (Anm.: Imayama verwendete andere Bezeichnungen als die Gleichungen (21)-(24). Diese werden hier Bericht beibehalten.) Nach seinen Untersuchungen existiert in einem bestimmten Bereich des Rißfortschrittes eine Beziehung zwischen dem Rißfortschritt (dl/dN) und dem Spannungsintensitätsfaktor (K_{max}) für gekerbte Proben:

$$\frac{dl}{dN} = C * (K_{max})^m \quad (21 d)$$

Dabei brachen Proben, die mit einer größeren Spannung beansprucht wurden, bei geringeren Lastspielzahlen. Der Rißfortschritt im Verhältnis zur Bruchlastspielzahl ist bei allen Spannungen nahezu gleich (vgl. Bild 69).

Die Entwicklung des Rißfortschrittes ist ebenfalls aus Bild 69 zu sehen.

Die Rißausbreitung wurde in drei (/Im1/, /Im4/, /Par3/, /Par4/) bzw. vier Schritten (/Im3/, /Im7/, /Im8/) beschrieben: Im ersten Schritt, der bis zu ca. 5% der gesamten Bruchlastspielzahl dauerte, vergrößerte sich der Riß rasch. Danach fand im zweiten Schritt nur noch ein "unmerkliches" Rißwachstum statt. Während der 75% der Lebensdauer nahm der Riß ca. 30% der Probenbreite ein. Im letzten Schritt, der noch ca. 20% der Lebensdauer ausmachte, weitete sich der Riß schnell aus und führte dann zum Bruch. Diese Ausbreitungsweise war weitgehend von der Spannung unabhängig. (vgl. Bild 69 und 70)

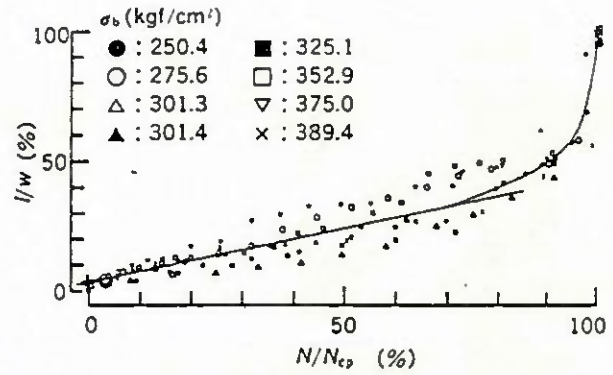
Die Rißausbreitungsgeschwindigkeit ist aber von der Biegespannung abhängig. Höhere Spannungen ergeben einen größeren Rißfortschritt, der wiederum die Lastspielzahl verkürzt.

Zwischen dem zweiten und dem dritten Schritt wurde in verschiedenen Berichten (z.B. /Im3/) noch ein weiterer eingefügt, der den Übergang von dem geringen zum starken Rißwachstum beschrieb. In dieser Phase wurden Mikrorisse an der Prüfkörperoberfläche sichtbar /Im3/.

Für die fast lineare Rißausbreitungsphase für gerissene Proben existierte das Rißausbreitungsgesetz und der Spannungsintensitätsfaktor K_{max} nach Paris-Erdogan:

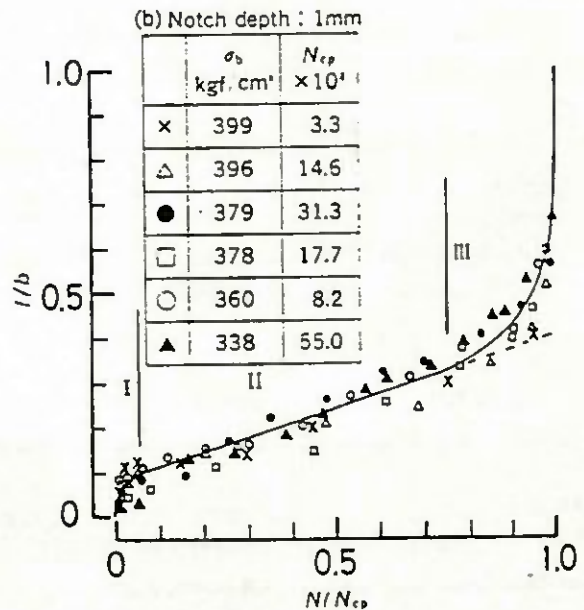
$$dl/dN = C \cdot (K_{max})^m$$

Für die Konstanten C und m wurde eine Beziehung, die eine gute Korrelation hatte, gefunden. /Im6/



Legend: l : crack length. w : width of specimen. N : number of cycles. N_{cp} : number of cycles of crack-propagation. σ_b : amplitude of alternative bending-stress.

Bild 69: Beziehung zwischen dem Verhältnis der Rißlänge zur Probenbreite (l/w) und der Lastspielzahl zur Rißausweitungslastspielzahl (N/N_{cp}) für verschiedene Biegespannungen (fig. 7 aus /Im6/)



Legend: l/b : ratio of crack length (l), b : width of specimen. N/N_{cp} : cycle ratio of crack propagation. N : number of cycles. N_{cp} : number of cycles of crack propagation. σ_b : amplitude of the alternative bending stress.

Bild 70: Rißausbreitungskurven für gekerbte Proben (fig. 9 b aus /Im4/)

3.2.6. Einfluß von Holzunregelmäßigkeiten auf die Zeit- und Dauerfestigkeit

Im Stahlbau wird bei der Bemessung nach verschiedenen Kerbfällen unterschieden, weil sich Kerben und andere Unregelmäßigkeiten entscheidend auf die Zeit- und Dauerfestigkeit auswirken. Im Holz gibt es durch seinen Wuchs, seine Verarbeitung und Verbindungsmittel eine Fülle von Unregelmäßigkeiten (vgl. 2.4.2.).

In diesem Abschnitt sind z.T. sehr unterschiedliche Ergebnisse aus der Literatur zusammengetragen:

Fuller und Oberg /Fu1/ führten Rotationsbiegeversuche an sehr kleinen Proben mit hohen Frequenzen durch. Dabei verwendeten sie auch gekerbte Proben mit einem Kerbanteil von ca. 6% vom Durchmesser. Die ertragbaren Spannungen waren bei ca. $2 \cdot 10^8$ Lastwechseln um 21-10% geringer als bei den ungekerbten Proben. Ein direkter Vergleich der gekerbten Proben im Dauerversuch zu gekerbten im statischen Bruchversuch ist dieser Literatur nicht zu entnehmen. Den Vergleich gekerbter zu ungekerbten Proben in Abhängigkeit von der Lastspielzahl zeigt Bild 71. Fuller und Oberg folgerten aus ihren Versuchen, daß bei Vollholz und Schichtholz eine relativ niedrige Kerbempfindlichkeit vorhanden sei.

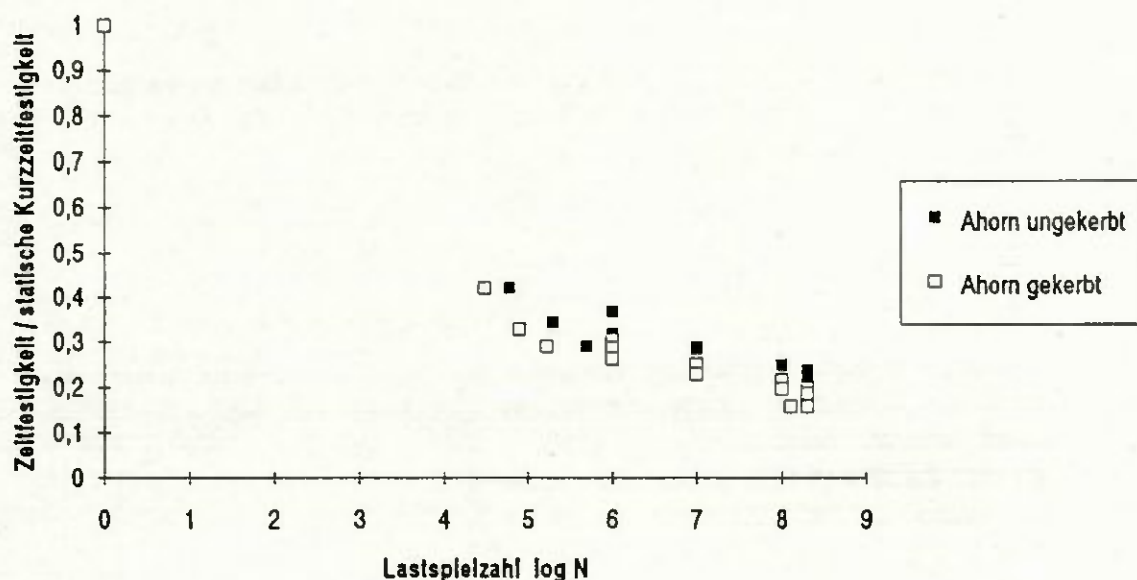


Bild 71: Verhältnis der Zeitfestigkeit gekerbter und ungekerbter Proben zur statischen Kurzzeitfestigkeit ungekerbter Proben (Werte aus /Fu1/).

Ibuki /Ib1/ machte Versuche mit Kleinproben aus verschiedenen Hölzern und mehreren Kerbeanspruchungen: Das waren seitliche Kerben und gebohrte Löcher in der Mitte der Biegeprobe. Der Ermüdungskerbefaktor β , der das Verhältnis der ertragbaren Spannungen in den Nettoquerschnitten der ungekerbten zu den gekerbten Proben darstellte, bewegte sich i.d.R. zwischen 0,8 und 1,2. Da sowohl Spannungserhöhungen wie -abminderungen auftraten, kann man aus diesen Versuchen keinen eindeutigen Einfluß der verschiedenen Kerbarten aus den Versuchsergebnissen ablesen.

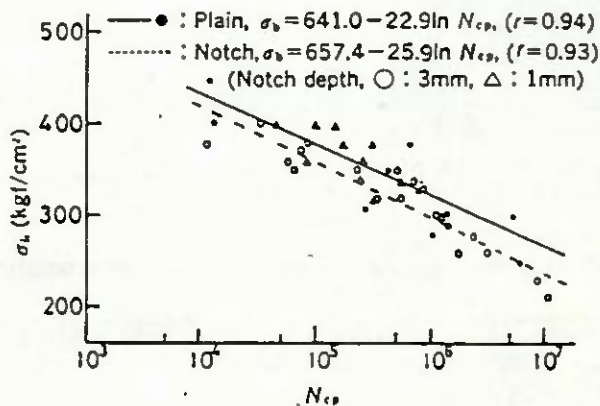
Egner und Jagfeld /Eg4/ untersuchten keilgezinkte Gurthölzer eines genagelten Brückenträgers, der 9 Jahre dem Verkehr und anschließend zwei Jahre einer freien Bewitterung ausgesetzt worden war. Die Zugschwellversuche wiesen eine große Streuung auf; die untere Grenze der Abminderungswerte lag im Bereich anderer Zugschwellversuche. Bei den gebrochenen Zugkörpern lagen die Brüche mit überwiegendem Anteil im Holzbereich außerhalb der Zinkung. Hierbei hatten die Nagellöcher oder starke Wuchsabweichungen (insbesondere Äste) den Bruchverlauf erheblich beeinflußt.

Diese Ergebnisse weisen darauf hin, daß Nägellöcher und Äste eine Schwächung sowohl für den statischen Bruchversuch wie für den Zeitfestigkeitsversuch darstellen. Diese Schwächungen führten aber zu keinem weiteren Festigkeitsverlust durch oft wiederholte Beanspruchungen.

Kraemer /Kra2/ untersuchte im Rotationsbiegeversuch den Einfluß von Oberflächenbeschädigungen an drei verschiedenen Probestäben. Flache Eindrückungen (Tiefe: ca. 1 mm bei ca. 10 mm Radius) zeigten keine Wirkung. Eine 1 mm tiefe Kerbe, die mit einem Messer keilförmig ausgeschnitten worden war, verkürzte die Lebensdauer der Probe; ebenso eine 2 mm breite Bohrung, die das Widerstandsmoment der Probe nicht verringerte. Beide Ergebnisse liegen aber am unteren Rande des Streubereiches, so daß ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Verkürzung der Lebensdauer und den Oberflächenbeschädigungen nicht bewiesen werden kann.

Bürnheim /Bü1/, zitiert in /Kol8/, "fand bei Wechselbiegeversuchen an verschiedenen Flugzeugbauhölzern mit und ohne Bohrung, daß eine Kerbwirkung in dem Sinne wie bei Metallen eigentlich nur bei Kiefernholz vorhanden war".

Maku /Mak2/ untersuchte verleimte Hölzer mit dem Rotationsbiegeversuch. Dabei verwendete er auch Schäft- und Stoßfugenverbindungen in der Biegezone mit verschiedenen Anordnungen der Fugen. Im Vergleich zu den statischen Festigkeiten konnte keine eindeutig größere Abnahme der Zeitfestigkeiten durch die Fugen ermittelt werden, d.h. die Abminderungswerte bleiben nahezu gleich. (vgl. Leimverbindungen 3.1.2.4.)



Legend: N_{cp} : number of cycles of crack propagation, σ_p : amplitude of the alternative bending stress, r : correlation coefficient.

Bild 72: σ - N_{cp} -Diagramm für ungekerbte und gekerbte Proben (fig. 4 aus /Im4/)

Imayama /Im4/ führte Flachbiegeversuche an seitlich gekerbten und ungekerbten Proben durch. Einige Ergebnisse sind in Bild 72 dargestellt. Die Verhältnisse für die gekerbten Proben waren geringfügig ungünstiger als für die ungekerbten Proben.

Die Güteklassen, in denen sich Holzfehler widerspiegeln, haben auf das Verhältnis der Zeitfestigkeit zu den entsprechenden zulässigen Spannungen nach DIN 1052 Teil 1 nach 3.2.2.4. keinen signifikanten Einfluß.

Für Brettschichtholzträger, bei denen die Leimfuge als "Kerbe" angesehen werden kann, stellte Sterr /Ste7/ fest: "Abgesehen von der wesentlichen Verringerung der Streuung der Schichtholzserien, verglichen mit der Vollholzversuchsserie(...), brachte die Schichtung eine Gütestei-gerung der Dauerfestigkeit um 23,1%."

Zusammenfassende Bewertung

Es gibt keine eindeutigen Ergebnisse. Aus den Berichten ist zu entnehmen, daß Kerben eine Tendenz zeigen, einen Einfluß auf die Zeitfestigkeit zu haben. Dieser Kerbeinfluß ist jedoch nicht groß (zumindest nicht im Vergleich zum Stahlbau). Die Abminderungswerte werden durch Kerben kaum verändert, denn die Kerben wirken sich unter einer statischen wie auch unter einer oft wiederholten Beanspruchung nahezu gleichermaßen aus.

Eine Unterscheidung, wie sie im Stahlbau gemacht worden ist, erscheint für den Holzbau nicht angebracht.

Kollmann /Kol8/ schrieb, daß "die Kerbempfindlichkeit von Holz im Vergleich zu manchen anderen Werkstoffen weniger stark ausgeprägt ist."

Erklärung:

Holz besteht in Längsrichtung aus mehreren Fasern. "Wenn in einem Seil oder einem Gewebe eine Faser reißt, breitet sich der Riß meist nicht auf die benachbarten Fasern aus. Es gibt nämlich keinen Weg, auf dem die freigesetzte Energie über die Lücken zwischen den Fasern hinweg transportiert werden kann - im Gegensatz zum homogenen Material, bei dem die freiwerdende Energie über Scherungen (Anm.: Schubkräfte) in die Bruchzone weitergegeben werden kann. Getrennte Fasern können einfach übereinander hinweggleiten, sofern keine merklichen Adhäsionskräfte im Spiel sind; ein Riß kann sich nicht weiter ausbreiten. Wenn man ein Seil oder ein Gewebe aus organischem Material mit Leim tränkt, wird es nach dem Trocknen steif und spröde und wesentlich brüchiger, weil der Leim eine hohe Adhäsion bewirkt und genügend Scherungsenergie übertragen kann, um den Bruchmechanismus in Gang zu halten." /Go1/

Den Einfluß einer Verleimung stellt auch Kollmann fest: "Vergütete Hölzer sind kerbempfindlicher als Vollhölzer." /Kol8/

3.2.7. Einfluß oft wiederholter Einwirkungen auf die Dämpfung

Dobraszczyk /Dob1/ sowie Imayama und Matsumoto /Im7/ untersuchten den Einfluß von oft wiederholten Beanspruchungen auf das Dämpfungsverhalten von Probekörpern.

Dobraszczyk /Dob1/ beanspruchte die Probekörper mit einer Torsionsbeanspruchung und stellte sein Ergebnis in Bild 73 dar.

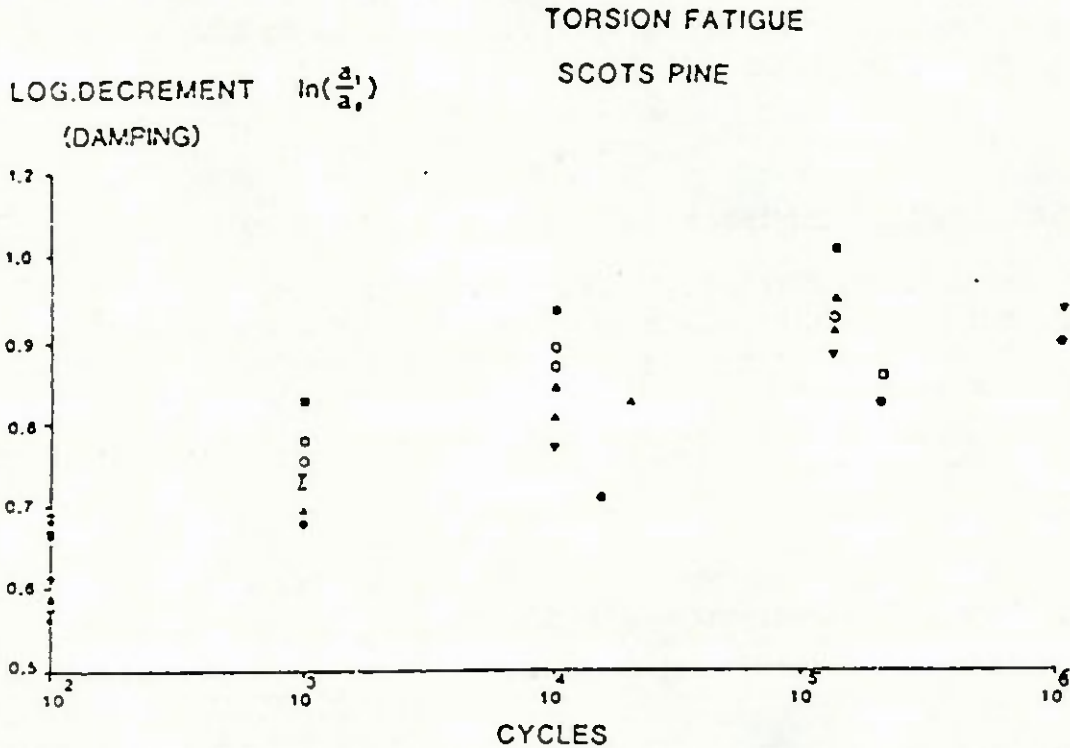


Bild 73: Veränderung der Dämpfung nach vorhergehender Ermüdung durch eine Torsionsbeanspruchung in Abhängigkeit von der Lastspielzahl. (fig. 72 aus /Dob1/) (Anm.: Die Bedeutung der Symbole \square , \circ , ... war in der vorliegenden Kopie nicht mehr erkennbar. Sie wurden deswegen weggelassen.)

Das logarithmische Dekrement nahm mit steigender Lastspielzahl zu. Dobraszczyk wertete dieses Dämpfungsverhalten als Indikator für eine anwachsende Schädigung, die durch eine Ermüdungsbeanspruchung hervorgerufen wurde.

Imayama /Im7/ dagegen maß die Dämpfung bis zum Ermüdungsbruch und stellte vor dem Bruch noch ein sehr starkes Anwachsen fest (Bild 74).

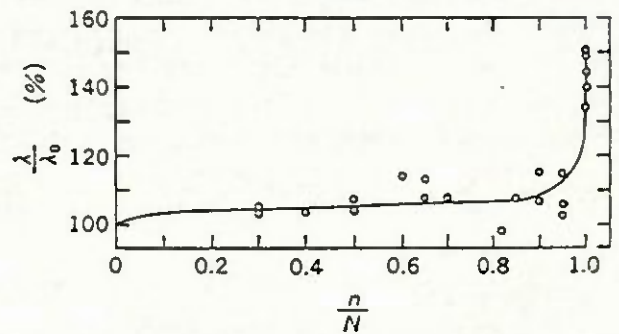


Bild 74: Verhältnis zwischen dem Logarithmischen Dekrement und dem Verhältnis der Lastspielzahl zur Bruchlastspielzahl. (Fig. 7 aus /Im7/)

Zusammenfassung:

Beide Autoren kamen zum Ergebnis, daß mit steigender Lastspielzahl die Dämpfung, die durch das logarithmische Dekrement ausgedrückt wird, anwächst.

3.2.8. Sonstige Erkenntnisse im Holzbau

1) Einfluß der Amplitudenform der oft wiederholten Beanspruchungen

Die oft wiederholten Beanspruchungen bei Dauerversuchen werden i.d.R. mit sinusförmigen Amplituden aufgebracht. Marsoem et al. /Mar2/, /Bor2/ verwendete daneben noch andere Formen: dreieckige und rechteckige (vgl. Bild 75).

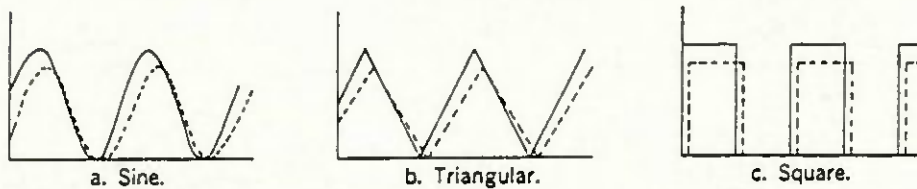


Bild 75: Verschiedene im Versuch verwendete Amplitudenformen
(Anm.: ——— : Beanspruchung, - - - - - : Dehnung)

Dabei ergab sich bei der rechteckigen Amplitudenform eine geringere Zeit bis zum Bruch als bei der sinusförmigen, die wiederum ungünstiger wirkte als die dreieckige. Dieses Ergebnis ist in Bild 76 dargestellt. Dies ist mit einer höheren Energieaufnahme der Probe zu erklären.

Bewertung:

Die Unterschiede bei den Spannungsniveaus der verschiedenen Amplitudenformen bleiben im Rahmen: Die Differenz beträgt in Bild 76 ca. 5% zwischen der günstigen dreieckigen und der ungünstigen rechteckigen. Dort kann man ebenfalls entnehmen, daß sonstige Streuungen einen wesentlich größeren Einfluß auf die Zeitfestigkeit nehmen, so daß der Einfluß der Amplitudenform als untergeordnet betrachtet werden muß. Für ein Bemessungskonzept bedeutet dies aber, daß die Amplitudenform, die bei den praktischen Beanspruchungen nur schwer exakt zu bestimmen ist und sich auch lastabhängig in der Form ändert, nicht weiter berücksichtigt werden muß. Dies führt zu keinen großen Fehlern.

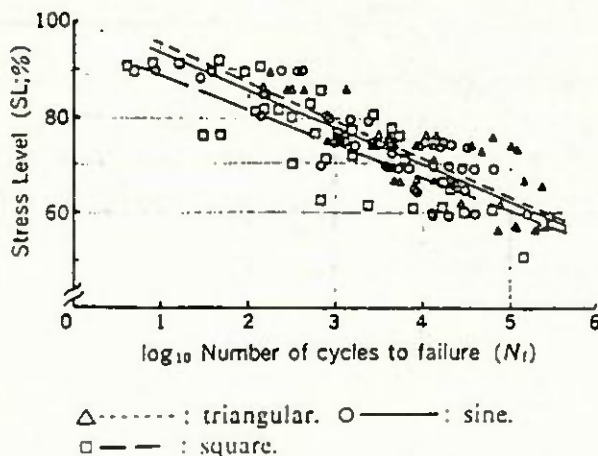


Bild 76: Beziehung zwischen dem Spannungsverhältnis und der Bruchlastspielzahl (fig. 3 aus /Mar2/)

2) Temperaturverlauf während der Dauerfestigkeitsprüfung

Anhand des Temperaturverlaufs lassen sich Schlüsse auf das Ermüdungsverhalten ziehen. Einheitlich wurde festgestellt, daß während der Dauerfestigkeitsprüfung ein Temperaturanstieg eintritt (z.B.: /Mar2/, /Noa2/, /Im5/, /Im7/, /Im8/, /Oku8/). Im Prüfkörper stellt sich zunächst eine gleichbleibende, aber leicht erhöhte Temperatur ein. Dabei ist die vom Prüfkörper aufgenommene Energie und der Energieverlust durch Wärmeabgabe gleich. Erst kurz vor dem Bruch findet ein weiterer Temperaturanstieg statt. (vgl. Bild 77). Die Temperaturentwicklung ist auch von der verwendeten Amplitudenform der Beanspruchung abhängig /Bor2/, /Mar2/, /Oku8/.

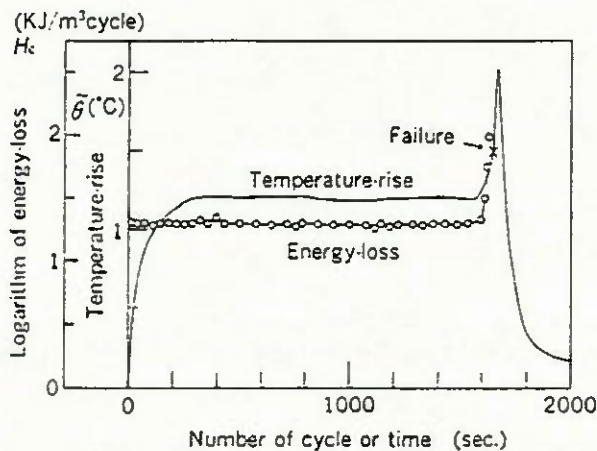


Bild 77 : Kurven des Temperaturanstieges und Energieverlust im Ermüdungsprozeß mit einer rechteckigen Amplitudenform für 70% der stat. Bruchspannung (fig. 2 aus /Oku8/).

Eine Temperaturerhöhung an bestimmten Stellen deutet auf die Versagensstelle hin. Sterr /Ste7/ beobachtete an der späteren Bruchstelle die größte Temperaturzunahme und zwar in der Druckzone an den Quetschfalten. Der Durchläufer zeigte in allen Punkten eine gleichmäßige Temperaturzunahme.

3. Schädigungen an den Fasern

Kitahara et al. /Kit1/ stellten bei ihren Untersuchungen mit einem Elektronenmikroskop fest, daß sich schon mit einer Biegebeanspruchung von 30% der statischen Bruchlast und einer sehr geringen Lastspielzahl ($N=15$) leichte Falten in den Zellwänden des Druckbereiches des Holzes bildeten. Veränderungen auf der Zugseite stellten sich ab 70 bis 90% der statischen Bruchlast ein.

3.3. Nachweise aus der Literatur

Die Klammern (z.B. (6.5)) geben die Abschnitte in den Normen bzw. in den Erläuterungen (z.B. (E 5.1.4)) an. Es werden die Bezeichnungen der Normen bzw. der Autoren verwendet.

3.3.1. DIN-Normen

1) DIN 1052 Teil 1: Holzbauwerke

Holz wird grundsätzlich für nicht vorwiegend ruhende Lasten zugelassen. Sofern es sich dabei um eine Schwellbelastung handelt, ist keine Abminderung erforderlich. Wird das Bauteil, inklusive Stöße und Anschlüsse, nicht allein durch Wind- und Schneelasten wechselbeansprucht, sind die Spannungen nach Gleichung (6) und (7) der DIN 1052 abzumindern (6.5):

$$zul\sigma = k_w * zul\sigma \quad \text{mit:} \quad k_w = 1 - 0,25 * \frac{\min|\sigma|}{\max|\sigma|} \quad (25 \text{ a}), (26)$$

Dabei ist nicht klar, ob sich $zul\sigma$ bei einer reinen Zug-Druck-Wechselbeanspruchung auf die zulässige Zug- oder Druckspannung bezieht. Der Wert k_w beträgt bei reiner Wechselbeanspruchung ($\kappa = -1$) minimal 0,75.

Die Regelung der DIN 1052 Teil 1, Ausgabe 10/1969, die nur Normalkräfte und ihre Anschlüsse und Stöße betraf, wurde in der jetzt gültigen Neufassung auch für alle Beanspruchungen ausgedehnt.

Sonstiges:

- Bei waagrechten Stoßlasten und Erdbebenlasten dürfen die zulässigen Spannungen um 100% erhöht werden. (5.1.6)
- Bei fliegenden Bauten (siehe DIN 4112) dürfen für tragende Bauteile der Haupttragwerke nur Hölzer verwendet werden, die der Güteklasse I nach DIN 4074 Teil 1 und 2 entsprechen (5.1.4). Dies wird in den Erläuterungen mit dem mehrfachen Auf- und Abbau und "dynamischen" Beanspruchungen begründet (vgl. E 5.1.4).
- Für geschweißte Bauteile gilt die DIN 18800 Teil 7 (5.3.2). Dort werden bei nicht vorwiegend ruhenden Beanspruchungen schärfere Anforderungen für das Herstellen von Stahlbauteilen gestellt.
- "Decken- und Dachscheiben (...) dürfen mit Stützweiten bis 30 m für die Aufnahme und Weiterleitung von vorwiegend ruhenden Lasten (...) in Scheibenebene in Rechnung gestellt werden" (11.3.1). Diese Aussage beinhaltet indirekt den Ausschluß für nicht vorwiegend ruhende Einwirkungen, ohne daß dies näher erläutert wird. Hier liegt die Vermutung nahe, daß sich diese Scheibenkonstruktionen bei vorwiegend ruhenden Lasten bewährt haben, während für nicht vorwiegend ruhende keine Ergebnisse vorliegen. Das gleiche gilt für die Scheiben, die unter (10.3) in der DIN 1052 genannt sind.

2) DIN 1052 Teil 2: Holzbauwerke - Mechanische Verbindungen

Für die Bemessung der Verbindungsmittel unter nicht vorwiegend ruhenden Lasten wird dort keine eigene Regelung getroffen.

- Bei waagrechten Stoßlasten und Erdbebenlasten dürfen die zulässigen Spannungen um 100% erhöht werden. (3.2.)

Bei einer Beanspruchung für nicht vorwiegend ruhende Lasten werden verschiedene Verbindungsmittel ausgeschlossen:

- Bolzen, die auf Abscheren beansprucht werden, werden bei Dauerbauten allgemein wegen ihrer großen Verformungen nicht herangezogen. (5.2)
- Bei Nägeln ist die zulässige Nagelbelastung nach Gleichung (6) der DIN 1052 zu ermitteln, ohne Angabe über ruhende bzw. nicht ruhende Einwirkungen (6.2.2). In der Erläuterung wird aber darauf hingewiesen, daß diese Gleichung nur für vorwiegend ruhende Einwirkungen gilt (E 6.2.2).
- Stahlblechformteile (7.3.1). In der Erläuterung (E 7.3.1) wird hierfür das ungeklärte Verhalten der Nägel bei "dynamischer" Beanspruchung auf Herausziehen angegeben.
- Nagelplatten (10.3)
- Bauklammern, die bei Dauerbauten nur für untergeordnete Zwecke verwendet werden dürfen (11).

3) DIN 1052 Teil 3: Holzbauwerke in Tafelbauart - Berechnung und Ausführung

Diese Norm gilt nur für Holzhäuser und für vorwiegend ruhende Einwirkungen einschließlich Windlasten und mit Erdbebenlasten (1).

4) DIN 1074: Holzbrücken

"Für Bauteile aus Holz und Bau-Furniersperrholz ist ein Nachweis der Dauerschwingbeanspruchung nicht erforderlich. DIN 1052 Teil 1, Abschnitt 6.5, ist gegebenenfalls zu beachten. Für Stahlbauteile und Verbindungsmittel von Straßenbrücken, die durch Verkehrsregellasten nach DIN 1072/ 12.85, Tabelle 1, beansprucht werden, ist ein Nachweis der Dauerschwingbeanspruchung zu erbringen. Beim Nachweis mechanischer Verbindungen nach DIN 1052 Teil 2 ist Abschnitt 5.2 (Anm.: der DIN 1074) zu beachten."(4.2).

Eine Abminderung der zulässigen Belastung der Verbindungsmittel in (5.2) erfolgt zu:

$$zulN' = k_{s,w} * zulN \quad \text{mit } k_{s,w} = 0,75 \pm 0,25 * \frac{\min|N|}{\max|N|} \quad (25 \text{ b}), (27)$$

Für Schwellbeanspruchung gilt das positive, bei Wechselbeanspruchung das negative Vorzeichen.

Bei einer reinen Wechselbeanspruchung dürfen die Verbindungsmittel nur zu 50% der zulässigen Kraft nach DIN 1052 Teil 2 beansprucht werden.

"Für tragende Verbindungen mit Dübeln besonderer Bauart (siehe DIN 1052 Teil 2) in Straßenbrücken dürfen im allgemeinen nur zweiseitige Ringkeildübel (Dübeltyp A), Rundholzdübel aus Eiche (Dübeltyp B) sowie zweiseitige Einpreß- und Einlaß-Einpreßdübel (Dübeltyp D bzw. E) verwendet werden. In Geh- und Radwegbrücken dürfen auch einseitige Einpreß- und Einpreß-Einlaßdübel (Dübeltyp D bzw. E) verwendet werden. Klammer- und Nagelplattenverbindungen (siehe DIN 1052 Teil 2) dürfen in Holzbrücken nicht als tragend in Rechnung gestellt werden." (5.1)

5) DIN 4178: Glockentürme - Berechnung und Ausführung

Bei Glockentürmen treten durch das Läuten oft wiederholte horizontale und vertikale Beanspruchungen der Unterkonstruktion auf.

"Die Bemessung ist nach DIN 1052 Teil 1 und Teil 2 durchzuführen. Für die Bemessung aus dem Lastfall Glockenläuten ist für Holz und Holzverbindungen ein Ermüdungsbeiwert von $\mu=2,5$ zu berücksichtigen, soweit durch Versuche keine günstigeren Werte nachgewiesen sind." (6.5.3.)

"Verbindungsmittel müssen DIN 1052 Teil 1 oder Teil 2 entsprechen. Bei Nagelverbindungen mit Drahtnägeln nach DIN 1151 sind die Nagellöcher für Stöße und Anschlüsse stets vorzubohren. Außer vorgebohrten Nagelverbindungen sind Dübel nach DIN 1052 Teil 2 und Leimverbindungen besonders geeignet.

Bei Stabdübeln sollte eine Sicherheit gegen unbeabsichtigtes Klaffen vorgesehen werden. Unzulässig sind kraftschlüssige Bolzenverbindungen und Versätze mit Ausnahme des Stirnversatzes, der auch für die Aufnahme der maximal auftretenden Zugkräfte ausgebildet werden muß.

Bei Nagelverbindungen, die auf Herausziehen beansprucht werden, sowie zur Befestigung von Schalungen sind stets Schraub- oder Rillennägel zu verwenden." (6.5.5.)

6) DIN 18900: Holzmastenbauart - Berechnung und Ausführung

Die DIN 18900 hat keinen Anwendungsbereich für nicht vorwiegend ruhende Beanspruchungen. Sie darf nur angewendet werden für Gebäude, die "vorwiegend aus der Eigenlast der Baukonstruktion und aus Schnee und Wind herrührenden Kräfte in den Baugrund ableiten." (1)

7) DIN 4112: Fliegende Bauten - Richtlinien für Bemessung und Ausführung

In der DIN 4112 werden für Holz im Gegensatz zu Stahl keine Regeln zur Bemessung für "schwingende Beanspruchungen" angegeben, dafür aber konstruktive Hinweise:

"Bohrungen in Holzbauteilen für Anschlußbolzen, die Wechsel- und Schwelllasten unterliegen (...) sind durch Stahllaschen oder Dübel zu entlasten. (...) Allgemein muß beachtet werden, daß starke Schwächungen von Holzquerschnitten zu vermeiden sind. Dies gilt insbesondere für Hölzer, die durch Stöße beansprucht werden, oder die Wechsel- und Schwellbeanspruchungen unterliegen. Einpreßdübel dürfen aus dem Holz nicht entfernt werden." (8.3.3)

8) DIN 4024 Teil 1: Maschinenfundamente - Elastische Stützkonstruktionen für Maschinen mit rotierenden Massen

In dieser Norm werden Baukonstruktionen aus Stahl bzw. Stahlbeton behandelt, die als Stützkonstruktionen von Maschinenanlagen mit überwiegend rotierenden Massen oder als Maschinenträger in mindestens einer Ebene Biegeschwingungen ausführen.

Hier wird der Baustoff Holz nicht behandelt.

9) Zusammenfassende Bewertung

In den deutschen Normen werden für die nicht vorwiegend ruhenden Beanspruchungen Bestimmungen sowohl für Holz, Holzwerkstoffe und Verbindungsmittel angegeben. Diese Bestimmungen können jedoch nicht als einheitlich angesehen werden.

Weil nicht für alle Verbindungen Eignungsnachweise, die die Unbedenklichkeit bei oft wiederholten Beanspruchungen belegen, vorliegen, werden sie ausgeschlossen.

Einige Verbindungsmittel (z.B. Nagelplatten) sind nicht zugelassen, weil Versuche keine guten Zeitfestigkeitseigenschaften erbrachten.

3.3.2. Ausländische Normen und Standards

In den Normen der Länder Kanada /N1/, /N2/, /N3/, /N4/, Schweiz /N7/, Österreich /N8/, /N9/, /N10/, Dänemark /N11/, /N12/, Großbritannien /N13/ und Australien /N14/, /N15/ können keine eindeutigen Hinweise für die Bemessung und Ausführung von Holzbauteilen, die oft wiederholten Beanspruchungen unterliegen, gefunden werden.

Frankreich

In einer französischen Norm /N5/ findet sich eine Angabe zur Berücksichtigung von wechselnden Beanspruchungen (Wechselbiegung und Zug-Druck-Wechsel):

Der Bruchwiderstand bei schnell wechselnden Beanspruchungen kann mit 1/3 der einfachen statischen Festigkeit pauschal abgeschätzt werden. Im Kommentar findet sich die Angabe, daß sich dies auf Versuche mit 0,5-1 Million Lastwechseln und 1000 Beanspruchungen pro Minute bezieht.

Vereinigte Staaten

In einem amerikanischen Standardwerk des American Institute of Timber Construction (AITC) /N6/ wird festgestellt, daß in der gegenwärtigen Bemessungspraxis, kein Faktor für die Ermüdung gilt, noch es notwendigerweise in Erwägung gezogen wird, dies zu tun. Wenn hohe Lastspielzahlen nahe der Bemessungsgrenze zu erwarten sind, sollte der Tragwerksplaner die Möglichkeit von Ermüdungsbrüchen durch Schub und Zug senkrecht zur Faser untersuchen. Für diesen Fall sollten die Schubspannungen um 10% abgemindert werden oder eine genaue Untersuchung anhand den Berichten des Forest Products Laboratory /Lew5/ und des ASCE /Lew1/ durchgeführt werden. /N6/

Dieses Ergebnis beruht auf den Untersuchungen von Lewis /Lew5/, /Lew2/, der Proben schwellend ($\kappa=0,1$) beanspruchte, und folgenden Überlegungen:

Das Sicherheitskonzept gibt einen minimalen Sicherheitsfaktor ("near-minimum factor of safety" /Wo1/), der von Wood /Wo1/ ermittelt wurde, mit 5/4 bis 6/4 an. Der Faktor zur Berücksichtigung der Dauerstandfestigkeit wird mit 5/8 also 0,625 angesetzt. Wenn diese beiden Faktoren kombiniert werden, ergibt sich:

$$\frac{5/8}{5/4} = 0,5.$$

Dieser Wert ist gleich groß oder niedriger als die Abminderungswerte für verschiedene Beanspruchungen. Deswegen scheint es vernünftig zu sein, daß die Ermüdungsfestigkeit von Holz für die meisten Anwendungen mit den zulässigen Spannungen ausreichend berücksichtigt wird. Bei einer anderen Beanspruchung, wie der Wechselbeanspruchung, ist dies nicht mehr gegeben.

/Lewl/

Von der National Forest Products Association (NFPA) liegen hier keine Standards vor.

