

St.-Nr. LH-V47F/49/1

ABSCHLUSSBERICHT

Zu den Forschungsvorhaben AIF-Nr. 4289 und
AIF-Nr. 5348 (Fortsetzung zu Nr. 4289)

FORSCHUNGSTHEMA:

"ERFASSUNG, SYSTEMATISCHE AUSWERTUNG UND ERGÄNZUNG
BISHERIGER UNTERSUCHUNGEN ÜBER DAS RHEOLOGISCHE VER-
HALTEN VON HOLZ UND HOLZWERKSTOFFEN - EIN BEITRAG
ZUR VERBESSERUNG DES FORMÄNDERUNGSNACHWEISES NACH
DIN 1052 "HOLZBAUWERKE"

von

Peter Gressel

Lehrstuhl für Ingenieurholzbau
und Baukonstruktionen
Universität Karlsruhe
o. Prof. Dr.-Ing. J. Ehlbeck

Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine
Abt. Ingenieurholzbau
Universität Fridericiana Karlsruhe

September 1983

Band 1: Bericht

236 Seiten mit
66 Abbildungen
25 Tabellen
394 Literaturstellen

J. Ehlbeck P. Gressel

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in der Zeit vom 1.8.1978 bis 31.1.1981 (AIF-Nr. 4289) und vom 1.1.1982 bis 31.12.1982 (AIF-Nr. 5348, Fortsetzung von Nr. 4289) am Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen der Universität Karlsruhe.

Herrn em.o.Prof.Dr.-Ing.Dr.-Ing.E.h.Karl Möhler sowie seinem Nachfolger, Herrn o.Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ehlbeck danke ich vielmals für die Ermöglichung und hilfsbereite Unterstützung der umfangreichen Untersuchungen.

Ebenso gilt mein Dank der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung und vor allem der AIF für die finanzielle Förderung der Arbeit.

Stephanskirchen, im September 1983

P. Gursel

Inhaltsübersicht

Seite

1	Einführung und Aufgabenstellung	1
2	Bisherige Berücksichtigung des Kriechens in den Bemessungsvorschriften	4
3	Einflüsse auf die Kriechverformungen von Holz und Holzwerkstoffen unter Dauerlast	9
3.1	Versuchsmaterial und Auswertung	9
3.2	Einfluß der Beanspruchungsart	11
3.2.1	Vollholz	11
3.2.2	Holzwerkstoffe	17
3.3	Einfluß des Belastungsgrades	18
3.3.1	Konstantlast	18
3.3.2	Wechselast	27
3.4	Einfluß der Klimabeanspruchung	34
3.4.1	Einfluß der Feuchtigkeit	34
3.4.1.1	Vergleich des Kriechens im natürlichen Außenklima und im definierten Laborklima	40
3.4.1.2	Zeitraffer-Wirkung verschiedener Klimabeanspruchungen	44
3.4.1.3	Verstärkungsgrad unterschiedlicher Klimabeanspruchungen	46
3.4.2	Einfluß der Temperatur	51
3.5	Einfluß der Prüftechnik	54
3.5.1	Einflüsse aus der Prüfmethodik	55
3.5.2	Einflüsse aus der Meßtechnik	57
3.5.3	Einfluß der Probengröße	59
3.5.4	Einfluß der Probenahme	64
3.5.4.1	Stichprobenumfang	64
3.5.4.2	Probenahme	67
3.5.5	Einflüsse aus dem Versuchsablauf	69

<u>Inhaltsübersicht</u> (Fortsetzung)	Seite	
4	Eigenschaften nach Entlasten	74
4.1	Rückbildung der Kriechverformungen	74
4.2	Restfestigkeit nach Entlastung	80
5	Unterschiede im Kriechverhalten von Vollholz und Holzwerkstoffen	85
5.1	Einflüsse aus der Werkstoff-Struktur	91
5.1.1	Vollholz	91
5.1.2	Holzwerkstoffe	94
5.2	Einfluß des Sorptionsverhaltens	100
5.2.1	Sorptionsverhalten im konstanten Feuchtklima	101
5.2.2	Sorptionsverhalten unter wechselnden Klimabedingungen	104
5.2.3	Zusammenhang zwischen Sorptions- und Kriechverhalten	106
6	Kriechverhalten von Holzbauteilen und Verbindungsmitteln	108
6.1	Holzbauteile	108
6.2	Verbindungsmittel	112
7	Zusammenhänge zwischen Kriechverhalten und Kurzeit-eigenschaften	115
8	Möglichkeiten einer Vorhersage des langfristigen Formänderungsverhaltens aus relativ kurzfristigen Kriechversuchen	117
8.1	Bisherige Methoden zur rechnerischen Erfassung von Kriechvorgängen	117
8.1.1	Rein mathematische Ansätze	119
8.1.2	Mechanische Ersatzmodelle	122
8.1.3	Temperatur-Zeit-Beziehungen	127
8.1.4	Molekularkinetische Betrachtungsweisen	129
8.2	Eigene Auswertung von Kriechversuchen mit mathematischen und Modell-Funktionen	134