3.3.3. Sonstige Literatur

1) Gerold /Ger4/ macht in einem Beitrag zur Berechnung von Glockentürmen folgenden Vorschlag:

Nach Berücksichtigung eines dynamischen Lastfaktors von 1,3 sind die minimalen und maximalen Normal- und Biegespannungen zu ermitteln:

$$\sigma_{N1} = \sigma_{Ng} + \min \sigma_{Ndyn} \quad (28 a)$$

$$\sigma_{N2} = \sigma_{Ng} + \max \sigma_{Ndyn} \quad (28 b)$$

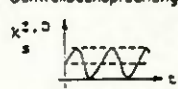

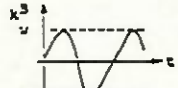
analog:

$$\sigma_{B1} = \sigma_{Bg} + \min \sigma_{Bdyn} \quad (28 c)$$

$$\sigma_{B2} = \sigma_{Bg} + \max \sigma_{Bdyn} \quad (28 d)$$

Mit $\max \sigma$ wird die betragsmäßig größere der beiden Spannungen σ_1 oder σ_2 bezeichnet. Aus den Verhältnissen der minimalen und maximalen Spannungen wird der jeweilige k-Wert ermittelt:

Tabelle 7: Verhältnis der "dynamischen" Festigkeit und der Dauerstandfestigkeit für Bauteile aus Vollholz und Brettschichtholz (Tabelle 1 aus /Ger4/):

Art der Beanspruchung	statisch	Grenzen	Holzarten
Schwellbeanspruchung 	Druck	$k_s^D = \begin{cases} 1,0 \\ (0,8)^{2,5} \end{cases}$	Tanne, Eiche, Kiefer, Kiefer
	Zug	$0,5 \leq k_s^Z \leq 1,0$	Kiefer Kern
Wechselbeanspruchung 	Biegung	$k_s^B = 0,4$	Buche Splint
		$0,5 \leq k_s^B \leq 0,8$	Fichte, Tanne
Wechselbeanspruchung 	Biegung	$k_s^B = 0,4$	Birke, Buche Splint
		$0,4 \leq k_s^B \leq 0,7$	Eiche, Esche, Nußbaum, Sugi, Douglasie, Fichte, Kiefer

¹⁾ Das Verhältnis zwischen der Dauerstandfestigkeit und der statischen Kurzzeitfestigkeit wurde mit 0,6 zugrunde gelegt.

²⁾ ... Zusammenstellung erfolgte im wesentlichen nach den in [8] [5] und [9] mitgeteilten Literaturstellen und Versuchsergebnissen.

³⁾ Die Werte nach [4] bleiben unberücksichtigt, da die Proben nicht bis zum Bruch beansprucht wurden.

$$k^{N,B} = \begin{cases} \text{für Druckschwellen} & k_s^D = 1,0 \\ \text{für Zugschwellen} & k_s^Z = 0,6 + 0,4 \frac{\min \sigma_N}{\max \sigma_N} \\ \text{für Biegeschwellen} & k_s^B = \begin{cases} 0,5 \text{ für Nadelhölzer} \\ 0,4 \text{ für Laubhölzer} \end{cases} \\ \text{für Zug-Druck-Wechsel} & k_w^{D-Z} = 0,6 + 0,2 \frac{\min \sigma_N}{\max \sigma_N} \\ \text{für Biegewechsel} & k_w^B = 0,4 \end{cases}$$

Diese k-Werte ergeben sich unter Berücksichtigung der Tabelle 7.

Der Tragfähigkeitsnachweis lautet dann:

$$\frac{\max \sigma_N}{k^N * zul \sigma_N} + \frac{\max \sigma_B}{k^B * zul \sigma_B} \leq 1 \quad (29)$$

Bewertung:

Dieser Bemessungsvorschlag berücksichtigt bereits die Dauerfestigkeitseigenschaften der verschiedenen Holz- und Beanspruchungsarten, nicht aber die unterschiedlichen Lastspielzahlen. (Anm.: Die Tabelle 7 entstand aus den Ergebnissen verschiedener Dauerfestigkeitsversuche (z.B.: 0,25 für eine Biegewechselbeanspruchung), die durch die Dauerstandfestigkeit noch dividiert wurden. "Das Verhältnis der Dauerstandfestigkeit und der statischen Kurzzeitfestigkeit wurde mit 0,6 angenommen." /Ger4/ Damit ergaben sich die einzelnen k-Werte (z.B. 0,25/0,6 \cong 0,4 für die Biegewechselbeanspruchung)).

Der Einfluß der Zeitstandfestigkeit kann in diesem Fall vernachlässigt werden, weil die Summe der Beanspruchungszeiten bei Glockenstühlen ungefähr denen der Dauerfestigkeitsversuche entspricht. Dieses Konzept kann aber nicht auf alle auftretenden, oft wiederholten Einwirkungen übertragen werden, weil andere Einwirkungszeiten über die Zeitstandfestigkeit und auch verschiedene Lastkollektive berücksichtigt werden sollten.

Dieser Bemessungsvorschlag gibt deutlich geringere k-Werte als die DIN 1052 Teil 1 (6.5) an.

2) Mit Ermüdungsbeiwerten nach Eibl et al. /Ei1/

Der Spannungsnachweis wird in die quasi-statische Form gebracht:

$$\sigma_{stat} + \mu * \sigma_{dyn} \leq zul \sigma \quad (30)$$

Für Holz wird ein Ermüdungsbeiwert $\mu=2,5$,für die Verbindungsmittel im Schwellbereich $\mu=2,5$ und im Wechselbereich $\mu=3,0$ angegeben. Bei der Ermittlung von μ wird ebenfalls der Quotient aus der Dauerstandfestigkeit durch die Dauerfestigkeit zugrunde gelegt.

Bewertung:

Bei einer reinen Biegewechselbeanspruchung wird $\sigma_{stat} = 0$. Daraus folgt für einen k-Wert:

$$k = \frac{zul \sigma'}{zul \sigma} = \frac{\sigma_{dyn}}{zul \sigma} = \frac{1}{\mu} = \frac{1}{2,5} = 0,4$$

Dieser Wert entspricht dem Wert, den Gerold /Ger4/ ermittelt hat.

3) Harnach /Har2/ weist für die Bemessung von Glockentürmen auf Folgendes hin: "Die Normalkräfte in den Stäben müssen gemäß DIN 1052 Blatt 1 (Anm.: Ausgabe 10/69), Gleichungen (1a) und (1b) erhöht werden, (...). Weiterhin ist gemäß DIN 4178, Zi 6.5.3. ein Ermüdungsbeiwert von 2,5 bei der Bemessung der Stäbe und der Verbindungsmittel aus dem Lastfall Glockenläuten zu berücksichtigen." /Har2/

Dies ist nach Meinung der Verfasser eine doppelte Berücksichtigung der oft wiederholten Beanspruchungen.

3.3.4. Zusammenfassende Bewertung

Die verschiedenen Regelungen haben verschiedene Ansätze das Zeit- bzw. Dauerfestigkeitsproblem für Holz und Holzwerkstoffe und deren Verbindungen zu regeln. In einigen Normen werden aber auch keine Angaben gemacht. Diese Tatsache spiegelt die Unsicherheit in der Bemessung von Holz unter oft wiederholten Einwirkungen wieder.

Die zahlreichen Verbindungsmittel im Holzbau zeigen unterschiedliche Zeitfestigkeitseigenschaften. Deswegen kann man nicht eine pauschale Abminderungsfunktion für alle angeben. Geringere Tragfähigkeiten einiger mechanischer Verbindungsmittel werden nur dadurch berücksichtigt, daß sie nicht zugelassen werden.

In den Holzbau-Regelungen wird nicht danach unterschieden, welche Lastkollektive auftreten.

Die Abminderungen, die oft wiederholte Beanspruchungen berücksichtigen, haben zwischen den einzelnen Regeln und Berichten eine große Spannweite. Für die Wechselbiegung wird dafür in Frankreich /N5/ 0,33, von Gerold /Ger4/ bzw. Eibl et al. /Ei1/ 0,4 und in der DIN 1052 Teil 1 0,75 angegeben.

Ergebnis:

Für die Bemessung gibt es keine sicheren Angaben, die durch mehrere vorliegende Veröffentlichungen belegt werden.

4. Anpralllasten und Stöße

Die Problematik des Anpralls wird nach DIN 1055 Teil 3 den nicht vorwiegend ruhenden Lasten zugeordnet. Dabei werden Ersatzlasten für die Bemessung angegeben.

Diese Bestimmungen gehen nach /Blo1/ "von einem sehr ungünstigen Verformungsverhalten an der Stoßstelle aus, wie es für Stahlbetonkonstruktionen zutreffen kann. Dem günstigeren, weil nachgiebigeren Verhalten von Holz- und Stahlkonstruktionen wurde dabei keine Rechnung getragen."

Für die Ermittlung der Stoßkraft F macht Block /Blo1/ bzw. /Ei2/ folgende Überlegungen, die "für die Praxis genügend genau" sind:

Dabei kommt er auf folgende Gleichung für die Stoßkraft. (Die Bezeichnungen des Autors wurden übernommen.)

$$F = \bar{k} [(m\beta)v_0^2]^{3/5} \quad (31)$$

mit: $\bar{k} = 720$ für Nadelholz
 $m =$ Stoßmasse

$$\beta = 1 - \left(\frac{1}{1 + \eta} \right)^2 \quad (32)$$

$$\eta = \frac{m_{red}}{m} \quad (33)$$

$$m_{red} \equiv d * \bar{m} = d * \frac{A * \gamma}{g} \quad (34)$$

mit: $A =$ Balkenfläche
 $d =$ Querschnittshöhe
 $\gamma =$ spez. Gewicht
 $g =$ Erdbeschleunigung

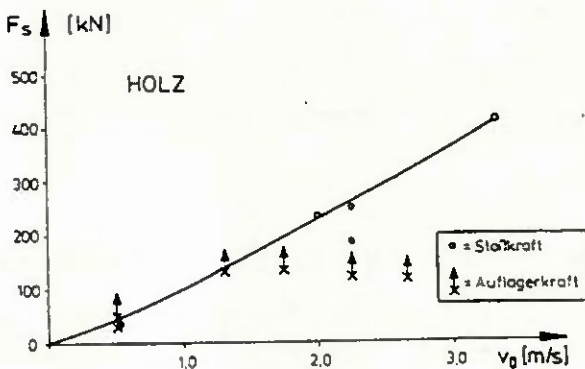


Bild 78: Meß- und Berechnungsergebnisse der Stoßkräfte an einer Stütze aus Nadelholz 26/26 Gkl. II. (Bild 7.2. aus /Blo1/)

Bild 78 zeigt, "daß eine hinreichend gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Versuchsergebnissen bis zu einer Geschwindigkeit von etwa 3,5 m/s erreicht werden kann." /Blo1/

Um diese Berechnung mit den bestehenden DIN-Vorschriften zu vergleichen, wird ein Beispiel durchgerechnet. Im Gegensatz zu der DIN 1055 Teil 3 geht bei der o.g. Berechnung auch im erheblichen Maß die Geschwindigkeit des Fahrzeugs mit ein.

Weil für die Bemessung eines Gabelstaplers mit 13 t zul. Gesamtgewicht große Nadelholzquerschnitte, die die baupraktischen Abmessungen deutlich überschreiten, erforderlich wären, wird für das Berechnungsbeispiel Brettschichtholz verwendet. Dabei wird das gleiche Kontaktkraftgesetz wie bei Nadelholz angewendet ($k=720$).

Beispiel:

- **Statisches System:**
Stützhöhe: 4,5 m, oben und unten gelenkig gelagert.
- **Lastannahmen:**
Nach DIN 1055 Blatt 3 ist zur Berücksichtigung eines möglichen Anpralls bei Gabelstaplern in 0,75 m Höhe eine Horizontallast gleich dem 5-fachen zulässigen Gesamtgewicht anzunehmen.
Gabelstapler: zul. $G = 13 \text{ t}$
 $F = 13 \text{ t} \cdot 10 \text{ kN/t} \cdot 5 = 650 \text{ kN}$
Die Normalkraft in der Stütze ist hier vernachlässigbar.
- **Abmessungen der Stütze:**
Brettschichtholz Gkl. II $b/h = 22 \text{ cm}/72 \text{ cm}$
 $\Rightarrow W = 19008 \text{ cm}^3$
- **Berechnungen:**

Das Biegemoment ergibt sich zu:

$$M = 650 \text{ kN} \cdot \frac{3,75 \text{ m} \cdot 0,75 \text{ m}}{4,5 \text{ m}} = 406,2 \text{ kNm}$$

Nach DIN 1052 dürfen die zul. Spannungen bei Stoßlasten um 100% erhöht werden.

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{406,2 \cdot 10^6}{19008 \cdot 10^3} = 21,4 \text{ N/mm}^2 \leq 22 \text{ N/mm}^2 = 2 \cdot \text{zul} \sigma_B$$

Der Schubspannungsnachweis ist unter Berücksichtigung von Abschnitt 8.2.1.2 der DIN 1052 Teil 1 eingehalten.

- **Nach Block werden die Stoßlasten ermittelt:**

$$m_{red} = 0,72 \cdot \frac{0,72 \cdot 0,22 \cdot 5}{9,81} = 0,0581 \text{ t}$$

$$\eta = \frac{0,0581}{13} = 0,00447$$

$$\beta = 1 - \left(\frac{1}{1 + 0,00447} \right)^2 = 0,00888$$

Die Geschwindigkeit v_0 des Fahrzeugs wird mit 2,7 m/s (ca. 10 km/h) angesetzt.

$$F = 720 \cdot \left[(13 \cdot 0,00888) \cdot 2,7^2 \right]^{3/5} = 649 \text{ kN} \approx 650 \text{ kN}$$

Für andere Geschwindigkeiten ergeben sich:

$$\begin{array}{ll} v_0 = 2 \text{ m/s (7,2 km/h)} & F = 453 \text{ kN} \\ v_0 = 3,5 \text{ m/s (12,6 km/h)} & F = 886 \text{ kN} \end{array}$$

Aus dieser Rechnung ist ersichtlich, daß die Ersatzlasten der DIN 1055 Teil 3 je nach Geschwindigkeit des Fahrzeugs gut übereinstimmen, aber auch zu einer Über- und Unterbemessung führen können.

Die Bemessung für Stoßlasten macht in jedem Fall deutlich größere Querschnitte erforderlich als bei einer Bemessung nur für die Normalkraft. Block /Blo1/ kommt zum Schluß, daß "eine Bemessung von Stützen auf den harten Querstoß immer dann vermieden werden sollte, wenn Anprallsicherungen anderer Art möglich sind."

Anmerkung:

Ein Stahlträger 0,75m hoch und eingespannt, der die Stoßlasten aus Anprall (nach DIN 1055 Teil 3) aufnimmt, und eine getrennte Bemessung der Holzstütze nur für die Normalkräfte ergeben beim gewählten Beispiel einen geringeren Raumbedarf und Holzeinsparungen von ca. 70%!

Es ist auch zu prüfen, ob eine Fußausbildung der Holzstützen aus Stahl so ausgebildet werden kann, daß sie die Anpralllasten aufnimmt und gleichzeitig eine günstige Verbindung mit der Holzstütze darstellt.

Bewertung:

Mit der obigen Rechnung soll verdeutlicht werden, daß Holzkonstruktionen für die Abtragung der Anpralllasten wenig geeignet sind, denn die Dimensionierung ergibt große Abmessungen. Die DIN 1055 Teil 3 gibt Stoßlasten an, die nicht von der Anprallgeschwindigkeit abhängig sind. Die auftretende Stoßlast entspricht bei einer bestimmte Anprallgeschwindigkeit (in obigen Beispiel 10 km/h) dem Ansatz der DIN 1055 Teil 3 für das Material Holz.

Hinweis:

Für Stützen können im Holzbau Balken mit nachgiebigem Verbund eingesetzt werden. Durch die Verbindungsmittel kann im höheren Maße Energie von den Verbindungsmitteln aufgenommen werden. Für den Einsatz verdübelter Balken liegen keine Versuchsergebnisse vor.

5. Zusammenfassung

5.1. Ergebnisse

Holz, Holzwerkstoffe und Holzverbindungen werden durch oft wiederholte Beanspruchungen geschädigt:

- Oft wiederholte Beanspruchungen in Größe der statischen Beanspruchungen können nicht ertragen werden. (3.1.1. bis 3.1.3.)
- Obwohl sich die Restfestigkeit i.d.R. nach einer bestimmten oft wiederholten Beanspruchung kaum ändert, führen weitere Lastspiele mit dieser Beanspruchung zum Bruch. (3.1.1. bis 3.1.3.; Wöhlerversuch)
- Restfestigkeitsversuche, die mit einer anderen Beanspruchungsrichtung als die der oft wiederholten durchgeführt werden, ergeben deutlich geringere Restfestigkeiten im Vergleich zu den statischen Festigkeiten. (3.1.5.)
- Die Bruchschlagzähigkeit nimmt nach oft wiederholten Beanspruchungen leicht ab. (3.1.5.)
- Die Dämpfung nimmt während einer oft wiederholten Beanspruchung zu. (3.2.7.)
- Die Fasern zeigen nach oft wiederholten Beanspruchungen eine sichtbare Schädigung. (3.2.8.)

Holz, Holzwerkstoffe und Holzverbindungen sind aber zur Abtragung von oft wiederholten Beanspruchungen grundsätzlich geeignet. Der Tragfähigkeitsverlust durch die Ermüdung hält sich in Grenzen. Dafür wird in Kapitel 6 ein Bemessungskonzept aufgestellt, das die oft wiederholten Beanspruchungen auf der sicheren Seite liegend berücksichtigt.

Holz und Holzwerkstoffe

Eine Übersicht über die ermittelten Abminderungs- und k_{fat} -Werte gibt die folgende Tabelle 8:

Tabelle 8: Ergebnisse der zusammenfassenden Bewertung von Holz und Holzwerkstoffen mit Ausnahme von Span- und Faserplatten unter oft wiederholten Beanspruchungen.

Beanspruchung:	Material	Mittelwert der Abminderungswerte bei 10^7 Lastspielen	ermittelter k_{fat} -Wert für 10^7 Lastspiele
Zugschwellen		0,50	0,50
Druckschwellen		-	$\geq 0,75$ *1
Zug-Druck-Wechsel		0,35	0,26 *2
Biegeschwellen	Vollholz	0,44	0,42
	Schichtholz	0,52	0,52
Biegewechsel	Vollholz	0,31	0,26
	Schichtholz	0,24	0,20
Schub	Schwellen	0,32	0,30
	Wechsel	0,26 *3	0,24 *3

*1 : bei $2 \cdot 10^6$ Lastspielen

*2 : bezogen auf die Zugfestigkeit

*3 : nur Leimfugen

(Anmerkung: Der Unterschied zwischen dem Mittelwert der Abminderungswerte und dem k_{fat} -Wert besteht darin, daß für die Bemessung die Streuungen der einzelnen Wöhlerversuche in den k_{fat} -Werten bereits eingearbeitet ist. Die k_{fat} -Werte sind deswegen kleiner.)

Vollhölzer und Schichthölzer unterscheiden sich in den Abminderungswerten. Während bei den Biegeschwellversuchen das Brettschichtholz gegenüber dem Vollholz die besseren Ergebnisse liefert, sind die Abminderungswerte im Biegewechselversuch bei Schichthölzern geringer als bei Vollholz. (vgl. Zeile 5-8 aus Tabelle 8). Die Biegeschwellversuche wurden im Gegensatz zu den Biegewechselversuchen mit großen Abmessungen durchgeführt.

Eine Biegeschwellbeanspruchung mit den 1,5-fachen zulässigen Spannungen und einem Spannungsverhältnis von $\kappa=0,33$ führte bei allen 3 Güteklassen nach DIN 4074 zu Brüchen. (3.1.1.4.)

Die Querzeigeeigenschaften unter oft wiederholten Beanspruchungen scheinen nicht ungünstiger als andere Beanspruchungsarten wie z.B. die Biegung zu sein. (3.1.1.7.)

Für eine Torsionsbeanspruchung liegen keine genauen Ergebnisse vor. (3.1.1.8.)

Die Abminderungswerte für Span- und Faserplatten liegen im Bereich derjenigen für Vollholz und verleimten Hölzer. Der Einfluß der verwendeten Leime spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Größere Feuchtigkeiten der Platten vermindern die Zeit- und Dauerfestigkeiten. (3.1.3.)

Verbindungsmittel

Die Bolzenverbindungen zeigen mäßige Zeit- und Dauerfestigkeitseigenschaften; d.h. die Mittelwerte der Abminderungswerte unter einer Schwellbeanspruchung betragen 0,48 bei $N=5 \cdot 10^5$ und 0,30 bei $N=2 \cdot 10^6$ und sind somit geringer als die Abminderungswerte für Zug- und Biegeschwellen bei Vollholz. (3.1.2.1.)

Eine Untersuchung deutet auf gute Zeit- und Dauerfestigkeitseigenschaften von Stabdübeln hin. Für den gesicherten Einsatz von Stabdübeln unter schwellender und wechselnder Beanspruchung sind noch weitere Versuche notwendig, weil nur wenige Versuche bekannt sind. (3.1.2.1.)

Nagelverbindungen können oft wiederholt beansprucht werden, wenn dies durch einen geeigneten k_{fat} -Wert in der Bemessung berücksichtigt wird. Dieser kann bei ca. 0,4 bis 0,5 für eine schwellende ($\kappa=0$) und bei ca. 0,15 bis 0,2 für eine wechselnde Beanspruchung ($\kappa=-1$) abgeschätzt werden. Für eine schwellende Beanspruchung mit der zulässigen Kraft nach DIN 1052 Teil 2 trat bei drei verschiedenen Untersuchungen kein Bruch auf. Für die Wechselbeanspruchung liegen wenige Versuchsergebnisse vor.

Die Bruchursache liegt in der Regel bei den verwendeten Nägeln. (3.1.2.2.)

Die Wöhlerlinien bei Nagelplatten zeigen eine deutlich schlechtere Tragfähigkeit unter oft wiederholten Beanspruchungen im Vergleich zu Vollholz bei der jeweiligen Beanspruchungsart. Die Nagelplatten sind für die Abtragung oft wiederholter Beanspruchungen wenig geeignet. (3.1.2.3.)

Mit Ausnahme der Keilzinkenverbindung zeigen Leimverbindungen keine schlechteren Zeit- und Dauerfestigkeitseigenschaften als das Holz selber, denn die Abminderungswerte sind nicht ungünstiger. Von den Leimfugen in trockenen Hölzern sind keine negativen Auswirkungen zu erwarten. Für die Keilzinkenverbindung, die nur auf Zug oft wiederholt schwellend ($\kappa=0$) beansprucht wird, ist ein Mittelwert der Abminderungswerte von 0,37 ermittelt worden. Der k_{fat} -Wert kann dann mit 0,35 abgeschätzt werden. (3.1.2.4.)

Verschiedene Dübel (vergleichbar mit Dübeltyp A, B, E nach DIN 1052 Teil 2) zeigen unter einer schwellenden Beanspruchung ($\kappa=0$) gute Eigenschaften; d.h. es können k_{fat} -Werte zwischen 0,45 und 0,50 abgeschätzt werden. (3.1.2.5.)

Für Schrauben liegen keine Versuchsergebnisse zum Abscherverhalten unter oft wiederholten Beanspruchungen vor. (3.1.2.6.)

Viele Verbindungsmittel werden aus Stahl gefertigt. Die Untersuchungen für Nägel, Nagelplatten und Schrauben ergeben, daß das Stahlteil für die Ermüdungsfestigkeit maßgebend wird. Bei anderen Verbindungsmitteln aus Stahl sollte dieser Umstand berücksichtigt werden.

Holzkonstruktionen

Verschiedene Holzkonstruktionen wurden auch unter einer oft wiederholten Beanspruchung geprüft. Die Holzkonstruktionen verhielten sich dabei nicht ungünstiger als die verwendeten Hölzer und Verbindungsmittel. Zahlreichen Bauten sind für eine oft wiederholte Beanspruchung erstellt worden. (3.1.4.)

Restfestigkeit

Die Restfestigkeiten nach einer oft wiederholten Beanspruchung liegen im Bereich der statischen Festigkeit vor der Ermüdungsbeanspruchung, wenn die Ermüdungsbeanspruchung in der gleichen Richtung wie bei der Restfestigkeitsprüfung aufgebracht wird.

Für oft wiederholte Beanspruchungen mit Werten nahe der statischen Kurzzeitfestigkeit treten geringere Werte auf, während für deutlich geringere Beanspruchungen kein Restfestigkeitsverlust auftritt. Durch die Bemessung für oft wiederholte Beanspruchungen werden die zulässigen Beanspruchungen begrenzt, so daß große Restfestigkeitsverluste nicht mehr auftreten.

Nach Meinung der Verfasser ist mit weiter steigender Lastspielzahl aber noch ein starker Abfall der Restfestigkeit zu erwarten. Das letzte Lastspiel bei dem Wöhlerverfahren kann auch als Restfestigkeitsprüfung mit dem Wert des Beanspruchungsniveaus interpretiert werden.

Restfestigkeitsprüfungen, die mit einer anderen Beanspruchungsrichtung als die der oft wiederholten durchgeführt wurden, ergaben deutlich geringere Werte als mit der gleichen Beanspruchungsrichtung. Dies muß in der Bemessung gesondert berücksichtigt werden. Hierzu sind noch weitere Versuche notwendig, um die genauen Auswirkungen für die Bemessung zu erfassen.

(3.1.5.)

Einflußfaktoren auf die Zeit- und Dauerfestigkeit

Die Existenz einer Dauerfestigkeitsgrenze wird in der Literatur unterschiedlich angegeben. Von den einen Autoren wird diese eindeutig belegt; während von anderen sie nicht bestätigt werden kann (3.2.1.1.).

Die Wöhlerlinien haben auch unterschiedliche Formen. Die Auswertung der einzelnen Punkte eines Wöhlerdiagrammes lassen mehrere Interpretationen zu. (3.2.1.2.)

Bei der Prüfung mit verschiedenen Frequenzen wurden unterschiedliche Auswirkungen der Prüffrequenzen festgestellt. (3.2.2.1.)

Es besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Rohdichte, der Zeit- und Dauerfestigkeit:

- Mit Zunahme der Rohdichte wächst die Dauerfestigkeit linear. Das Verhältnis Dauerfestigkeit zur statischen Festigkeit wird von der Rohdichte nicht beeinflusst.
- Der Übergang der Wöhlerlinie in eine horizontale Gerade erfolgt für Hölzer mit größerer Rohdichte früher.
- Die abfallende Kurve der Zeitfestigkeit wird dann steiler.

(3.2.2.2.)

Die Holzarten haben nur einen indirekten Einfluß über die Rohdichte auf die Zeit- und Dauerfestigkeitseigenschaften. (3.2.2.3.)

Es gibt durch die Einteilung in die Güteklassen keine signifikanten Unterschiede bei den Abminderungswerten. (3.2.2.4.)

Die Feuchtigkeit wirkt sich auf die Zeit- und Dauerfestigkeit aus. Ihr genauer Einfluß auf die Abminderungswerte ist nicht geklärt. Die Feuchtigkeit scheint bei höheren Lastspielzahlen und Vollhölzern keinen zusätzlichen Verlust der Tragfähigkeit zu bewirken.

(3.2.2.5.)

Ein nichtparalleler Rand-Faser-Verlauf führt unter oft wiederholten Beanspruchungen zu ungünstigeren Abminderungswerten. (3.2.2.8.)

Vorbehandlungen, die mit der Kesseldruckimprägnierung vergleichbar sind, wirken sich ungünstig auf die Zeit- und Dauerfestigkeit aus. Es werden durch eine Vorbehandlung sowohl die Festigkeiten geringer als auch die Abminderungswerte ungünstiger. (3.2.2.10.)

Die Auswirkungen unterschiedlicher Temperaturen auf die Dauerfestigkeit sind gering. Die Temperatur hat aber keinen Einfluß auf die Abminderungswerte. (3.2.2.11.)

Sonstige Ergebnisse

Solange die Beanspruchungen unter der einer "Dauerfestigkeitsgrenze" liegen nehmen die Verformungen unter oft wiederholten Einwirkungen stetig aber im geringen Maße zu. Erst kurz vor dem Dauerbruch nehmen die Verformungen deutlich zu. Bei Verbindungsmitteln kann der Bruch auch ohne eine vorherige deutliche Vergrößerung der Verformung eintreten. (3.2.4.)

"Kerben" zeigen eine Tendenz, einen Einfluß auf die Zeitfestigkeit zu haben. Dieser Kerbeinfluß ist jedoch nicht groß (zumindest nicht im Vergleich zum Stahlbau). Die

Abminderungswerte werden durch Kerben kaum verändert. Die Kerben wirken sich unter einer der statischen wie auch unter einer oft wiederholten Beanspruchung nahezu gleichermaßen aus. Eine Unterscheidung, wie sie im Stahlbau gemacht worden ist, erscheint für den Holzbau nicht angebracht. (3.2.6.)

Es konnte festgestellt werden, daß die Dämpfung, die durch das logarithmische Dekrement ausgedrückt wird mit steigender Lastspielzahl anwächst.(3.2.7.)

In den deutschen Normen werden für nicht vorwiegend ruhende Beanspruchungen Bestimmungen angegeben, sowohl für Holz und Holzwerkstoffe als auch für Verbindungsmittel.

Diese Bestimmungen können jedoch nicht als einheitlich angesehen werden.

Für die Bemessung gibt es keine sicheren Angaben, die durch mehrere vorliegende Veröffentlichungen belegt werden.

(3.3.)

Holzkonstruktionen sind zur Abtragung von Anpralllasten wenig geeignet, denn die Dimensionierung ergibt große Abmessungen.

Die DIN 1055 Teil 3 gibt Stoßlasten an, die nicht von der Anprallgeschwindigkeit abhängig sind. Die auftretende Stoßlast entspricht bei einer bestimmte Anprallgeschwindigkeit (in obigen Beispiel 10 km/h) dem Ansatz der DIN 1055 Teil 3 für das Material Holz.

5.2. Noch ausstehende Untersuchungen

Es fehlt eine Schädigungshypothese im Bezug auf die Ermüdung für Holz und Holzverbindungen, die durch entsprechende Versuche belegt wird, um verschiedene Lastkollektive zu berücksichtigen. Dabei ist auch der Einfluß der Zeitstandfestigkeit zu berücksichtigen. Es ist nicht geklärt, wie sich die Zeitstandfestigkeit und die Zeitfestigkeit überlagern und ob die Versuchsdauer der Dauerfestigkeitsversuche ausreicht, die Zeitstandfestigkeitseigenschaften zu berücksichtigen. (3.2.3.)

Es ist nicht geklärt, ob die Streuungen der Versuche unter oft wiederholten Beanspruchungen größer, kleiner oder gleich den Streuungen statischer Versuche ist. Es besteht die Möglichkeit bereits vorhandenes Datenmaterial zu untersuchen oder neue Versuche so anzulegen, daß dies bestimmt werden kann. Maennig /Mae3/ stellt für Stahl fest: "Ganz allgemein wird ferner festgestellt, daß der Streubereich lastspielzahlmäßig mit sinkender Beanspruchung zunimmt."

Die vorhandenen Ergebnisse wurden in Abhängigkeit der Ober- und Unterspannungen bzw. des daraus resultierenden κ -Wertes ausgewertet. Es sollte noch geprüft werden, ob es genügt, die Zeit- und Dauerfestigkeitseigenschaften nur von der Lastamplitude bzw. dem Spannungsausgang σ_a abhängig zu machen, und ob dieses Auswertungsverfahren günstiger ist. Kato et al. /Kat1/ geben an, daß die Bruchlastspielzahl von Spanplatten nicht nur von den Oberspannungen sondern auch von der Spannungsamplitude beeinflusst wird.

Der Einfluß der Umweltbedingungen (z.B.: schwankende Feuchtigkeiten, Durchnässen) auf

Bauwerke unter oft wiederholten Beanspruchungen ist nicht geklärt. Die meisten Zeit- und Dauerfestigkeitsversuche erfolgten unter nahezu konstanten Laborbedingungen. Da Holz und Holzwerkstoffe auch für Bauteile im Außenbereich (z.B. Brücken) und den damit verbundenen wechselnden klimatischen Verhältnissen eingesetzt werden soll, muß noch Klarheit geschaffen werden über die Auswirkungen des Außenklimas auf die Zeit- und Dauerfestigkeit. Die DIN 1052 Teil 1 schreibt für Bauteile, die allseitig der Witterung ausgesetzt sind, eine Abminderung der zulässigen Spannungen um 1/6 vor. Es ist nicht klar, ob diese Abminderung ausreichend ist und ob sich großflächige Risse (Schwindrisse, Schälrisse, etc.) auf die Zeit- und Dauerfestigkeit auswirken. (vgl. 3.2.2.9.)

Es liegen wenige Ergebnisse mit Versuchen in Bauteilgröße vor. Hier sind insbesondere Brett-schichtholzträger und Vollholzträger unter Biegewechselbeanspruchungen zu nennen. Für die Holzwerkstoffe (z.B.: Brettschichtholz, Furnierstreifenholz, Schichthölzer), die im modernen Ingenieurholzbau eingesetzt werden, und dafür geeignete Verbindungsmittel liegen fast keine Ergebnisse vor.

Für die meisten Verbindungsmittel gibt es wenige, meist uneinheitliche Ergebnisse. Es fehlen Ergebnisse z.B. über:

- den Einfluß der Kraft-Faserrichtung
- Stabdübel bzw. Paßbolzen
- verschiedene Dübeltypen (Typ C,D)
- Sondernägeln
- Stahlblechformteile (z.B.: Balkenschuhe)
- Verbindungen mit Stahlblechen
- eingeleimte Gewindestangen

Die Biegerestfestigkeitsprüfungen, die mit einer anderen Beanspruchungsrichtung als die der oft wiederholten durchgeführt wurden, ergaben deutlich geringere Werte als mit der gleichen Beanspruchungsrichtung. (3.1.5.) Es ist noch genau zu prüfen, ob dieser Restfestigkeitsverlust auch nach Biegebeanspruchungen, die nach Abschnitt 6. begrenzt werden, und bei Proben in Bauteilabmessungen auftritt.

Das Problem des Knickens muß noch näher untersucht werden. (vgl. 3.1.1.2.)

Bei den Zug-Druck-Wechselversuchen treten große Unterschiede in den Wöhlerlinien auf, die auf die sehr unterschiedlichen Rohdichten zurückzuführen sind. Hier sind noch weitere Untersuchungen möglich. (3.1.1.3.)

6. Bemessungskonzepte für oft wiederholte Beanspruchungen

6.1. Allgemeines

Die Bemessungskonzepte sind so gestaltet, daß sie sich den entsprechenden Sicherheitsphilosophien des Eurocodes und der deutschen Normen anpassen. Deswegen sind zwei verschiedene Konzepte notwendig.

Die Bemessungskonzepte sind für Bauobjekte aus dem Ingenieurholzbau gedacht. Dabei wird von eindeutigen Systemen ausgegangen, die eine sichere Bestimmung der Schnittgrößen, Kräfte bzw. Spannungen zulassen.

Es fehlen noch einige Angaben (vgl. 5.2.). Dennoch werden Bemessungsvorschläge aufgestellt, um die Problematik der Ermüdung im Holzbau zu verdeutlichen, um die vorhandenen Ergebnisse zu prüfen und mit ihnen arbeiten zu können. Angaben, die noch fehlen, und Annahmen, die noch nicht erwiesen sind, können zu einem späteren Zeitpunkt in die Bemessungskonzepte eingefügt werden.

Der Grundgedanke der Bemessungskonzepte liegt darin, daß die oft wiederholten Beanspruchungen über einen zusätzlichen Faktor k_{fat} , ähnlich dem Modifikationsfaktor k_{mod} , berücksichtigt werden. Dieser wird aus den Abminderungswerten gebildet.

Die Berücksichtigung verschiedener Streuungen der Widerstandsseite erfolgt in den k_{fat} -Werten, die Berücksichtigung einer Schädigungshypothese für oft wiederholte Beanspruchungen in den Schädigungsbeiwerten γ_{fat} .

Es werden die verschiedenen Einflüsse (z.B. Feuchte, Güteklasse) auf die Ermüdungsfestigkeit wie bei der statischen Festigkeit berücksichtigt, weil alle Versuchsergebnisse auf die entsprechende statische Kurzzeitfestigkeit bezogen werden. Wenn ein Einfluß auf die Ermüdungsfestigkeit im Vergleich zur Kurzzeitfestigkeit ungünstigere Auswirkungen zeigt, muß dies gesondert berücksichtigt werden.

Die Bemessungskonzepte sind so gestaltet, daß sie von einer Oberspannung und einem κ -Wert abhängig sind. Es gibt keine Belege dafür, daß eine Bemessung nur in Abhängigkeit von der Spannungsamplitude günstiger wäre. Dies ist aber nicht ausgeschlossen und kann in einem weiteren Schritt untersucht werden. (vgl. 5.2.)

6.2. Theoretische Grundlagen und Annahmen

- Für die Bemessung mit oft wiederholten Einwirkungen sind zwei Kriterien zu beachten:
 1. Die oft wiederholten Beanspruchungen dürfen das Holz nur soweit schädigen, daß auch Beanspruchungsspitzen, die nur kurze Zeit und mit geringer Anzahl auf das Bauwerk einwirken, noch ertragen werden können. Die Normen erlauben hier größere k_{mod} -Werte (EC 5) bzw. höhere zulässige Spannungen (DIN 1052). Das bedeutet, daß die Restfestigkeiten nach oft wiederholten Einwirkungen nicht abnehmen dürfen.
 2. Die oft wiederholten Einwirkungen dürfen nicht zum Versagen infolge Ermüdung führen. Deswegen muß die Größe der oft wiederholten Einwirkungen begrenzt werden. Hier ist ein Nachweis mit oft wiederholten Einwirkungen (Ermüdungsnachweis) zu führen.
- Kurz andauernde Einwirkungen, die aus Wind, Anprall, Stöße, Montagezuständen, Erdbeben und ähnlichen Lasten resultieren können, werden dadurch berücksichtigt, daß ein statischer Nachweis sie mit der maximalen Beanspruchung aus den nicht vorwiegend ruhenden Einwirkungen und den anderen Einwirkungen berücksichtigt. Die Anzahl der Lastspiele, die mit den kurz andauernden Einwirkungen zusammenfallen, ist gering (vgl. Bild 79). Dadurch kann hier die Berücksichtigung der Ermüdung entfallen. Mittel und lang andauernde Einwirkungen, die aus Nutz-, Verkehrs-, Schnee- und ähnlichen Lasten resultieren können, werden für den Ermüdungsnachweis wie ständige Einwirkungen behandelt. Dies ist eine Festlegung, die getroffen werden muß, weil eine Schädigungshypothese, die auch die unterschiedlich langen, vorwiegend ruhenden Einwirkungen berücksichtigt, fehlt. Die Anzahl der Lastspiele, die mit den mittel und lang andauernden zusammenfallen, ist groß (vgl. Bild 79) und es muß die Ermüdung berücksichtigt werden.

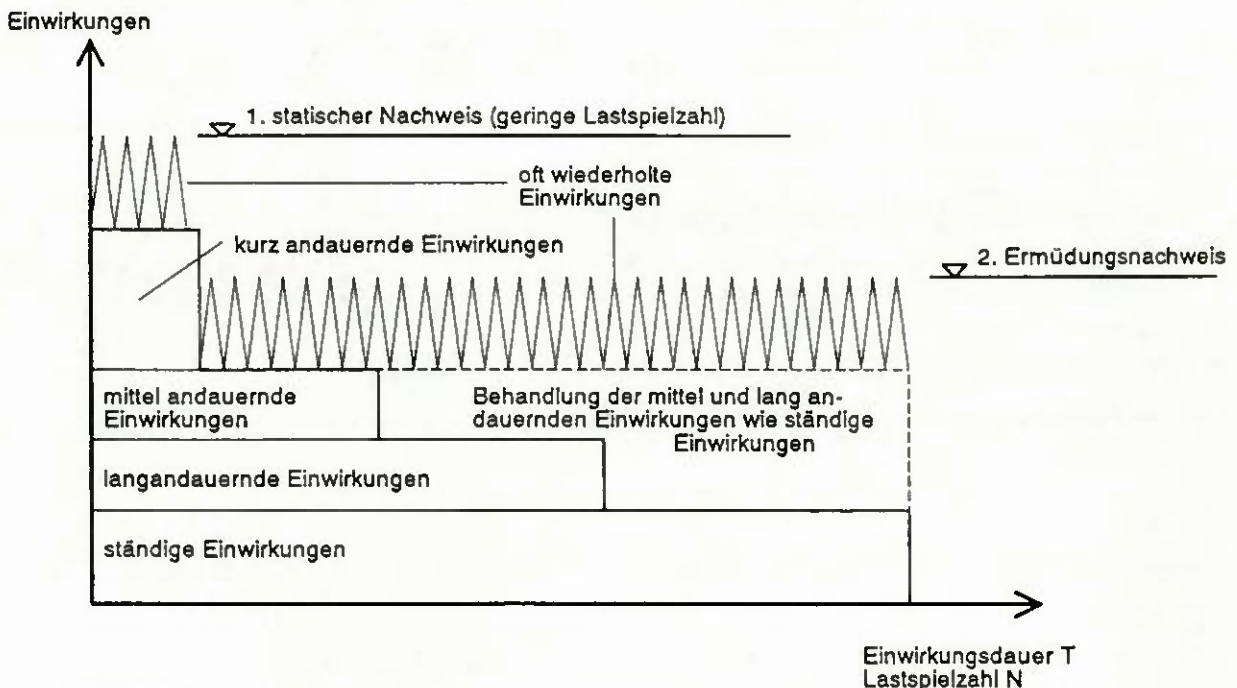


Bild 79: Schematisches Lastkollektiv mit vorwiegend ruhenden und oft wiederholten Einwirkungen.
(Anmerkung zu Bild 79: Bei den vorwiegend ruhenden Einwirkungen werden die Summen der Einwirkungszeiten verwendet und an der Ordinate beginnend angetragen.)

Zu Punkt 1.:

- Die Tragfähigkeitsverluste durch oft wiederholte Einwirkungen (Restfestigkeitsverluste) sind so gering, daß sie vernachlässigt werden können, wenn die oft wiederholte Beanspruchung in der gleichen Richtung wirkt wie die maximale Beanspruchung. Dies wurde in 3.1.5. für die Zugschwell-, die Druckschwell- und die Biegewechselbeanspruchung bei Holz sowie für verschiedene Verbindungsmittel festgestellt. Lewis /Lew1/ kommt ebenfalls zum Schluß, daß oft wiederholten Einwirkungen nicht das Sicherheitsniveau für statische Beanspruchungen reduzieren.
Bei der Biegeschwellbeanspruchung nahm die Restfestigkeit, die in der anderen Richtung geprüft wurde, deutlich ab. Dies muß in der Bemessung berücksichtigt werden.

Zu Punkt 2.:

- Für eine bestimmte Beanspruchung verlaufen die Wöhlerlinien, aus denen die Abminderungswerte gebildet werden, nahezu gleich. (vgl. 3.2.1.) Die Streuungen der Ermüdungsprüfungen untereinander und die der einzelnen Proben werden bei der k_{fat} -Wertbildung (vgl. 8.2.) berücksichtigt.
- Die Wöhlerlinien zeigen im höheren Lastwechselbereich eine Abflachung. Die Existenz einer echten Dauerfestigkeitsgrenze wird unterschiedlich diskutiert (vgl. 3.2.1.1.). Deshalb werden, um eine Bemessung durchzuführen, für verschiedene Lastspielzahlen die Zeitfestigkeiten verwendet.

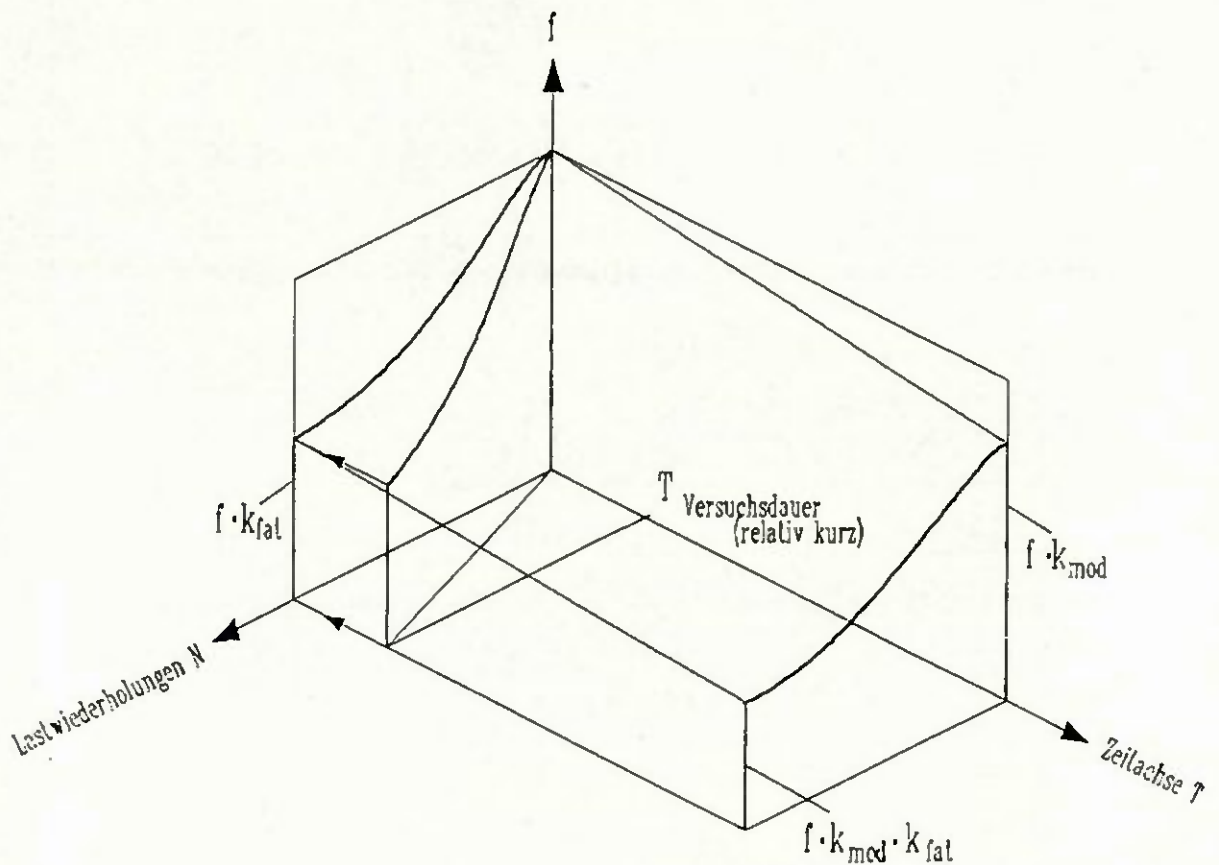


Bild 80: Verknüpfung von Zeitstandfestigkeit mit Dauerfestigkeit

- Die Dauerfestigkeitsversuche, die in einem relativ kurzen Zeitraum durchgeführt wurden, werden mit den Dauerstandversuchen einer konstanten Einwirkung verknüpft, um die Wirkung der oft wiederholten Beanspruchungen über einen langandauernden Zeitraum zu erfassen. Dabei wird von einer linearen Interaktion, die als der ungünstigsten Fall angesehen wird, ausgegangen (vgl. Bild 80). Der Einfluß der Versuchsdauer während der Dauerfestigkeitsversuche wird in der Regel nicht berücksichtigt.

Anmerkung:

Es ist möglich, daß nur das Minimum der Abminderungswerte aus Zeitstandfestigkeit und Zeitfestigkeit für die Bemessung maßgebend ist, oder daß die Versuchsdauer genügt, um die Zeitstandfestigkeit zu berücksichtigen. Beides würde sich günstig auf die Bemessung auswirken. Nach Meinung der Verfasser ist dies sogar wahrscheinlich, kann aber durch Versuche nicht belegt werden.

- Die oft wiederholten Einwirkungen werden mit der Summe der Zeiten T , in denen sie auf das Bauwerk wirken, berücksichtigt. Dies wird mit dem k_{mod} -Wert in Anlehnung an den EC 5 berücksichtigt. Dies liegt auf der sicheren Seite, weil die k_{mod} -Werte rechteckige Zeit-Spannungsverläufe berücksichtigen, während die oft wiederholten Beanspruchungen im allgemeinen einen annähernd sinusförmigen Zeit-Spannungsverlauf haben. (vgl. Bild 81) Dieser k_{mod} -Wert, der für die oft wiederholten Einwirkungen maßgebend ist, wird im weiteren mit $k_{\text{mod,fat}}$ bezeichnet. Die Summe der Einwirkungszeiten errechnet sich zu:

$$T = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 + \dots + \Delta T_N = \sum_{i=1}^N \Delta T_i \quad (35)$$

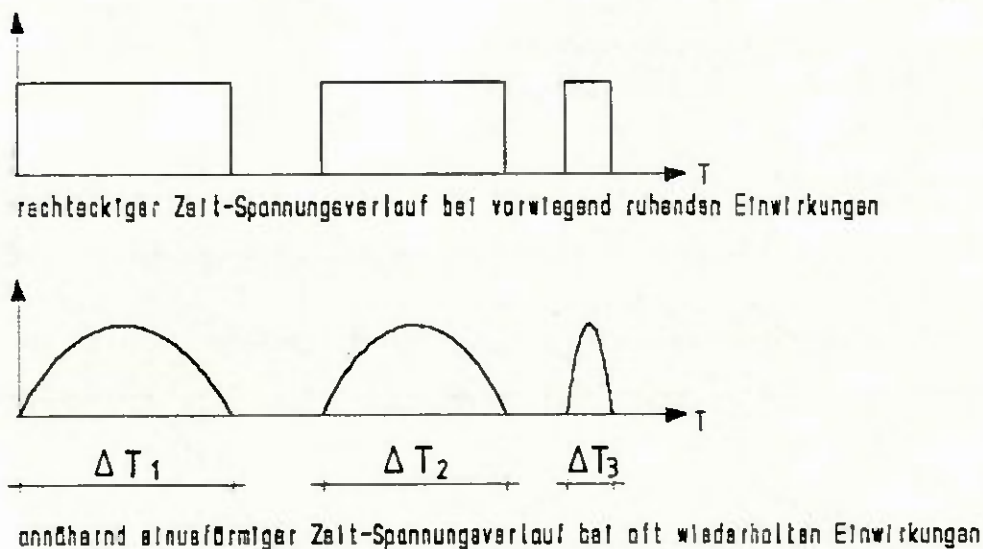


Bild 81 : Verschiedene Zeitspannungsverläufe

- Die streuenden Einwirkungen werden als 95%-Fraktilen angegeben. Um mit den Wöhlerlinien arbeiten zu können, die mit konstanten Lastamplituden erstellt wurden, werden die 95%-Fraktilen als gleiche Amplituden angesehen und mit einem Schädigungsbeiwert γ_{fat} versehen. Der Grundgedanke besteht darin, daß nur wenige Lastspiele die 95%-Fraktile überschreiten. Diese Beanspruchungsspitzen werden dann durch den statischen Nachweis, der ohnehin geführt werden muß, abgedeckt. Es wird auch von einem gewissen Ausgleich zwischen hohen und geringen Amplituden ausgegangen. Diese Annahme beinhaltet eine Art Schädigungshypothese. Deshalb ist ein Beispiel mit der einfachsten Schädigungshypothese nach Palmgren-Miner gerechnet worden, um diese Annahme einschätzen zu können (vgl. 3.2.3.). Das Ansetzen des Teilsicherheitsbeiwertes für veränderliche statische Einwirkungen γ_Q für den Schädigungsbeiwert γ_{fat} liegt auf der sicheren Seite.
- Die Lastannahmen werden als reell angesehen: d.h. in ihnen sind keine Materialeigenschaften, keine Sicherheiten wegen zu erwartender Einbaumängel, etc. enthalten. Schwingbeiwerte, Stoßzahlen etc. geben die reellen Lasterhöhungen infolge dynamischer Einwirkungen wieder.
- Die Veränderung der Verformungen und die Wirkung auf eine Veränderung der oft wiederholten Beanspruchungen werden nicht berücksichtigt. Deswegen kann nicht nach einer Theorie höherer Ordnung gerechnet werden. Auch zur Berechnung statisch unbestimmter Systeme müssen solche Angaben noch gemacht werden. Teilweise kann man die Verformungen und damit die Federkonstanten und Elastizitätsmoduln den Versuchsberichten noch entnehmen.

6.3. Anpassung an Eurocode 5 (EC 5)

6.3.1. Allgemeines

Im Eurocode werden allgemein die Bemessungswerte der Schnittgröße S_d den Bemessungswerten des Widerstandes R_d (der Tragfähigkeit) gegenübergestellt. Der Tragfähigkeitsnachweis ist erbracht, wenn:

$$S_d \leq R_d \quad (36 \text{ a})$$

eingehalten wird.

Aus den Bemessungswerten werden unter Berücksichtigung verschiedener Faktoren Bemessungsspannungen gebildet, so daß dann der Nachweis folgendermaßen aussieht:

$$\sigma_d \leq f_d \quad (36 \text{ b})$$

Für die weiteren Ableitungen werden wegen der besseren Übersichtlichkeit die Bemessungsspannungen verwendet, die wiederum auf die Bemessungswerte übertragen werden können.

Zur besseren Unterscheidung wird hier für den statischen Nachweis der Index "stat" und für den Ermüdungsnachweis der Index "fat" eingeführt. So wird beispielsweise für den statischen Nachweis der $k_{\text{mod,stat}}$ -Wert für die Zeitdauer der statischen Einwirkungen sowie der $k_{\text{mod,fat}}$ -Wert für die Zeitdauer der oft wiederholten Einwirkungen dem EC 5 entnommen.

6.3.2. Statischer Nachweis

$$\sigma_{d,stat} \leq f_{d,stat} \quad \text{bzw.} \quad S_{d,stat} \leq R_{d,stat} \quad (36 \text{ c, d})$$

Die Bemessungsspannungen $\sigma_{d,stat}$ der Schnittgrößen bilden sich aus verschiedenen Teilsicherheitsbeiwerten der Einwirkungen (γ_G, γ_Q) und den Überlagerungsbeiwerten ψ :

$$\sigma_{d,stat} = \gamma_G * \sigma_G + \gamma_Q * \sigma_{Q1} + \sum_{i>1} \psi_i * \gamma_Q * \sigma_{Qi} \quad (37 \text{ a})$$

Unter den veränderlichen Einwirkungen (σ_Q) befindet sich auch die ermüdungswirksame Einwirkung ($\sigma_{fat}, \gamma_Q, \psi_{fat}$).

Die Bemessungsspannungen des Widerstandes lauten:

$$f_{d,stat} = \frac{f_k * k_{\text{mod,stat}}}{\gamma_M} \quad (38)$$

Der Nachweis lautet dann:

$$\sigma_{d,stat} \leq f_{d,stat} \quad (36 \text{ c})$$

$$\Leftrightarrow \sigma_{d,stat} \leq \frac{f_k * k_{mod,stat}}{\gamma_M} \quad (39)$$

Bei mehreren Einwirkungen, die sich in der Einwirkungsdauer unterscheiden, müssen getrennte Nachweise geführt werden mit den entsprechenden k_{mod} -Werten in Abhängigkeit der Klasse der Einwirkungsdauern nach Tabelle 3.1.6 aus EC 5.

Vergleich mit DIN 1052:

Um später für den Ermüdungsnachweis einen Vergleich mit der DIN 1052 durchführen zu können, wird folgendes eingeführt:

Auch für die 1. veränderliche Einwirkung wird hier ein Überlagerungsbeiwert ψ , der den Wert 1,0 hat, eingeführt um die Formel zu vereinfachen. Dabei werden für $\sigma_{d,stat}$ nur die maßgebenden mittel, lang und ständig andauernden sowie die oft wiederholten Einwirkungen nach Bild 79 berücksichtigt. (Anm.: Diese Einwirkungen entsprechen etwa den Einwirkungen des Lastfalles H der DIN 1052.)

$$\sigma_{d,stat} = \gamma_G * \sigma_G + \sum_i \psi_i * \gamma_Q * \sigma_{Q_i} \quad (37 b)$$

Es wird ein mittlerer Teilsicherheitsbeiwert der statischen Einwirkungen $\gamma_{F,stat}$ definiert, der im Ermüdungsnachweis für die Ergänzung zur DIN 1052 und DIN 1074 benötigt wird.

$$\gamma_{F,stat} := \frac{\sigma_{d,stat}}{\sum \sigma} \quad \text{mit: } \sum \sigma = \sigma_G + \sum_i \sigma_{Q_i} \approx \text{vorh } \sigma \quad (40 a)$$

Der Vergleich zur DIN 1052 ergibt:

$$\text{Eurocode 5: } \frac{\sigma_{d,stat}}{\gamma_{F,stat}} \leq \frac{f_k * k_{mod,stat}}{\gamma_M * \gamma_{F,stat}} \quad \text{bzw.: } \frac{S_{d,stat}}{\gamma_{F,stat}} \leq \frac{R_k * k_{mod,stat}}{\gamma_M * \gamma_{F,stat}} \quad (41 a, b)$$

$$\text{DIN 1052: } \text{vorh } \sigma \leq \text{zul } \sigma \quad \text{bzw.: } \text{vorh } N \leq \text{zul } N \quad (42 a, b)$$

Aus den Gleichungen (40), (41 a) und (42 a) ergibt sich:

$$\text{zul } \sigma \approx \frac{f_k * k_{mod,stat}}{\gamma_M * \gamma_{F,stat}} \quad (43)$$

Weil die DIN 1052 mit $\text{zul } \sigma$ auch die ständigen Einwirkungen berücksichtigt, kann hier der $k_{mod,stat}$ -Wert von 0,6 angesetzt werden.

$$\text{zul } \sigma = \frac{f_k * k_{mod,stat}}{\gamma_M * \gamma_{F,stat}} = \frac{f_k * 0,6}{\gamma_M * \gamma_{F,stat}}$$

6.3.3. Nachweis mit oft wiederholten Einwirkungen

Die Nachweise für oft wiederholte Einwirkungen ergeben sich zu:

$$\sigma_{d,fat} \leq f_{d,fat} \quad \text{bzw.} \quad S_{d,fat} \leq R_{d,fat} \quad (36 \text{ e, f})$$

Die Bemessungsspannungen $\sigma_{d,fat}$ aus den mittel, lang und ständig andauernden sowie den oft wiederholten Einwirkungen bilden sich unter Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte γ und der Überlagerungsbeiwerte ψ . Für die erste veränderliche Einwirkung wird wieder der Überlagerungsbeiwert $\psi = 1,0$ eingeführt.

$$\sigma_{d,fat} = \gamma_G * \sigma_G + \psi_{fat} * \gamma_{fat} * \sigma_{fat} + \sum_i \psi_i * \gamma_{Q_i} * \sigma_{Q_i} \quad (37c)$$

(Anmerkung: In \sum_i sind die oft wiederholten Einwirkungen nicht mehr enthalten.)

Die Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen berücksichtigen beim statischen Nachweis diejenigen Einwirkungen, die den verwendeten Fraktilwert überschreiten. Bei der Ermüdungsbeanspruchung können jedoch größere Beanspruchungen zugelassen werden, allerdings nur mit einer geringeren Lastspielzahl. Der statische Nachweis deckt diese Überschreitungen im Hinblick auf das Bruchversagen infolge einer einmaligen Überlastung ab.

Da aber diese Überschreitungen das Bauteil schädigen, muß dies durch einen anderen Beiwert, den Schädigungsbeiwert γ_{fat} berücksichtigt werden. Der Schädigungsbeiwert γ_{fat} , der kein Sicherheitsbeiwert darstellt, sondern die Schädigung derjenigen Einwirkungen berücksichtigt, die den charakteristischen Wert der Einwirkungen σ_k bzw. S_k überschreiten, muß gesondert gebildet werden. Er steht anstelle des Teilsicherheitsbeiwertes der Einwirkungen γ_Q . Deswegen wird auch die Bezeichnung der Teilsicherheitsbeiwerte "γ" gewählt.

Um seine Größe abzuschätzen, werden in 3.2.3. Ermittlungen durchgeführt. Die Werte für diesen Schädigungsbeiwert γ_{fat} liegen je nach Streuung der Einwirkungen zwischen 1,1 und 1,4.

Sie sind damit kleiner als der Teilsicherheitsbeiwert der veränderlichen Einwirkungen $\gamma_Q = 1,5$.

Wie beim statischen Nachweis wird ein mittlerer Teilsicherheitsbeiwert der Einwirkungen $\gamma_{F,fat}$ definiert:

$$\gamma_{F,fat} := \frac{\sigma_{d,fat}}{\sum \sigma} \quad \text{mit:} \quad \sum \sigma = \sigma_G + \sum_i \sigma_{Q_i} \approx \text{vorh } \sigma \quad (40 \text{ b})$$

Um die oft wiederholten Beanspruchungen zu berücksichtigen, wird zusätzlich zum k_{mod} -Wert, der die Zeitstandfestigkeitseigenschaften berücksichtigt, ein Ermüdungsbeiwert eingeführt. Dieser wird hier als k_{fat} bezeichnet (von "fatigue" : Ermüdung).

Der k_{fat} -Wert ist nach Gleichung (2) so gebildet, daß das Produkt des k_{fat} -Wertes mit dem charakteristischen Wert f_k wieder einen charakteristischen Wert $f_{k,N}$ darstellt. $f_{k,N}$ ist die charakteristische Zeitfestigkeit für N Lastspiele. Der k_{fat} -Wert ist damit lastspielzahlabhängig.

Es ergibt sich:

$$f_{d,fat} = \frac{f_{k,N} * k_{mod,fat}}{\gamma_M} = \frac{f_k * k_{mod,fat} * k_{fat}}{\gamma_M} \quad \text{bzw.}$$
$$R_{d,fat} = \frac{R_k * k_{mod,fat} * k_{fat}}{\gamma_M} \quad (44 \text{ a, b})$$

Der Nachweis lautet dann:

$$\sigma_{d,fat} \leq f_{d,fat}$$
$$\Leftrightarrow \sigma_{d,fat} \leq \frac{f_k * k_{mod,fat} * k_{fat}}{\gamma_M} \quad \text{bzw.} \quad S_{d,fat} \leq \frac{R_k * k_{mod,fat} * k_{fat}}{\gamma_M} \quad (45 \text{ a, b})$$

6.4. Ergänzung zur DIN 1052 und DIN 1074

Geht man davon aus, daß die DIN 1052 und der EC 5 die gleiche Sicherheit gegen Versagen der Bauteile haben und die Lastannahmen vergleichbar sind, kann man mit einer einfachen Überlegung die Bemessung für oft wiederholte Einwirkungen vom EC 5 auf die DIN 1052 übertragen.

Lastfall H

In Anlehnung an Abschnitt 6.5 der DIN 1052 bzw. Abschnitt 5.2 (2) der DIN 1074 wird ein k_{Erm} (Erm := Ermüdung) zur Berücksichtigung der oft wiederholten Einwirkungen eingeführt:

$$zul \sigma' = k_{Erm} * zul \sigma \quad (25 c)$$

Die DIN 1052 geht für oft wiederholte Beanspruchungen von folgendem Nachweis aus:

$$\frac{vorh \sigma}{zul \sigma'} \leq 1 \quad (46)$$

Dabei entspricht $vorh \sigma$ der Einwirkungsseite ohne den mittleren Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{F,fat}$.

$$vorh \sigma \approx \frac{\sigma_{d,fat}}{\gamma_{F,fat}} \quad (\text{vgl. (40 b)})$$

Die Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_{F,stat}$ und γ_M , ein Modifikationsfaktor $k_{mod,stat}$ und der charakteristische Wert f_k sind in $zul \sigma$ enthalten.

$$zul \sigma \approx \frac{f_k * k_{mod,stat}}{\gamma_M * \gamma_{F,stat}} \quad (43)$$

Das Einsetzen der Gleichungen (40), (25 c), (45 a) und (43) in (46) ergibt dann für die Grenzzustände $vorh \sigma = zul \sigma'$ und $\sigma_{d,fat} = f_{d,fat}$:

$$\begin{aligned} \frac{vorh \sigma}{zul \sigma'} = 1 &\Rightarrow \frac{\frac{\sigma_{d,fat}}{\gamma_{F,fat}}}{k_{Erm} * \frac{f_k * k_{mod,stat}}{\gamma_M * \gamma_{F,stat}}} = 1 \Rightarrow \frac{\frac{f_k * k_{mod,stat} * k_{fat}}{\gamma_{F,fat} * \gamma_M}}{k_{Erm} * \frac{f_k * k_{mod,stat}}{\gamma_M * \gamma_{F,stat}}} = 1 \\ &\Rightarrow k_{Erm} \approx k_{fat} * \frac{k_{mod,fat}}{k_{mod,stat}} * \frac{\gamma_{F,stat}}{\gamma_{F,fat}} \end{aligned} \quad (47)$$

Nach Einsetzen der Gleichungen (37 a, b) und (40 a, b) ergibt sich:

$$k_{Erm} \approx k_{fat} * \frac{k_{mod,fat}}{k_{mod,stat}} * \frac{\gamma_G * \sigma_G + \psi_{fat} * \gamma_Q * \sigma_{fat} + \sum_i \psi_i * \gamma_Q * \sigma_{Qi}}{\gamma_G * \sigma_G + \psi_{fat} * \gamma_{fat} * \sigma_{fat} + \sum_i \psi_i * \gamma_Q * \sigma_{Qi}} \quad (48)$$

Vereinfachungen:

Es werden folgende Formeln eingeführt, um die oben stehenden Formeln zu vereinfachen:

$$1) \quad k_T := \frac{k_{\text{mod},fat}}{k_{\text{mod},stat}} = \frac{k_{\text{mod},fat}}{0,6} \quad (49)$$

k_T berücksichtigt, daß die Summe der Einwirkungszeiten der oft wiederholten Beanspruchungen sich von der statischen Bemessung nach DIN 1052 unterscheidet.

$$2) \quad k_F := \frac{\gamma_G * \sigma_G + \psi_{fat} * \gamma_Q * \sigma_{fat} + \sum_i \psi_i * \gamma_Q * \sigma_{Q_i}}{\gamma_G * \sigma_G + \psi_{fat} * \gamma_{fat} * \sigma_{fat} + \sum_i \psi_i * \gamma_Q * \sigma_{Q_i}} \quad (50)$$

k_F berücksichtigt, daß auch Spannungsspitzen mit einer geringen Lastspielzahl ertragen werden können. (vgl. 6.2. und 3.2.3.)

Anmerkung: Dieser Faktor k_F kann auf der sicheren Seite liegend mit 1 angesetzt werden. Weitere Umformungen sind noch möglich.

Damit ergibt sich:

$$k_{Erm} = k_{fat} * k_T * k_F \quad (51)$$

Andere Lastfälle

Die Lastfälle HZ und HS müssen wie beim statischen Nachweis untersucht werden. Die Ermüdung muß nicht berücksichtigt werden, weil mit den Lastfällen HZ und HS kurz andauernde Einwirkungen erfaßt werden. (vgl. 6.2.)

Brems- und waagrechte Seitenkräfte (z.B. von Kranen), die sich oft wiederholen, müssen mit einem Ermüdungsnachweis nachgewiesen werden.

6.5. Bemessungsbeispiel

Als Bemessungsbeispiel wird eine Kranbahnstütze gewählt, die starr eingespannt ist.

6.5.1. Statisches System, Schnittgrößen

Statisches System:

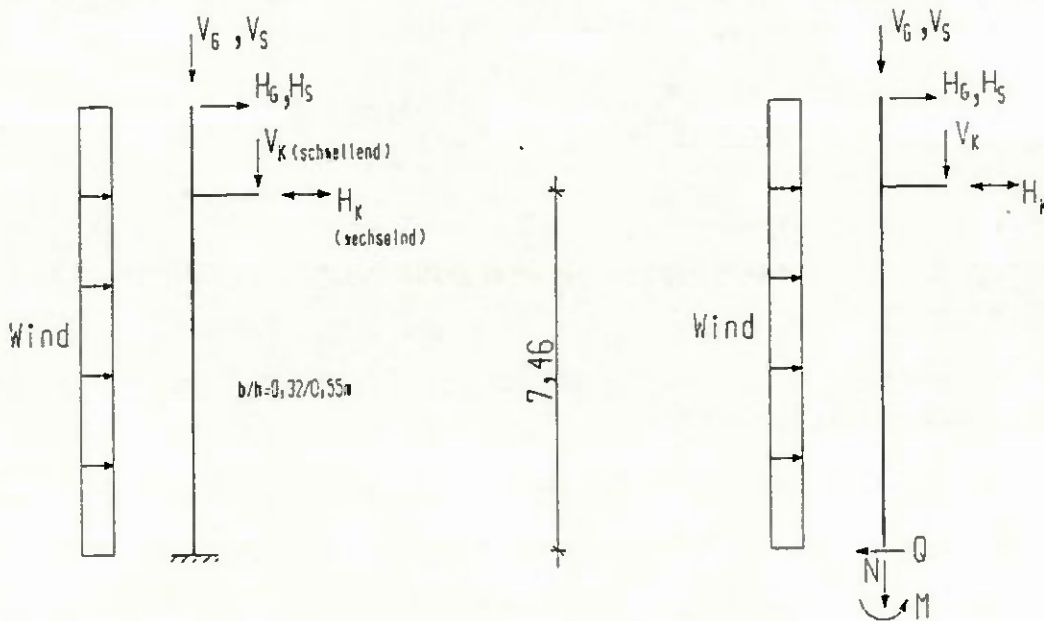


Bild 82: Statisches System und Schnittgrößendefinition

Gewählte Abmessungen der Stütze aus BSH Gkl. II:

$$b/h = 0,32\text{m}/0,55\text{m}$$

$$A = 0,176\text{m}^2$$

$$W = 0,01613\text{m}^3$$

Schnittgrößen am Fußpunkt:

	M [kNm]	N [kN]	Q [kN]
Eigengewicht (G):	5,47	-39,48	0,73
Schnee (S):	3,14	-36,56	0,42
Wind (W):	86,60	0	11,61
Kran (K):	+/-34,69	0/-53,20	+/-2,31
gesamt:	129,90	-129,24	15,07

6.5.2. Bemessung mit oft wiederholten Einwirkungen

Restfestigkeit:

Die Biegemomente, die aus Wind resultieren, wirken nur in einer Richtung nämlich in der gleichen Richtung wie der überwiegende Teil der oft wiederholten Beanspruchungen, die aus den vertikalen Kranlasten resultieren. Deshalb ist keine Verringerung der Restfestigkeit durch die oft wiederholten Beanspruchungen zu erwarten.

Ermüdungsnachweis:

Die Stütze aus Brettschichtholz hat unmittelbar an der Einspannung die Stelle der maximalen Beanspruchungen. Die Zahl der Lastspiele werden mit $2 \cdot 10^6$ angesetzt. Das ergibt bei einer Nutzungsdauer von 50 Jahren und 200 Nutzungstagen im Jahr 200 Lastspiele pro Tag. Die Normalkräfte werden schwellend angesetzt. Die oft wiederholten Biege- und Schubbeanspruchungen aus dem Kran, die vertikal (z.B.: Heben und Senken) und horizontal (z.B.: Bremsen und Anfahren) wirken, werden ungünstig auf eine Stütze wirkend und wechselnd angesetzt.

Für die Normalspannungen (Biegung und Normalkraft) lautet dann der Nachweis:

$$\frac{\frac{M}{W}}{zul \sigma_B * k_{Erm,B}} + \frac{\frac{N}{A}}{zul \sigma_k * k_{Erm,D}} \leq 1 \quad (\text{analog (25) und (46) bzw. (29)})$$

für die Schubspannungen mit einem Rechteckquerschnitt:

$$\frac{\tau}{zul \tau} = \frac{\frac{1,5 * Q}{A}}{zul \tau * k_{Erm,Q}} \leq 1 \quad (\text{analog (25) und (46)})$$

Die Schnittgrößen werden in [kNm] und [kN], die Spannungen in [N/mm²] angegeben.

1) Biegung und Normalkraft

1.1) Schnittgrößen

Bei diesem Beispiel werden die Schneelasten den mittel andauernden Einwirkungen zugerechnet. Die Windlasten werden als kurz andauernde Einwirkungen angesehen und im Ermüdungsnachweis nicht berücksichtigt. (vgl. 6.2.)

Aus Eigengewicht (G) und Schnee (S) wirken:

$$M_G + M_S = 5,47 + 3,14 = 8,61$$

und durch den Kran (K) :

$$M_K = +/- 34,69$$

Damit ergibt sich:

$$\min M = 8,61 - 34,69 = -26,08$$

$$\max M = 8,61 + 34,69 = +43,3$$

$$\min N = 39,48 + 36,56 = 76,04$$

$$\max N = 39,48 + 36,56 + 53,2 = 129,24$$

1.2) Ermittlung des Abminderungswertes k_{fat} für die Biegung

$$\kappa = \frac{\min M}{\max M} = \frac{-26,08}{+43,3} = -0,60 \quad (1)$$

Durch Interpolation entnimmt man den k_{fat} -Wert nach 8.2.7. 2) für $\kappa = -0,60$ mit 0,34.

1.3) Ermittlung von $k_{Erm,B}$:

Die Kranlasten wirken nur eine begrenzte Zeit. Ein Lastspiel wird mit einer Minute angesetzt. Bei $2 \cdot 10^6$ Lastspielen ergibt die Summe ca. 4 Jahre.

$$k_T = \frac{k_{mod,Kran}}{k_{mod,stat}} = \frac{0,7}{0,6} = 1,167 \quad (49)$$

Kranlasten sind wegen den eingebauten Überlastsicherungen nur geringen Streuungen unterworfen. Deswegen kann der Schädigungsbeiwert für die Kranlasten γ_{fat} von 1,5 auf 1,1 gesenkt werden.

Dieser Umstand wird mit einem Faktor k_F berücksichtigt.

$$\begin{aligned} k_F &= \frac{\gamma_G * M_G + \psi_{fat} * \gamma_Q * M_K + \psi * \gamma_Q * M_S}{\gamma_G * M_G + \psi_{fat} * \gamma_{fat} * M_K + \psi * \gamma_Q * M_S} = \\ &= \frac{1,35 * 5,47 + 1,0 * 1,5 * 34,69 + 0,6 * 1,5 * 3,14}{1,35 * 5,47 + 1,0 * 1,1 * 34,69 + 0,6 * 1,5 * 3,14} = \frac{62,25}{48,37} = 1,29 \end{aligned} \quad (50)$$

Für $k_{Erm,B}$ ergibt sich dann:

$$k_{Erm,B} = k_{fat} * k_T * k_F = 0,34 * 1,167 * 1,29 = 0,51 \quad (51)$$

1.4) Ermittlung von k_{fat} für die Normalkraft:

$$\kappa = \frac{\min N}{\max N} = \frac{76,04}{129,04} = 0,59 \quad (1)$$

Durch Interpolation entnimmt man den k_{fat} -Wert nach 8.2.4. für $\kappa = 0,59$ mit 0,90.

1.5) Ermittlung von $k_{Erm,D}$:

$$k_T = 1,167 \quad (\text{s. oben})$$

$$\begin{aligned} k_F &= \frac{\gamma_G * N_G + \psi_{fat} * \gamma_Q * N_K + \psi * \gamma_Q * N_S}{\gamma_G * N_G + \psi_{fat} * \gamma_{fat} * N_K + \psi * \gamma_Q * N_S} = \\ &= \frac{1,35 * 39,48 + 1,0 * 1,5 * 53,2 + 0,6 * 1,5 * 36,56}{1,35 * 39,48 + 1,0 * 1,1 * 53,2 + 0,6 * 1,5 * 36,56} = \frac{166}{144,72} = 1,147 \end{aligned} \quad (50)$$

$$k_{Erm,D} = k_{fat} * k_T * k_F = 0,90 * 1,167 * 1,147 = 1,20 \quad (51)$$

$$\Rightarrow k_{Erm,D} = 1,0$$

Anmerkung: Das Knickverhalten wird hier wie bei vorwiegend ruhenden Einwirkungen mit $\omega = 2,5$ berücksichtigt.

1.6) Nachweis:

$$\frac{\frac{M}{W}}{zul\sigma_B * k_{Erm,B}} + \frac{\frac{N}{A}}{zul\sigma_k * k_{Erm,D}} = \frac{43,3 * 10^{-3}}{11 * 0,51} + \frac{129 * 10^{-3}}{\frac{8,5}{2,5} * 1,0} =$$
$$= \frac{2,68}{5,61} + \frac{0,733}{3,4} = 0,48 + 0,23 = 0,71 \leq 1$$

2) Schub

2.1) Schnittgrößen:

$$\max Q = 0,73 + 0,42 + 2,31 = 3,46$$

$$\min Q = 0,73 + 0,42 - 2,31 = -1,16$$

2.2) Ermittlung von k_{fat} :

$$\kappa = \frac{\min Q}{\max Q} = \frac{-1,16}{3,46} = -0,335 \quad (1)$$

Durch Interpolation ergibt sich nach 8.2.8.3. der k_{fat} -Wert zu 0,28.

2.3) Ermittlung von $k_{Erm,Q}$:

$$k_T = 1,167$$

$$k_F = 1$$

$$k_{Erm,Q} = k_{fat} * k_T * k_F = 0,28 * 1,167 * 1 = 0,33$$

(s. oben)

(sichere Seite, vgl. 6.4.)

(51)

2.4) Nachweis:

$$\frac{\tau}{zul\tau} = \frac{1,5 * \frac{\max Q}{A}}{zul\tau * k_{Erm,Q}} = \frac{1,5 * \frac{3,46 * 10^{-3}}{0,176}}{1,2 * 0,33} = \frac{0,029}{0,40} = 0,07 \ll 1$$

3) Einspannung:

Heimeshoff und Eglinger /Hei2/ geben für eingespannte Brettschichtträger Bemessungsformeln für die erforderliche Einspanntiefe an. Diese Formeln berücksichtigen die im Einspannbereich auftretenden Querdruckspannungen σ_{\perp} und die im Einspannbereich auftretende Schubspannung τ .

Für die praktische Bemessung der erforderlichen Einspanntiefe wird von den Spannungsverhältnissen

$$\frac{\text{vorh } \sigma}{\text{zul } \sigma_B} \text{ und } \frac{\text{vorh } \tau}{\text{zul } \tau}$$

ausgegangen. Dabei sind *vorh* σ und *vorh* τ die Biege- bzw. Schubspannungen der Stütze an der Einspannstelle. Der Nachweis wird hier nach Tabelle 2 aus /Hei2/ geführt. Die oft wiederholten Einwirkungen werden durch die Abminderung der zulässigen Spannungen mittels den k_{Erm} -Werten berücksichtigt:

$$\text{zul } \sigma' = \text{zul } \sigma * k_{Erm,B} = 11 * 0,51 = 5,61 \text{ N / mm}^2$$

Mit diesen geänderten zulässigen Werten, die die oft wiederholten Einwirkungen berücksichtigen, wird die Bedingung

$$\frac{\text{vorh } \sigma_B}{\text{zul } \sigma_B'} = \frac{2,68}{5,61} = 0,48 < 0,60$$

eingehalten. Bei diesem Wert ist nach Tabelle 2 aus /Hei2/ der Bereich 1 maßgebend, für den die Schubspannung nicht mehr berücksichtigt werden muß und eine Mindesteinspanntiefe von $t \geq 2h$ ausreichend ist.

Hinweis:

Für eingespannte Stützen in Betonfundamenten "sollen im Einspannbereich keine planmäßigen Biegemomente aus ständigen Lasten auftreten." /Hei2/ In diesem Berechnungsbeispiel sind sie gering. In der Praxis können diese Biegemomente aus ständigen Lasten beispielsweise durch eine gezielte Auflagerung des Dachbinders eliminiert werden.

6.5.3. Bewertung

Der Nachweis der Tragfähigkeit ist damit erbracht. Das Bemessungsbeispiel wurde für einen konkreten Fall gemacht. In diesem Beispiel führen die hohen Windlasten, die auf die Stütze wirken, dazu, daß sich die Bemessung für oft wiederholte Einwirkungen nicht dahingehend auswirkt, daß die Querschnitte vergrößert werden müssen.

6.6. Bewertung der DIN 1052 Teil 1 und 1074

In diesem Abschnitt werden die Bemessungsregeln der DIN 1052 Teil 1 und DIN 1074 bezüglich der oft wiederholten Einwirkungen mit dem neuen Bemessungskonzept dieses Berichtes verglichen.

6.6.1. Vorbemerkungen

In das neue Bemessungskonzept gehen mehr Einflußfaktoren ein als in die Bemessungsregeln der DIN 1052 Teil 2 und DIN 1074. Diese werden hier folgendermaßen angesetzt.

1) Lastspielzahl:

Die Lastspielzahl wird mit 10^7 Lastspielen hoch angesetzt.

2) Summe der Einwirkungszeiten:

Die Summe der Einwirkungszeiten der oft wiederholten Beanspruchungen wird mit maximal 6 Monaten angesetzt. Damit ergibt sich nach EC 5, Tabelle 3.1.7 für Holz und Brettschichtholz in der Nutzungsklasse 1 und 2 ein $k_{\text{mod},fat}$ -Wert von 0,8.

3) Schädigungsbeiwert γ_{fat} :

Die Schädigungsbeiwerte γ_{fat} werden mit den in 3.2.3. ermittelten Werten für $V=0,2$ angesetzt.

Das ist für die Biegeschwellbeanspruchung $\gamma_{fat,S} = 1,28$

und für die Biegewechselbeanspruchung $\gamma_{fat,W} = 1,25$

Diese Werte werden auch für andere Beanspruchungsarten (Zug, Druck, Schub) und für die Verbindungsmittel angesetzt.

4) Sonstige Einwirkungen:

Sonstige Einwirkungen sind gering. Dieser Ansatz ist notwendig, um die Ergebnisse besser vergleichen zu können.

6.6.2. Regelungen der DIN 1052 Teil 1

Für eine Schwellbeanspruchung muß keine Abminderung getroffen werden:

$$k_s = 1$$

Für wechselnde Beanspruchungen werden die zulässigen Spannungen folgendermaßen abgemindert:

$$k_w = 1 - 0,25 \frac{\min|\sigma|}{\max|\sigma|} \quad (26)$$

Das ergibt bei einer reinen Wechselbeanspruchung ($\kappa = -1$, d.h. $\min|\sigma| = \max|\sigma|$) einen Wert von $k_w = 0,75$.

6.6.3. Regelungen der DIN 1074

Die DIN 1074 gibt für Verbindungsmittel folgende Abminderung der zulässigen Kräfte an:

$$k_{S,W} = 0,75 \pm 0,25 * \frac{\min. |N|}{\max. |N|} \quad (27)$$

Bei Schwellbeanspruchung gilt das positive, bei Wechselbeanspruchung das negative Vorzeichen.

Das ergibt für eine reine Schwellbeanspruchung ($\kappa = 0$, d.h. $\min|N|$ bzw. $\min|\sigma| = 0$) einen Wert von $k_S = 0,75$ und für eine reine Wechselbeanspruchung einen Wert von $k_W = 0,50$ ($\kappa = -1$, d.h. $\min|N| = \max|N|$ bzw. $\min|\sigma| = \max|\sigma|$).