8.2.1	Erfassung der aus Versuchen gewonnenen Daten	134
8.2.2	Auswertung der Versuchsergebnisse	135
8.2.3	Wahl der Kriechfunktionen	135
8.2.4	Anpassung der Meßwerte	137
8.2.5	Problematik der Anpassung	139
8.3	Genauigkeit der Anpassung und Extrapolation mit Hilfe der Funktionen (1) bis (4)	141
8.3.1	Kriechverformungen im Normalklima 20/65	141
8.3.2	Kriechverformungen im Außenklima	150
8.3.3	Kriechverformungen im Wechselklima	154
8.3.4	Einfluß des Belastungsgrades, der Feuchtigkeitsbeanspruchung und der Probenbreite auf die Parameter der Potenzfunktionen	155
9	Folgerungen für den Formänderungsnachweis	163
9.1	Berücksichtigung der mechanischen Beanspruchung	164
9.1.1	Beanspruchungsart	164
9.1.2	Belastungsgrad	166
9.1.3	Belastungsdauer/Wechselast	169
9.2	Berücksichtigung der klimatischen Beanspruchung	175
9.3	Vorschlag zur Berücksichtigung der Kriechverformungen in DIN 1052	184
10	Vorschlag einheitlicher Prüfgrundsätze zur Durchführung und Auswertung von Kriechversuchen	189
10.1	Standard-Kriechversuch an kleinen, fehlerfreien Proben unter Biegebeanspruchung (4-Schneiden-Versuch)	190
10.1.1	Versuchsaufbau	191
10.1.2	Probenahme	193
10.1.3	Versuchsdurchführung	194
10.1.4	Auswertungen	200
10.2	Bewertung der Versuchsergebnisse	201

Inhaltsübersicht (Fortsetzung)

Seite

11 Literatur

207

12 Anhang: Kriechkurven (Bilder 2 bis 66), in getrenntem
Heft gebunden

236

1 Einführung und Aufgabenstellung

Von tragenden Holzbauteilen muß neben einer ausreichenden Festigkeit eine während der erwarteten Standdauer genügende Verformungsbeständigkeit gefordert werden. Das bedeutet, daß die Formänderungen auch unter lange andauernden oder periodisch auftretenden Beanspruchungen die Gebrauchsfähigkeit oder gar die Standsicherheit des Bauteils nicht beeinträchtigen dürfen.

Bei der Bemessung von Tragwerken aus Holz und Holzwerkstoffen sind daher sowohl Spannungsnachweise als auch Formänderungsnachweise zu führen. Die für den Spannungsnachweis erforderlichen Festigkeitseigenschaften (Dauerstandfestigkeiten) sind heute weitgehend bekannt und - unter Einbeziehung der entsprechenden Abminderungsfaktoren - als zulässige Spannungen in den einschlägigen Bemessungsvorschriften festgelegt. Erheblich unsicherer sind aber bis heute die elastomechanischen Grundlagen für die bei der Bemessung von tragenden Bauteilen vielfach maßgebenden Formänderungsnachweise. Für die dabei benötigten Verformungskenngrößen (Elastizitäts- und Schubmoduln) werden in DIN 1052 und den entsprechenden Ergänzungsbestimmungen nur die im Kurzzeitversuch ermittelten Werte herangezogen. Die angegebenen Rechenwerte berücksichtigen bisher nicht, daß diese Moduln nur die elastischen, nicht aber die - zeitabhängigen - viskoelastischen und plastischen Formänderungen erfassen, die ein Holztragwerk mit der Zeit erfährt. Aufgrund des zeitabhängigen Verformungsverhaltens - des Kriechverhaltens - von Holz und Holzwerkstoffen kann sich die tatsächliche Verformung je nach Art und Höhe der Belastung und je nach der klimatischen Beanspruchung gegenüber der berechneten Verformung im Laufe der Zeit unter Umständen erheblich erhöhen. Es liegen noch nicht genügend Unterlagen vor, um in allen Anwendungsfällen eine Vorausberechnung der unter bestimmten Beanspruchungszuständen auftretenden Verformungswerte zu ermöglichen.