6.6.4. Vorgeschlagenes Bemessungskonzept

Der Nachweis für oft wiederholte Beanspruchungen mit den zulässigen Spannungen und Kräften nach DIN 1052 Teil 1 und 2 erfolgt mittels einer Abminderung nach Gleichung (51):

$$k_{Erm} = k_{fat} * k_T * k_F \quad (51)$$

Mit den in den Vorbemerkungen gemachten Angaben ergibt sich:

$$k_T = \frac{k_{mod,fat}}{k_{mod,stat}} = \frac{0,8}{0,6} = 1,33 \quad (49)$$

$$k_F = \frac{\gamma_G * \sigma_G + \psi_{fat} * \gamma_Q * \sigma_{fat} + \sum_i \psi_i * \gamma_Q * \sigma_{Qi}}{\gamma_G * \sigma_G + \psi_{fat} * \gamma_{fat} * \sigma_{fat} + \sum_i \psi_i * \gamma_Q * \sigma_{Qi}} = \quad (50)$$
$$\begin{aligned} &= \frac{0 + \psi_{fat} * \gamma_Q * \sigma_{fat} + 0}{0 + \psi_{fat} * \gamma_{fat} * \sigma_{fat} + 0} = \frac{\gamma_Q}{\gamma_{fat}} = \frac{1,5}{1,25} = 1,2 \quad (\text{Wechselbeanspruchung}) \end{aligned}$$

$$k_F = \frac{\gamma_Q}{\gamma_{fat}} = \frac{1,5}{1,28} = 1,17 \approx 1,2 \quad (\text{Schwellbeanspruchung})$$

Damit ergeben sich mit den k_{fat} -Werten, die in Anlage 8.2. ermittelt worden sind, folgende Abminderungswerte k_{Erm} , die mit den zulässigen Spannungen und Kräften nach DIN 1052 Teil 1 und 2 zu multiplizieren sind und so die Ermüdung berücksichtigen:

Reine Schwellbeanspruchung:

- Zugschwellen:

$$k_{Erm,ZS} = k_{fat} * k_T * k_F = 0,50 * 1,33 * 1,2 = 0,80$$

- Druckschwellen:

$$k_{Erm,DS} = k_{fat} * k_T * k_F = 0,75 * 1,33 * 1,2 = 1,2$$

$$\Rightarrow k_{Erm,DS} = 1,0$$

- Biegeschwellen bei Vollholz:
 $k_{Erm,BS.VH} = k_{fat} * k_T * k_F = 0,42 * 1,33 * 1,2 = 0,67$
- Biegeschwellen bei Schichtholz:
 $k_{Erm,BS.SH} = k_{fat} * k_T * k_F = 0,52 * 1,33 * 1,2 = 0,83$
- Schub:
 $k_{Erm,SS} = k_{fat} * k_T * k_F = 0,30 * 1,33 * 1,2 = 0,48$
- Verbindungsmittel:
 Der k_{fat} -Wert kann nach 3.1.2.5. zwischen 0,45 und 0,50 abgeschätzt werden.
 $k_{Erm,VM} = k_{fat} * k_T * k_F = 0,45...0,50 * 1,33 * 1,2 = 0,72...0,80$

Reine Wechselbeanspruchung:

- Zug-Druck-Wechsel
 $k_{Erm,ZDW} = k_{fat} * k_T * k_F = 0,26 * 1,33 * 1,2 = 0,41$
- Biegewechsel bei Vollholz
 $k_{Erm,BW.VH} = k_{fat} * k_T * k_F = 0,26 * 1,33 * 1,2 = 0,41$
- Biegewechsel bei Schichtholz
 $k_{Erm,BW.SH} = k_{fat} * k_T * k_F = 0,20 * 1,33 * 1,2 = 0,32$

6.6.5. Diskussion

1) Die Lastspielzahl sollte nicht geringer angesetzt werden, weil der Übergang der Wöhlerlinien in eine Horizontalen bei unterschiedlichen Rohdichten unterschiedlich erfolgt (vgl. 3.2.1.1.)

2) Geringere $k_{mod,fat}$ -Werte liefern einen geringeren k_T -Wert und damit geringere k_{Erm} -Werte. Wenn nachgewiesen wird, daß nur das Minimum der Abminderungswerte aus Zeitstandfestigkeit und Zeitfestigkeit für die Bemessung maßgebend ist oder daß die Versuchsdauer genügt, um die Zeitstandfestigkeit zu berücksichtigen, ergibt sich ein günstigerer d.h. größerer k_T -Wert. (vgl. Anmerkung in 6.2.) Dieser wird dann zu

$$k_T = \frac{1,0}{0,6} = 1,67$$

berechnet und ergibt die 1,25-fachen k_{Erm} -Werte.

3) Die in den Vorbemerkungen angesetzten γ_{fat} -Werte liegen im mittleren Bereich .

4) Der Ansatz von anderen Einwirkungen außer den ermüdungswirksamen führt zu einer Verminderung des k_F -Wertes. Er geht dann gegen 1. Damit werden die k_{Erm} -Werte geringer.

6.6.6. Vergleich und Bewertung der Ergebnisse

Die Bemessungsregel der DIN 1052 Teil 1 liefert im Vergleich zu dem vorgeschlagenen Bemessungskonzept Abminderungen, die zu ungünstig sind, auf zu große zulässige Spannungen führen und damit auf der unsicheren Seite liegen. Dies gilt sowohl für eine Wechsel- als auch für eine Schwellbeanspruchung im Bereich nahe $\kappa=0$. Dies wird durch die Untersuchung von Kolb /Koll/ bestätigt. Er stellte bei einer Biegeschwellbeanspruchung an großen Proben aus Vollholz und einem κ -Wert von 0,33 Brüche bei einer Beanspruchung mit dem 1,5-fachen der zulässigen Spannungen nach DIN 1052 Teil 1 fest. Das heißt, daß bei diesem κ -Wert und den Bemessungsregeln nach DIN 1052 Teil 1 die Sicherheit weniger als 1,5 beträgt. Bei einem κ -Wert nahe 0 wird dann diese Sicherheit wegen der größeren Spannungsausläge der oft wiederholten Einwirkungen noch geringer.

Die Bemessungsregel der DIN 1074 bestätigt die Ergebnisse für Verbindungsmittel. Sie scheint auch geeignet zu sein für die Bemessung bei Zug- und Biegeschwellbeanspruchung. Bei einer Zug-Druck-Wechselbeanspruchung sowie einer Biegewechselbeanspruchung sind die nach DIN 1074 ermittelten Abminderungswerte geringfügig zu ungünstig und liegen auf der unsicheren Seite.

Dies wird im folgenden Bild 83 zum Ausdruck gebracht.

(Anmerkung zu Bild 83: Die k_{Erm} -Werte für $\kappa=-1$, $\kappa=0$ und $\kappa=1$ werden linear verbunden. Es wird für $\kappa=1$ der k_{Erm} -Wert 1,0 angesetzt.)

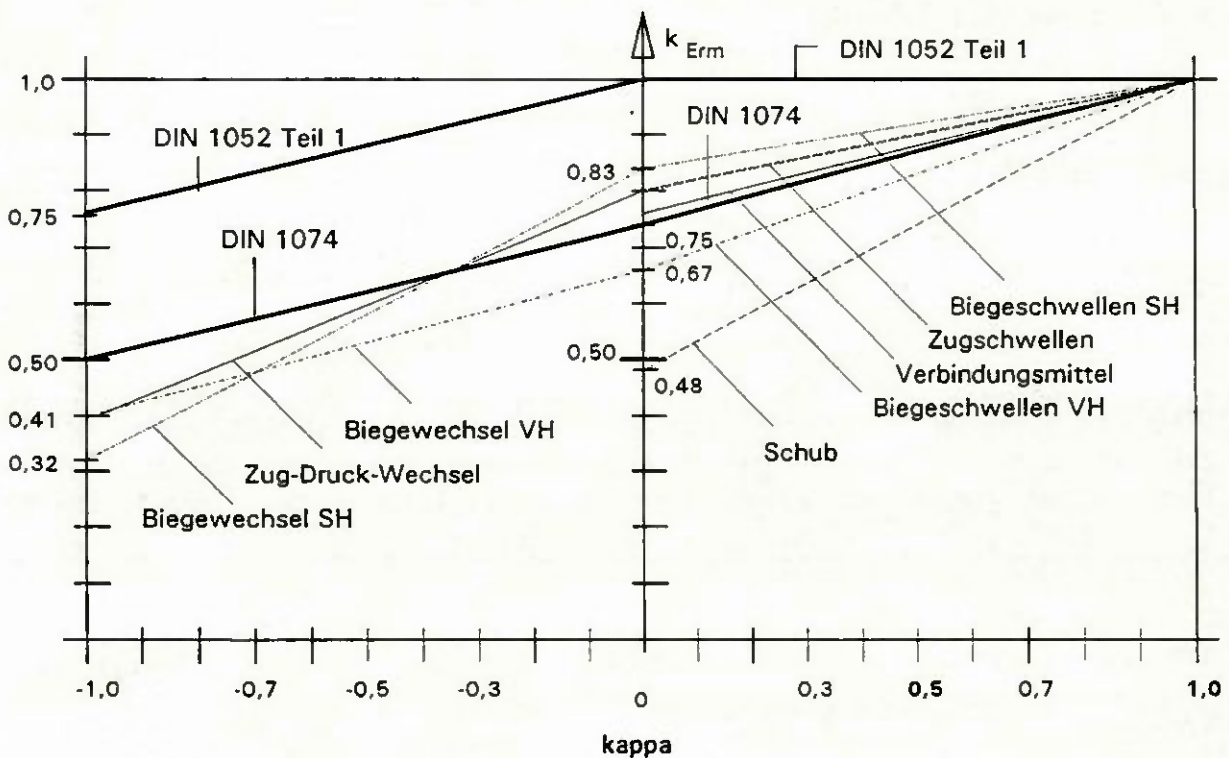


Bild 83: Vergleich der Ergebnisse des vorgeschlagenen Bemessungskonzeptes mit den Bemessungsregeln der DIN 1052 Teil 1 und DIN 1074

7. Literatur

7.1. Allgemeine Hinweise

Dieses Literaturverzeichnis ist alphabetisch angelegt. Hinter der fortlaufenden Nummer befindet sich noch eine interne Numerierung. Das Verzeichnis erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Das heißt, es sind nur Werke angegeben, die durch entsprechende Hilfsmittel aufgefunden und beschafft werden konnten.

Titel, die keinen Hinweis auf einen Beitrag zum Problem der nicht vorwiegend ruhenden Lasten im Holzbau erkennen ließen, wurden teilweise sogar weggelassen, weil sonst die Literaturbeschaffung ins Uferlose wüchse.

Im zweiten Teil des Literaturverzeichnisses werden Veröffentlichungen genannt, die nicht beschafft werden konnten, aber für diesen Bericht vermutlich wichtig gewesen wären.

Im dritten Teil finden sich verschiedene Normen und Standards.

7.2. Literatur

/1/ (Ab1)

Abendroth R. E., Wipf T. J. : Cyclic Behavior of Bolted Timber Joint. In: Journal of Structural Engineering 105 (1989) Nr. 10, S. 2496-2510.

/2/ (Ai1)

Aicher, S.; Reinhardt, H. W. : Einfluß der Bauteilgröße in der linearen und nichtlinearen (Holz-) Bruchmechanik. In: Holz als Roh- und Werkstoff 51 (1993), S. 215-220.

/3/ (Are1)

American Railway Engineering Association: Static and Repeated- Load Strength of Bolted Timber Joints. In: American Railway Engineering Association, Bulletin AREA, Washington D.C., 61 (1959) Nr. 551, S.79-134.

/4/ (Asc1)

American Society of Civil Engineers : Duration of Load and Fatigue in Wood Structures: Progress Report of a Sub-Committee of the Committee on Timber Structures of the Structural Division. (Proc. Paper 1361). In: Journal of the Structural Division (1957) ST 5, S. 1361-1 bis 1361-12.

/5/ (Ang1)

Angström, T. K. : Aeronautical Research in Sweden. In: Journal of the Royal Aeronautical Society 33 (1929) Nr. 226, Okt., S. 897-914.

/6/ (Ans2)

Ansell, M. P.; Tsai, K. T. : Fatigue testing of wood composites for aerogenerator rotor blades. In: Wind Energy Conversion 1984: Proceedings of the 6. BWEA Wind Energy Conference, Cambridge (1984), S. 239-255.

/7/ (Bar6)

Barrett, J. D. : Fracture mechanics and the design of wood structures. In: Phil. Trans. R. Soc. London A 299 (1981), S. 217-226.

/8/ (Bar7)

Barrett, J. D.; Foschi, R. : Duration of Load and Probability of Failure in Wood. Part I: Modelling Creep Rupture. In: Canadian Journal of Civil Engineering 5 (1978) Nr. 4, S. 505-514.

/9/ (Bar8)

Barrett, J. D.; Foschi, R. : Duration of Load and Probability of Failure in Wood. Part II: Constant, Ramp and Cyclic Loadings. In: Canadian Journal of Civil Engineering 5 (1978) Nr. 4, S. 515-532.

/10/ (Be4)

Becker, K.; Zeitter, H. : Holzbau: Theoretische und experimentelle Untersuchungen für die Anwendung des EC 8. Technische Hochschule Darmstadt, Fachgebiet Holzbau. Abschlußbericht 1992

/11/ (Blo1)

Block, K. : Der harte Querstoß - Impact - auf Balken aus Stahl, Beton und Stahlbeton. Dissertation, Dortmund 1983.

/12/ (Boa2)

Boatright, S. W. J. : Studies on the Fracture and Fatigue of Wood. M. Sc. Thesis, University of Cape Town. South Africa, 1977. (zit. in: /Dob1/)

/13/ (Bod2)

Bodig, J.; Jayne, B. A. : Mechanics of Wood and Wood Composites. S. 278-281, Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York 1982. S. 319-334.

/14/ (Boh1)

Bohannon, B.; Kanvik, K. J. : Fatigue strength of finger joints. U.S.D.A. Forest Service Research Paper FPL 114, Forest Prod. Lab., Madison Wis., 1969.

/15/ (Bon1)

Bonfield, P. W.; Ansell, M. P. : Fatigue properties of wood in tension, compression and shear. In: Journal of Materials Science 26 (1991), S. 4765-4773.

/16/ (Bor1)

Borchard, B. : Die Entwicklung des Holznagelbaus in den letzten 10 Jahren. In: Die Bautechnik 28 (1951) Nr. 7, S. 145-147.

/17/ (Bor2)

Bordonne, P.-A.; Okuyama, T.; Marsoem, S. N. : Mechanical Responses of Wood to Repeated Loading III.: Effect of wave-form on dissipated energy. In: Journal of the Japan Wood Research Society 33 (1987) Nr. 8, S. 623-629.

/18/ (Brö1)

Bröker, F.-W.; Krause, H. A. : Orientierende Untersuchungen über das Haltevermögen dynamisch beanspruchter Holzschrauben. In: Holz als Roh- und Werkstoff 49 (1991), S. 381-384.

/19/ (Brö2)

Bröker, F.-W.; Salamon, S. : Instrumentierung eines Pendelschlagwerkes für die Holzprüfung. In: Holz als Roh- und Werkstoff 47 (1989), S. 93-97.

/20/ (Bü1)

Bürnheim, L. : Wechselbiegefestigkeit und Kerbempfindlichkeit verschiedener Flughölzer. In: Focke-Wulf Versuchsbericht Nr. 3434 vom 30.7.1943. (zit. in: /Kol8/)

/21/ (Bur1)

Burmester, A.; Hoffmann, A. : Schraubenhaltevermögen von Kiefern- und Fichtenholz unter langdauernder statischer und dynamischer Belastung. In: Holzbearbeitung 17 (1970) Nr.5, S. 9-11.

/22/ (Bur2)

Burmester, A. : Versuche mit einer Prüfeinrichtung zum Bestimmen der Wechselbiegefestigkeit von Holz. In: Materialprüfung 7 (1965) Nr. 9, S. 321-324.

/23/ (Ce2)

Ceccotti, A.; Spinelli, P.; Uzielli, L. : Sul comportamento sotto carichi statici e dinamici di travi in legno lamellare incollato di abete rosso e di pioppo. Congresso C.T.E. sull' Industrializzazione edilizia. Verona, Novembre 1982.

/24/ (Ci2)

Cizek, L. : Einfluß der Feuchtigkeit auf das rheologische Verhalten des Holzes. In: Holz als Roh- und Werkstoff 26 (1968) Nr. 11, S. 416-417.

/25/ (Co6)

Corotis, B. R.; Sheehan, D. P. : Wood damage accumulation by stochastic load models. In: Journal of Structural Engineering 112 (1986) Nr. 11, S. 2402-2415.

/26/ (Deb1)

Debaise, G. R.; Porter, A. W.; Pentoney, R. W. : Morphology and Mechanics of Wood Fracture. In: Materials Res. Stand. (ASTM) 6 (1966), S. 493-499.

/27/ (Di2)

Dietz, A. G. H.; Grinsfelder, H. : Behaviour of synthetic adhesives in Plywood under alternating stresses. In: Transactions of the A.S.M.E. 66 (1944), S. 319-328.

/28/ (Dob1)

Dobraszczyk, B. : An Investigation into the Fracture and Fatigue Behavior of Wood. Ph. D. Thesis, University of Bath, Bath 1983.

/29/ (Dor1)

Dorff, D. : Vergleich verschiedener statistischer Transformationsverfahren auf ihre Anwendbarkeit zur Ermittlung der Dauerschwingfestigkeit. Dissertation TU Berlin 1961.

/30/ (Dor2)

Dorn, H.; Egner, K. : Untersuchungen an Keilzinkenstößen in tragenden Holzbauteilen nach langjähriger Verwendung. In: Holz als Roh- und Werkstoff 19 (1961) Nr. 3, S. 100-112.

/31/ (Dos1)

Dosoudil, A. : Dauerfestigkeit der verdichteten Hölzer. In: VDI-Zeitschrift 91 (1949) Nr. 4, S. 85-88.

/32/ (Dos2)

Dosoudil, A. : Prüfverfahren für Holzfaser- und Holzspanplatten: Kurze Übersicht mit Diskussionsvorschlägen. In: Holz als Roh- und Werkstoff 12 (1954) Nr. 2, S. 55-64.

/33/ (Ec1)

Eckelmann, C. A. : The Fatigue Strength of Two-Pin Moment-Resisting Dowel Joints. In: Forest Products Journal (1970) Nr. 5, S. 42-45

/34/ (Eg1)

Egner, K. : Biegeschwellbelastung 35 m langer, genagelter Vollwandträger. In: Fortschritte und Forschungen im Bauwesen, Reihe D, Heft 9 (1953), S. 109-138

/35/ (Eg4)

Egner, K.; Jagfeld, P. : Untersuchungen an keilgezinkten Bohlen nach langjähriger Gebrauchsdauer - Verhalten bei Zugschwellbeanspruchung. In: Holz als Roh- und Werkstoff 22 (1964) Nr. 3, S.107-113.

/36/ (Eg5)

Egner, K.; Rothmund, A. : Zusammenfassender Bericht über Dauerzugversuche mit Hölzern, Materialprüfungsanstalt der TH Stuttgart, 1944. (zit. in /Wa1/)

/37/ (Eg6)

Egner, K.; Rothmund, A. : Zusammenfassender Bericht über Dauerzugversuche mit Hölzern, Materialprüfungsanstalt der TH Stuttgart, 1944. (zit. in /Kol6/)

/38/ (Eh1)

Ehlbeck, J. : Dauerschwingfestigkeit von Holz und Holzverbindungen- eine Bestandsaufnahme. In: Ingenieurholzbau in Forschung und Praxis, Bruderverlag Karlsruhe, 1982.

/39/ (Eh2)

Ehlbeck, J.; Belchior-Gaspard, P. : Dynamische Beanspruchung von Holz und Holzkonstruktionen. Forschungsbericht Versuchsanstalt für Stahl, Holz, Steine Abt. Ingenieurholzbau, Universität Fridericiana Karlsruhe, 1989.

/40/ (Ei1)

Eibl, J.; Henseleit, O.; Schlüter, F.-J. : Baudynamik. In: Betonkalender 1988, Teil 2; Verlag Ernst und Sohn, Berlin 1988.

/41/ (Ei2)

Eibl, J.; Block, K. : Zur Beanspruchung von Balken und Stützen bei hartem Stoß (impact). In: Bauingenieur 56 (1981), S. 369-377.

/42/ (Fa2)

Faddoul, J. R. : Test evaluation of a laminated wood wind turbine concept. Final Report DOE/NASA/20220-30 NASA TM -81719 (1981).

/43/ (Fo5)

Foschi, R. O. : Probability of Failure of Wood and the Application of Limit States Design Concepts. In: Proceedings, ASCE Speciality Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability, Tuscon Ariz., Jan 1979, S. 353-357.

/44/ (Fo2)

Foschi, R. O.; Barrett, J. D. : Load-Duration Effects in Western Hemlock Lumber. In: Proceedings of the ASCE 108 (1982) Nr.7, S. 1494-1510.

/45/ (Fo3)

Foschi, R. O.; Floz, B. R.; Yao, F. Z. : Reliability-Based Design of Wood Structures. Structural Research Series, Report No. 34, Department of Civil Engineering, University of British Columbia Vancouver, Canada 1989.

/46/ (Fr2)

Freas, A. D.; Werren, F. : Flexural Properties of Laminated White Oak. In: Forest Products Journal (1959) Nr. 2, S. 100-103.

/47/ (Fr6)

Frühwald, A.; Bauch, J.; Götsche-Kühn, H. : Holzeigenschaften von Fichten aus Waldschadensgebieten: Untersuchungen an frisch gefälltem Holz. In: Holz als Roh- und Werkstoff 42 (1984), S. 441-449.

/48/ (Fu1)

Fuller, F. B.; Oberg, T. T. : Fatigue Characteristics of Natural and Resin-Impregnated, Compressed, Laminated Woods. In: Journal of the Aeronautical Sciences (1943) Nr. 3, S. 81-85.

/49/ (Gab1)

Gaber, E. : Bahnbrücke von 30 m Stützweite aus Brettern und Nägeln. In: Die Technik 2 (1947) Nr. 4, S. 153-156.

/50/ (Gab2)

Gaber, E. : Die Holzbauten bei der Wiederherstellung der Straßenbrücke über den Main bei Lohr. In: Deutscher Zimmermeister 52 (1950) Nr. 11, S. XI/1-4 und Nr. 12, S. XII/3-6.

/51/ (Gab6)

Gaber, E. : Statische und dynamische Versuche mit Nagelverbindungen. In: Berichte aus der Versuchsanstalt für Holz, Stein, Eisen, Technische Hochschule Karlsruhe, Heft 3 (1935).

/52/ (Gab7)

Gaber, E. : Statische und dynamische Versuche mit Nagelverbindungen. In: Berichte aus der Versuchsanstalt für Holz, Stein, Eisen, Technische Hochschule Karlsruhe, Heft 6 (19??), S. 1-16.

/53/ (Gab5)

Gaber, E. : 25 t-Laufkran aus Brettern und Nägeln. In: VDI-Zeitschrift 86 (1942) Nr. 33/34, S. 519-521.

/54/ (Ger5)

Gerhards, C. C. : Time-Related Effects of Loading on Wood Strength: A Linear Cumulative Damage Theory. In: Wood Science 11 (1979) Nr. 3, S. 139-144

/55/ (Ge2)

Gerhards, C.C.; Link, C.L. : A Cumulative Damage Model To Predict Load Duration Characteristics Of Lumber. In: Wood and Fiber Science 19 (1987) S. 147-164

/56/ (Ger6)

Gerhards, C. C.; Link, C. L. : Effect of loading rate on bending strength of Douglas-fir 2 by 4's. In Forest Products Journal 36 (1986) Nr.2, S. 63-66.

/57/ (Ger3)

Gerold, M. : Hölzerne Brücken von den Anfängen bis heute, Teil 1 und 2. In: Bauen mit Holz (1990) Nr. 5 und 6, S. 350-355 und 434-438.

/58/ (Ger4)

Gerold, M. : Zur Berechnung und Konstruktion von Glockenstühlen. In: Bauen mit Holz (1989) Nr.4, S.232-234.

/59/ (Ger8)

Gerstetter, E. : Untersuchungen über das Verhalten von Buchenschichtholz bei der Dauerschwingprüfung. Diplomarbeit Math.-Nat. Fakultät der Universität Hamburg 1969.

/60/ (Gil1)

Gillwald, W. : Beitrag zur Bestimmung der Formänderung von Holz unter schwingender Beanspruchung. In: Holz als Roh- und Werkstoff 19 (1961) Nr.3, S. 86-92.

/61/ (Gil2)

Gillwald, W. : Untersuchungen über die Dauerfestigkeit von mehrschichtigen Spanplatten. In: Holz als Roh- und Werkstoff 24 (1966) Nr. 10, S. 445-449.

/62/ (Gil3)

Gillwald, W. : Untersuchungen über die Dauerschwingfestigkeit von Holz- und Holzwerkstoffen in verschiedenen Abmessungen. In: Archiv für Forstwesen 10 (1961) Nr. 4-6, S. 542-556.

/63/ (Gil5)

Gillwald, W.; Richter, K. : Die Festigkeitsabnahme stehender Maste durch Dauerschwingbeanspruchung. In: Mitteilungen aus dem Institut für Post und Fernmeldewesen (1960), Nr. 2.

/64/ (G15)

Glos, P. : Zur Modellierung des Festigkeitsverhaltens von Bauholz bei Druck-, Zug- und Biegebeanspruchung. In: Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke, Sonderforschungsbereich 96, L.K.I., T.U. München, Heft 61/1981.

/65/ (G13)

Glos, P.; Kelletshofer, W. : Einfluß der Belastungsdauer auf die Zug- und Druckfestigkeit von Fichten - Brettlamellen. In: Baukonstruktion und Holzbau, Beiträge aus Lehre und Forschung (1986), S. 85-106.

/66/ (Göh1)

Göhre, K. : Werkstoff Holz. VEB Fachbuchverlag Leipzig 1961, 2. Auflage.

/67/ (Go1)

Gordon, J. E. : Strukturen unter Stress: Mechanische Belastbarkeit in Natur und Technik. Spektrum-Bibliothek, Band 21. Heidelberg Spektrum-der-Wiss.-Verlagsgesellschaft 1989.

/68/ (Göt2)

Götze, H. : Untersuchungen über einige verwertungskennzeichnende Eigenschaften des Pappelholzes II: Scher-, Spalt-, Schlagbiege- und Dauerfestigkeit des Pappelholzes. In: Holzindustrie 17 (1964) Nr. 8, S. 224-227.

/69/ (Göt3)

Götze, H.; Melle, W. : Über den Einfluß vorausgegangener Dauerschwingbelastung auf den statischen Elastizitätsmodul und die statische Biegefestigkeit bei Kiefern- und Rotbuchenholz. In: Holzindustrie 22 (1969) Nr. 7, S. 200-202.

/70/ (Gr2)

Graf, O. : Dauerversuche mit Holzverbindungen. In: Holz als Roh- und Werkstoff, 1 (1938) Nr. 7, S. 266-269.

/71/ (Gr3)

Graf, O. : Dauerfestigkeit von Holzverbindungen. In: Mitteilungen des Fachausschusses für Holzfragen beim Verein deutscher Ingenieure und Deutschen Forstverein, Heft 22, 1938.

/72/ (Gr7)

Graf, O. : Versuche über die Druckelastizität und Druckfestigkeit von Tannenholz und von Eichenholz nach oftmals wiederholter Belastung und Entlastung. In: Bautechnik 6 (1928) Heft 30, S. 438-441.

/73/ (Gül)

Günther, B. : Über das Verhalten von Spanplatten aus Rinde und Gattersägespänen bei dynamischer Beanspruchung. In: Holzindustrie 25 (1972) Nr. 10, S. 301-304.

/74/ (Har2)

Harnach, R. : Zur Berechnung und Konstruktion eines Glockenturms. In: Bauen mit Holz (1989) Nr.1, S.7-11.

/75/ (Hay2)

Hayashi, T. : Fatigue Properties of Structural Laminated-Veneer-Lumber. In: Journal of the Japan Wood Research Society 35 (1989) Nr. 7, S. 616-624.

/76/ (Hay3)

Hayashi, T.; Masuda, M.; Sasaki, H. : Rotation Bending Fatigue Properties of Timber Butt-Joint with Metal Plate Connectors. In: Journal of the Society of Material Science 28 (1979) Nr. 7, S. 623-628.

/77/ (Hay5)

Hayashi, T.; Sasaki, H. : Fatigue Damage of Wood Butt-Joints with Metal-Plate Connectors. In: Journal of the Japan Wood Research Society 30 (1984) Nr. 1, S. 23-31.

/78/ (Hay4)

Hayashi, T.; Sasaki, H. : Time Dependence on Fatigue Strength of Timber Butt-Joints with Metal Plate Connectors. In: Journal of the Society of Material Science 30 (1981) Nr. 334, S. 697-702.

/79/ (Hay6)

Hayashi, T.; Sasaki, H.; Fuyuki, T. : Effect of Butt-Joint Gap on Fatigue Properties of Laminated-Veneer Lumber (LVL) with Metal Plate Connectors. In: Journal of the Japan Wood Research Society 29 (1983) Nr. 10, S. 663-669.

/80/ (Hay7)

Hayashi, T.; Sasaki, H.; Masuda, M. : Fatigue Properties of Wood Butt Joints With Metal Plate Connectors. In: Forest Products Journal 30 (1980) No 2, S. 49-54.

/81/ (Hei1)

Heimb, L. : Holz als Kranbahnstütze. In: Consulting 16 (1984) Nr. 2, S. 30.

/82/ (Hei2)

Heimeshoff, B.; Eglinger, W. : Einspannung von Stützen aus Brettschichtholz durch Verguß in Betonfundamenten. In: Holzbau-Statik-Aktuell Folge 7, Juli 1983, S. 1-4.

/83/ (Hof1)

Hoffmeyer, P. : Duration of Load Effects for Spruce Timber with special Reference to Moisture Influence. In : R und D Programm "Wood as an renewable raw material". Proceedings. Vol. A München 1987. S.45-51. (Hrsg: Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V.-DGfH München)

/84/ (Ib1)

Ibuki, Y.; Sasaki, H.; Kawamoto, M.; Maku, T. : The Plane Bending Fatigue Strength of Glued Laminated Wood. In: Bulletin Wood Research Institute, Kyoto (1963) Nr. 31, S. 11-22.

/85/ (Im1)

Imayama, N. : Influence of the Number of Annual Rings on the Fatigue of Wood I: Fatigue strength of earlywood, latewood and single-annual-ring specimens. In: Journal of the Japan Wood Research Society 37 (1991) Nr. 8, S. 688-693.

/86/ (Im2)

Imayama, N. : Influence of the Number of Annual Rings on the Fatigue Strength of Wood II: Fatigue strength of 1-3-annual-ring specimens. In: Journal of the Japan Wood Research Society 37 (1991) Nr. 10, S. 890-896.

/87/ (Im3)

Imayama, N. : Studies on the Fatigue of Wood III: Effect of the annual ring on the fatigue crack propagation. In: Journal of the Japan Wood Research Society 26 (1980) Nr. 9, S. 595-602.

/88/ (Im4)

Imayama, N. : The Fatigue of Wood IV: The propagation of fatigue cracks in notched specimens. In: Journal of the Japan Wood Research Society 33 (1987) Nr.6, S. 457-463.

/89/ (Im5)

Imayama, N. : The Fatigue of Wood V: In: Journal of the Japan Wood Research Society 34 (1988) Nr.1, S. 8-13.

/90/ (Im6)

Imayama, N. : The Fatigue of Wood VI: Fatigue crack-propagation of cracked specimen. In: Journal of the Japan Wood Research Society 34 (1988) Nr. 11, S. 896-903.

/91/ (Im7)

Imayama, N.; Matsumoto, T. : Studies on the Fatigue of Wood I: Phenomenal Study on the Fatigue Process. In: Journal of the Japan Wood Research Society 16 (1970); S. 319-325.

/92/ (Im8)

Imayama, N.; Matsumoto, T. : Studies on the Fatigue of Wood II: On the Temperature-rise Generated with Fatigue. In: Journal of the Japan Wood Research Society 20 (1974), S. 53-62.

/93/ (In1)

Institut für Forstwissenschaften Eberswalde : Dauerstand- und Dauerschwingfestigkeit, Forschungsbericht, Eberswalde 1965.

/94/ (Is1)

Ishihara, S.; Sasaki, H.; Maku, T. : Fatigue Test of Some Glue Joints. In: Bulletin Wood Research Institute, Kyoto (1963) Nr. 31, S. 75-86.

/95/ (Jo3)

Johns, K.; Madsen, B. : Duration of load effects in lumber. Part I: A fracture mechanics approach. In: Canadian Journal of Civil Engineering 9 (1982) Nr. 3, S. 502-514.

/96/ (Iv2)

Ivanow, J. M. : Über die einheitliche Gesetzmäßigkeit für die Dauerfestigkeit von Holz. In: Holztechnologie, 17 (1976) Nr.1, S.9-10.

/97/ (Kat1)

Kato, K.; Suzuki, S.; Saito, F. : Fatigue Properties of Particleboards II.: Effects of partial non-reversed loading on tensile fatigue properties. In: Journal of the Japan Wood Research Society 36 (1990) Nr. 12, S. 1057-1062.

/98/ (Kit1)

Kitahara, R.; Tsutsumi, J.; Matsumoto, T. : Observations on Cell Wall Response and Mechanical Behavior in Wood Subjected to Repeated Static Bending Load. In: Journal of the Japan Wood Research Society 27 (1981) Nr. 1, S. 1-7.

/99/ (Kol1)

Kolb, H. : Das Verhalten verleimter und unverleimter Bauhölzer im Biegeschwellversuch. In: Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung, Heft 55, 1968

/100/ (Kol16)

Kollmann, F. : Die Esche und ihr Holz, Springer-Verlag Berlin 1941, S. 106-125.

/101/ (Kol6)

Kollmann, F. : Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Band 1 , 2.Auflage, Springer-Verlag Berlin 1951.

/102/ (Kol8)

Kollmann, F. : Über die Abhängigkeit einiger mechanischer Eigenschaften der Hölzer von der Zeit, von Kerben und von der Temperatur. Zweite Mitteilung: Die Bedeutung von Kerben für die Holzfestigkeit. In: Holz als Roh- und Werkstoff 10 (1952) Nr.6, S. 239-244. (bzw. S. 17-19*)

/103/ (Kol10)

Kollmann, F.; Dosoudil, A. : Holzfaserplatten: Ihre Eigenschaften und Prüfung, mit besonderer Berücksichtigung der Dauerfestigkeit. In: VDI-Forschungsheft 426, VDI-Verlag Düsseldorf 1949.

/104/ (Kol13)

Kollmann, F.; Krech, H. : Zeitfestigkeit und Dauerfestigkeit von Holzspanplatten. In: Holz als Roh- und Werkstoff 19 (1961) Nr. 3, S. 113-118.

/105/ (Kol14)

Kollmann, F.; Schmidt, E. : Gefügezerrüttung und Festigkeitseinbuße von dauerbeanspruchtem Nadelholz. In: Holz als Roh- und Werkstoff 20 (1962) Nr.9, S.333-338.

/106/ (Kom2)

Kommers, W.J.: Effect of 5000 Cycles of Repeated Bending Stresses on Five-Ply Sitka Spruce Plywood. Report No. 1305 Forest Products Laboratory in cooperation with the Army-Navy-Civil Committee on Aircraft Design Criteria, February 1943. (zit. in /Lew3/ und /Dob1/)

/107/ (Kos1)

Kosteas, D. : Grundlagen für Betriebsfestigkeitsnachweise. In: Sonderdruck aus dem Stahlbauhandbuch für Studium und Praxis, Band 1, S. 585-618. Stahlbau-Verlags-GmbH Köln 1982.

/108/ (Kra1)

Kraemer, O. : Aufbau und Verleimung von Flugzeugsperrholz. In: Luftfahrtforschung 11 (1934) Nr. 2, S. 33-52.

/109/ (Kra2)

Kraemer, O. : Dauerbiegeversuche mit Hölzern, DVL-Bericht 190. In: DVL-Jahrbuch, Berlin 1930, S. 411-420 und Luftfahrtforschung 8 (1930) Heft 2, S. 39-48.

/110/ (Kra5)

Kraemer, O. : Kunstharzstoffe und ihre Entwicklung zum Flugzeugbaustoff, DVL-Jahrbuch 1933, VI, S. 69-81; und In: Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt 24 (1933) Nr. 15, S. 420-426.

/111/ Kra4

Krauss, A.; Raczkowski, J. : Resistance of Various Wood Species to the Action of Sea Water Substitute: Widerstandsfähigkeit verschiedener Holzarten gegen die Einwirkung von Meerwasserersatz. In: Holzforschung und Holzverwertung 37 (1985) Nr. 4, S. 71-75.

/112/ (Kre1)

Krech, H. : Experimentelle Untersuchungen über Größe und zeitlichen Verlauf von Kraft und Durchbiegung beim Schlagbiegeversuch an Holz und ihren Zusammenhang mit der Bruchschlagarbeit, Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen und Elektrotechnik der TU München, 1959

/113/ (Kre2)

Krech, H. : Größe und zeitlicher Ablauf von Kraft und Durchbiegung beim Schlagbiegeversuch an Holz und ihr Zusammenhang mit der Bruchschlagarbeit. In: Holz als Roh- und Werkstoff 18 (1960) Nr. 3, S. 95-105.

/114/ (Krp1)

Krpan, J. : Vergleichende Untersuchungen der physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Tischlerplatten. In: Holz als Roh- und Werkstoff 19 (1961) Nr. 1, S. 27-30.

/115/ (Kü6)

Küch, W. : Heimische Werkstoffe des Flugzeugbaues. In: DVL-Jahrbuch 1937, S. 317-339.

/116/ (Kü3)

Küch, W. : Untersuchungen an Holz und Schichthölzern im Hinblick auf ihre Verwendung im Flugzeugbau. In: Holz als Roh- und Werkstoff 2 (1939) Nr. 7/8, S. 257, 262, 272.

/117/ (Kü5)

Küch W.: Zeit- und Dauerfestigkeit von Lagenhölzern, In: Holz als Roh- und Werkstoff, 5 (1942) Nr.2/3, S.69-73. und in: DVL-Forschungsbericht Nr. 1270 und in: Jahrbuch der Deutschen Luftfahrtforschung 1940, S. I 1114- I 1118.

/118/ (Ku1)

Kufner, M. : Änderung der Festigkeit und des Elastizitätsmoduls von Kiefernholz infolge Dauerbelastung. In: Holz als Roh- und Werkstoff 27 (1969) Nr.7, S.261-270.

/119/ (Ku2)

Kufner, M.; Spengler, R. : Stabwerkträger mit geleimten Knotenpunkten. In: Holz als Roh- und Werkstoff 39 (1981) S. 51-62.

/120/ (Ku3)

Kuipers, J. : Langzeitversuche mit Holzverbindungen. In: Bauen mit Holz (1983) Nr. 5, S. 296-300.

/121/ (Ku4)

Kuipers, J. : Creep and damage of joints. In: R und D Programm "Wood as an renewable raw material". Proceedings. Vol. A, München 1987, S. 4-12.

/122/ (Ky1)

Kyanka, G. H. : Fatigue properties of wood and wood composites. In: International Journal of Fracture 16 (1980) Nr. 6, S. 609-616.

/123/ (Ky2)

Kyanka, G. H. : Fatigue Studies in wood and Paper. Proc. Conf. Environmental degradation of engineering materials. Institute and State University, College of Engineering, Blackburg 1977. (zit. in /Dob1/)

/124/ (Lew1)

Lewis, W. C. : Design considerations for fatigue in timber structures. In: Journal of Structural Division, Proceedings of the ASCE, ST 5, (1960), S. 15-23.

/125/ (Lew2)

Lewis, W. C. : Fatigue of Wood and Glued Joints Used in Laminated Construction. In: Proceedings Forest Products Research Society Vol. 5 (1951), S. 221-229.

/126/ (Lew3)

Lewis, W. C. : Fatigue of Wood and Glued-Wood Constructions. In: Proceedings of the ASTM 46 (1946) S. 814-832.

/127/ (Lew4)

Lewis, W. C. : Fatigue Resistance of Quarter-Scale Bridge Stringers of Green and Dry Southern Pine. In: American Railway Engineering Association, Bulletin, No. 538 (1957), S. 363-390.

/128/ (Lew5)

Lewis, W.C.: Fatigue Resistance of Quarter Scale Bridge Stringers in Flexure and Shear. Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, Report Nr. 2236, 1962.

/129/ (Lic1)

Lichten, W. : Skriptum Fehleranalyse: Eine Einführung in die Analyse experimenteller Daten für Studenten der Naturwissenschaften - Mit Programmen für alle gängigen Taschenrechner. Berlin, Springer-Verlag 1988.

/130/ (Lin1)

Lin, T.-H.; Okuma, M. : The Durability of Structural Particleboard 1: Evaluation of water resisting quality by repetitive loading test. In: Journal of the Japan Wood Research Society 23 (1977), S. 660-665.

/131/ (Mac1)

Mack, J. J. : Repetitive Loading of Nailed Timber Joint. In: Division of Forest Products Technological Papers No. 10, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia, Melbourne 1960.

/132/ (Mad3)

Madsen, B.; Johns, K. : Duration of load effects in lumber. Part II: Experimental data. In: Canadian Journal of Civil Engineering 9 (1982) Nr. 3, S. 515-526.

/133/ (Mak2)

Maku, T.; Sasaki, H. : The Rotation Bending Fatigue Test of Glued Laminated Wood. In: Bulletin Wood Research Institute, Kyoto (1963), Nr. 31, S.1-10

/134/ (Mak3)

Maku, T.; Sasaki, H. : The Plane Bending Fatigue Test of Glued Laminated Wood Cantilever. In: Bulletin Wood Research Institute, Kyoto (1963), Nr. 31, S.23-40

/135/ (Mar2)

Marsoem, S. N.; Bordonne, P.-A.; Okuyama, T. : Mechanical Responses of Wood to Repeated Loading II. In: Journal of the Japan Wood Research Society 33 (1987) Nr.5, S. 354-360.

/136/ (Mar3)

Marten, G. : Spalten und Tragfähigkeit von Nagelverbindungen. In: Fortschritte und Forschungen aus dem Bauwesen, Reihe D, Heft 9 (1953), S. 55-72.

/137/ (Mc1)

McNatt, J. D. : Design Stresses for Hardboard - Effect of Rate, Duration, and Repeated Loading. In: Forest Product Journal 20 (1970) Nr. 1, S. 53-60.

/138/ (Mc3)

McNatt, J. D. : Linear Regression of Fatigue Data. In: Wood Science 11 (1978) Nr. 1, S. 39-41.

/139/ (Mc2)

McNatt, J.D.; Soltis, L.A. : Instrumented Impactor for Testing Wood-Base Floor Panels. In: Journal of Testing and Evaluation 18 (1990) Nr. 4, S. 265-273

/140/ (Mc4)

McNatt, J. D.; Warren, F. : Fatigue Properties of Three Particleboards in Tension and Interlaminar Shear. In: Forest Products Journal 26 (1976) Nr. 5, S. 45-48.

/141/ (Exc1)

Microsoft Corporation : Microsoft Excel. Verzeichis der Funktionen. 1992.

/142/ (Mi3)

Miner, M. A. : Cumulative Damage in Fatigue. In: Journal of applied mechanics (1945) Nr.9, S. A159-A164.

/143/ (Miy1)

Miyakawa, H. : Effect of Shock-Absorbing Material on the Impact Fracture of Wood I: Impact bending tests with a rubber buffer on the impact-contacting surface. In: Journal of the Japan Wood Research Society 31 (1985) Nr. 3, S. 157-164.

/144/ (Miy2)

Miyakawa, H. : Effect of Shock-Absorbing Material on the Impact Fracture of Wood II. In: Journal of the Japan Wood Research Society 32 (1986) Nr.2, S.80-86.

/145/ (Miy3)

Miyakawa, H. : Impact bending fatigue of wood. In: Wood and Fiber Science 19 (1987) Nr.1, S. 37-49.

/146/ (Miy4)

Miyakawa, H.; Mori, M. : Impact Properties of Wood and Wood Based Materials I: Low Cycle Impact Tensile Fatigue of Wood. In: Journal of the Japan Wood Research Society 22 (1976) Nr. 2, S. 69-75.

/147/ (Miy5)

Miyakawa, H.; Mori, M. : Impact Properties of Wood and Wood Based Materials II: Fatigue Proceedings of Glued Butt-End Joint Specimens under Tensile Impact Blows. In: Journal of the Japan Wood Research Society 23 (1977) Nr. 2, S. 69-75.

/148/ (Miy8)

Miyakawa, H.; Mori, M. : Impact Properties of Wood and Wood Based Materials V: Effect of Impact Velocity on Fracture of Glued Joint Specimens under Impulsive Shear and Tensile Load. In: Science Bulletin, Faculty of Agriculture, Kyushu University 33 (1979) Nr. 2-3, S. 87-94.

/149/ (Miy6)

Miyakawa, H.; Mori, M. : Impact Properties of Wood and Wood Based Materials VI: Fatigue Proceedings of Wood, Plywood, and Particleboard under Repeated Impact Bending. In: Science Bulletin, Faculty of Agriculture, Kyushu University 34 (1980) Nr. 3-4, S. 81-95.

/150/ (Miy7)

Miyakawa, H.; Mori, M. : Impact Properties of Wood and Wood Based Materials VII: Impact bending fatigue of wooden beams with a semi- circular notch on the tensile side. In: Journal of the Japan Wood Research Society 27 (1981) Nr. 5, S. 372-380.

/151/ (Mö4)

Möhler, K. : Versuche und Erfahrungen mit Holzverbindungen und Holzkonstruktionen. In: Schweizer Archiv für angewandte Technik 20 (1954) Nr. 7, S. 224-236.

/152/ (Mö6)

Möhler, K.; Maier, G. : Untersuchungen über das Dauerschwingverhalten von Holzverbindungen. Karlsruhe TH, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, Forschungsbericht, 1973.

/153/ (Mo2)

Moore, H.F.; Kommers, J.B. : The Fatigue of Metals (with chapters on the fatigue of wood and of concrete). 1. Auflage, McGraw-Hill Book Company, New York 1927.

/154/ (Mo3)

Moslemi, A. A. : To Shear Fatigue Stressing. In: Forest Products Journal 11 (1961) Nr.3, S.115-119.

/155/ (Nad1)

Nadeau, J. S.; Bennett, R.; Fuller, E. jr.: An explanation of the rate-of-loading and duration-of-loading effects in wood in terms of fracture mechanics. In: Journal of Materials Science, Vol. 17 (1982); S. 2831-2840.

/156/ (Nag1)

Nagasawa, Ch.; Kumagai, Y.; Ono, M. : Effect of Overlap Length on the Fatigue Properties of Adhesive-bonded Joints. In: Journal of the Japan Wood Research Society 27 (1981) Nr. 27, S. 633-639.

/157/ (Nag2)

Nagasawa, Ch.; Kumagai, Y.; Ono, M. : Fatigue Test of Adhesive- bonded Joints under Repeated Stress of Constant Deflection. In: Journal of the Japan Wood Research Society 27 (1981) Nr. 7.S.541-547.

/158/ (Nak1)

Nakai, T.; Grossman, P. U. A. : Deflection of Wood Under Intermittent Loading, Part 1: Fortnightly Cycles. In: Wood Science and Technology 17 (1983) , S. 55-67.

/159/ (Nar2)

Narayanamurti, D.; Pant, H. C. : Interrelationship between some physical properties of plywood. In: Materialprüfung 5 (1963) Nr. 6, S. 240-243.

/160/ (Nik1)

Nikishin, Y. M. : An estimate of the effect of cyclic loads on plywood boards. In: Derevoobrabatyvayushchaya-Promyshlennost (1984) Nr. 1, S. 8-9.

/161/ (Noa1)

Noack, D.; Stöckmann, V. : Prinzip der Dauerschwingbeanspruchung als statischer Relaxationsversuch mit überlagerter dynamischer Relaxation. In: Holz als Roh- und Werkstoff 26 (1968) Nr.12, S. 447-453.

/162/ (Noa2)

Noack, D.; Stöckmann, V. : Dauerschwingverhalten von Rotbuchenholz unter konstanten Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen. In: Holz als Roh- und Werkstoff 27 (1969) Nr.12, S. 464-472.

/163/ (Ös1)

Östmann, B.; Olsson, A. M.; Back, E. : Permanent Indentation in Hardboard Surfaces Due to Impact. In: Holz als Roh- und Werkstoff 37 (1979), S. 83-90.

/164/ (Oku2)

Okuma, M.: Manufacture and Performance of Construction Use Particleboard III: On the Durability of Particleboard. In: Journal of the Japan Wood Research Society 22 (1976) Nr. 5, S. 303-308.

/165/ (Oku3)

Okuma, M.; Lin, T.-H.; Onuki, S. : Durability of Structural Particleboard Evaluated by Repetitive Loading Tests. In: Durability of Building Materials and Components (1980), S. 935-945.

/166/ (Oku4)

Okuyama, T. : Effect of Strain Rate on Mechanical Properties of Wood V. In: Journal of the Japan Wood Research Society 21 (1975) Nr. 4, S. 212-216.

/167/ (Oku7)

Okuyama, T.; Itoh, A.; Marsoem, S. N. : Mecanical Responses of Wood to Repeated Loading I. In: Journal of the Japan Wood Research Society 30 (1984) Nr. 19, S. 791-798.

/168/ (Oku8)

Okuyama, T.; Marsoem, S. N. : Mecanical Responses of Wood to Repeated Loading IV. In: Journal of the Japan Wood Research Society 33 (1987) Nr. 11, S. 844-850.

/169/ (Ota3)

Ota, M.; Tsubota, Y. : Studies on the Fatigue of 2-Ply Laminated Wood III: Several Investigations on the Fatigue of Woods Subjected to Bending Test. In: Journal of the Japan Wood Research Society 12 (1966) Nr. 5, S. 210-214.

/170/ (Ota4)

Ota, M.; Tsubota, Y. : Studies on the Fatigue of 2-Ply Laminated Wood IV: Several Investigations on the Fatigue of 2-Ply Laminated Wood Subjected to Repeated Bending Load. In: Journal of the Japan Wood Research Society 13 (1967) Nr. 4, S. 131-137.

/171/ (Pan1)

Pana, G. I.; Surupaceanu, N.; Dupu, M.; Mitrea, V. : Rezistența la oboseala a lemnului de brad în funcție de umiditatea, greutatea specifică aparentă și temperatura sa. (rumänisch). In: *Industria Lemnului* (1961) Nr. 12, S. 450-455.

/172/ (Par2)

Park, J.-Y.; Mataka, Y. : Behavior of Hysteresis Energy in Bending Fatigue for Particleboard. In: *Journal of the Japan Wood Research Society* 36 (1990) Nr.11, S. 961-968.

/173/ (Par3)

Park, J.-Y.; Mataka, Y. : Bending Fatigue Characteristics of Particleboard under Controlled Deflection. In: *Journal of the Japan Wood Research Society* 36 (1990) Nr.11, S.952-960.

/174/ (Par4)

Park, J.-Y.; Mataka, Y. : Probabilistic Fatigue Properties of Particleboard in Bending. In: *Journal of the Japan Wood Research Society* 35 (1989) Nr.7, S. 609-615.

/175/ (Par6)

Partl, M.; Strässler, H. : Temperatureinfluß auf das Biege- und Schlagbiegeverhalten von Fichtenholz. In: *Holzforschung und Holzverwertung* 29 (1977) Nr. 5, S.94-101.

/176/ (Pa1)

Patton-Mallory, M.; Cramer, S. M. : Fracture Mechanics: a tool for predicting wood component strength. In: *Forest Products Journal* 37 (1987) Nr. 7/8, S. 39-47.

/177/ (Pe1)

Pearson, R. G. : Application of Fracture Mechanics to the Study of the Tensile Strength of Structural Lumber. In: *Holzforschung* 28 (1974) Heft 1, S. 11-19.

/178/ (Pe2)

Pearson, R. G. : The Effect of Duration of Load on the Bending Strength of Wood. In: *Holzforschung* 26 (1972) Nr.4, S.153-158.

/179/ (Per1)

Perkitny, T.; Garczynski, R. : Vergleichende Untersuchungen über die Verformungen von Holz, Span- und Faserplatten bei langdauernder Wechselbiegebelastung. In: *Holztechnologie* 10 (1969) Nr. 4, S. 236-240.

/180/ (Per3)

Perkitny, T.; Steller, St. : Vergleichende Untersuchungen über die Verformungen von Sperr- und Schichtholz bei konstanter und variabler Dauerbiegebelastung. In: *Holztechnologie* 13 (1972) Nr. 1, S. 43-49.

/181/ (Pet2)

Petersen, Ch. : *Stahlbau - Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, Braunschweig 1988.

/182/ (Re3)

Rensburg, B. W. J. van; Burdzik, W. M. G.; Ebersohn, W. : The better utilization of timber in beams by creating composite action with other materials. In: *Proceedings volume 4. Symposium on forest products research international - achievements and the future* (1985) Paper No. 3-7.

/183/ (Ro1)

Roik, K.-H. : Vorlesungen über Stahlbau: Grundlagen, 2. Auflage Verlag Wilhelm Ernst&Sohn Berlin 1983.

/184/ (Ro3)

Rose, G. : Das mechanische Verhalten des Kiefernholzes bei dynamischer Dauerbeanspruchung in Abhängigkeit von Belastungsart, Belastungsgröße, Feuchtigkeit und Temperatur. In: Holz als Roh- und Werkstoff 23 (1965) Nr.7, S. 271-284.

/185/ (Ro4)

Rose, G. : Über das mechanische Verhalten des Kiefernholzes bei dynamischer Dauerbeanspruchung in Abhängigkeit von Belastungsart, Belastungsgröße, Feuchtigkeit und Temperatur. Dissertation. Fakultät für Maschinenwesen und Elektrotechnik der Technischen Hochschule München. 1965

/186/ (Rot1)

Roth, Ph. : Dauerbeanspruchung von Eichenholz- und von Tannenholz-Prismen in Faserrichtung durch konstante und durch wechselnde Druckkräfte und Dauerbiegebeanspruchung von Tannenholzbalken. Technische Hochschule Fridericiana Karlsruhe, Diss. 1935.

/187/ (Rot3)

Roth, v. W. : Planung und Auswertung von Dauerschwingversuchen an hölzernen Bauteilen. In: Holz als Roh- und Werkstoff 36 (1978), S. 261-268.

/188/ (Rot4)

Roth, v. W.; Noack, D. : Untersuchungen zum Dauerschwingverhalten von Rahmenecken aus gekrümmten lamellierten Schichtholz. In: Holz als Roh- und Werkstoff 41 (1983) S.233-240.

/189/ (Sa4)

Sachsse, H. : Über einige Holzeigenschaften der *Carya ovata* K. Koch aus einem westdeutschen Versuchsanbau. In: Holz als Roh- und Werkstoff 38 (1980), S. 45-50.

/190/ (Sc1)

Schaudy, R.; Proksch, E. : Untersuchung verschiedener Hölzer auf ihre Eignung zur Herstellung von dimensionsstabilen Holz-Kunststoff-Kombinationen. In: Holzforschung und Holzverwertung 32 (1980) Nr. 2, S. 25-35.

/191/ (Sc5)

Schlyter, C. E. : Researches into Durability and Strength Properties of Swedish Coniferous Timber. In: Government Testing Institute, Stockholm, S. 47-66.

/192/ (Sc15)

Schniewind, A.P. : Fracture Toughness And Duration Of Load Factor II. Duration Factor For Cracks Propagating Perpendicular-To-Grain. In: Wood and Fiber 9 (1977), S. 216-226

/193/ (Sc11)

Schniewind, A. P.; Centeno, J. C. : Fracture toughness and duration of load factor I. Six principal systems of crack propagation and the duration factor for crack propagation parallel to grain. In: Wood and Fiber 5 (1973) Nr. 2, S. 152-159.

/194/ (Sc12)

Schniewind, A. P.; Pozniak, R. A. : On the fatigue toughness of Douglas fir wood. In: Engineering Fracture Mechanics 2 (1971), S. 223-233.

/195/ (Sc9)

Schwab, E.; Gyamfi, A. : Verhalten von Furnierlagenholz bei schlagartiger Beanspruchung. In: Holz als Roh- und Werkstoff 43 (1985), S. 455-461.

/196/ (Sek5)

Sekhar, A. C. : Dynamic Stresses in Shear. In: Holz als Roh- und Werkstoff 24 (1966) Nr. 11, S. 559-563.

/197/ (Sek4)

Sekhar, A. C.; Shukla, N. K. : Der Einfluß von Faserrichtungswinkeln und Biegemoment auf die Dauerfestigkeit von Cedrus deodara. In: Holz als Roh- und Werkstoff 23 (1965) Nr. 11, S. 434-437.

/198/ (Sek3)

Sekhar, A. C.; Shukla, N. K. : Some studies on the influence of specific gravity on fatigue strength of indian timbers. In: Journal of the Indian Academy of Wood Science 10 (1979).

/199/ (Sek7)

Sekhar, A. C.; Shukla, N. K.; Gupta, V. K. : A Note on Fatigue Properties of Timber: Effect of Torsional Stress and Moisture Content. In: J. Nat. Building Org. 8 (1964, oder 64) Nr. 4, S. 36-40.

/200/ (Sek1)

Sekhar, A. C.; Shukla, N. K.; Gupta, V. K. : Einfluß von Torsionsspannungen und Feuchtigkeit auf die Dauerfestigkeitseigenschaften des Holzes. In: Holz als Roh- und Werkstoff 22 (1964) Nr. 7, S.264-266.

/201/ (Sek2)

Sekino, N.; Okuma, M. : Performance over Time of Construction Particleboard I: Fatigue behavior in bending. In: Journal of the Japan Wood Research Society 31 (1985) Nr. 10, S. 801-806.

/202/ (Set1)

Setzer : Skriptum zur Vorlesung Werkstoffphysik in der Vertiefungsrichtung Baustoffkunde an der TU München. Aufzeichnungen von Mohr, B. 1990.

/203/ (Si1)

Sieminski, R. : Über die Dauerhaftigkeit von Kiefernholz. In: Holz als Roh- und Werkstoff 18 (1960) Nr.10, S. 369-377.

/204/ (Sk1)

Skripen, J. : Bestimmung des Durchstoßwiderstandes bei Platten.: In: Holztechnologie 3 (1962) Nr.2, S. 172-174

/205/ (So3)

Soltis, L. A.; Mtenga, P. V. A. : Strength of nailed wood joints subjected to dynamic load. In: Forest Products Journal 35 (1985) Nr.11/12, S.14-18.

/206/ (Spr1)

Springenschmid, R. : Skriptum zur Grundvorlesung in Baustoffkunde. Teil A: Allgemeine Grundlagen. München, März 1986.

/207/ (Sq1)

Squires, G. L. : Weitere Themen aus der statistischen Theorie: Die Behandlung von Funktionen. Berlin, Walter de Gruyter & Co. 1971.

/208/ (Sta2)

Stanton, D. : Resistance of Wood to Stress Reversals. In: Annual Report of the Nat. Phys. Lab. in 1915/16. Engineering 10 (1916) S. 605. (bzw. In: Engineering (1916), National Physical Laboratory, Teddington)

/209/ (Ste7)

Sterr, R. : Untersuchungen zur Dauerfestigkeit von Schichtholzbalken, Dissertation 1962.

/210/ (Su3)

Sugiyama, H. : On the Effect of the Loading Time on the Strength Properties of Wood. In: Wood Science and Technology 1 (1967) , S. 289-303.

/211/ (Suz2)

Suzuki, S.; Saito, F. : Fatigue Behavior of Particleboard in Tension Perpendicular to the Surface I: Effect of resin type. In: Journal of the Japan Wood Research Society 30 (1984) Nr. 10, S. 799-806.

/212/ (Suz3)

Suzuki, S.; Saito, F. : Fatigue Behavior of Particleboard in Tension Perpendicular to the Surface II: Effect of moisture content. In: Journal of the Japan Wood Research Society 32 (1986) Nr. 10, S. 801-807.

/213/ (Suz5)

Suzuki, S.; Saito, F. : Fatigue Properties of Particleboards I: Effects of aging treatment on tensile properties parallel to the surface. In: Journal of the Japan Wood Research Society 34 (1988) Nr.7, S. 590-596

/214/ (Tan2)

Tanaka, A.; Suzuki, M. : Bending Fatigue Strength of Particleboard. In: Journal of the Japan Wood Research Society 30 (1984) Nr. 10, S. 807-813.

/215/ (Th2)

Thum, A.; Jacobi, H. R. : Die Biegefestigkeit von stahlbewehrtem Panzerholz. In: Holz als Roh- und Werkstoff 1 (1938) Nr. 9, S. 335-339.

/216/ (To7)

Tokuda, M. : Fatigue Properties of Nailed Joints under Reversed Cyclic Loading. In: Journal of the Japan Wood Research Society 33 Nr.7 (1987), S. 605-609.

/217/ (To6)

Tokuda, M. : Prediction of the Number of Cycles to Failure of Nailed Shear-Wall Panels under Reversed Cyclic-Loading. In: Journal of the Japan Wood Research Society 33 Nr.7 (1987), S. 558-563.

/218/ (To2)

Tomin, M. : Influence of Anisotropy on Fracture Toughness of Wood. In: Wood Science 5 (1972) Nr.2, S. 118-121.

/219/ (To3)

Tomin, M. : Zur Riausbreitung von Holz bei Schwingbeanspruchung. In: Holztechnologie 18 (1977) 1, S.22-26.

/220/ (Tr1)

Trübswetter, T. : Klammern als Holzverbinder bei wechselnden Lasten. In: Holz- und Kunststoffverarbeitung 7 (1973) Nr. 5, S. 360-363.

/221/ (Ts1)

Tsai, K. T.; Ansell, M. P. : The fatigue properties of wood in flexure. In: Journal of Material Science 25 (1990), S. 865-878.

/222/ (Wa1)

Walter, F. : Ein Beitrag zur Dauerfestigkeit der Hölzer. Forstwissenschaftliche Fakultät Eberswalde, Dissertation 1955.

/223/ (Win1)

Winter, H.; Heyer, S. : Untersuchungen zur Entwicklung von Prüfverfahren für die Kennzeichnung der Eigenschaften von Holzspanplatten: Schlagversuche an Platten. Investigations on Test-Methods for the Signification of Chipboard-Properties: Impact-Tests on Boards. In: Holz als Roh- und Werkstoff 15 (1957) Nr. 1, S. 51-58.

/224/ (Wis1)

Wischer, B. : Keilzinkenverleimte Weichenschwellen aus Eichen- bzw. Buchenholzabschnitten. In: Die Holzschwelle 100 (1989), S.9-27.

/225/ (Wo3)

Wood, L. W. : Relation of Strength of Wood to Duration of Load. U.S. Department of Agriculture, Report No. 1916, Forest Products Laboratory, Madison Wis., 1951. (zitiert in /Fo2/)

/226/ (Wo1)

Wood, L. W. : The Factor of Safety in Design of Timber Structures. In: Journal of the Structural Division, Proceedings of the ASCE, Paper 1838, 84 (1958) ST 7, S. 1838.1-1838.18.

/227/ (Ye1)

Yeh, B. : Behavior of a bolted timber splice joint under cyclic loading. Thesis Submitted to Graduate Faculty in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science, Iowa State University Ames, Iowa. 1986.

/228/ (Y12)

Ylinen, A. : Die Anwendung von Holz im Flugzeugbau Finnlands. In: Holz als Roh- und Werkstoff 5 (1942) Nr. 4, S. 118-122.

/229/ (Y11)

Ylinen, A. : Zur Theorie der Dauerstandfestigkeit des Holzes. In: Holz als Roh- und Werkstoff 15 (1957) Nr.5, S.213-215.

/230/ (Yo1)

Youngs, R. L.; Hilbrand, H. C. : Time-Related Flexural Behavior of Small Douglas-Fir Beams under Prolonged Loading, In: Forest Products Journal (1963) Nr. 6, S. 227-232.

7.3. Nicht zu beschaffende Literatur

Barrett, J. D.; Foschi, R. O. : Reliability and the Implementation of Duration of Load Data. In: Proceedings Wood Engineering Group, International Union of Forest Research Organization (IUFRO), Oxford, United Kingdom, April 1980.

Beljankin, F. P.: Strength of wood under repeated loading. Kiew: Academy of Sci. of Ukrainian SSR 1936

Bielankin, F. P.; Jacenko, W. F. : Die Deformation und Widerstandsfähigkeit des Holzes (Dieformativnoct i soprotivlajemost drierwiesny). Kiew 1957.

Boatright, S. W. J. : Studies on the Fracture and Fatigue of Wood. M. Sc. Thesis, University of Cape Town. South Africa, 1977.

Bürnheim, L. : Wechselbiegefestigkeit und Kerbempfindlichkeit verschiedener Flughölzer. In: Focke-Wolf Versuchsbericht Nr. 3434 V. 30.7.1943.

Dolan, J. D. : The dynamic response of timber shear walls. Ph.D. thesis, University of British Columbia, Vancouver, B.C.

Egner, K.; Rothmund, A. : Zusammenfassender Bericht über Dauerzugversuche mit Hölzern, Materialprüfungsanstalt der TH Stuttgart, 1944.

Faddoul, J. R.; Sullivan, T. L. : Structural fatigue test results for large wind turbine blade sections. NASA Star Conference Paper Issue No.09, Large horizontal wind turbines, S. 303, (1983).

Foschi, R. O. : Loading Duration Testing and Damage Accumulation Modelling in Timber Joints, Report No. 4-79-7, Technische Hogeschool, Stevin Laboratory, Delft, The Netherlands 1979.

Hayashi, T.; Sasaki, H. : Fatigue Properties of Nailed Wood-Metal Tension Joints. Presentation summary at the 28th annual meeting of the Japan Wood Research Society, Japan 1979,? 257.

Jenkins, G. : (Originaltitel unbekannt). Bristol Aircraft Ltd, Structures and Materials Laboratory Report No. 171-76B-3040 (1962).

Johnson, P. E. : Design of test specimens and procedures for generating material properties of Douglas fir/epoxy laminated wood composite material with the generation of baseline data at two environmental conditions. Final Report NASA-CR 174910; DOE/NASA-0286-1; UDR-TR85-45 DEN3-286; DE-AI01-89ET-20320 850700 (1985).

Kommers, W. J. : Effect of 5000 Cycles of Repeated Bending Stresses on 5-Ply Sitka Spruce Plywood. U.S.-Forest Products Laboratory, Report Nr 1305, Madison Wisconsin, USA 1943.

Kommers, W. J. : Effect of Repetitions of Stress on the Bending and Compressive Strength of Sitka-Spruce and Douglas-Fir, U.S.-Forest Products Laboratory, Report No. 1320, Madison Wisconsin, USA 1943.

Kommers, W. J. : The Fatigue Behavior of Wood and Plywood Subjected to Repeated Load and Reversed Bending Stress. Madison Wisconsin, USA, 1955

Kommers, W.J.: Supplement to the Fatigue Behaviour of Wood and Plywood Subjected to Repeated Load and Reversed Bending Stress. US- For. Prod. Lab., Report No. 1327. Madison, Wisconsin, USA 1955

(Autor unbekannt) : The fatigue behavior of Douglas-fir and Sitka spruce subjected to reversed stresses super-imposed on steady stress. U. S. Forest Prod. Lab. Report No. 1327-A. Madison, Wis.

Kurtenacker, R. S. : Performance of container fasteners subjected to static and dynamic withdrawal. In: USDA Forest Products Laboratory Research Paper FPL 29, 1965.

Kyanka, G. H. : Fatigue Studies in wood and Paper. Proc. Conf. Environmental degradation of engineering materials. Institute and State University, College of Engineering, Blackburg 1977.

Matsumoto, T. : Studies on the dynamic modulus E and the logarithmic decrement of wood by transverse vibration. In: Bull. Kyushu univ. For. Nr. 36 (1962), S. 1-86.

Möhler, K.: Holzsparende Bauweise im Behelfsbrückenbau. Forschungsauftrag Nr. 11A, Abschluß 1968.

Ohira, C.; Sakuno, T.; Furukawa, I.; Kishimoto, J. : The durability of wood-glue joint under cyclic bending loads. In: Research-Bulletin-of-the-Tottori-University-Forests (1988), Nr. 17, S. 205-216.

Reardon, G. F. : Properties of Joints in Messmate Stringybark Formed by Punched Tooth Metal Plate Connectors, Lab. Report No. 1, CSIRO Melbourne, Australia 1966.

Schleusener, J. : Dynamische und statische Untersuchungen an Metall-Holz-Verleimungen. In: Schweiz. Schreinerztg. 75 (1964), S.161-165.

Sekhar, A. C. : Dynamic stresses and strains in timber. Paper presented at the Ninth Commonwealth Forestry Conference, New Dehli, 1968.

Sletteland, N. T. : Fatigue Life of Metal Connector Plates, Master's thesis, North Dakota State University, Fargo N.D., 1976.

Stroebel, T.; Dechow, C.; Zuteck, M. : Design of an advanced wood composite rotor and development of wood composite blade technology. DOE/NASA/0260-1 NASA-CR-174713 GBI ER-11 (1984).

(Autor unbekannt) : Rigidity and endurance test of full-size wooden structures and glued laminated beams. 1. Fabrications of structural members and rigidity test of gable frames and glued laminated beams. In: J. Hokkaido Forest Prod. Res. Inst. (1969) Nr. 11, S. 2-17.

7.4. Zitierte Normen und Standards

7.4.1. Deutsche Normen (DIN) und ihre Erläuterungen

DIN 1052 Teil 1: Holzbauwerke - Berechnung und Ausführung. 4/1988.

DIN 1052 Teil 2: Holzbauwerke - Mechanische Verbindungen. 4/1988.

DIN 1052 Teil 3: Holzbauwerke - Holzhäuser in Tafelbauart, Berechnung und Ausführung. 4/1988.

DIN 1055 Teil 3: Lastannahmen für Bauten - Verkehrslasten. 6/1971.

DIN 1072 : Straßen- und Wegbrücken - Lastannahmen. 12/85.

DIN 1074: Holzbrücken. 5/1991.

DIN 1151: Drahtstifte, rund; Flachkopf, Senkkopf. (zitiert in DIN 4178).

DIN 4024 Teil 1: Maschinenfundamente - Elastische Sützkonstruktionen für Maschinen mit rotierenden Massen. 4/1988.

DIN 4074 Teil 1: Bauholz für Holzbauteile - Gütebedingungen für Bauschnittholz (Nadelholz)

DIN 4074 Teil 2: Bauholz für Holzbauteile - Gütebedingungen für Baurundholz (Nadelholz)

DIN 4112: Fliegende Bauten - Richtlinien für die Bemessung und Ausführung. 2/1983.

DIN 4178: Glockentürme - Berechnung und Ausführung. 8/1978.

DIN 18800 Teil 7: Stahlbauten - Herstellen, Eignungsnachweise zum Schweißen. 5/1983.

DIN 18900: Holzmastenbauart - Berechnung und Ausführung. 10/1982

DIN 50100: Dauerschwingversuch - Begriffe, Zeichen, Durchführung, Auswertung. 2/1978.

7.4.2. Ausländische und internationale Normen

/N1/

CAN/CSA-S6-88:Design of Highway Bridges. 1988.(National Standard of Canada)

/N2/

Commentary on CSA Standard CAN/CSA-S6-88

Design of Highway Bridges. Special Publication S6.1-M 1990.

/N3/

CAN/CSA-086.1-M89: Engineering Design in Wood (Limit States Design).1989. (National Standard of Canada).

/N4/

CAN3-O86-M84: Engineering Design in Wood (Working Stress Design), 1984 (A National Standard of Canada).

/N5/

Règles C. B. 71: Règles de calcul et de conception des CHARPENTES EN BOIS, 2. édition, mars 1971.

/N6/

AITC (American Institute of Timber Construction): Timber Constructional Manual, 3. édition. 1985.

/N7/

SIA 164 : Holzbau (1981)

/N8/

ÖNORM B 4101 : Holzbau - Tragwerke des Hochbaus und verwandte Bauten. 9/1976.

/N9/

ÖNORM B 4100 Teil 1 : Holzbau - Formelzeichen, Kurzbilder, Sinnbilder. 12/1976.

/N10/

ÖNORM B 4100 Teil 2 : Holzbau - Holztragwerke. 1981.

/N11/

Dansk Standard DS 1117: Testing of mechanical timber fasteners - Requirements to the wood and calculations of the characteristic values. 10/1980.

/N12/

Dansk Standard DS 413: Code of Practice for the Structural Use of Timber. 11/1982.

/N13/

British Standard BS 5268: Structural use of timber, Part 2 - Code of practice for permissible stress design, materials and workmanship. 1991.

/N14/

Australien Standard AS 1720.1-1988 : Part 1: Design methods. 1988.

/N15/

Australien Standard AS 1720.2-1990: Part 2: Timber properties. 1990.

/N16/

Eurocode No. 5: Design of Timber Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. EC5 : Part: 1-1: 1992.

/N17/

European Committee for Standardization (CEN): Structural timber - Strength classes. European Standard DRAF prEN 338. September 1991.

8. Anlagen

8.1. Tabellen zur Auswertung der Wöhlerlinien

In den Anlagen 1-5 werden die Ergebnisse aus den Wöhlerversuchen in Tabellen dargestellt. Mit der Angabe von verschiedenen Einflußfaktoren, statischen Festigkeiten und Zeitfestigkeiten soll dem Leser ermöglicht werden sich auch selber ein Urteil über das Verhalten von Holz bei oft wiederholten Einwirkungen zu bilden. In den Vorbemerkungen zu 3.1. finden sich weitere Angaben zur Erstellung dieser Tabellen.

Die Anlagen 6 und 7 sind aus der Literatur (/Wal/ und /Mö6/) direkt übernommen worden.

Aufbau der Tabellen:

Nach allgemeinen Angaben und Abkürzungen werden für eine Wöhlerlinie die Ergebnisse in einer Zeile abgebildet. Im ersten Teil der Zeile (Spalte 1-13) finden sich Angaben über den Autor und die Versuchsbedingungen, im zweiten (Spalte 14-16) die statischen Festigkeiten, im dritten (Spalte 17-29) die Ergebnisse (Oberspannungen σ_0) aus den Wöhlerlinien mit den von den einzelnen Autoren angegebenen Einheiten, im vierten Teil (30-40) werden die Wöhlerlinien in einheitliche (Ober-) Spannungen [N/mm²] umgerechnet. Im fünften Teil (41-50) wird das Verhältnis der (Ober-) Spannungen zur statischen Kurzzeitfestigkeit angegeben. Darunter finden sich die Berechnungen des Mittelwertes, der Standardabweichung, des Variationskoeffizientens und des k_{fat} -Wertes. Im sechsten Teil (51-54) werden Anmerkungen gemacht.

Wenn die Versuchsergebnisse wegen uneinheitlicher Spannungsverhältniszahlen κ noch auf $\kappa = 0$ umgerechnet werden müssen, wird noch ein siebter Teil angehängt. Darin sind die umgerechneten Abminderungswerte zu finden. Es werden nur κ -Werte nahe 0 auf $\kappa = 0$ umgerechnet. Die Umrechnung erfolgt linear nach Gleichung (52):

$$x_{\kappa=0} = 1 - \frac{1 - x_{\kappa \neq 0}}{1 - \kappa} \quad (52)$$

mit: $x_{\kappa=0}$: Abminderungswert nach der Umrechnung
 $x_{\kappa \neq 0}$: Abminderungswert aus den Versuchen
 κ : Spannungsverhältniszahl der Versuche

Darunter werden die entsprechenden Berechnungen des Mittelwertes, der Standardabweichung, des Variationskoeffizientens und des k_{fat} -Wertes aufgeführt.

Die einzelnen Spalten einer Zeile haben folgenden Inhalt:

Spaltennr.	Überschrift:	Bedeutung/Erklärung:
1	Autor	1. Autor bzw. das Institut, das die Versuche durchführte.
2	Jahr	Jahr der Veröffentlichung
3	Litnr.	Literaturstelle
4	Nummer	interne Durchnummerierung der Wöhlerlinien mit Angaben über den Autor, die Beanspruchungsart und die verwendete Wöhlerlinie
5	Holzart	Angabe der Holzart oder des Holzwerkstoffes, dabei wurden verschiedene Holzarten ins Deutsche übersetzt.

6	Beanspr.	Beanspruchungsart. Hier wird zwischen Zug-, Druck-, Biegeschwellen (ZS, DS, BS), Zug-Druck-Wechsel (ZDW), Biege- wechselln (BW), schwellenden und wechselnden Schubbeanspru- chungen (SS, SW) unterschieden.
7	kappa	Angabe des Spannungsverhältnisses κ
8	Probengr.	Angabe der Probengröße. Dabei wird nach sehr kleinen ($A < 0,6 \text{ cm}^2$), kleinen ($0,6 < A < 40 \text{ cm}^2$) und großen ($A > 40 \text{ cm}^2$) Proben unterschieden.
9	Versuchsart	Die Einwirkungen wurden als konstante Spannungen (Spa.) oder als konstante Verformungen (Verf.) aufgebracht. Bei den Biege- wechsellversuchen wird noch nach Flachbiegeversuchen (Fla.) und Rotationsbiegeversuchen (Rot.) unterschieden.
10	Feuchte	Diese Angabe bezieht sich auf die Feuchte, die vom Autor ange- geben wurde. Hier finden sich auch Mittelwerte der Versuchs- serien, wenn sich die Feuchtigkeit in engen Grenzen hält.
11	Feuchte nachher	Bei wenigen Versuchstellern wurde die Feuchtigkeit auch nach dem Dauerfestigkeitsversuch gemessen, weil durch die Dauer- versuche die Feuchtigkeit abnahm.
12	Dichte	Angabe der Dichte der Proben. Hier finden sich auch Mittel- werte der Versuchsserien, wenn sich die Dichte in engen Gren- zen hält.
13	Frequ.	Diese Angabe bezieht sich auf die Frequenz, die vom Autor angegeben wurde.
14	stat. Fest.	Angabe der statischen Kurzzeitfestigkeit in der Einheit, die vom Autor verwendet wurde.
15	Umrechn.	Umrechnungsfaktor um die vom Autor verwendeten Einheiten in N/mm^2 umzurechnen
16	stat.Fest.	Angabe der statischen Kurzzeitfestigkeit in N/mm^2
17	Einheit	Angabe der vom Autor verwendeten Einheit, in dem die Wöhlerlinie gezeichnet wurde.
18-28	z.B. 1000 3	Angabe der Spannungen, in den vom Autor verwendeten Einhei- ten in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N (hier: 1000) bzw. $\log N$ (hier: 3)
29	Umrechn.	Umrechnungsfaktor, um die vom Autor verwendeten Einheiten in N/mm^2 umzurechnen
30-40	z.B. 1000 3	Angabe der Spannungen in N/mm^2 in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N bzw. $\log N$
41-50	z.B. 1000 3	Verhältnisse zur statischen Kurzzeitfestigkeit in Abhängigkeit von der Lastspielzahl N bzw. $\log N$
51-54	Anmerkungen	Anmerkungen, die vom Autor gemacht wurden, oder Anmer- kungen, die für die Auswertung wichtig sind.
55-58	z.B. 1000 3	Hier wird eine Umrechnung wegen verschiedener Spannungs- verhältniszahlen κ durchgeführt. Dabei wird ein linearen Verlauf verwendet. Die angegebenen Werte gelten für $\kappa=0$.