Vor allem in jüngerer Zeit wurden zwar verstärkte Anstrengungen unternommen, um mit Hilfe verschiedener Langzeitbelastungsversuche das Kriechverhalten von Holz und Holzwerkstoffen in Abhängigkeit von den wesentlichsten Einflußgrößen zu ermitteln. Die bisherigen Kenntnisse über das zeitabhängige Formänderungsverhalten sind jedoch in einer Vielzahl von Einzelveröffentlichungen weltweit verstreut und zum Teil noch lückenhaft. Sie sind bisher noch nicht zusammenfassend ausgewertet worden unter dem Gesichtspunkt der Schaffung werkstoff- und beanspruchungsbezogener Verformungskennwerte für den Formänderungsnachweis.

Das Kriechverhalten von Holz und Holzwerkstoffen entzieht sich bisher weitgehend einer allgemeingültigen rechnerischen Erfassung. In verschiedenen Arbeiten wird zwar versucht, die zeitabhängigen Formänderungen durch entsprechende Modellvorstellungen und daraus abgeleitete "Kriechfunktionen" rechnerisch anzunähern und auf längere Beanspruchungszeiträume zu extrapolieren. Der Vergleich derartiger Kriechkurven mit Versuchswerten beschränkt sich bisher jedoch auf relativ kurze Zeiten (Tage oder Wochen, maximal 1 bis 2 Jahre). Selbst durchgeführte Kriechversuche über mehr als 10 Jahre deuten jedoch darauf hin, daß die Übertragung von Meßwerten aus derartigen Kurzzeit-Kriechversuchen auf längere Beanspruchungszeiträume (Jahrzehnte) mit den bisher vorgeschlagenen Extrapolations-Gleichungen häufig zu günstige Rechenwerte liefert und damit auf der unsicheren Seite liegt.

Bisher fehlen einheitliche Prüfrichtlinien zur Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von Kriechversuchen. Das gemessene Kriechverhalten hängt jedoch von zahlreichen prüftechnischen Einflüssen (z.B. Probengröße, Klimaführung, Verformungsmessung) ab. Daher sind Ergebnisse aus Kriechversuchen mit unterschiedlicher Prüftechnik nur eingeschränkt - unter Umständen überhaupt nicht - miteinander vergleichbar.

In der vorliegenden Arbeit sollen alle erreichbaren Untersuchungen und Veröffentlichungen auf dem Gebiet des zeitabhängigen Formänderungsverhaltens von Holz und Holzwerkstoffen erfaßt und ausgewertet werden mit dem Ziel, aus dieser Analyse nach Möglichkeit Abminderungsfaktoren bzw. -funktionen für die im Kurzzeitversuch ermittelten elastischen Materialkennwerte (E und G) abzuleiten. Diese Abminderungen sollen - soweit erforderlich - in Abhängigkeit von Art, Höhe und Dauer der zu erwartenden Gebrauchslasten und von den klimatischen Randbedingungen entsprechend gestaffelt werden.

Außerdem soll geklärt werden, inwieweit eine ausreichend sichere Extrapolation der in relativ kurzfristigen Kriechversuchen ermittelten Verformungskennwerten auf die im Bauwesen üblichen Lebensdauererwartungen möglich ist.

Die Arbeit soll zu einer besseren Abschätzung der zu erwartenden Formänderungen und damit zur besseren Berücksichtigung des Kriechverhaltens beim Formänderungsnachweis beitragen.

Ein weiteres Ziel besteht darin, die aus den Auswertungen gewonnenen versuchstechnischen Erkenntnisse in Form von allgemein gültigen Prüfgrundsätzen zusammenzufassen, die bei der Planung, Durchführung und Auswertung von Kriechversuchen mit Holz und Holzwerkstoffen zu beachten sind.

Eine einheitliche Prüfmethodik ist grundlegende Voraussetzung für die notwendige Koordinierung und für eine bessere Vergleichbarkeit künftiger Kriechversuche.

2 Bisherige Berücksichtigung des Kriechens in den Bemessungsvorschriften

Durch Auswertung von über 20 internationalen Holzbau-Normen sollte festgestellt werden, inwieweit das Kriechverhalten bisher beim Formänderungsnachweis Berücksichtigung findet. Dabei wurden auch der 5. Entwurf (8/1980) des im Rahmen der CIB-W18 ausgearbeiteten "Structural Timber Design Code" sowie die Neu-Vorlage (11/1981 bzw. 11/1982) der z.Z. in Überarbeitung befindlichen DIN 1052 Teil 1 mit einbezogen. Die Ergebnisse dieser Auswertungen sind in Tabelle 1 zusammengefaßt. Es wurden nur die Normen aufgeführt, die eine Berücksichtigung der zeitabhängigen Verformungen in irgendeiner Form vornehmen. Andere Vorschriften enthalten entweder keine oder nur allgemeine, unverbindliche Hinweise auf die Möglichkeit von zusätzlichen Kriechformänderungen.

In Spalte 1 der Tabelle sind Land, Norm-Nummer und Ausgabejahr sowie die für Holzbauwerke jeweils zugelassenen Werkstoffe aufgeführt. Demnach dürfen Holzwerkstoffe in manchen Ländern noch nicht, in anderen zumindest teilweise für Holztragwerke verwendet werden; wieder andere Länder führen zwar Holzwerkstoffe im Geltungsbereich mit auf, nach den zugehörigen Rechenwerten sucht man jedoch vergebens. Spalte 2 enthält den Bezugszustand hinsichtlich Belastungsdauer und Feuchtigkeitsgehalt, für den die in der jeweiligen Norm tabellierten Rechenwerte (E, G) gelten. Diese Rechenwerte enthalten teilweise bereits Abminderungen für längere Belastungszeiten, teilweise werden diese Abminderungen erst beim Formänderungsnachweis rechnerisch berücksichtigt (siehe Spalten 3 und 4). Die entsprechenden Angaben über die Bezugsfeuchtigkeit, für die die tabellierten Rechenwerte gelten, schwanken zwischen "trocken" und 21 % und führen zu entsprechend unterschiedlichen Abminderungsfaktoren in den Spalten 5 und 6 in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt beim jeweiligen Anwendungsfall. Entsprechend dem unterschiedlichen Sicherheitskonzept der einzelnen Länder ist die Art

Tabelle 1: Bisherige Berücksichtigung des Langzeit- und Feuchtigkeitseinflusses beim Formänderungsnachweis von Holztragwerken im internationalen Normenwerk (Stand 1981/82)