Verzeichnis der Anlagen:

Anlage 1: Tabelle der vorliegenden Zugschwellversuche

Anlage 2: Tabelle der vorliegenden Zug-Druck-Wechselversuche

Anlage 3: Tabellen der vorliegenden Schubversuche

- Anlage 3.1.: Hölzer unter schwellender Schubbeanspruchung
- Anlage 3.2.: Leimfugen unter schwellender Schubbeanspruchung
- Anlage 3.3.: Leimfugen unter wechselnder Schubbeanspruchung

Anlage 4 : Tabellen der vorliegenden Biegeschwellversuche

- Anlage 4.1.: Vollhölzer unter Biegeschwellbeanspruchung
- Anlage 4.2.: Vollhölzer unter Biegeschwellbeanspruchung, Auswertung der trockenen und nassen Proben mit großen Abmessungen
- Anlage 4.3.: Schichthölzer unter Biegeschwellbeanspruchung

Anlage 5. : Tabelle der vorliegenden Biegewechselversuche

- Anlage 5.1.: Vollhölzer unter Biegewechselbeanspruchung
- Anlage 5.2.: Schichthölzer unter Biegewechselbeanspruchung
- Anlage 5.3.: Sperr- und Sternhölzer unter Biegewechselbeanspruchung

Anlage 6.1. Tabelle der Versuche mit einer radial wirkenden Biegebeanspruchung
(Tafel 5 aus /Wa1/)

Anlage 6.2. Tabelle der Versuche mit einer tangential wirkenden Biegebeanspruchung
(Tafel 6 aus /Wa1/)

Anlage 7.: Übersicht über die untersuchten Versuchskörper und Versuchsergebnisse von
Möhler und Maier (Tab. 2 aus /Mö6/)

ANLAGE 1: Holz und Holzwerkstoffe unter Zugschweißbeanspruchung

Abkürzungen:		kA.=keine Angabe																														
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	29	30	31	32	33	
ZUGSCHWELLEN																	Spannungen in verschiedenen Einheiten															
Autor	Jahr	Ulnr.	Nummer	Holzart	Beanspr.	kappa	Probengr.	Versuchsart	Feuchte	Feuchte	Dichte	Frequ.	stat.Fest.	Umrechn.	stat.Fest.	Einheit	10	100	1000	3162	10000	1E+05	1E+06	2E+06	1E+07	1E+08	Umrechn.	10	100	1000	3162	
						(-)			(%)	naecher	(kg/dm3)	(Hz)	(N/mm²)	(-)	(N/mm²)		1	2	3	3,5	4	5	6	6,3	7	8		1	2	3	3,5	
Merosem	1987	Mar2	Mar.ZS.1-2	Fichte	ZS	0,07	klein		12		0,43	1	kA.			kA.																
Lewis	1951	Lew2	Le51.ZS.1-1	Douglas-fir	ZS	0,1	klein		12		0,47	15	14,37	6,9	99,153	1000psi											6,9	98,178	92,212	98,246		
Lewis	1951	Lew2	Le51.ZS.2-1	Eiche	ZS	0,1	klein		12		0,66	15	16,82	6,9	114,678	1000psi											6,9	112,38	108,94	100,92		
Lewis	1951	Lew2	Le51.ZS.1-2	Douglas-fir	ZS	0,1	klein		12		0,47	15	11,78	6,9	81,282	1000psi											6,9	78,844	75,592	72,341		
Lewis	1951	Lew2	Le51.ZS.2-2	Eiche	ZS	0,1	klein		12		0,66	15	13,27	6,9	91,583	1000psi											6,9	89,732	86,985	82,407		
Küch	1942	Kü5	Kü.ZS.1	Buchenschicht	ZS	0	klein		6,5	5,2	0,81	kA.	1508	0,102	153,816	kp/cm²		1400	1330	1200	1040	900	870	810		0,102				142,8	135,7	
Bonfield	1984	Bon1	Bn.ZS.1	Khaya Fumie	ZS	0,1	klein		10		0,45	5	81,8	1	81,8	N/mm²			85	82,5	80	55	50	48,5	45	1			85	82,5		
Die Kettzinkenverbindung werden wegen der geringfügig kleineren Abminderungsdaten gesondert betrachtet.																																
Bohannon	1969	Boh1	Bo.ZS.1	Fichte	ZS	0,1	klein		12		0,47	15	10,18	6,9	70,242	1000psi											6,9	68,135	64,823	58,301		
Bohannon	1969	Boh1	Bo.ZS.2	Fichte	ZS	0,1	klein		12		0,47	15	7,1	6,9	48,98	1000psi											6,9	47,03	45,071	41,152		
Egner	1984	Eg4	Eg.ZS.1	Fichte	ZS	0,25	groß		15		0,47	2,7	246	0,102	25,092	kp/cm²		200	185	170	150	133				0,102			20,4	18,87		
sonstige Ergebnisse:																																
Gilwald	1981	Gil1	Gil1.ZS.1	Douglasie	ZS	kA.	klein	Spa.	11,9		0,534	kA.	kA.			kp/cm²		620	590	590	500	460	460	460		0,102			63,24	60,18		
Gilwald	1981	Gil1	Gil1.ZS.2	Pappel	ZS	kA.	klein	Spa.	11,9		0,429	kA.	kA.			kp/cm²		820	735	650	490	300	290	290		0,102			83,84	74,97		
Okuyama	1984	Oku7	Ok.ZS.1-1	Fichte	ZS	kA.	klein	Spa.	12		0,43	10	kA.		1,14	(100%)	1,058	0,972	0,888	0,848	0,804	0,72	0,636	0,61		1	keine statische Kurzzeitfestigkeit					
Okuyama	1984	Oku7	Ok.ZS.1-2	Fichte	ZS	kA.	klein	Spa.	12		0,43	0,1	kA.		1,01	(100%)	0,936	0,862	0,778	0,746	0,714	0,64				1	keine statische Kurzzeitfestigkeit					

181

ANLAGE 2: Holz und Holzwerkstoffe unter Zug-Druck-Wechselbeanspruchung																													
Abkürzungen:		kA. =keine Angabe																											
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
ZUG-DRUCK-WECHSEL																	Spannungen in verschiedenen Einheiten												
AUTOR	Jahr	Litv.	Nummer	Holzart	Beanapr.	kappa	Probengr.	Versuchsart	Feuchte	Feuchte	Dichte	Frequ.	stat.Druckfest.	Umrechn.	stat.Fest.	Einheit	10	100	1000	3162	10000	1E+05	1E+06	1E+07	1E+08	2E+08	Umrechn.	10	
						[-]			[%]	nachtr	[kg/dm³]	[Hz]	[versch.]	[-]	[N/mm²]		1	2	3	3,5	4	5	6	6,3	7	8	8,3		
Götze	1964	G&K2		Pappel	Z/D	-1	klein		12		0,378		kA.	0,102		kg/cm²						210	180	150	140	120	107	0,102	
Dosoudil	1949	Dos1	Do.Z/D.1	Lignostone BN	Z/D	-1	klein		10,3		1,413	43,3	1320	0,102	134,84	kg/cm²						780	420	420	420	420		0,102	
Dosoudil	1949	Dos1	Do.Z/D.2	Lignostone BF II/2	Z/D	-1	klein		10,1		1,384	43,3	1258	0,102	128,318	kg/cm²					800	650	410	410	410	410		0,102	
Dosoudil	1949	Dos1	Do.Z/D.3	Lignostone BF II/2	Z/DW	-1	klein		9,9		1,38	43,3	1027	0,102	104,754	kg/cm²					575	480	280	280	280	280		0,102	
Dosoudil	1949	Dos1	Do.Z/D.4	Lignostone BF IV/7	Z/DW	-1	klein		8		1,383	43,3	1261	0,102	128,622	kg/cm²			580	480	380	300	300	300	300		0,102		
Bonfeld	1991	Bon1	Bn.Z/D.1-4	Khaya Furnier	Z/DW	-1	klein		10		0,45	5	49,5	1	49,5	N/mm²			37,8	35,9	34,2	30,8	27,4	26,4	24		1		
Bonfeld	1991	Bon1	Bn.Z/D.2	Douglas-fir	Z/DW	-1	klein		10		kA.	5	81,2	1	81,2	N/mm²			43,1	40,5	37,9	32,7	27,5	26,8	25		1		
Eberswalde	1964	In1	Eb.Z/D.1-1	Eiche	Z/DW	-1	klein		12		kA.	kA.	1640	0,102	167,28	kg/cm²	1310	1145	1062	960	815	650	580	580			0,102		
Eberswalde	1964	In1	Eb.Z/D.1-2	Buche	Z/DW	-1	klein		12		kA.	kA.	1410	0,102	143,82	kg/cm²	1140	1005	937	870	735	600	580	510			0,102		
Eberswalde	1964	In1	Eb.Z/D.1-3	Linde	Z/DW	-1	klein		12		kA.	kA.	1100	0,102	112,2	kg/cm²	910	816	769	722	628	534	505	440			0,102		
Eberswalde	1964	In1	Eb.Z/D.3-1	Kiefer	Z/DW	-1	klein		kA.		kA.	kA.	785	0,102	80,07	kg/cm²	607	518	473	429	340	310	310	310			0,102		
Eberswalde	1964	In1	Eb.Z/D.3-2	Kiefernsperrholz, 5-l	Z/DW	-1	klein		kA.		kA.	kA.	720	0,102	73,44	kg/cm²	540	460	405	380	270	230	230	230			0,102		
Eberswalde	1964	In1	Eb.Z/D.3-3	Kiefernsperrholz, 3-l	Z/DW	-1	klein		kA.		kA.	kA.	675	0,102	68,85	kg/cm²	505	420	377	335	250	200	200	200			0,102		

Spannungen in [N/mm ²]								Spannungen im Verhältnis zur Kurzzeitfestigkeit								ANMERKUNGEN		
100	1000	3162	10000	1E+05	1E+06	2E+06	1E+07	1E+08	10	100	1000	10000	1E+05	1E+06	2E+06		1E+07	1E+08
2	3	3,5	4	6	6	6,3	7	8	1	2	3	4	5	6	6,3		7	8
			21,42	18,98	15,3	14,28	12,24	10,91										
			79,56	42,84	42,84	42,84	42,84					0,591	0,318	0,318	0,318	0,318		
			81,6	66,3	41,82	41,82	41,82	41,82				0,517	0,326	0,326	0,326	0,326		
			58,95	48,92	29,58	29,58	26,58	26,58				0,448	0,273	0,273	0,273	0,273		
	59,16	48,96	38,76	30,6	30,6	30,6	30,6			0,46	0,301	0,238	0,238	0,238	0,238			
	37,8	35,9	34,2	30,8	27,4	26,4	24			0,76	0,691	0,622	0,554	0,533	0,465			
	43,1	40,5	37,9	32,7	27,5	26,8	25			0,704	0,618	0,534	0,448	0,438	0,408			
133,6	116,8	108,3	99,96	83,13	66,3	59,16	59,16		0,799	0,698	0,599	0,497	0,396	0,354	0,354		stat. Kurzzeitfestig. durch Extrapolation für N=1 ermittelt	
116,3	102,5	95,57	88,74	74,97	61,2	57,12	52,02		0,809	0,713	0,617	0,521	0,426	0,397	0,362		stat. Kurzzeitfestig. durch Extrapolation für N=1 ermittelt	
92,82	83,23	78,44	73,64	64,06	54,47	51,51	44,88		0,827	0,742	0,656	0,571	0,485	0,459	0,4		stat. Kurzzeitfestig. durch Extrapolation für N=1 ermittelt	
81,81	52,84	49,25	43,76	34,68	31,82	31,82	31,82		0,773	0,68	0,546	0,433	0,395	0,395	0,395		stat. Kurzzeitfestig. durch Extrapolation für N=1 ermittelt	
55,08	45,9	41,31	36,72	27,54	23,46	23,46	23,46		0,75	0,625	0,5	0,375	0,319	0,319	0,319		stat. Kurzzeitfestig. durch Extrapolation für N=1 ermittelt	
51,51	42,84	38,45	34,17	25,5	20,4	20,4	20,4		0,748	0,622	0,496	0,37	0,296	0,296	0,296		stat. Kurzzeitfestig. durch Extrapolation für N=1 ermittelt	
									Mittelwert:				0,423	0,373	0,362	0,348	mit den extrapolierten Ergebnissen aus Eberswalde	
									Standardabweichung:				0,125	0,094	0,085	0,068	mit den extrapolierten Ergebnissen aus Eberswalde	
									Variationskoeffizient:				0,295	0,252	0,235	0,194	mit den extrapolierten Ergebnissen aus Eberswalde	
									Varlat. d. stat. Kurzzeitf.:				0,18	0,16	0,18	0,18		
									V1,2:				0,3497	0,313	0,299	0,2871	mit den extrapolierten Ergebnissen aus Eberswalde	
									kfat:				0,2554	0,2571	0,2815	0,2771	mit den extrapolierten Ergebnissen aus Eberswalde	
									Mittelwert:				0,395	0,36	0,354	0,341	ohne die extrapolierten Ergebnissen aus Eberswalde	
									Standardabweichung:				0,1554	0,1191	0,1108	0,0909	ohne die extrapolierten Ergebnissen aus Eberswalde	
									Variationskoeffizient:				0,4035	0,3311	0,3127	0,2683	ohne die extrapolierten Ergebnissen aus Eberswalde	
									Varlat. d. stat. Kurzzeitf.:				0,19	0,18	0,18	0,18		
									V1,2:				0,4478	0,3816	0,3652	0,3249	ohne die extrapolierten Ergebnissen aus Eberswalde	
									kfat:				0,1442	0,1902	0,201	0,2257	ohne die extrapolierten Ergebnissen aus Eberswalde	

187

Anlage 3.1.: Hölzer unter Scherschwellbeanspruchung																															
Abkürzungen:		KA.=keine Angabe																													
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
SCHERSCHWELLEN																	Spannungen in verschiedenen Einheiten														
Autor	Jahr	Libr.	Nummer	Holzart	Beanspr.	kappa	Probengr.	Versuch	Feuchte	Feuchte	Dichte	Frequ.	stat.Fest.	Umrechn.	stat.Fest.	Einheit	10	100	1000	3162	10000	1E+05	1E+06	2E+06	1E+07	1E+08	2E+08	Umrechn.	10	100	1000
									%	naecher	[kg/dm3]	[Hz]	[versch.]	[]	[N/mm²]		1	2	3	3,5	4	5	6	6,3	7	8	8,3		1	2	3
Lewis	1963	Lew5	Le62.SS.1	Southern Pine	SS	0,1	groß		11,5		0,56	8,3	690	0,0069	4,761	psi					510	380	280	260	230			0,0069			
Lewis	1963	Lew5	Le62.SS.2	Southern Pine	SS	0,1	groß		11,2		0,59	8,3	665	0,0069	4,5885	psi						325	230	215	200			0,0069			
Lewis	1963	Lew5	Le62.SS.5	Douglas-fir	SS	0,1	groß		KA.		0,49	8,3	535	0,0069	3,6915	psi						390	300	280	240			0,0069			
Lewis	1963	Lew5	Le62.SS.6	Douglas-fir	SS	0,1	groß		KA.		0,51	8,3	520	0,0069	3,588	psi						340	265	245	205			0,0069			
Bonfield	1991	Bon1	Bn.SS.1	Khaya verleimt	SS	0,1	klein		10		0,45	5	9,55	1	9,55	N/mm²			66	64	62	55	47	44	37		1		8,45	7,9	
Bonfield	1991	Bon1	Bn.SS.2	Khaya verleimt	SS	0,1	klein		10		0,45	5	9,55	1	9,55	N/mm²			66	64	62	55	47	44	37		1		7,95	7,16	
Lewis	1963	Lew5	Le57.SS.1	Southern Pine	SS	0,1	groß		11		0,56	8,3	885	0,0069	6,1065	psi					590	505	420	390	330			0,0069			
Lewis	1963	Lew5	Le57.SS.2	Southern Pine	SS	0,1	groß		11,2		0,6	8,3	809	0,0069	5,5821	psi						490	355	320	275			0,0069			
Lewis	1963	Lew5	Le62.SS.3	Douglas-fir	SS	0,1	groß		13,2		0,5	8,3	660	0,0069	4,554	psi					530	415	330	310	280			0,0069			
Lewis	1963	Lew5	Le62.SS.4	Douglas-fir	SS	0,1	groß		12,7		0,53	8,3	610	0,0069	4,209	psi					440	370	310	290	240			0,0069			

188

33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	
Spannungen in [N/mm ²]		Spannungen im Verhältnis zur Kurzzzeitfestigkeit		Spannungen im Verhältnis zur Kurzzzeitfestigkeit		Spannungen im Verhältnis zur Kurzzzeitfestigkeit		Spannungen im Verhältnis zur Kurzzzeitfestigkeit		Spannungen im Verhältnis zur Kurzzzeitfestigkeit		Spannungen im Verhältnis zur Kurzzzeitfestigkeit		Spannungen im Verhältnis zur Kurzzzeitfestigkeit		Spannungen im Verhältnis zur Kurzzzeitfestigkeit		Spannungen im Verhältnis zur Kurzzzeitfestigkeit		Spannungen im Verhältnis zur Kurzzzeitfestigkeit		Spannungen im Verhältnis zur Kurzzzeitfestigkeit		Spannungen im Verhältnis zur Kurzzzeitfestigkeit		
3.5	4	5	6	7	8	9	10	10	100	1000	10000	1E+05	1E+06	2E+06	1E+07	1E+08		ANMERKUNGEN				5	6	7		
3,519	2,822	1,932	1,794	1,587					0,739	0,551	0,406	0,377	0,353					radial, behandelt				0,5008	0,3398	0,3076	0,2593	
	2,243	1,587	1,484	1,39					0,489	0,348	0,323	0,301						radial, behandelt, schräger Faserverlauf				0,4319	0,2732	0,2481	0,2201	
	2,691	2,07	1,932	1,658					0,728	0,581	0,523	0,448						radial, behandelt				0,9989	0,5119	0,4704	0,3875	
	2,348	1,829	1,691	1,415					0,654	0,51	0,471	0,394						radial, behandelt, schräger Faserverlauf				0,6154	0,4551	0,4124	0,3269	
	7,35	6,9	6,25	6,08	5,7				0,827	0,77	0,712	0,654	0,637	0,597				tangentiel				0,68	0,6161	0,5983	0,5521	
	6,37	5,58	4,79	4,55	4				0,75	0,687	0,584	0,502	0,478	0,419				radial				0,5381	0,4482	0,4183	0,3543	
	4,071	3,485	2,898	2,691	2,277				0,667	0,571	0,475	0,441	0,373					radial				0,5229	0,4182	0,3785	0,3032	
	3,381	2,45	2,208	1,898					0,608	0,488	0,398	0,34						radial, schräger Faserverlauf				0,5819	0,3785	0,3284	0,2686	
	3,057	2,664	2,277	2,138	1,852				0,803	0,820	0,5	0,47	0,424					radial				0,5975	0,4444	0,4108	0,3603	
	3,038	2,553	2,139	2,001	1,858				0,721	0,607	0,508	0,475	0,393					radial, schräger Faserverlauf				0,5828	0,4536	0,4171	0,326	
									Milchwert	0,8029	0,4804	0,4453	0,3826									0,5547	0,4274	0,3906	0,3221	nur radiale Werte unbehandelter Proben
									Standardabweichung	0,024	0,0412	0,0365	0,0354									0,0249	0,0318	0,0394	0,0386	nur radiale Werte unbehandelter Proben
									Variationskoeffizient	0,0399	0,0648	0,062	0,0928									0,0449	0,0744	0,0983	0,1197	nur radiale Werte unbehandelter Proben
																						0,3	0,3	0,3	0,3	V1=0,3 angenommen
																						0,3036	0,3099	0,3171	0,325	nur radiale Werte unbehandelter Proben
																						0,5481	0,4138	0,368	0,2959	nur radiale Werte unbehandelter Proben

Anlage 3.2.: Leimfugen unter Scherswellbeanspruchung																																			
Abkürzungen: Spa.=Prüfung mit konstanten Spannungen																																			
Verf.= Prüfung mit konstanten Verformungen																																			
kA.=keine Angabe																																			
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34		
ABSCHEREN IN DER LEIMFUGE																	Spannungen in verschiedenen Einheiten																		
Autor	Jahr	Litr.	Nummer	Holzart	Beenspr.	kappa	Probengr.	Versuch	Feuchte	Feuchte	Dichte	Frequ.	stat.Fest.	Umrechn.	stat.Fest.	Einheit	10	100	1000	3162	10000	1E+05	1E+06	2E+06	1E+07	1E+08	2E+08	Umrechn.	10	100	1000	3162	10000		
						[]			[%]	nacher	[kg/dm3]	[Hz]	[versch.]	[]	[N/mm²]		1	2	3	3,5	4	5	6	6,3	7	8	8,3		1	2	3	3,5	4		
Lewis	1946	Lew3	Le46.SS.1	Douglas-fir	SS	0,1	klein	Spa	kA.		kA.	kA.	748	0,0069	5,1612	psi																			
Lewis	1951	Lew2	Le51.SS.2	Eiche	SS	0,1	klein	Spa.	kA.		kA.	kA.	1304	0,0069	8,9976	psi																			
Stern	1962	Ste7	Ste.SS.1	Fichte	SS	0,12	klein		13,5				65,5	0,102	6,681	kp/cm²					44	37,5	31	31	31		0,102							4,488	
Stern	1962	Ste7	Ste.SS.3	Fichte	SS	0,18	klein		13,5				61,1	0,102	6,2322	kp/cm²												0,102							
Stern	1962	Ste7	Ste.SS.5	Fichte	SS	0,15	klein		13,5				70,9	0,102	7,2318	kp/cm²					42	36	32,3	32,3	32,3		0,102							4,284	
Stern	1962	Ste7	Ste.SS.2	Fichte	SS	0,62	klein		13,5				85,5	0,102	8,881	kp/cm²					46	42	40,5	40,5	40,5		0,102							4,692	
Stern	1962	Ste7	Ste.SS.4	Fichte	SS	0,49	klein		13,5				61,1	0,102	6,2322	kp/cm²					46	42	38	38	38		0,102							4,692	
Stern	1962	Ste7	Ste.SS.6	Fichte	SS	0,49	klein		13,5				70,9	0,102	7,2318	kp/cm²					44	37,5	37,5	37,5	37,5		0,102							4,488	
Moslemi	1961	Mo3	Mo.SS.1	Ahorn	SS	0	klein	Verf.	6,9		kA.	30	2398	0,0069	16,546	psi					1970	1300	900	764	630		0,0069							13,59	

35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58
Spannung in [N/mm ²]		1E+06		2E+08		10		100		1000		10000		1E+05		1E+06		1E+07		1E+08		1E+09	
5	6	6,3	7	8	8,3	1	2	3	4	5	6	6,3	7	8	ANMERKUNGEN								
Spannungen im Verhältnis zur Kurztzeitfestigkeit														Umrechnung auf k _{spas} =0									
				0,94	0,98	0,96	0,98	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89					100000	1E+06	2E+08	1E+07	1E+07
				0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96					0,8	0,4778	0,4444	0,4111	0,4111
																			0,6444	0,5	0,4559	0,3778	0,3778
																			0,5142	0,4015	0,4015	0,4015	0,4015
																			0,519	0,3583	0,3194	0,3194	0,3194
																			0,4209	0,3595	0,3595	0,3595	0,3595
3,825	3,162	3,162	3,162																				
3,774	2,958	2,754	2,754																				
3,672	3,295	3,295	3,295																				
4,284	4,131	4,131	4,131																				
4,284	3,876	3,876	3,876																				
3,825	3,825	3,825	3,825																				
8,97	6,21	5,272	4,347																				
Mittelwerte																							
Standardabweichung																							
Variationskoeffizient																							
Varf. d. stat. Kurzzeit. (V)																							
V1,2:																							
k _{stat} :																							
																			0,54	0,42	0,398	0,374	0,374
																			0,0883	0,069	0,0573	0,0365	0,0365
																			0,1589	0,1573	0,1446	0,0977	0,0977
																			0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
																			0,1886	0,1984	0,1756	0,1368	0,1368
																			0,4455	0,3482	0,3369	0,3445	0,3445

Anlage 3.3.: Leimfugen unter Scherwechselbeanspruchung																																	
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	
ABSCHEREN IN DER LEIMFUGE																	Spannungen in verschiedenen Einheiten																
Autor	Jahr	Litr.	Nummer	Holzart	Beanspr.	kappa	Probengr.	Versuch	Feuchte	Feuchte	Dichte	Frequ.	stat.Fest.	Umrechn.	stat.Fest.	Einheit	10	100	1000	3162	10000	1E+05	1E+06	2E+06	1E+07	1E+08	2E+08	Umrechn.	10	100	1000	3162	
						[-]			[%]	nacher	[kg/dm3]	[Hz]	[versch.]	[-]	[N/mm²]		1	2	3	3,5	4	5	6	6,3	7	8	8,3		1	2	3	3,5	
Sterr	1962	Ste7	Ste.SW.6	Fichte	SW	-0,21	klein		13,5				70,9	0,102	7,2318	kp/cm²					39	32	24	23,9	23,9			0,102					
Sterr	1962	Ste7	Ste.SW.2	Fichte	SW	-0,2	klein		13,5				65,5	0,102	6,681	kp/cm²					40	33,5	27	25,3	25,3			0,102					
Sterr	1962	Ste7	Ste.SW.4	Fichte	SW	-0,22	klein		13,5				61,1	0,102	6,2322	kp/cm²					38	33	27	25,5	22			0,102					
Sterr	1962	Ste7	Ste.SW.5	Fichte	SW	-1	klein		13,5				70,9	0,102	7,2318	kp/cm²					30	23	18,6	18,6	18,6			0,102					
Sterr	1962	Ste7	Ste.SW.1	Fichte	SW	-1	klein		13,5				65,5	0,102	6,681	kp/cm²					32,5	25	19	17,5	17,5			0,102					
Sterr	1962	Ste7	Ste.SW.3	Fichte	SW	-1	klein		13,5				61,1	0,102	6,2322	kp/cm²					33	27,5	22	20	17			0,102					

34		35		36		37		38		39		40		41		42		43		44		45		46		47		48		49		50		51		52		53		54									
Spannungen in (N/mm ²)										Spannungen im Verhältnis zur Kurzzeitfestigkeit										ANMERKUNGEN																													
10000	1E+05	1E+06	2E+06	1E+07	1E+08	2E+08	10	100	1000	10000	1E+05	1E+06	2E+06	1E+07	1E+08																																		
4	5	6	6,3	7	8	8,3	1	2	3	4	5	6	6,3	7	8																																		
3,978	3,264	2,448	2,438	2,438						0,55	0,451	0,338	0,337	0,337																										Resorcinleim									
4,08	3,417	2,754	2,581	2,581						0,811	0,511	0,412	0,366	0,366																											Kaurileim								
3,978	3,368	2,754	2,601	2,244						0,838	0,54	0,442	0,417	0,36																											Phenolleim								
3,06	2,346	1,893	1,893	1,893						0,423	0,324	0,234	0,234	0,234																											Resorcinleim								
3,315	2,55	1,838	1,785	1,785						0,498	0,382	0,29	0,267	0,267																											Kaurileim								
3,366	2,805	2,244	2,04	1,734						0,54	0,45	0,36	0,327	0,278																										Phenolleim									
																																									Mittelwerte								
																																									0,385	0,295	0,278	0,26	nur reine Wechselbeanspruchung (kappa=1)				
																																										0,0629	0,0631	0,0473	0,0229	nur reine Wechselbeanspruchung (kappa=1)			
																																											0,1633	0,2141	0,1711	0,0683	nur reine Wechselbeanspruchung (kappa=1)		
																																												0,1	0,1	0,1	0,1	V1=0,1 angenommen	
																																												0,1915	0,2363	0,1982	0,1334	nur reine Wechselbeanspruchung (kappa=1)	
																																													0,316	0,2157	0,2229	0,2429	nur reine Wechselbeanspruchung (kappa=1)

ANLAGE 4.1: Vollhölzer unter Biegeschwellbeanspruchung																																
Abkürzungen:		Fla.= Flachbiegung																														
		Spa.=Prüfung mit konstanten Spannungen																														
		Verf.= Prüfung mit konstanten Verformungen																														
		kA.=keine Angabe																														
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	
BIEGESCHWELLEN																		Spannungen in verschiedenen Einheiten														
Autor	Jahr	Litr.	Nummer	Holzart	Beanspr.	kappa	Probengr.	Versuchsart	Feuchte [%]	Feuchte nachher	Dichte [kg/dm³]	Frequ. [Hz]	stat.Fest. [versch.]	Umrechn. [-]	stat.Fest. [N/mm²]	Einheit	10	100	1000	3162	10000	100000	1E+06	2E+06	1E+07	1E+08	Umrechn.	10	100	1000		
																	1	2	3	3,5	4	5	6	6,3	7	8		1	2	3		
Gilwald	1961	Git3	Gi.BS.1-1	Douglasie	BS	kA.	groß	Fla./kA..	15	kA.	5/8,33	kA.	0,102			kp/cm²				365	330	267	208	208	208		0,102					
Gilwald	1961	Git3	Gi.BS.1-2	Kiefer	BS	kA.	groß	Fla./kA..	15	kA.	5/8,33	kA.	0,102			kp/cm²			334	308	278	222	170	170	170		0,102				34,07	
Gilwald	1961	Git3	Gi.BS.1-3	Fichte	BS	kA.	groß	Fla./kA..	15	kA.	5/8,33	kA.	0,102			kp/cm²		293	259	242	225	190	156	156	156		0,102				26,42	
Gilwald	1961	Git3	Gi.BS.2-1	Impercol-Schwe	BS	kA.	groß	Fla./kA..	15	kA.	5/8,33	kA.	0,102			kp/cm²				437	344	255	225	200	200		0,102					
Gilwald	1961	Git3	Gi.BS.2-2	Kiefer	BS	kA.	groß	Fla./kA..	15	kA.	5/8,33	kA.	0,102			kp/cm²		395	345	320	295	245	195	180	175	175		0,102			35,19	
Lewis	1957	Lew4	Le57.BS.1	Southern Pine	BS	0,1	groß	Fla./Spa.	>35		0,54	8,33	7,45	6,9	51,405	1000psi						3,7	3,7	3,7	3,7						6,9	
Lewis	1957	Lew4	Le57.BS.2	Southern Pine	BS	0,1	groß	Fla./Spa.	>35		0,56	8,33	7,02	6,9	48,438	1000psi						3,85	3,85	3,85	3,85						6,9	
Lewis	1962	Lew5	Le62.BS.3	Douglas-fir	BS	0,1	groß	Fla./Spa.	>35		0,49	8,33	6,76	6,9	46,644	1000psi					3,7	3,7	3,7	3,7	3,7						6,9	
Lewis	1962	Lew5	Le62.BS.4	Douglas-fir	BS	0,1	groß	Fla./Spa.	31,9		0,51	8,33	5,99	6,9	41,331	1000psi					3,6	3,6	3,6	3,6	3,6						6,9	
Lewis	1962	Lew5	Le62.BS.1	Southern Pine	BS	0,1	groß	Fla./Spa.	11,4		0,56	8,33	12,37	6,9	85,353	1000psi			9	8,5	7,25	5,9	5,5	4,6							6,9	
Lewis	1962	Lew5	Le62.BS.2	Southern Pine	BS	0,1	groß	Fla./Spa.	11,3		0,57	8,33	9,84	6,9	59,616	1000psi					5,3	4,3	4,1	3,9							6,9	
Lewis	1962	Lew5	Le62.BS.7	Douglas-fir	BS	0,1	groß	Fla./Spa.	kA.		0,49	8,33	10,83	6,9	74,727	1000psi					7,7	6,6	5,7	5,3	4,6						6,9	
Lewis	1962	Lew5	Le62.BS.8	Douglas-fir	BS	0,1	groß	Fla./Spa.	kA.		0,5	8,33	7,17	6,9	49,473	1000psi						4,75	4,2	3,9	3,5						6,9	
Tsai	1990	Ts1	Ts.BS.2-4	Fichte	BS	0,1	klein	Fla./Spa.	12		0,42		91,32	1	91,32	N/mm²	86,6	83,6	80,5	78,9	77,4	74,3	71,2	70,2	68,1		1	86,6	83,6	80,5		
Fuller	1946	Lew3	Le46.BS.1	verschiedene	BS	0,1	klein	kA./Spa.	kA.		kA.	kA.																				
Lewis	1957	Lew4	Le57.BS.3	Southern Pine	BS	0,1	groß	Fla./Spa.	11,2		0,56	8,33	13,54	6,9	93,426	1000psi			10,5	10	9,2	8,3	8	7,4						6,9		
Lewis	1957	Lew4	Le57.BS.4	Southern Pine	BS	0,1	groß	Fla./Spa.	10,9		0,58	8,33	10,15	6,9	70,035	1000psi				7,7	6,4	5,4	5,15	4,7						6,9		
Lewis	1962	Lew5	Le62.BS.5	Douglas-fir	BS	0,1	groß	Fla./Spa.	13,3		0,48	8,33	10,66	6,9	73,554	1000psi						7,8	6,6	6,3	5,4						6,9	
Lewis	1962	Lew5	Le62.BS.8	Douglas-fir	BS	0,1	groß	Fla./Spa.	12,5		0,49	8,33	7,98	6,9	55,062	1000psi			5,9	5,6	5	4,4	4,2	3,75						6,9		
Sterr	1962	Ste7	St.BS.5	Fichte	BS	0,17	groß	Fla./Spa.	13,5		0,45	kA.	kA.			kp/cm²					375	340	330	328	325		0,102					
Hayashi	1989	Hay2	Ha.BS.9	Sugi	BS	0,02	klein	Fla./Spa.	10		kA.	10	kA.																			
Hayashi	1989	Hay2	Ha.BS.6	Sugi	BS	0,02	klein	Fla./Spa.	10		kA.	10	kA.																			

Spannungen in [N/mm²]								Spannungen im Verhältnis zur Kurzzeitfestigkeit								Umrechnung auf kappa=0									
3162	10000	100000	1E+06	2E+06	1E+07	1E+08		10	100	1000	10000	100000	1E+06	2E+06	1E+07	1E+08	ANMERKUNGEN				100000	1E+06	2E+06	1E+07	
3,5	4	5	6	6,3	7	8		1	2	3	4	5	6	6,3	7	8					5	6	6,3	7	
37,23	33,66	27,23	21,22	21,22	21,22												keine stat.Biegefestigkeit angegeben								
31,21	28,38	22,84	17,34	17,34	17,34												keine stat.Biegefestigkeit angegeben								
24,68	22,95	19,38	15,91	15,91	15,91												keine stat.Biegefestigkeit angegeben								
	44,57	35,09	26,01	22,95	20,4	20,4											keine stat.Biegefestigkeit angegeben								
32,64	30,09	24,99	19,89	18,36	17,85	17,85											keine stat.Biegefestigkeit angegeben								
		25,53	25,53	25,53	25,53							0,497	0,497	0,497	0,497		naß				0,4407	0,4407	0,4407	0,4407	
		26,57	26,57	26,57	26,57							0,548	0,548	0,548	0,548		naß, schräger Faseranschnitt				0,4983	0,4983	0,4983	0,4983	
	25,53	25,53	25,53	25,53	25,53						0,547	0,547	0,547	0,547	0,547		naß				0,497	0,497	0,497	0,497	
	24,84	24,84	24,84	24,84	24,84						0,601	0,601	0,601	0,601	0,601		naß, schräger Faseranschnitt				0,5567	0,5567	0,5567	0,5567	
62,1	58,65	50,03	40,71	37,95	31,74						0,687	0,586	0,477	0,445	0,372		behandelt				0,5401	0,4188	0,3829	0,3021	
		36,57	28,67	28,29	26,91							0,613	0,496	0,475	0,451		behandelt, schräger Faserverlauf				0,5705	0,4419	0,4182	0,3904	
	53,13	45,54	39,33	36,57	31,74						0,711	0,609	0,526	0,489	0,425		behandelt				0,566	0,4737	0,4326	0,3608	
		32,78	26,99	26,91	24,15							0,662	0,506	0,544	0,488		behandelt, schräger Faserverlauf				0,625	0,5397	0,4933	0,4313	
78,9	77,4	74,3	71,2	70,2	68,1			0,948	0,915	0,882	0,848	0,814	0,78	0,769	0,746		statistischer Versuch unsicher				0,7929	0,7552	0,743	0,7175	
									0,79	0,63	0,48	0,43	0,41	0,4	0,37		keine stat.Biegefestigkeit angegeben				0,4222	0,3667	0,3444	0,3333	
72,45	69	63,48	57,27	55,2	51,06							0,739	0,679	0,613	0,591	0,547						0,6439	0,57	0,5454	0,4961
	53,13	44,16	37,26	35,54	32,43						0,759	0,631	0,532	0,507	0,463		schräger Faseranschnitt				0,5895	0,48	0,4527	0,4034	
		53,82	45,54	43,47	37,26							0,732	0,619	0,591	0,507						0,7019	0,5768	0,5455	0,4517	
40,71	38,64	34,5	30,36	28,98	25,88						0,702	0,627	0,551	0,526	0,47		schräger Faseranschnitt				0,5851	0,5015	0,4737	0,411	
	38,25	34,68	33,66	33,46	33,15																				
									0,77	0,73	0,68						keine stat.Biegefestigkeit angegeben				0,6735				
									0,78	0,74	0,69	0,63					keine stat.Biegefestigkeit angegeben				0,6837				
												0,625	0,582	0,539	0,504		Mittelwert				0,587	0,508	0,487	0,449	
												0,0858	0,0827	0,0865	0,0936		Standardabweichung				0,0985	0,0929	0,0961	0,104	
												0,1374	0,147	0,1606	0,1856		Variationskoeffizient				0,1679	0,1827	0,1973	0,2315	
												0,27	0,27	0,27	0,27		Variat. d. stat. Kurzzeitf.				0,27	0,27	0,27	0,27	
												0,3052	0,31	0,3172	0,3315		V1,2:				0,3211	0,3297	0,3386	0,3611	
												0,5597	0,4958	0,4634	0,4126		ktat:				0,4979	0,4186	0,3884	0,3281	

195

Anlage 4.2.: Vollhölzer unter Biegeschwellbeanspruchung, Auswertung der trockenen und naßen Proben mit großen Abmessungen.

Abkürzungen:		Rot. = Rotationsbiegung		Spa. = Prüfung mit konstanten Spannungen																													
		Fla. = Flechbiegung		Verf. = Prüfung mit konstanten Verformungen																													
		kA. = keine Angabe																															
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
BIEGESCHWELLEN																	Spannungen in verschiedenen Einheiten																
trockene Proben																	Spannungen in [N/mm ²]																
Autor	Jahr	Litr.	Nummer	Holzart	Beanspr.	kappa	Proben	Versuchs	Feuchte	Feuchte	Dichte	Frequ.	stat.Fest	Umrechn	stat.Fest	Einheit	10	100	1000	3162	10000	1E+05	1E+06	2E+06	1E+07	1E+08	Umrechn.	10	100	1000	3162	10000	
						[]			[%]	näher	[kg/dm ³]	[Hz]	[versch.]	[]	[N/mm ²]		1	2	3	3,5	4	5	6	6,3	7	8		1	2	3	3,5	4	
Gilwald	1961	Gd3	Gl.BS.1-1	Douglasie	BS	kA.	groß	Fla./Spa.	15		kA.	5/8,33	kA.	0,102		kp/cm ²					365	330	267	208	208		0,102				37,23	33,66	
Gilwald	1961	Gd3	Gr.BS.1-2	Kiefer	BS	kA.	groß	Fla./Spa.	15		kA.	5/8,33	kA.	0,102		kp/cm ²			334	306	278	222	170	170		0,102			34,07	31,21	28,36		
Gilwald	1961	Gd3	Gl.BS.1-3	Fichte	BS	kA.	groß	Fla./Spa.	15		kA.	5/8,33	kA.	0,102		kp/cm ²		293	259	242	225	190	156	156		0,102			26,42	24,68	22,95		
Gilwald	1961	Gd3	Gl.BS.2-1	Impercol-Sch	BS	kA.	groß	Fla./Spa.	15		kA.	5/8,33	kA.	0,102		kp/cm ²				437	344	255	225	200	200		0,102			44,57			
Gilwald	1961	Gd3	Gl.BS.2-2	Kiefer	BS	kA.	groß	Fla./Spa.	15		kA.	5/8,33	kA.	0,102		kp/cm ²		395	345	320	295	245	195	180	175		0,102		35,19	32,64	30,09		
Sterr	1962	St17	St.BS.5	Fichte	BS	0,17	groß	Fla./Spa.	13,5		0,45	kA.	kA.			kp/cm ²					375	340	330	328	325		0,102			38,25			
Lewis	1957	Lew4	Le57.BS.3	Kiefer	BS	0,1	groß	Fla./Spa.	11,2		0,56	8,33	13,54	6,9	93,426	1000psi			10,5	10	9,2	8,3	8	7,4		6,9			72,45	69			
Lewis	1957	Lew4	Le57.BS.4	Kiefer	BS	0,1	groß	Fla./Spa.	10,9		0,56	8,33	10,15	6,9	70,035	1000psi					7,7	6,4	5,4	5,15	4,7		6,9			53,13			
Lewis	1962	Lew5	Le62.BS.5	Tanne	BS	0,1	groß	Fla./Spa.	13,3		0,48	8,33	10,66	6,9	73,554	1000psi						7,8	6,6	6,3	5,4		6,9						
Lewis	1962	Lew5	Le62.BS.6	Tanne	BS	0,1	groß	Fla./Spa.	12,5		0,48	8,33	7,98	6,9	55,082	1000psi				5,9	5,6	5	4,4	4,2	3,75		6,9			40,71	38,64		
naße (wassergesättigte Proben)																																	
Lewis	1957	Lew4	Le57.BS.1	Kiefer	Bieg	0,1	groß	Fla./Spa.	>35		0,54	8,33	7,45	6,9	51,405	1000psi						3,7	3,7	3,7	3,7		6,9						
Lewis	1957	Lew4	Le57.BS.2	Kiefer	Bieg	0,1	groß	Fla./Spa.	>35		0,56	8,33	7,02	6,9	48,438	1000psi						3,85	3,85	3,85	3,85		6,9						
Lewis	1962	Lew5	Le62.BS.3	Tanne	Bieg	0,1	groß	Fla./Spa.	>35		0,49	8,33	6,76	6,9	46,644	1000psi						3,7	3,7	3,7	3,7	3,7		6,9				25,53	
Lewis	1962	Lew5	Le62.BS.4	Tanne	Bieg	0,1	groß	Fla./Spa.	31,9		0,51	8,33	5,99	6,9	41,331	1000psi						3,6	3,6	3,6	3,6	3,6		6,9				24,84	

										Spannungen im Verhältnis zur Kurzzeitfestigkeit										Umrechnung auf kappa=0			
1E+05	1E+06	2E+06	1E+07	1E+08	10	100	1000	10000	1E+05	1E+06	2E+06	1E+07	1E+08	ANMERKUNGEN				100000	1000000	2000000	1E+07		
5	6	6,3	7	8	1	2	3	4	5	6	6,3	7	8					5	6	6,3	7		
21,23	21,22	21,22	21,22																				
22,64	17,34	17,34	17,34																				
19,38	15,91	15,91	15,91																				
35,09	26,01	22,95	20,4	20,4																			
24,99	18,89	18,36	17,85	17,85																			
34,68	33,66	33,46	33,15																				
63,48	57,27	55,2	51,06					0,739	0,679	0,613	0,591	0,547				0,84385	0,57	0,54538	0,48614				
44,16	37,26	35,54	32,43					0,758	0,631	0,532	0,507	0,463		schräger Faseranschnitt		0,58949	0,48002	0,45285	0,40339				
53,82	45,54	43,47	37,28					0,732	0,619	0,591	0,507					0,7019	0,57682	0,54555	0,45174				
34,5	30,36	28,98	25,88					0,702	0,627	0,551	0,528	0,47		schräger Faseranschnitt		0,58507	0,50153	0,47388	0,41103				
					trocken:	Mittelwerte		0,867	0,579	0,554	0,497			trocken:	Mittelwerte	0,83008	0,53209	0,50432	0,44058				
						Standardabweichung		0,0494	0,0437	0,0435	0,0384				Standardabweichung	0,05483	0,04859	0,04828	0,04269				
						Variationskoeffizient		0,074	0,0755	0,0785	0,0774				Variationskoeffizient	0,06703	0,09132	0,09574	0,0969				
					trocken:	Variat. d. stat. K		0,27	0,27	0,27	0,27			trocken:	Variat. d. stat. Kurzzeitf.(V1)	0,27	0,27	0,27	0,27				
						V1,2:		0,2807	0,2811	0,282	0,2816				V1,2:	0,28465	0,28609	0,28764	0,28805				
						kfat:		0,646	0,5589	0,5343	0,4794				kfat:	0,60276	0,50676	0,476	0,41704				
25,53	25,53	25,53	25,53					0,497	0,497	0,497	0,497			naß		0,44072	0,44072	0,44072	0,44072				
26,57	26,57	26,57	26,57					0,548	0,548	0,548	0,548			naß, schräger Faseranschnitt		0,49826	0,49826	0,49826	0,49826				
25,53	25,53	25,53	25,53					0,547	0,547	0,547	0,547	0,547		naß		0,49704	0,49704	0,49704	0,49704				
24,84	24,84	24,84	24,84					0,601	0,601	0,601	0,601	0,601		naß, schräger Faseranschnitt		0,55687	0,55687	0,55687	0,55687				
					naß:	Mittelwerte		0,548	0,548	0,548	0,548			naß:	Mittelwerte	0,51732	0,51732	0,51732	0,51732				
						Standardabweichung		0,0426	0,0426	0,0426	0,0426				Standardabweichung	0,03408	0,03408	0,03408	0,03408				
						Variationskoeffizient		0,0777	0,0777	0,0777	0,0777				Variationskoeffizient	0,06588	0,06588	0,06588	0,06588				
					naß:	Variat. d. stat. K		0,27	0,27	0,27	0,27			naß:	Variat. d. stat. Kurzzeitf.(V1)	0,27	0,27	0,27	0,27				
						V1,2:		0,2817	0,2817	0,2817	0,2817				V1,2:	0,27849	0,27849	0,27849	0,27849				
						kfat:		0,5293	0,5293	0,5293	0,5293				kfat:	0,50433	0,50433	0,50433	0,50433				
					gesamt:	Mittelwerte		0,608	0,564	0,551	0,522			gesamt:	Mittelwerte	0,5641	0,5151	0,5012	0,4694				
						Standardabweichung		0,0785	0,0432	0,04	0,0467				Standardabweichung	0,08497	0,04797	0,04439	0,05186				
						Variationskoeffizient		0,1258	0,0766	0,0725	0,0893				Variationskoeffizient	0,15063	0,09312	0,08858	0,11049				
					gesamt:	Variat. d. stat. K		0,27	0,27	0,27	0,27			gesamt:	Variat. d. stat. Kurzzeitf.(V1)	0,27	0,27	0,27	0,27				
						V1,2:		0,2898	0,2814	0,2802	0,2854				V1,2:	0,31184	0,28871	0,28518	0,29325				
						kfat:		0,5541	0,5446	0,5344	0,4986				kfat:	0,49428	0,48965	0,47876	0,43707				

ANLAGE 4.3.: Schlichthölzer unter Biegeschwellbeanspruchung																																											
Abkürzungen:		Fla.= Flachbiegung Spa.=Prüfung mit konstanten Spannungen Verf.= Prüfung mit konstanten Verformungen kA.=keine Angabe																																									
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32												
BIEGESCHWELLEN																		Spannungen in verschiedenen Einheiten																									
Autor	Jahr	Unt.	Nummer	Holzart	Beanspr.	kappa	Probengr.	Versuchsart	Feuchte [%]	Feuchte nachtr	Dichte (kg/dm3)	Frequ. [Hz]	staf.Fest. [versch.]	Umrechn. [-]	staf.Fest. [N/mm²]	Einheit	10	100	1000	3182	10000	1E+05	1E+06	2E+06	1E+07	1E+08	Umrechn.	10	100	1000													
						[-]											1	2	3	3,5	4	5	6	6,3	7	8		1	2	3													
Stierr	1962	Ste7	St.BS.6	Fichte	BS	0,15	groß	Fla./Spa.	13,4		0,46	kA.	kA.	0,102		kg/cm²					440	382	382	382	382		0,102																
Stierr	1962	Ste7	St.BS.7	Fichte	BS	0,17	groß	Fla./Spa.	kA.		kA.	kA.	kA.	0,102		kg/cm²					400	340	335	335	335		0,102																
Stierr	1962	Ste7	St.BS.3	Fichte	BS	0,14	groß	Fla./Spa.	13,5		0,44	kA.	541	0,102	55,182	kg/cm²				510	460	400	395	394	392		0,102																
Tsai	1990	Ts1	Ts.BS.2-1	Birke	BS	0,1	groß	Fla./Spa.	8		kA.	20	255	1	255	N/mm²		255	237	227	218	198	178	172	158		1		255	237													
Tsai	1990	Ts1	Ts.BS.2-5	Khaya	BS	0,1	groß	Fla./Spa.	11		0,57		95,6	1	95,6	N/mm²		79,3	77,8	77,05	76,3	74,76	73,23	72,77	71,7		1		79,3	77,8													
Tsai	1990	Ts1	Ts.BS.2-3	Khaya	BS	0,1	groß	Fla./Spa.	11		0,54		109	1	109	N/mm²	104,33	99,65	94,99	92,65	90,31	85,64	80,97	79,57	76,3		1	104,3	99,65	94,99													
Stierr	1962	Ste7	St.BS.1	Fichte	BS	0,14	groß	Fla./Spa.	13		0,45	kA.	676	0,102	68,952	kg/cm²					445	405	400	400	400		0,102																
Stierr	1962	Ste7	St.BS.2	Fichte	BS	0,15	groß	Fla./Spa.	13		0,44	kA.	618	0,102	62,832	kg/cm²					415	375	365	365	365		0,102																
Stierr	1962	Ste7	St.BS.4	Fichte	BS	0,14	groß	Fla./Spa.	13,5		0,47	kA.	699	0,102	71,298	kg/cm²					555	480	415	408	408	403		0,102															
Hayashi	1989	Hay2	Ha.BS.2-1	Helmlock	BS	0,01	klein	Fla./Spa.	10		kA.	10	698	0,102	71,196	kg/cm²	keine Angaben der Zeitfestigkeitswerte																							58,805			
Hayashi	1989	Hay2	Ha.BS.3-1	Helmlock	BS	0,02	klein	Fla./Spa.	10		kA.	10	609	0,102	62,118	kg/cm²	keine Angaben der Zeitfestigkeitswerte																								50,316		
Hayashi	1989	Hay2	Ha.BS.4-1	Sugi	BS	0,03	klein	Fla./Spa.	10		kA.	10	398	0,102	40,596	kg/cm²	keine Angaben der Zeitfestigkeitswerte																									31,665	
Hayashi	1989	Hay2	Ha.BS.5-1	Sugi	BS	0,02	klein	Fla./Spa.	10		kA.	10	483,5	0,102	49,317	kg/cm²	keine Angaben der Zeitfestigkeitswerte																										40,44
Hayashi	1989	Hay2	Ha.BS.7	Sugi	BS	0,02	klein	Fla./Spa.	10		kA.	10				kg/cm²	keine Angaben der Zeitfestigkeitswerte																										
Hayashi	1989	Hay2	Ha.BS.8	Sugi	BS	0,02	klein	Fla./Spa.	>35		kA.	10				kg/cm²	keine Angaben der Zeitfestigkeitswerte																										

198

33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58				
Spannungen in [N/mm ²]										Spannungen im Verhältnis zur Kurzzeitfestigkeit										Umrechnung auf kappa=0									
3162	10000	1E+05	1E+06	2E+06	1E+07	1E+08		10	100	1000	10000	1E+05	1E+06	2E+06	1E+07	1E+08					ANMERKUNGEN	100000	1E+06	2E+06	1E+07				
3,5	4	5	6	6,3	7	8		1	2	3	4	5	6	6,3	7	8						5	6	6,3	7				
	44,88	38,96	38,96	38,96	38,96															verkürzte Stützweite									
	40,8	34,68	34,17	34,17	34,17															verkürzte Stützweite, Verwendung eines Durchläufers									
52,02	48,92	40,8	40,29	40,19	39,98							0,85	0,739	0,73	0,728	0,725				Phenolfeim, stat. Versuch = "Ausreißer"	0,6969	0,8662	0,684	0,6797					
227	218	198	178	172	158					1	0,929	0,856	0,776	0,698	0,675	0,62				stat. Versuch unsicher	0,7518	0,6645	0,6383	0,5773					
77,05	76,3	74,76	73,23	72,77	71,7						0,829	0,814	0,798	0,782	0,766	0,781	0,75			stat. Versuch unsicher, sliced	0,7578	0,74	0,7347	0,7222					
82,65	80,31	85,64	80,97	79,57	76,3					0,957	0,914	0,871	0,829	0,796	0,743	0,73	0,7			stat. Versuch unsicher, rotary	0,7618	0,7143	0,7	0,6667					
	45,39	41,31	40,8	40,8	40,8							0,658	0,599	0,592	0,582	0,592				Kaurilfeim	0,5352	0,5266	0,5266	0,5266					
	42,33	38,25	37,23	37,23	37,23							0,674	0,609	0,593	0,593	0,593				Kaurilfeim, stehende Jahninge	0,5397	0,5206	0,5206	0,5206					
58,81	48,96	42,33	41,62	41,41	41,11							0,687	0,594	0,584	0,581	0,577				Resorcinleim	0,5303	0,5187	0,5154	0,5104					
											0,84	0,77	0,7	0,62						Urealeim	0,6957	0,6146							
											0,81	0,75	0,7	0,64						Phenolfeim, Mittelwert aus 2 Versuchen	0,6948	0,6338							
											0,78	0,74	0,7	0,66						verschiedene Leime; Mittelwert aus 2 Versuchen	0,6923	0,6513							
											0,82	0,75	0,67	0,6						verschiedene Leime; Mittelwert aus 2 Versuchen	0,6629	0,5914							
											0,77	0,73	0,69	0,65						verschiedene Leime	0,6837	0,6429							
											0,74	0,62	0,5	0,5						naß	0,4898	0,4898							
												0,64	0,604	0,588	0,587					Mittelwerte		0,814	0,577	0,521	0,519				
												0,0695	0,0479	0,0065	0,009					Standardabweichung	0,0871	0,0627	0,0056	0,0082					
												0,1085	0,0782	0,0111	0,0153					Variationskoeffizient	0,142	0,1087	0,0106	0,0158					
												0,2	0,2	0,2	0,2					Variat. d. stat. Kurzzeitf.:	0,2	0,2	0,2	0,2					
												0,2286	0,2157	0,2003	0,2006					V1,2:	0,2469	0,2287	0,2003	0,2006					
												0,5959	0,581	0,5879	0,588					kfat:	0,5433	0,5361	0,5206	0,5184					

Anlage 5.1.: Vollhölzer unter Biegewechselbeanspruchung																																
Abkürzungen:																																
Rot.= Rotationsbiegung		Spa.= Prüfung mit konstanten Spannungen																														
Fla.= Flachbiegung		Verf.= Prüfung mit konstanten Verformungen																														
kA.= keine Angabe																																
? =unklar																																
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
BIEGEWECHSEL																	Spannungen in verschiedenen Einheiten															
Autor	Jahr	Ltnr.	Nummer	Holzart	Beanspr.	kappa	Probengr.	Versuchs	Feuchte	Feuchte	Dichte	Frequ.	stat.Fest.	Umrechn.	stat.Fest.	Einheit	10	100	1000	3162	10000	1+05	1+08	2+06	1+07	1+08	2+08	Umrechn.	10	100	1000	3162
						[]			[%]	nacher	[kg/dm3]	[Hz]	[versch.]	[]	[N/mm²]		1	2	3	3,5	4	5	6	6,3	7	8	8,3		1	2	3	3,5
Angström	1929	Ang1	An.BW.1-1	Kiefer	BW	-1	klein	Fla./kA.	11		0,48	kA.	kA.	0,102	kp/cm²	keine Angaben																0,102
Angström	1929	Ang1	An.BW.1-2	Fichte	BW	-1	klein	Fla./kA.	11		0,4	kA.	kA.	0,102	kp/cm²	keine Angaben																0,102
Angström	1929	Ang1	An.BW.1-3	Fichte	BW	-1	klein	Fla./kA.	11		0,4	kA.	kA.	0,102	kp/cm²	keine Angaben																0,102
Giltwald	1961	Gi1	Gi61.BW-2	Buche	BW	-1	klein	Fla./Spa.	11,9	kA	0,712	25	kA	0,102	kp/cm²			543	522	491	440	430	430	430							55,39	53,24
Giltwald	1961	Gi1	Gi61.BW-1	Kiefer	BW	?	klein	Fla./Spa.	11,9	kA	0,498	25	kA	0,102	kp/cm²	1060	890	740	666	576	423	340	340	340				0,102	108,1	90,78	75,48	67,93
Giltwald	1961	Gi3	Gi.BW.3	Kiefer	BW	-1	klein	Fla./?	11,9	kA	0,455	kA.	kA.	0,102	kp/cm²				460	425	350	310	310	310				0,102				46,92
Giltwald	1961	Gi3	Eb.BW.4-2	Douglasie	BW	-1	klein	Rot./Spa.	15		0,55	kA.	kA.	0,102	kp/cm²				570	470	370	370	370				0,102					
Giltwald	1961	Gi3	Eb.BW.4-1	Douglasie	BW	-1	klein	Rot./Spa.	15		0,45	kA.	kA.	0,102	kp/cm²				460	430	375	320	305	205				0,102				46,92
Giltwald	1961	Gi3	Eb.BW.2-2	Kiefer	BW	-1	klein	Rot./Spa.	15		0,55	kA.	kA.	0,102	kp/cm²				595	480	375	365	365				0,102					
Giltwald	1961	Gi3	Eb.BW.2-1	Kiefer	BW	-1	klein	Rot./Spa.	15		0,45	kA.	kA.	0,102	kp/cm²			555	510	470	390	310	305	305				0,102				52,02
Giltwald	1961	Gi3	Eb.BW.3-2	Fichte	BW	-1	klein	Rot./Spa.	15		0,475	kA.	kA.	0,102	kp/cm²					480	370	365	365				0,102					
Giltwald	1961	Gi3	Eb.BW.3-1	Fichte	BW	-1	klein	Rot./Spa.	15		0,4	kA.	kA.	0,102	kp/cm²				495	460	385	310	305	305				0,102				50,49
Kollmann	1941	kol18	Kol41.BW.1-2	Esche	BW	-1	Klein	Rot./Spa.	10,6	8,1	0,58			0,102	kp/cm²		415	370	332	270	270	270	270				0,102				42,33	37,74
Kollmann	1941	kol16	Kol41.BW.1-2	Esche	BW	-1	Klein	Rot./Spa.	10,6	8,1	0,58			0,102	kp/cm²			415	370	332	270	270	270				0,102				42,33	37,74
Götze	1964	Göt2	keine	Pappel	BW	-1	klein	Rot.	12		0,378		kA.	0,102	kp/cm²				385	360	305	250	230	190	178		0,102				39,27	
Eberswalde	1964	In1	Eb.BW.6-4	Pappel	BW	-1	klein	Rot./Spa.	kA.		0,41	kA.	600	0,102	61,2	kp/cm²		500	440	410	390	320	260	200	200		0,102			51	44,88	41,82
Eberswalde	1964	In1	Eb.BW.6-3	Linde	BW	-1	klein	Rot./Spa.	kA.		0,48	kA.	720	0,102	73,44	kp/cm²		720	620	570	520	420	330	270	270		0,102			73,44	63,24	58,14
Eberswalde	1964	In1	Eb.BW.6-2	Buche	BW	-1	klein	Rot./Spa.	kA.		0,68	kA.	1250	0,102	127,5	kp/cm²		920	800	795	690	580	470	420	420		0,102			83,84	81,6	81,09
Eberswalde	1964	In1	Eb.BW.6-1	Robinie	BW	-1	klein	Rot./Spa.	kA.		0,72	kA.	1360	0,102	138,72	kp/cm²		1060	910	840	770	640	500	445	445		0,102			108,1	92,82	85,68
Moore	1927	Mo2	Mo.BW.1-2	Eiche	BW	-1	klein	Rot./kA.	na6		kA.	48	10,8	8,9	73,14	1000 psi			4,9	4,3	4	3,3					6,9			33,81	29,67	
Moore	1927	Mo2	Mo.BW.1-4	Douglas-fir	BW	-1	klein	Rot./kA.	23,8		kA.	48	12,8	6,9	88,32	1000 psi				5	4,3	3,9					6,9				34,5	
Moore	1927	Mo2	Mo.BW.1-1	Fichte	BW	-1	klein	Rot./kA.	13,8		kA.	48	12,1	6,9	83,49	1000 psi			5	4,8	4,6	3,8					6,9			34,5	33,12	
Moore	1927	Mo2	Mo.BW.1-3	Douglas-fir	BW	-1	klein	Rot./kA.	14,3		kA.	48	15	6,9	103,5	1000 psi				6,5	5,7	4,3					6,9				44,85	
Ibuki	1963	Ib1	Ib.BW.2-1,2	Japan cypress	BW	-1	klein	Fla./kA.	13		kA	kA	927	0,102	94,554	kg/cm²					262	210	197	166				0,102				
Eberswalde	1964	In1	Tabelle	Douglasie	BW	-1	klein	Rot./Spa.	kA.		0,47	kA.	790	0,102	80,58	kp/cm²							255				0,102					
Eberswalde	1964	In1	Tabelle	Kiefer	BW	-1	klein	Rot./Spa.	kA.		0,49	kA.	900	0,102	91,8	kp/cm²							260				0,102					
Eberswalde	1964	In1	Tabelle	Lärche	BW	-1	klein	Rot./Spa.	kA.		0,55	kA.	990	0,102	100,98	kp/cm²							320				0,102					
Eberswalde	1964	In1	Tabelle	Buche	BW	-1	klein	Rot./Spa.	kA.		0,62	kA.	1200	0,102	122,4	kp/cm²							330				0,102					
Eberswalde	1964	In1	Tabelle	Eiche	BW	-1	klein	Rot./Spa.	kA.		0,65	kA.	1100	0,102	112,2	kp/cm²							365				0,102					
Eberswalde	1964	In1	Tabelle	Fichte	BW	-1	klein	Rot./Spa.	kA.		0,43	kA.	780	0,102	79,56	kp/cm²							240				0,102					
Göhre	1961	Wa1	Tabelle	Douglasie	BW	-1	klein	Rot./kA.	12		0,55	kA.	1140	0,102	116,28	kp/cm²							370				0,102					
Göhre	1961	Wa1	Tabelle	Roteiche	BW	-1	klein	Rot./kA.	12		0,6	kA.	1175	0,102	118,85	kp/cm²							310				0,102					
Göhre	1961	Wa1	Tabelle	Roteiche	BW	-1	klein	Rot./kA.	12		0,67	kA.	1325	0,102	135,15	kp/cm²							380				0,102					
Kraemer	1933	Kra5	Tabelle	Kiefer	BW	-1	klein	Rot./Spa.	kA.		0,5	kA.	900	0,102	91,8	kg/cm²							300				0,102					
Kraemer	1933	Kra5	Tabelle	Birke	BW	-1	klein	Rot./kA.	kA.		0,87	kA.	1400	0,102	142,8	kp/cm²							350				0,102					
Schlyter	1931	Sc5	Sch.BW.1-1	Kiefer	BW	-1	klein	Fla./kA.	11		0,44	5	890	0,102	89,76	kg/cm²							195				0,102					
Schlyter	1931	Sc5	Sch.BW.3+4	Fichte	BW	-1	klein	Fla./kA.	11		0,4	5	780	0,102	78,58	kg/cm²							195				0,102					
Schlyter	1931	Sc5	Sch.BW.6-1	Fichte	BW	-1	klein	Fla./kA.	11		0,4	5	780	0,102	78,58	kg/cm²							185				0,102					

200

Anlage 5.2.: Schichthölzer unter Blegewechselbeanspruchung																																			
Abkürzungen:		Rot.= Rotationsbiegung										Spa.=Prüfung mit konstanten Spannungen																							
		Fla.= Flachbiegung										Verl.= Prüfung mit konstanten Verformungen																							
		kA.=keine Angabe																																	
		?=unklar																																	
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34		
BIEGEWECHSEL																	Spannungen in verschiedenen Einheiten										Spannungen in (N/mm²)								
Autor	Jahr	Litr.	Nummer	Holzart	Beanspr.	kappa	Probengr.	Versuchs.	Feuchte [%]	Feuchte nachher	Dichte [kg/dm³]	Frequ. [Hz]	stat.Fest. [versch.]	Umrechn. []	stat.Fest. [N/mm²]	Einheit	10	100	1000	3162	10000	1+05	1+06	2+06	1+07	1+08	2+08	Umrechn.	10	100	1000	3162	10000		
																	1	2	3	3,5	4	5	6	6,3	7	8	8,3	1	2	3	3,5	4			
Isari	1991	Ts1	Ts.BS.4-5	Khaya	BW	-1	klein	Fla./Spa.	11		0,572	15	95,58	1	95,58	N/mm²	keine direkten Angaben										77,13	69,1	65,1	61,1					
Wegelius	1942	Y12	Tabelle	Birke	BW	?	kA.	kA.	kA.	kA.	0,9	kA.	2100	0,102	214,2	kg/cm²										390								0,102	
Wegelius	1942	Y12	Tabelle	Birke	BW	?	kA.	kA.	kA.	kA.	1,2	kA.	2560	0,102	261,12	kg/cm²										600								0,102	
Ibuki	1963	Ib1	Ib.BW.5-2	Japan Cypres	BW	-1	klein	Fla./kA.	8,9		kA.	kA.	1266	0,102	129,13	kg/cm²							325	260	244	205							0,102		
Ibuki	1963	Ib1	Ib.BW.5-1	Japan Cypres	BW	-1	klein	Fla./kA.	10,3		kA.	kA.	1157	0,102	118,01	kg/cm²					400	340	280	262	220									40,8	
Küch	1942	Kü5	Kü.BW.3	Buche	BW	-1	klein	Fla./Verf.		6,3	0,91	kA.	1920	0,102	195,84	kg/cm²								470	440	390								0,102	
Küch	1942	Kü5	Kü.BW.4	Buche	BW	-1	klein	Fla./Verf.		6,8	1,4	kA.	2370	0,102	241,74	kg/cm²								630	580	530								0,102	
Maku	1963	Mak2	Ma.BW.1-2	Hinoki	BW	-1	klein	Rot./kA.	10,1		0,49	8,3/50	950	0,102	96,9	kg/cm²				470	440	385	300	276	220									47,94	44,88
Küch	1937	Kü6	Tabelle	Buche	BW	-1	klein	Fla./Verf.	kA.		kA.	kA.	1750	0,102	178,5	kg/cm²										411								0,102	
Maku	1963	Mak2	Ma.BW.1-1	Hinoki	BW	-1	klein	Rot./kA.	14,3		0,43	8,3/50	914	0,102	93,228	kg/cm²				430	400	340	290	262	220									43,86	40,8
Dietz	1944	Di2	Di.BW.1	Birke	BW	-1	klein	Fla./kA.	kA.		kA.	ca. 20	25,5	6,9	175,95	1000 psi																			6,9
Dietz	1944	Di2	Di.BW.2	Birke	BW	-1	klein	Fla./kA.	kA.		kA.	ca. 20	23,4	6,9	181,46	1000 psi																			6,9
Ibuki	1963	Ib1	Ib.BW.5-3	Birke/Japan	BW	-1	klein	Fla./kA.	10,2		kA.	kA.	1007	0,102	102,71	kg/cm²					310	280	271	250										0,102	
Küch	1942	Kü5	Kü.BW.2-1	Buche	BW	-1	klein	Fla./Verf.		6,5	1,3	kA.	2540	0,102	259,08	kg/cm²								670	760	680								0,102	
Füller	1943	Fu1	Fu.BW.1-3	Ahom	BW	-1	sehr klein	Rot./Spa.	3,5		1,23	57,5/1	41	6,9	282,9	1000 psi					14,5	13,1	12,88	11,7	10,2	9,75	8,9								
Füller	1943	Fu1	Fu.BW.2-4	Ahom	BW	-1	sehr klein	Rot./Spa.	3,3		0,68	57,5	19	6,9	131,1	1000 psi						7,75	7	6,55	5,5	4	4	6,9							
Füller	1843	Fu1	Fu.BW.4-3	Ahom	BW	-1	sehr klein	Rot./Spa.	3,1		1,31	57,5/1	41	6,9	282,9	1000 psi								13,5	13,05	12	10,5	10	6,9						
Küch	1942	Kü5	Kü.BW.1	Buche	BW	-1	klein	Fla./Verf.	8,5	7,3	0,81	2,0/20	1508	0,102	153,82	kg/cm²	1300	1090	900	810	730	610	520	502	450		0,102	132,6	111,2	81,8	82,62	74,46			

														51		52		53		54	
Spannungen im Verhältnis zur Kurzzeitfestigkeit																					
1+05	1+06	2+06	1+07	1+08	2+08	10	100	1000	10000	1+05	1+06	2+06	1+07	1+08	2+08	ANMERKUNGEN					
5	8	6,3	7	8	8,3	1	2	3	4	5	6	8,3	7	8	8,3						
53	45	42,63	36,99				0,807	0,723	0,639	0,555	0,471	0,446	0,387			statischer Versuch unsicher					
		39,78										0,196				keine Angabe der Lastspielzahl, Filmlein					
		61,2										0,234				keine Angabe der Lastspielzahl, Phenolharz					
33,15	26,52	24,89	20,91							0,257	0,205	0,193	0,162			Phenol-Resin					
34,68	26,56	26,72	22,44						0,348	0,284	0,242	0,226	0,19			Urea-Resin					
	47,94	44,88	39,78								0,245	0,228	0,203			SCH-T-BU-13					
	64,26	59,16	54,06								0,268	0,245	0,224			PSCH-T-BU-50/10					
37,23	30,6	28,15	22,44						0,463	0,384	0,316	0,291	0,232			Phenol resin verleimt					
		41,92											0,235			TV Bu 14, Mindestwerte					
34,68	26,56	26,72	22,44						0,438	0,372	0,306	0,287	0,241			Urea resin verleimt					
							0,46	0,41		0,34	0,28	0,25									
							0,47	0,4		0,33	0,28	0,24									
31,62	26,56	27,64	25,5							0,308	0,279	0,269	0,248								
	68,74	77,52	69,36								0,343	0,299	0,268			PSCH-T-BU-75					
100,1	90,39	87,49	80,73	70,38	67,28					0,354	0,32	0,309	0,285	0,249	0,238	Mittelwert aus 2 Serien					
53,48	48,3	45,2	37,95	27,6	27,6					0,408	0,368	0,345	0,289	0,211	0,211	Mittelwert aus 2 Serien					
	93,15	90,05	82,8	72,45	69						0,329	0,318	0,293	0,258	0,244	SCH-T-BU-20					
62,22	53,04	51,2	45,8			0,862	0,723	0,597	0,484	0,405	0,345	0,333	0,298								
											0,345	0,293	0,266	0,244							
											0,0493	0,0467	0,048	0,0425							
											0,1426	0,1594	0,1806	0,1743							
											0,2	0,2	0,2	0,2		V1=0,2 angenommen					
											0,2475	0,2577	0,2718	0,2676							
											0,3049	0,2516	0,2191	0,2033							

205

Anlage 5.3.: Sperr- und Sternhölzer unter Biegewechselbeanspruchung																																			
Abkürzungen		Rot. = Rotationsbiegung				Spa. = Prüfung mit konstanten Spannungen																													
		Fla. = Flachbiegung				Verf. = Prüfung mit konstanten Verformungen																													
		kA. = keine Angabe																																	
		N = Lastspielzahl																																	
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32				
BIEGEWECHSEL																	Spannungen in verschiedenen Einheiten																		
Autor	Jahr	Litr.	Nummer	Holzart	Beanspr.	keppa	Probengr.	Versuchst.	Feuchte	Feuchte	Dichte	Frequ.	stat. Fest.	Umrechn.	stat. Fest.	Einheit	10	100	1000	3182	10000	1E+05	1E+06	2E+06	1E+07	1E+08	2E+08	Umrechn.	10	100	1000				
						[-]			[%]	necher	[kg/dm ³]	[Hz]	[versch.]	[-]	[N/mm ²]		1	2	3	3,5	4	5	6	6,3	7	8	8,3	1	2	3					
Küch	1942	Kü5	Kü.BW.2.2	Buche	BW	-1	klein	Fla./Verf.		6,5	1,24	kA.	1540	0,102	157,08	kg/cm ²							460	410	380						0,102				
Küch	1942	Kü5	Kü.BW.2.3	Buche	BW	-1	klein	Fla./Verf.		6,1	1,13	kA.	1230	0,102	125,46	kg/cm ²							380	340	310						0,102				
Kraemer	1933	Kra5	Tabelle	Birke	BW	-1	klein	Fla./Spa.	kA.		0,8	kA.	800	0,102	81,6	kg/cm ²								300								0,102			
Kraemer	1934	Kra1	Tabelle	Birke	BW	-1	klein	Fla./Spa.	kA.		kA.	kA.				kg/cm ²								250								0,102			
Kraemer	1934	Kra1	Tabelle	Birke	BW	-1	klein	Fla./Spa.	kA.		kA.	kA.				kg/cm ²								300								0,102			
Kraemer	1934	Kra1	Tabelle	Birke	BW	-1	klein	Fla./Spa.	kA.		kA.	kA.				kg/cm ²								198								0,102			
Kraemer	1934	Kra1	Tabelle	Birke	BW	-1	klein	Fla./Spa.	kA.		kA.	kA.				kg/cm ²								85								0,102			
Dietz	1944	Di2	Di.BW.3	Birke	BW	-1	klein	Fla./kA.	kA.		kA.	ca. 20	20,85	6,9	142,485	1000psi																	6,9		
Dietz	1944	Di2	Di.BW.4	Birke	BW	-1	klein	Fla./kA.	kA.		kA.	ca. 20	17,4	6,9	120,06	1000psi																	6,9		
Thum	1938	Th2	Th.BW.1-1	verschied	BW	-1	klein			7,6	0,51		580	0,102	59,16	kg/cm ²								190								0,102			
Thum	1938	Th2	Th.BW.1-2	verschied	BW	-1	klein			7,55	0,47		575	0,102	58,85	kg/cm ²								190								0,102			
Gillwald	1961	Gil3	Gi.BW.4	Buche	BW	-1	klein	Fla./Verf.	11,9	0,7	kA.	kA.				kg/cm ²						740	360	300	300						0,102				
Gillwald	1961	Gil3	Gi.BW.5	Buche	BW	-1	klein	Fla./Verf.	11,9	0,7	kA.	kA.				kg/cm ²				1040	920	675	420	340	340						0,102				
Gillwald	1961	Gil3	Gi.BW.6	Buche	BW	-1	klein	Fla./Verf.	11,9	0,7	kA.	kA.				kg/cm ²						1080	580	370	370						0,102				
Gillwald	1961	Gil3	Gi.BW.7	Buche	BW	-1	klein	Fla./Verf.	11,9	0,7	kA.	kA.				kg/cm ²						900	600	510	370						0,102				
Gillwald	1961	Gil3	Gi.BW.8	Buche	BW	-1	klein	Fla./Verf.	11,9	0,7	kA.	kA.				kg/cm ²						870	660	560	400						0,102				
Gillwald	1961	Gil3	Gi.BW.1	Kiefer	BW	-1	klein	Fla./Verf.	11,9	0,46	kA.	kA.				kg/cm ²				410	373	335	265	200	200	200					0,102				
Gillwald	1961	Gil3	Gi.BW.2	Kiefer	BW	-1	klein	Fla./Verf.	11,9	0,46	kA.	kA.				kg/cm ²				415	375	335	260	217	217	217					0,102				

33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Spannungen in (N/mm ²)										Spannungen im Verhältnis zur Kurzzeitfestigkeit										ANMERKUNGEN	
3162	10000	1E+05	1E+06	2E+06	1E+07	1E+08	2E+08	10	100	1000	10000	1E+05	1E+06	2E+06	1E+07	1E+08	2E+08				
3,5	4	5	6	6,3	7	8	8,3	1	2	3	4	5	6	6,3	7	8	8,3				
			46,82	41,82	38,76								0,299	0,266	0,247			Spertholz:	PSCH-T-BU-75		
			38,76	34,68	31,62								0,308	0,276	0,252			Spertholz:	PSN-T-BU-75		
				30,6										0,375				Spertholz; keine genaue Angabe der Lastspielzahl			
				25,5										0,26				Kunstharzfilm; Spertholz; kA. der Lastspielzahl bezogen auf die Zugfestigkeit			
				30,6										0,25				Kaseinleim; Spertholz; kA. der Lastspielzahl bezogen auf die Zugfestigkeit			
				20,2										0,52				Kunstharzfilm; Spertholz; kA. von N bez. auf die Zugfestig.; senkr. zur Decklamier			
				8,67										0,26				Kaseinleim; Spertholz; kA. von N, bez. auf die Zugfestig.; senkr. zum Decklamier.			
									0,52	0,45	0,37	0,3	0,275					Phenolleim			
									0,5	0,42	0,34	0,27	0,25					Urea-Leim			
			19,38											0,328							
			19,38											0,33							
		75,48	36,72	30,6	30,6																keine statische Biegefestigkeit angegeben, 3-fach verleimt
106,1	83,84	68,85	42,84	34,68	34,68																keine statische Biegefestigkeit angegeben, 3-fach verleimt
		110,2	59,16	37,74	37,74																keine statische Biegefestigkeit angegeben, 5-fach verleimt
		91,8	61,2	52,02	37,74																keine statische Biegefestigkeit angegeben, 5-fach verleimt
		96,94	67,32	57,12	40,8																keine statische Biegefestigkeit angegeben, 7-fach verleimt
38,05	34,17	27,03	20,4	20,4	20,4																keine statische Biegefestigkeit angegeben, 3-fach verleimt
38,25	34,17	26,52	22,13	22,13	22,13																keine statische Biegefestigkeit angegeben, 5-fach verleimt

207

Tafel 5 Eigenschaften der untersuchten Hölzer bei radial wirkender Beanspruchung
(Länge = radial, Höhe = longitudinal, Breite = tangential)

Holz	Rohwichte	Holzfeuchte	statische Biegefestigkeit	Wechsel- biegefestigkeit	Verhältniszahlen		
	r_0 p/cm ³	u p/p	σ_{bB} kp/cm ²	σ_{bW} kp/cm ²	$\frac{\sigma_{bW}}{\sigma_{bB}}$	$\frac{\sigma_{bB}}{r_0 \cdot 100}$ km	$\frac{\sigma_{bW}}{r_0 \cdot 100}$ km
Buche	0,82	0,119	288	108	0,375	3,51	1,32
	0,78	0,121	283	105	0,371	3,63	1,35
Weißbuche	0,76	0,118	216	77	0,357	2,84	1,01
Birke	0,68	0,124	189	71	0,376	2,78	1,04
Robinie	0,68	0,131	186	74	0,398	2,74	1,09
Roteiche	0,69	0,118	180	71	0,394	2,61	1,03
o,6	0,66	0,117	165	64	0,388	2,50	0,96
Esche	0,55	0,122	165	61	0,370	3,00	1,11
Traubeneiche	0,53	0,131	125	47	0,376	2,36	0,89
Erle	0,48	0,113	115	44	0,379	2,42	0,92
Pappel	0,46	0,116	129	50	0,387	2,81	1,09
Linde	0,46	0,109	107	40	0,374	2,33	0,87
Kiefer	0,58	0,132	126	48	0,381	2,17	0,83
Douglasie	0,57	0,132	103	40	0,388	1,81	0,70
	0,53	0,134	96	37,5	0,391	1,81	0,71

Anlage G.1.

208

ans / W 1 /

Average G.2.

Tafel 6 Eigenschaften der untersuchten Hölzer bei tangential wirkender Beanspruchung
(Länge = tangential, Höhe = longitudinal, Breite = radial)

Holz	Rohwichte	Holzfeuchte	statische Biegefe- stigkeit	Wechsel- biegefe- stigkeit	Verhältniszahlen		
	r_0 p/cm^3	u p/p	σ_{bB} kp/cm^2	σ_{bW} kp/cm^3	$\frac{\sigma_{bW}}{\sigma_{bB}}$	$\frac{\sigma_{bB}}{r_0 \cdot 100}$ km	$\frac{\sigma_{bW}}{r_0 \cdot 100}$ km
Robinie	0,79	0,119	169	53	0,314	2,14	0,671
Weißbuche	0,72	0,123	165	48	0,291	2,29	0,668
Buche	0,75	0,124	146	43	0,294	1,95	0,573
0,63	0,63	0,117	105	31	0,296	1,68	0,492
	0,58	0,122	95	27	0,284	1,64	0,476
Roteiche	0,65	0,118	113	36	0,318	1,74	0,554
	0,62	0,119	106	29	0,274	1,71	0,468
Kiefer	0,48	0,129	62	19	0,307	1,29	0,396
Fichte	0,46	0,121	50	14	0,280	1,09	0,304

209

aus / W 4 1 /

Anlage 7:

Verbindungs- mittel	Versuch Nr.	Be- lastungs- art	ZulP nach DIN 1052 [Kp]	Ober- last P_o [Kp]	Unter- last P_u [Kp]	Frequenz [Lsp/min]	Aufgebrachte Lastspielzahl	statische Bruchlast P_{Br} [Kp]	Sicherheits- v	Bem.
Nägel 60/130	NS 1	statisch	2690	-	-	-	-	12 400	4,61	Kein Dauerbruch
	NSch 1	schwellend	2690	2600	390	150	1.522.000	12 900 ¹⁾	4,80	Dauerbruch der Nägel
	NW 1	wechselsch	2020	+2000	-2000	150	14.000	-	-	
	NW 2	wechselsch	2920	+2000	-2000	150	270.000	-	-	
	NW 3	wechselsch	2920	+1500	-1500	150	2.327.000	9800 ¹⁾ ; 11200 ¹⁾	3,36; 3,84	Kein Dauerbruch
Stabd- dübel φ 12	SS 1	statisch	2940	-	-	-	-	9 510	5,24	Kein Dauer- bruch
	SSch 1	schwellend	2940	3000	450	150 (300)	1.273.200	11 700 ¹⁾	5,78	
	SSch 2	schwellend	2940	3000	450	150	100.000	8 400 ¹⁾	2,86	
	SSch 3	schwellend	2940	3000	450	150	702.000	9 810 ¹⁾	3,34	
GAN-G-NAIL Platten GN 14 114/133	GNS 1	statisch	3200	-	-	-	-	8 290	2,59	Dauerbruch der Nägel
	GNSch 1	schwellend	3200	3200	480	150	40.800	-	-	
	GNSch 2	schwellend	3200	3200	480	150	110.450	-	-	
	GNSch 3	schwellend	3200	3200	480	150	51.660	-	-	
Appel- dübel φ 80	ADSch 1	schwellend	5600	4000	600	150	1.306.000	17 900 ¹⁾	3,20	Kein Dauer- bruch
	ADSch 2	schwellend	5600	5600	600	150	1.420.000	15 800 ¹⁾	2,82	
Appel- dübel φ 80	ADW 1	wechselsch	2800	+2800	-2800 (+3300)	150	60.000	6400 ¹⁾ ; (6140) ¹⁾	2,29; (1,48)	innere Holzteile abgesichert kein Dauer- bruch
	ADW 2	wechselsch	2800	+1400	-1400	150	2.078.000	6200 ¹⁾ ; 8400 ¹⁾	2,22; 3,00	
	ADW 3	wechselsch	2800	+1400	-1400	150	2.580.000	6900 ¹⁾ ; 7100 ¹⁾	2,47; 2,54	

1) statischer Versuch wurde nach dem Schwingversuch durchgeführt

1) innere Holzteile fehlten beim Bruchversuch

Tabelle 2: Übersicht über die untersuchten Versuchskörper und Versuchsergebnisse

8.2. Ermittlung der k_{fat} -Werte aus den Ergebnissen

8.2.1. Vorbemerkungen

Der Faktor k_{fat} ist das Verhältnis des Fraktilwertes für Beanspruchungen mit einer bestimmten Lastspielzahl zum Fraktilwert der statischen Festigkeit. In der Regel werden 5%-Fraktile verwendet:

$$k_{fat} = \frac{f_{k,N}}{f_k} \quad \text{bzw.} \quad k_{fat} = \frac{R_{k,N}}{R_k} \quad (2 \text{ a, b})$$

f_k bzw.: R_k = charakteristische Festigkeit (i.d.R. 5%-Fraktile) aus dem statischen Kurzzeitversuch

$f_{k,N}$ bzw.: $R_{k,N}$ = charakteristische Festigkeit (i.d.R. 5%-Fraktile) bei N Lastspielen

Zur zusammenhängenden Auswertung wird das nachfolgende Schema gewählt. Es bleibt weiteren Versuchsstellern überlassen, ihre Ergebnisse so auszuwerten, daß damit k_{fat} -Werte gebildet werden können.

Die Ermittlung der k_{fat} -Werte beruht auf einfachen sicherheitstheoretischen Grundlagen. Die Ergebnisse liegen mit den allen hier und in 6.2. getroffenen Annahmen auf der sicheren Seite.