Land Norm Werkstoffe	Bezugszustand der Rechenwerte		Lastdauer-Klassen Abminderung Klassen für E-/G- Modul		Feuchtigkeits-Klassen Abminderung Klassen für E-/G- Modul		Zul. Durch- biegungs- Grenzwerte	An- mer- kungen
	kurz	Feuchte	3	4	5	6		
1	2						7	8
Deutschland DIN 1052 T.1 (1969) VH, BFU'	kurz	trocken (≤ 20%)	-	Empfehlung in Erläuterungen (wenn g > 0,5q)	bewittert, dauernd durch- feuchtet	(x) 5/6	1/200...1/600	
Neu-Vorlage 11/1981 VH, BFU, FP	kurz	trocken (≤ 20%)	-	$(x)\eta = 1,5 - \frac{g}{q}$ (u ≤ 18%) $\eta = \frac{5}{3} - \frac{4}{3} \cdot \frac{g}{q}$ (u > 18%) η stets ≤ 1	u ≤ 18% 1,0 u > 18% VH (x)5/6 BFU 3/4 FP 2/3		noch nicht festgelegt	
Frankreich Règles CB71 (1972) VH, BSH	kurz	15%	kurz lang	1,0 (:) 1,0...1,75 f(Belastung)	Δu = 0% (:) 1,0...1,75 Δu = 5% 1,0...2,33 Δu = 10% 1,0...3,08 Δu = 15% 1,0...4,00		1/150...1/400 $E_{\infty} = \frac{E_0}{\Theta}$ $\Theta = 1 + f(\Delta u) \cdot f\left(\frac{g}{q}\right)$	
England CP 112 (1967) VH, BFU	-	≤ 18%	lang mittel kurz	(:) 1,5...2,0	Rechenwerte = f(u) BFU: (x) 0,75...0,90 f(Belastung)		1/250...1/500	
Schweiz SIA 164 (1981) VH, BSH	kurz	trocken	kurz lang	(x) 1,0...0,8 f(Feuchte) siehe Spalte 5 + 6	geschützt (:) 1,5...2,0 (u ≤ 18%) sonstige 3,0 (u > 18%)		1/150...1/500	
Holland NEN 3352 TGB (1972) VH, BSH	kurz	< 21%	lang	(:) 2,0 für ständige Lasten und 1/3 der variablen Lasten	u < 10% (x) 1,0 u = 10...15% 1,0 u = 15...21% 1,0 u = 21...30% 0,9 u > 30% 0,8		1/300...1/400 bzw. max. 6...18 mm (ohne Kriechanteil)	
Dänemark DS 413 (1975) VH	A	INT	A lang C kurz	(x) 0,8 für g i(Lastkombi- nation)	INT (innen) (x) 1,0 u ≤ 20% EXT (außen) 0,75 u > 20%		1/500 (Decken) 0,9 mm (Fußboden)	
Schweden SB 1975 Kap. 27 VH, BFU, FP, HF	normal	1 (2)	dauernd normal kurz	(x) 0,7 0,6 1,0 1,0 1,3 1,5 VH, FP, BFU HF	0: innen, beheizt (x) 1,0...1,3 1: innen, belüftet 1,0 2: innen, nicht belüft. 0,8 3: außen 0,6		FP nur bis Klima- klasse 1, BFU und HF bis Klasse 2 erlaubt	
Norwegen NS 3470 (1976) VH	A	1 (2)	A lang B kurz C sehr kurz	(x) 1,0 1,1...1,2 1,2...1,4	1: φ < 65% (u < 12%) (x) 1,0 2: φ < 85% (u < 20%) 1,0 3: φ > 85% (u > 20%) 0,75		☒	
Finnland SFS 4188 (1978) VH, BFU, FP, HF	B	1	A > 10 ³ h B 10-10 ³ h C < 10 h	(x) 0,8...0,35 1,0...0,6 1,3...0,8 i(Klima)	1: φ < 60% (x) 1,3...0,8 2: φ < 80% 1,3...0,7 3: φ < 95% 1,0...0,6 4: φ ≥ 95% 0,8...0,35 f(Lastdauer)		1/120...1/300 FP nur bis Klima- klasse 1, HF bis 2, BFU bis 3 erlaubt	
Skandinavien NKB-Rapp. 33 (1978)	A	1	dauernd > 10 ³ h A 10 ² -10 ³ h B 10-10 ³ h C < 10h	(x) 0,7...0,4 1,0...0,7 f(Klima)	0: φ ≤ 40% } (x) 1,0...0,7 1: φ ≤ 60% } 2: φ ≤ 80% } 0,8...0,6 3: Wetter, } 0,7...0,4 Wasser f(Lastdauer)		☒	

Tabelle 1 (Fortsetzung):