Annahmen:

1. Die statischen Kurzzeitfestigkeiten sind normalverteilt.
2. Die Abminderungswerte zur Ermittlung der Zeitfestigkeiten sind ebenfalls normalverteilt.
3. Die Normalverteilung der statischen Kurzzeitfestigkeit ist unabhängig von der Normalverteilung der Abminderungswerte. Dies ist in der Realität nicht der Fall, weil durch die Verhältnisbildung der Zeitfestigkeitswerte zu den statischen Kurzzeitfestigkeiten die Streuungen der statischen Werte in die Streuungen der Abminderungswerte eingehen. Sie werden in einem gewissen Maß doppelt berücksichtigt.
4. Die Größe der Streuungen der statischen Kurzzeitfestigkeiten ist so groß wie die Streuungen der Zeitfestigkeiten, d.h. sie haben den gleichen Variationskoeffizienten. Dies ist eine günstige Annahme, die nach Meinung der Verfasser durch Folgendes ausreichend kompensiert wird:
 - Die Streuungen der statischen Kurzzeitfestigkeiten werden in einem gewissen Maß doppelt berücksichtigt (s.o.)
 - Die Annahme der linearen Interaktion zwischen den Einflüssen der Zeitstandfestigkeit und der Zeitfestigkeit ist ungünstig (vgl. 6.2.).
 - Die Zeitdauer der Versuche geht nicht mit ein (vgl. 6.2.).
 - Die Streuungen der Abminderungswerte aus den verschiedenen Wöhlerlinien werden berücksichtigt.
 - Im Holzbau treten allgemein größere Streuungen auf, so daß zusätzliche Streuungen durch die Prüfung mit oft wiederholten Beanspruchungen relativ geringer werden.
5. Zur Ermittlung wird ein linearer Verlauf der Abminderungswerte zwischen $0 \leq \kappa \leq 1$ und $-1 \leq \kappa \leq 0$ verwendet (vgl. 3.2.2.6.).

6. Die Abminderungswerte sind unabhängig von
- der Prüffrequenz (vgl. 3.2.2.1.)
 - der Rohdichte (vgl. 3.2.2.2.)
 - der Holzart (vgl. 3.2.2.3.)
 - den Güteklassen (vgl. 3.2.2.4.)
 - der Feuchtigkeit, sofern trockene Proben verwendet werden. (vgl. 3.2.2.5.)
 - der Probengröße (vgl. 3.2.2.7.)
 - der Versuchsart
 - der Länge des Probekörpers, in der die maximale Beanspruchung vorhanden ist.

(Anmerkung: Durch die Berücksichtigung der Streuungen der Abminderungswerte werden diese Faktoren, sofern sie sich auf die Abminderungswerte auswirken, berücksichtigt, weil diese Faktoren bei der Erstellung der einzelnen Abminderungswerte von den Versuchsstellern konstant oder in engen Grenzen gehalten wurden.)

7. Die Prüfungen der statischen Kurzzeitfestigkeiten liefern vergleichbare Ergebnisse.
8. Die Variationskoeffizienten verschiedener statischer Kurzzeitfestigkeiten werden folgendermaßen angenommen:
- Biegefestigkeit bei Schichthölzern mit $V_1=0,2$
 - Schubfestigkeit von Hölzern mit $V_1=0,3$
 - Schubfestigkeit von Leimfugen mit $V_1=0,1$.

Vorgehensweise:

Die Übernahme der Ergebnisse aus den einzelnen Berichten wird in den Vorbemerkungen zu 3.1. näher beschrieben. Bei der Ermittlung der Abminderungswerte für oft wiederholte Beanspruchungen wird von den Mittelwerten der Wöhlerdiagramme ausgegangen.

Aus den Tabellen in den Anlagen 1-5 werden alle Ergebnisse verwendet und zur Mittelwertbildung herangezogen, auch wenn aus den Versuchsserien nicht immer für alle Lastspielzahlen Ergebnisse vorliegen. Damit können alle Versuchsergebnisse verwendet werden. Dies führt aber zu einer Verzerrung der Ergebnisse, d.h. daß z.B. durch die Ergebnisse eines Autors die Mittelwerte für eine bestimmte Lastspielzahl im Vergleich zu einer anderen "gedrückt" oder "gehoben" werden.

Wenn Gründe vorliegen, werden die Ergebnisse von einzelnen Autoren nicht herangezogen. Dies wird im Einzelfall näher erläutert.

Die k_{fat} -Werte werden für die Lastspielzahlen 10^5 , 10^6 , $2 \cdot 10^6$ und 10^7 gebildet. (Anmerkung: Es ist aber sinnvoll, die k_{fat} -Werte für die Lastspielzahl von 10^7 zu verwenden (vgl. 3.2.2.2).)

Definitionen:

- \bar{x}_1 := Mittelwert der statischen Kurzzeitfestigkeit
- V_1 := Variationskoeffizient der statischen Kurzzeitfestigkeiten
- \bar{x}_2 := Mittelwert der Abminderungswerte aus den Wöhlerversuchen
- V_2 := Variationskoeffizient der Abminderungswerte aus den Wöhlerversuchen
- $\bar{x}_{1,2}$:= Mittelwert der Zeitfestigkeiten
- $V_{1,2}$:= Variationskoeffizient der Zeitfestigkeiten

Die Verbindung zwischen den streuenden Größen stellt sich folgendermaßen dar:

$$\text{Mittelwerte:} \quad \overline{x_{1,2}} = \overline{x_1} * \overline{x_2} \quad (53)$$

$$\text{Variationskoeffizienten:} \quad V_{1,2}^2 = V_1^2 + V_2^2 \quad (54)$$

(nach Squires /SqI/ und Lichten /LicI/)

Damit ergibt sich:

$$f_k = \overline{x_1} * (1 - 1,645 * V_1) \quad (55a)$$

$$f_{k,N} = \overline{x_{1,2}} * (1 - 1,645 * V_{1,2}) \quad (55b)$$

$$k_{fat} = \frac{\overline{x_{1,2}} * (1 - 1,645 * V_{1,2})}{\overline{x_1} * (1 - 1,645 * V_1)} = \frac{\overline{x_2} * (1 - 1,645 * V_{1,2})}{(1 - 1,645 * V_1)} \quad (56)$$

Anmerkung:

Es besteht die Möglichkeit, entweder $f_{k,N}$ oder V_2 bei genügender Probenzahl direkt aus den Ergebnissen von Dauerfestigkeitsversuchen zu bilden.

8.2.2. Beispiel für die Ermittlung von k_{fat}

Für das Beispiel wird die Biegewechselbeanspruchung bei Vollhölzern (vgl. 3.1.1.5.) gewählt. Der Mittelwert und der Variationskoeffizient für die statische Festigkeit werden hierfür von Glos /GI5/ (Tabelle 1a) übernommen:

$$\overline{x_1} = 37 \text{ N/mm}^2$$

$$V_1 = 0,27$$

Aus Anlage 5.1. in 8.1. werden die Werte für eine Lastspielzahl von $1 * 10^7$ entnommen:

$$\text{Mittelwert} \quad \overline{x_2} = 0,306$$

$$\text{Variationskoeffizient} \quad V_2 = 0,175$$

$$\overline{x_{1,2}} = \overline{x_1} * \overline{x_2} = 37 \text{ N/mm}^2 * 0,306 = 11,32 \text{ N/mm}^2 \quad (53)$$

$$V_{1,2} = \sqrt{0,27^2 + 0,175^2} = 0,322 \quad (54)$$

$$f_k = 37 \text{ N/mm}^2 * (1 - 1,645 * 0,27) = 20,6 \text{ N/mm}^2 \quad (55a)$$

$$f_{k,N} = 11,32 \text{ N/mm}^2 * (1 - 1,645 * 0,322) = 5,32 \text{ N/mm}^2 \quad (55b)$$

$$k_{fat} = \frac{f_{k,N}}{f_k} = \frac{5,32}{20,6} = 0,26 \quad (2)$$

$$\text{oder: } k_{fat} = \frac{\overline{x_2} * (1 - 1,645 * V_{1,2})}{(1 - 1,645 * V_1)} = \frac{0,306 * (1 - 1,645 * 0,322)}{(1 - 1,645 * 0,27)} = 0,26 \quad (56)$$

Dieser Wert ist etwas geringer als der Mittelwert der Abminderungen $\overline{x_2}$, weil durch die beiden Streuungen die Verteilungskurve "flacher" wird.

8.2.3. Zugschwellen (vgl. 3.1.1.1.)

Die Ergebnisse der vorliegenden Versuche sind in Anlage 1 dargestellt.

Für den Variationskoeffizient der statischen Kurzzeitfestigkeiten für Zug wird nach Glos /Gl5/ $V_1=0,3$ angesetzt.

Zur Mittelwertbildung werden die Versuche von Okuyama /Oku7/ und Gillwald /Gil1/, sowie die Versuche mit Keilzinken von Egner /Eg4/ sowie Bohannan und Kanvik /Bon1/ nicht herangezogen.

Damit ergeben sich folgende Mittelwerte und Variationskoeffizienten (V_2) für die in der Tabelle angegebenen κ -Werte:

Lastspielzahl N	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^7$
Mittelwerte:	0,71	0,63	0,60	0,54
Variationsk. (V_2)	0,08	0,05	0,05	0,03

Die Umrechnung auf $\kappa=0$ ergibt die folgenden Werte, die dann zur Ermittlung von k_{fat} herangezogen werden:

Lastspielzahl N	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^7$
Mittelwerte:	0,68	0,60	0,57	0,50
Variationsk. (V_2)	0,08	0,05	0,05	0,05
k_{fat}	0,66	0,59	0,56	0,50

Bei der nachfolgenden grafischen Darstellung wird ein linearer Verlauf von k_{fat} (κ) verwendet:

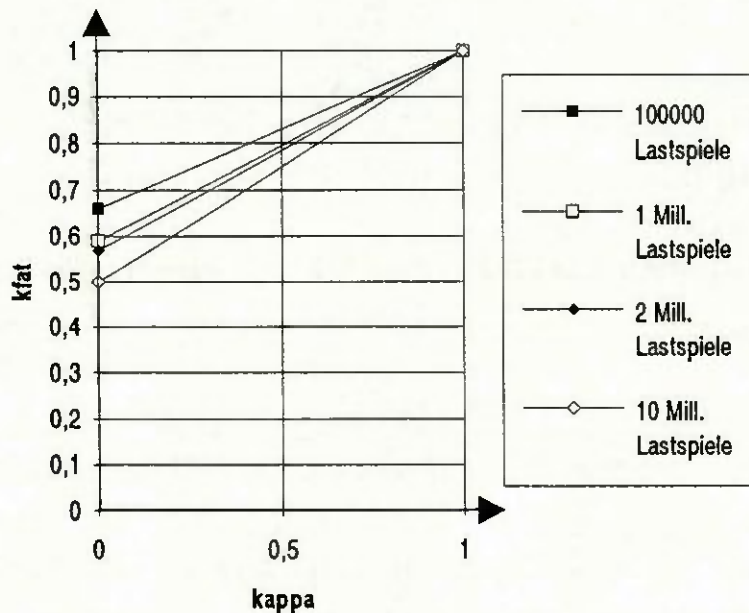


Bild 84: k_{fat} -Werte für Zugschwellbeanspruchungen

8.2.4. Druckschwellen (vgl. 3.1.1.2.)

Für das Druckschwellen lassen sich wenig Versuche finden, die zur k_{fat} -Wertermittlung herangezogen werden können. Deswegen dienen die hier gemachten Angaben zur Orientierung. Aus Bild 12 (vgl. 3.1.1.2.) kann man den k_{fat} -Wert für $N=2 \cdot 10^6$ mit $\geq 0,75$ entnehmen.

Unter Berücksichtigung des Zeitstandeinflusses, der das Holz in gleicher Weise wie die Druckschwellbeanspruchung schädigt, könnte der k_{fat} -Wert bis 1,0 reichen. (vgl. 3.1.1.2.)

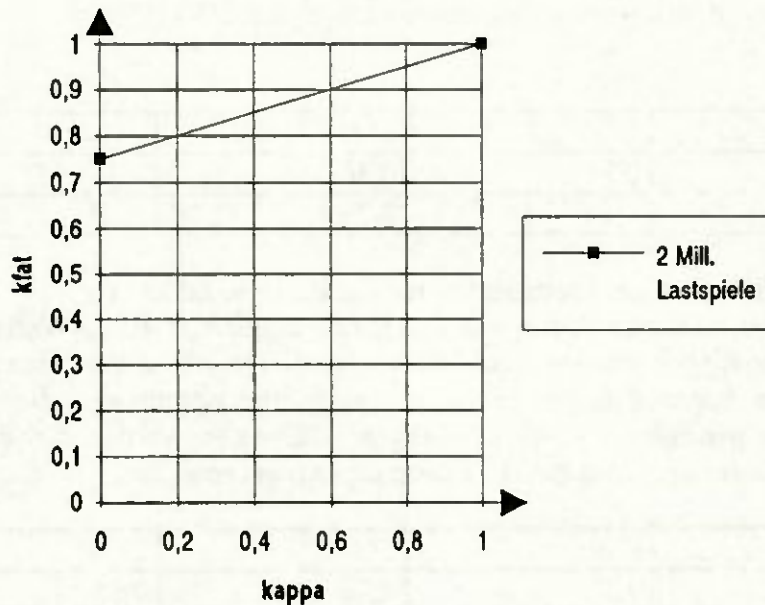


Bild 85: k_{fat} -Werte für Druckschwellbeanspruchungen

8.2.5. Zug-Druck-Wechsel (vgl. 3.1.1.3.)

Die Ergebnisse der vorliegenden Versuche sind in Anlage 2 dargestellt.

Die Ergebnisse werden bei den allen Versuchen auf die Druckfestigkeit bezogen. Für den Variationskoeffizient der statischen Kurzzeitfestigkeit für Druck wird nach Glos /G15/ $V_1=0,18$ angesetzt.

Zur Mittelwertbildung werden die Versuche aus Eberswalde /In1/, deren statische Kurzzeitfestigkeit durch Extrapolation ermittelt wurden, mitherangezogen.

Damit ergeben sich folgende Mittelwerte und Variationskoeffizienten (V_2) für die in der Tabelle angegebenen κ -Werte:

Lastspielzahl N	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^7$
Mittelwerte:	0,42	0,37	0,36	0,35
Variationsk. (V_2)	0,30	0,25	0,23	0,19

Durch das Ansetzen der großen Variationskoeffizienten für die Lastspielzahlen 10^5 , 10^6 und $2 \cdot 10^6$ ergeben sich mit dem gewählten Auswertungsschema geringfügig kleinere k_{fat} -Werte als für 10^7 Lastspiele, weil die Variationskoeffizienten die Abweichungen zwischen den einzelnen stark streuenden Wöhlerlinien berücksichtigen. Eine bestimmte Beanspruchung, die 10^7 Lastspiele erträgt, kann auch geringere Lastspiele ertragen. Deswegen werden für diese geringeren Lastspielzahlen auch der k_{fat} -Wert für 10^7 Lastspiele angegeben.

Lastspielzahl N	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^7$
Mittelwerte:	0,42	0,37	0,36	0,35
k_{fat}	0,28	0,28	0,28	0,28

Anmerkung:

Das gewählte Auswertungsschema liegt hier für die Berücksichtigung stark streuender Wöhlerlinien auf der sicheren Seite.

Bei den Versuchen zur Zug-Druck-Wechselfestigkeit wurde die oft wiederholte Beanspruchung auf die statische Druckfestigkeit bezogen. Der Mittelwert der statischen Druckfestigkeit ist aber höher als der Mittelwert der statischen Zugfestigkeit (vgl. /G15/). Deswegen wird vorgeschlagen, die Festigkeiten auf die Zugfestigkeit zu beziehen und die k_{fat} -Werte mit dem Verhältnis der Zugfestigkeit zur Druckfestigkeit umzurechnen. Dieses Verhältnis wird mit Werten von Glos /G15/ für europäisches Nadelholz zu

$$\frac{\bar{f}_t}{\bar{f}_c} = \frac{30 \text{ N/mm}^2}{32 \text{ N/mm}^2} = 0,94$$

berechnet. Danach wird der auf die Zugfestigkeit bezogene $k_{fat,t}$ -Wert errechnet, indem man den auf die Druckfestigkeit bezogenen k_{fat} -Wert mit diesem Faktor multipliziert:

$$k_{fat,t} = 0,28 \cdot 0,94 = 0,26$$

Für die reine Zug-Druck-Wechselbeanspruchung ($\kappa=-1$) wird vorgeschlagen, den $k_{fat,t}$ -Wert und den jeweils kleineren Wert der Zug- und Druckspannung zu verwenden.

Die zulässigen Zugspannungen nach DIN 1052 Teil 2 sind für Vollholz und Brettschichtholz der Güteklassen I und II gleich groß oder geringfügig kleiner als die entsprechenden zulässigen Zugspannungen. In dem europäischen Normenentwurf prEN 338 /N17/ werden nur für Laubhölzer höhere charakteristische Zugfestigkeiten im Vergleich zu den Druckfestigkeiten angegeben. Somit ist der Bezug auf die Zugfestigkeit als den kleineren Wert in der Regel maßgebend.

Bei der nachfolgenden grafischen Darstellung, die die Zug-Druck-Wechselversuche mit den Zugschwellversuchen verbindet, wird ein linearer Verlauf von $k_{fat}(\kappa)$ verwendet.

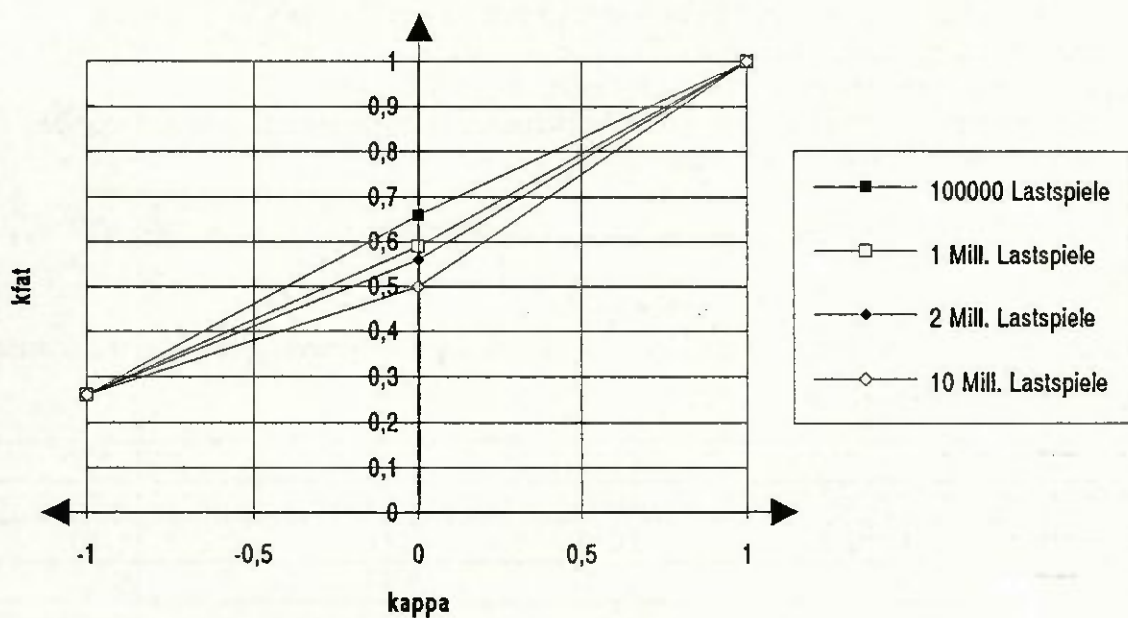


Bild 86: k_{fat} -Werte für Zug-Druck-Wechselbeanspruchung und Zugschwellbeanspruchung

8.2.6. Biegeschwellen (vgl. 3.1.1.4.)

Die Versuchsergebnisse werden für die Auswertung nach Vollhölzern und Schichthölzern unterteilt.

1) Vollhölzer

Die Ergebnisse der hier herangezogenen Versuche sind in Anlage 4.1. in Tabellenform dargestellt.

Das Verwenden aller Ergebnisse führt wegen der großen Streuungen, die in die Rechnungen eingehen, zu unrealistisch niedrigen Ergebnissen (vgl. Anlage 4.1.).

Es wird für die k_{fat} -Wert-Ermittlung nur auf die Proben in Bauteilgröße von Lewis /Lew4/ bzw. /Lew5/ zurückgegriffen. Die behandelten und nassen Proben von Lewis werden ebenso herausgenommen wie die Werte von Tsai und Ansell /Ts1/ sowie Fuller /Lew3/ (vgl. 3.1.1.4.). Die Auswertung der restlichen Versuche findet sich in Anlage 4.2. Zur Ermittlung werden nur noch 4 Versuchsreihen mit Nadelhölzern, die unbehandelt waren und eine Dichte von 0,48 bis 0,56 kg/dm³ hatten, herangezogen.

Für den Variationskoeffizient der statischen Kurzzeitfestigkeit wird nach Glos /G15/ $V_1=0,27$ angesetzt.

Damit ergeben sich nach einer Umrechnung auf $\kappa=0$ folgende Mittelwerte, Variationskoeffizienten (V_2) und k_{fat} -Werte:

Lastspielzahl N	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^7$
Mittelwerte:	0,63	0,53	0,50	0,44
Variationsk. (V_2)	0,09	0,09	0,10	0,10
k_{fat}	0,60	0,51	0,48	0,42

Bei der nachfolgenden grafischen Darstellung wird ein linearer Verlauf von $k_{fat}(\kappa)$ verwendet:

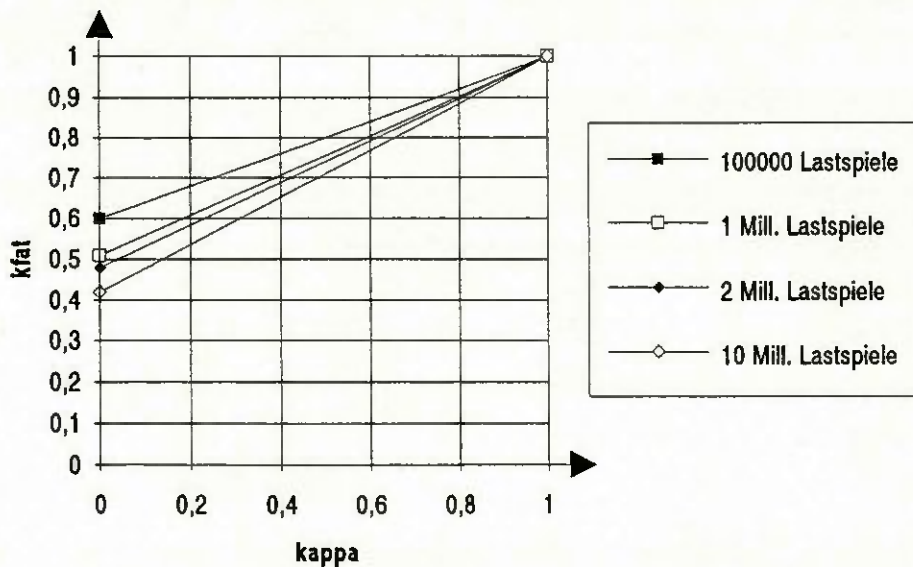


Bild 87: k_{fat} -Werte für Biegeschwellbeanspruchungen bei Vollhölzern

2) Schichthölzer

Die Ergebnisse der vorliegenden Versuche sind in Anlage 4.3. in Tabellenform dargestellt.

Für den Variationskoeffizient der statischen Kurzzeitfestigkeit wird wegen der geringeren Streuungen im Vergleich zu Vollholz ein Variationskoeffizient $V_1=0,2$ angenommen.

Zur Mittelwertbildung wurden die Versuche von Tsai und Ansell /Ts1/ und eine Versuchsserie von Sterr /Ste7/ nicht herangezogen. Bei höheren Lastspielzahlen können dann nur noch Werte für Brettschichtholz aus Fichte herangezogen werden.

Damit ergeben sich nach einer Umrechnung auf $\kappa=0$ folgende Mittelwerte, Variationskoeffizienten (V_2) und k_{fat} -Werte:

Lastspielzahl N	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^7$
Mittelwerte:	0,61	0,58	0,52	0,52
Variationsk. (V_2)	0,14	0,11	0,01	0,02
k_{fat}	0,54	0,54	0,52	0,52

Bei der nachfolgenden grafischen Darstellung wird ein linearer Verlauf von k_{fat} (κ) verwendet:

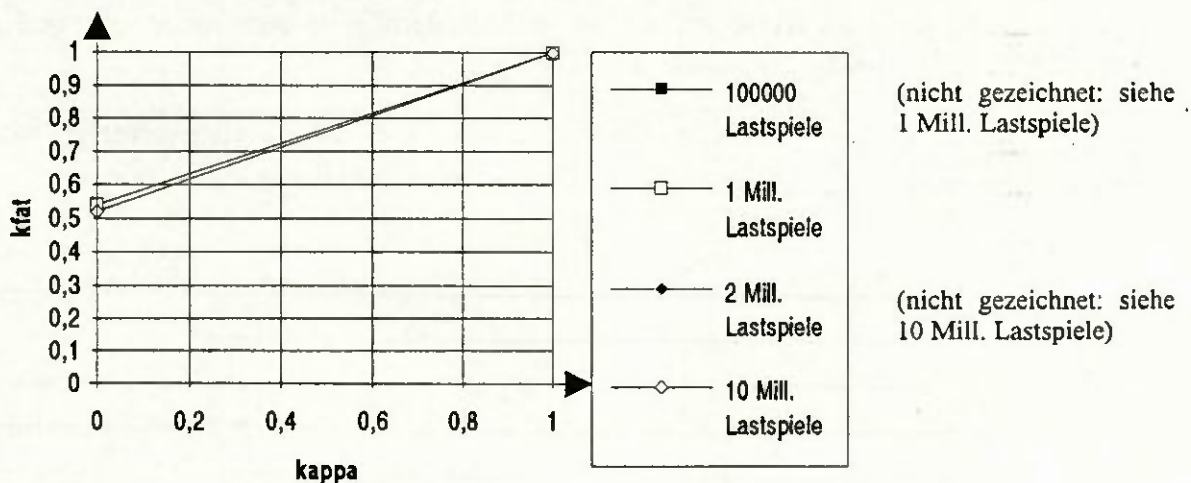


Bild 88: k_{fat} -Werte für Biegeschwellbeanspruchungen bei Schichthölzern

8.2.7. Biegewechsel (vgl. 3.1.1.5.)

Die Versuchsergebnisse werden für die Auswertung nach Vollhölzern und Schichthölzern unterteilt.

1) Vollhölzer

Die Ergebnisse der hier herangezogenen Versuche sind in Anlage 5.1. in Tabellenform dargestellt.

Für den Variationskoeffizient der statischen Kurzzeitfestigkeit wird nach Glos /G15/ $V_1=0,27$ angesetzt.

Zur Mittelwertbildung werden neben den Versuchen ohne genaue Angabe einer statischen Biegefestigkeit, zwei Versuchsreihen von Moore und Kommers /Mo2/ nicht herangezogen.

Damit ergeben sich folgende Mittelwerte, Variationskoeffizienten (V_2) und k_{fat} -Werte:

Lastspielzahl N	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^7$
Mittelwerte:	0,37	0,34	0,31	0,31
Variationsk. (V_2)	0,18	0,15	0,16	0,17
k_{fat}	0,31	0,30	0,27	0,26

Die Übertragung dieser Werte auf Hölzer in Bauteilgröße ist nicht gesichert, weil keine Versuchsergebnisse hierfür vorliegen.

Bei der nachfolgenden grafischen Darstellung, die die Biegewechselversuche mit den Biegeschwellversuchen verbindet, wird ein linearer Verlauf von k_{fat} (κ) verwendet:

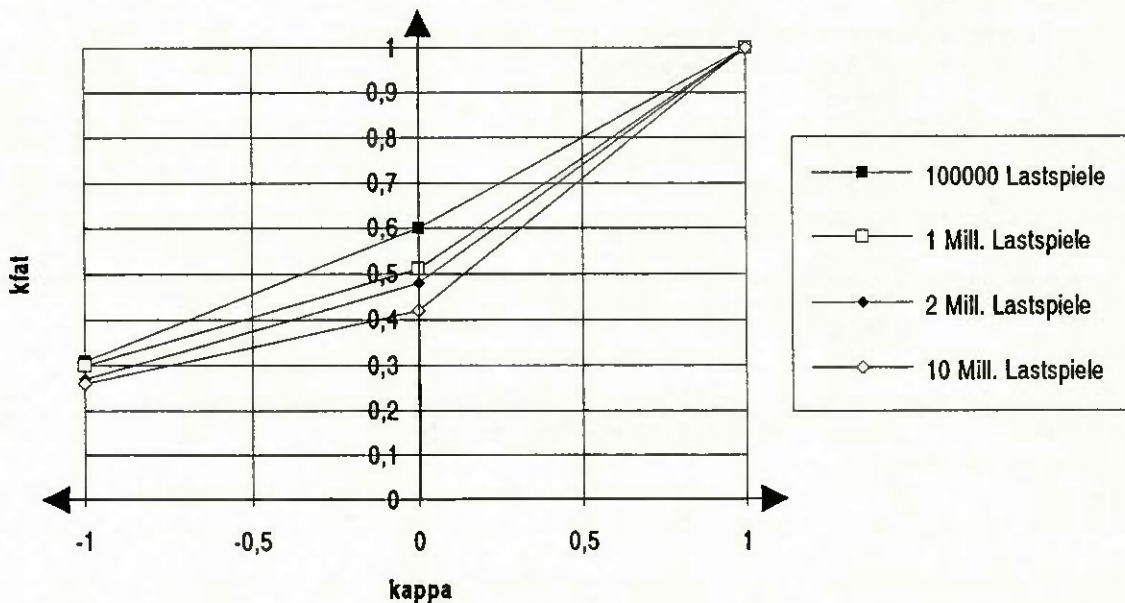


Bild 89: k_{fat} -Werte für Biegebeanspruchungen bei Vollhölzern

2) Schichthölzer

Die Ergebnisse der hier herangezogenen Versuche sind in Anlage 5.2. in Tabellenform dargestellt.

Für die Auswertung werden wieder die Werte von Tsai und Ansell /Ts1/ nicht berücksichtigt (vgl. 3.1.1.5.).

Für den Variationskoeffizient der statischen Kurzzeitfestigkeiten wird $V_1=0,20$ angenommen. Er ist geringer als derjenige für Vollhölzer.

Damit ergeben sich folgende Mittelwerte, Variationskoeffizienten (V_2) und k_{fat} -Werte:

Lastspielzahl N	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^7$
Mittelwerte:	0,34	0,29	0,27	0,24
Variationsk. (V_2)	0,14	0,16	0,18	0,17
k_{fat}	0,30	0,25	0,22	0,20

Die Übertragung dieser Werte auf Brettschichthölzer in Bauteilgröße ist nicht gesichert, weil keine Versuchsergebnisse hierfür vorliegen.

Bei der nachfolgenden grafischen Darstellung, die die Biegewechselversuche mit den Biegeschwellversuchen verbindet, wird ein linearer Verlauf von k_{fat} (κ) verwendet:

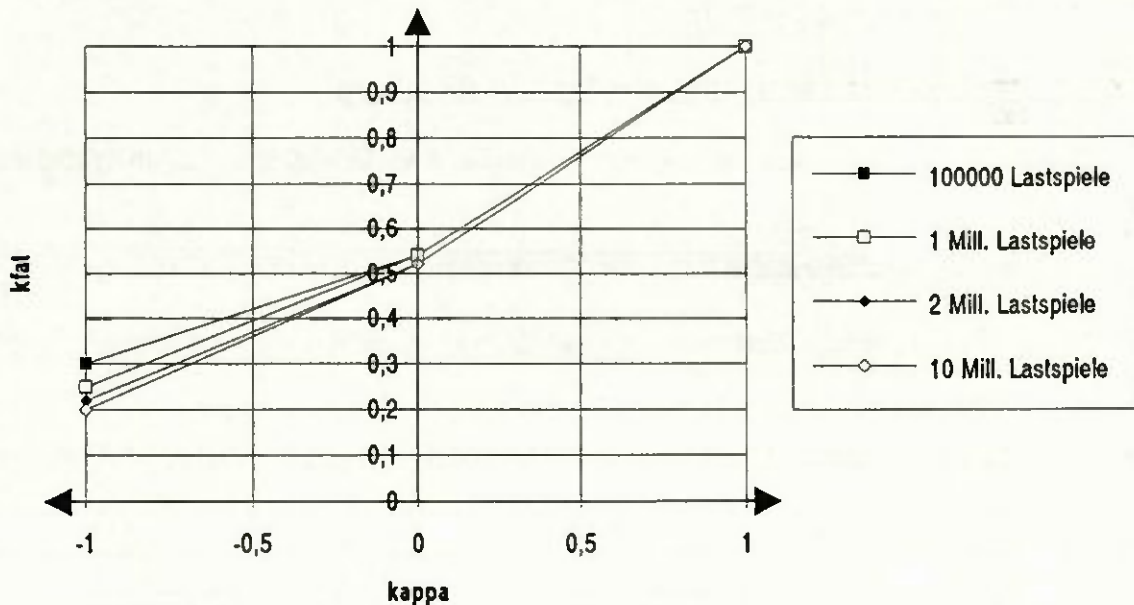


Bild 90: k_{fat} -Werte für Biegebeanspruchungen bei Schichthölzern

8.2.8. Schub (vgl. 3.1.1.6.)

Die Versuchsergebnisse werden für die Auswertung nach Hölzern und Leimfugen, sowie nach schwellender und wechselnder Beanspruchung unterschieden.

1) Schub bei Hölzern unter schwellender Beanspruchung

Die Ergebnisse der hier herangezogenen Versuche sind in Anlage 3.1. in Tabellenform dargestellt.

Für den Variationskoeffizient der statischen Kurzzeitfestigkeiten wird $V_1=0,30$ angenommen.

Für die Auswertung werden nur Versuchsserien mit einer Schubbeanspruchung in radialer Ebene herangezogen. Die Schubbeanspruchung in tangentialer Ebene verhält sich unter oft wiederholten Beanspruchungen günstiger /Bon1/. Damit liegt diese Festlegung auf der sicheren Seite.

Damit ergeben sich folgende Mittelwerte, Variationskoeffizienten (V_2) und k_{fat} -Werte:

Lastspielzahl N	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^7$
Mittelwerte:	0,55	0,43	0,39	0,32
Variationsk. (V_2)	0,04	0,07	0,10	0,12
k_{fat}	0,55	0,41	0,37	0,30

2) Schub bei Leimfugen unter schwellender Beanspruchung

Die Ergebnisse der hier herangezogenen Versuche sind in Anlage 3.2. in Tabellenform dargestellt.

Für den Variationskoeffizient der statischen Kurzzeitfestigkeiten wird $V_1=0,10$ angenommen.

Für die Ermittlung der k_{fat} -Werte werden nur Versuchsreihen herangezogen mit einem κ -Wert nahe 0.

Damit ergeben sich folgende Mittelwerte, Variationskoeffizienten (V_2) und k_{fat} -Werte:

Lastspielzahl N	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^7$
Mittelwerte:	0,54	0,42	0,40	0,37
Variationsk. (V_2)	0,16	0,16	0,14	0,10
k_{fat}	0,45	0,35	0,34	0,34

Für die Anwendung von k_{fat} -Werten unter einer schwellenden Schubbeanspruchung sowohl für die Hölzer wie auch für Leimfugen werden die minimalen Werte aus 8.2.8. 1) und 8.2.8. 2) empfohlen:

k_{fat}	0,45	0,35	0,34	0,30
-----------	------	------	------	------

Bei der nachfolgenden grafischen Darstellung für diese Werte wird ein linearer Verlauf von k_{fat} (κ) verwendet:

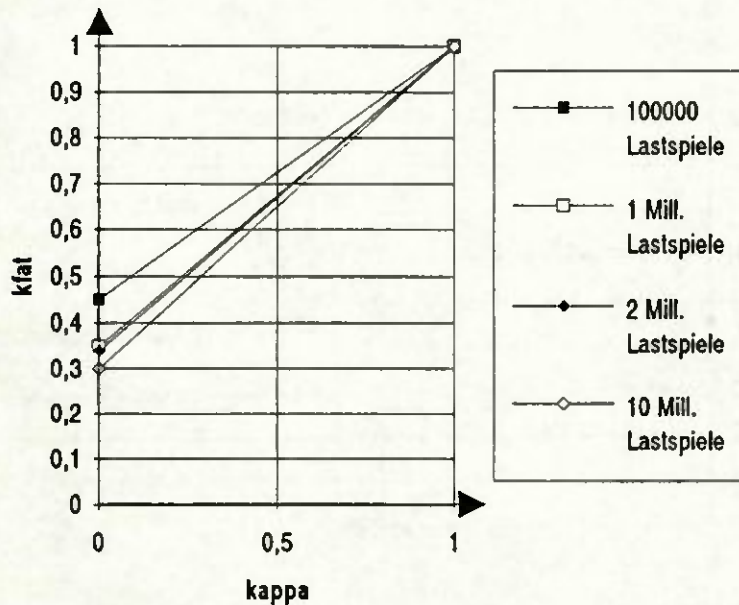


Bild 91: k_{fat} -Werte für schwellende Schubbeanspruchungen

3) Schub bei Leimfugen unter wechselnder Beanspruchung

Die Ergebnisse der hier herangezogenen Versuche sind in Anlage 3.3. in Tabellenform dargestellt.

Für den Variationskoeffizient der statischen Kurzzeitfestigkeiten wird $V_1=0,10$ angenommen.

Für die Ermittlung der k_{fat} -Werte werden nur Versuchsreihen herangezogen mit einem κ -Wert nahe -1.

Damit ergeben sich folgende Mittelwerte, Variationskoeffizienten (V_2) und k_{fat} -Werte:

Lastspielzahl N	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^7$
Mittelwerte:	0,38	0,29	0,28	0,26
Variationsk. (V_2)	0,16	0,21	0,17	0,09

Durch das Ansetzen der großen Variationskoeffizienten für die Lastspielzahlen 10^6 und $2 \cdot 10^6$ ergeben sich mit dem gewählten Auswertungsschema geringfügig kleinere k_{fat} -Werte als für 10^7 Lastspiele, weil die Variationskoeffizienten die Abweichungen zwischen den einzelnen Wöhlerlinien berücksichtigen. Eine bestimmte Beanspruchung, die 10^7 Lastspiele erträgt, kann

auch geringere Lastspiele ertragen. Deswegen wird für diese geringeren Lastspielzahlen auch der k_{fat} -Wert für 10^7 Lastspiele angegeben.

Lastspielzahl N	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^7$
Mittelwerte:	0,32	0,24	0,24	0,24

Bei der nachfolgenden grafischen Darstellung, die die Ergebnisse einer schwellenden Beanspruchung mit der wechselnden verbindet, wird ein linearer Verlauf von k_{fat} (κ) verwendet:

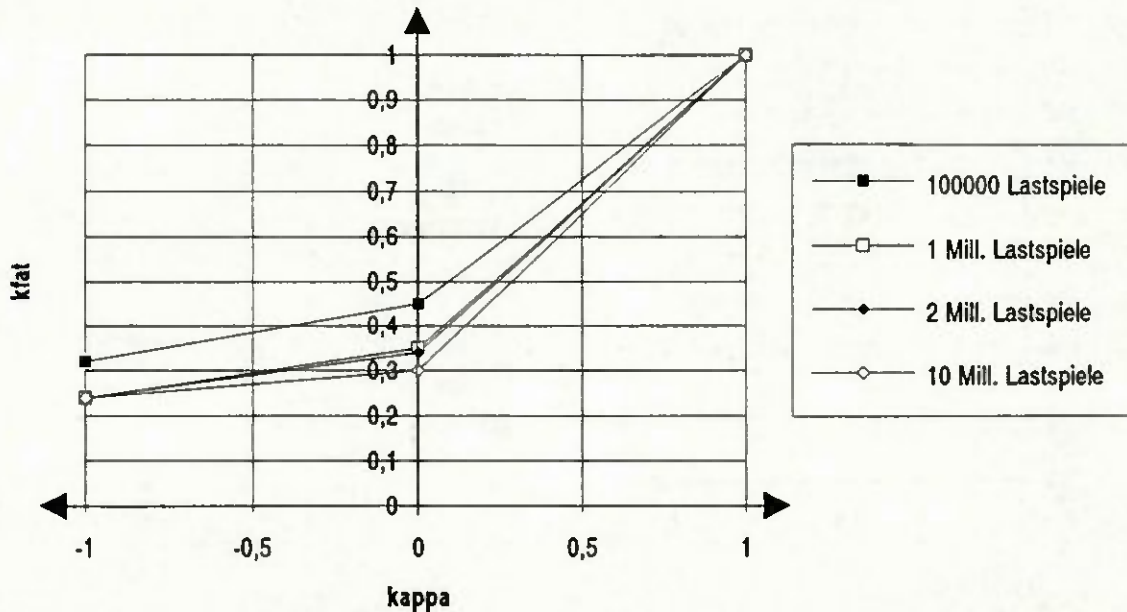


Bild 92: k_{fat} -Werte für Schubbeanspruchungen in den Leimfugen

Hinweis:

Es liegen keine Ergebnisse für eine wechselnde Schubbeanspruchung bei Hölzern vor. Deswegen wird vorgeschlagen, diese Werte auch für eine wechselnde Beanspruchung von Hölzern zu verwenden, wenn die damit berechneten zulässigen Spannungen bzw. Tragfähigkeiten nicht voll ausgenutzt werden.