Land Norm Werkstoffe	Bezugszustand der Rechenwerte Lastdauer Feuchte		Lastdauer-Klassen Abminderung für E-/G- Modul		Feuchtigkeits-Klassen Abminderung für E-/G- Modul		Zul. Durch- biegungs- Grenzwerte	An- mer- kungen
	1	2	3	4	5	6		
USA, NDS for wood constr. (1977) AITC 100-62 VH, BSH	normal	nicht klimatis. Holz	normal ($\geq 10^3$ h)	(:) 0,75 (BSH, klimat. Holz) 2,0 (nicht klimat. Holz)	trocken feucht	(x) 1,0 0,97...0,67 f(Eigenschaft, Querschnitt)	1/120...1/360	Kriechen nur bei besonderer Anwendung berücksichtigen
Australien AS 1720 - 1975 (1978) VH, BFU	kurz	VH 20% BFU 15%		(:) 1,0...3,0 f(Lastdauer, u) 1,0...10,0 f(Verbindungs- mittel)	$u > 25\%$ $u < 15\%$	(:) 1,5...3,0 1,0...2,0 f(Beanspruchungsart)	1/240...1/300 bzw. 9...12 mm	
Rußland SNIP II-W.4-71 VH, BFU	lang	$\leq 15\%$	lang kurz	(x) 1,0 1,2...1,6	10 Klassen	(x) 1,0...0,75	1/150...1/300 bzw. ≤ 5 mm	
CSSR CSN 73 1701 VH, BSH, BFU 100, FP-V100, HFH	lang	$\leq 15\%$		(x) 0,8...2,4 f(Lastkombination)	überdacht außen	(x) 1,0 0,85...0,90 BSH 0,75...0,90 BFU 0,75...0,85	1/150...1/700	zusätzliche Abminderung für Temperatureinfluß ($\vartheta > 25^\circ$ bis 55°C)
Polen PN-73/B-03150 VH, BFU, HFH, HFE	-	trocken	bei zulässigen Durch- biegungen berücksich- tigt		trocken feucht	(x) 1,0 (VH), 0,5 (HF), 0,8 (VH, BFU), 0,2 (HFH), 0,25 (HFE)	1/180...1/300	
CIB-W18 5. Entwurf (1980) VH, BSH	$10^2 - 10^3$ h	$< 15\%$	$> 10^3$ h $10^2 - 10^3$ h $10 - 10^2$ h < 10 h, < 3 sec f(Feuchte)	(x) 0,7...0,4 1,0...0,7	1: $\varphi \leq 65\%$ 2: $\varphi \leq 80\%$ 3: alle ändern	(x) 1,0...0,7 0,8...0,6 0,7...0,4 f(Lastdauer)	Rechenwerte für 12 bzw. 3 (BSH) Festig- keitsklassen	

¹ Erläuterung der Symbole bzw. Abkürzungen:

- (x) = Multiplikations-
- (:) = Divisionsfaktoren für E, G
- f() = in Abhängigkeit von (...)
- g = ständige Lasten
- q = Gesamtlast (g + s)
- s = Schneelast
- u = Feuchtigkeitsgehalt

- φ = relative Luftfeuchtigkeit
- VH = Vollholz
- BSH = Brettschichtholz
- BFU = Baufurniersperrholz
- FP = Flachpreßplatte
- HF = Holzfaserplatte (HFH = harte, HFE = extraharte, HFM = mittelharte HF)

und die Untergliederung der jeweiligen Abminderungsfaktoren der Rechenwerte hinsichtlich Lastdauer und Feuchtigkeitsbeanspruchung sehr verschieden (Spalten 4 bzw. 6). Diese Faktoren, die teils als Multiplikatoren, teils als Divisoren für die elastischen Rechenwerte angegeben werden, sind mitunter noch weiter abgestuft in Abhängigkeit von Werkstoff, Art und Höhe der Belastung, Konstruktion, Lastkombinationen usw.

Die maximal zulässigen Durchbiegungen (Spalte 7) bewegen sich je nach Bauteil, Oberflächenbeplankung und störenden Auswirkungen von evtl. Verformungen auf Standsicherheit und Funktionsfähigkeit einerseits und den jeweils maßgebenden Abminderungsfaktoren andererseits in einem relativ breiten Bereich zwischen $1/120$ und $1/700$ der jeweiligen Stützweite. Für bestimmte Konstruktionen werden teilweise auch absolute Maximaldurchbiegungen vorgeschrieben.

Die Auswertung zeigt, daß vor allem in jüngeren Normenwerken zunehmend die Notwendigkeit einer geeigneten Berücksichtigung des Kriechverhaltens bei der Bemessung von Holzbauteilen erkannt worden ist. Dagegen gehen die Auffassungen über die Art und das Ausmaß einer erforderlichen Abminderung der in Kurzzeitversuchen ermittelten elastischen Kennwerte in Abhängigkeit von den verschiedenen Einflußgrößen wie z.B. Art, Dauer und Höhe der Belastung, Klimabeanspruchung usw. noch weit auseinander.

Die bisher gültige Fassung von DIN 1052 Teil 1 aus dem Jahre 1969 enthält noch keine konkreten Angaben über die Berücksichtigung der zeitabhängigen Verformungen; lediglich in den Erläuterungen wird empfohlen, die E- und G-Werte dann um mindestens 25 % abzumindern, wenn "die Spannung aus ständiger Last größer als die Hälfte der zulässigen Spannung ist". Bei hoher Feuchtigkeitsbeanspruchung sind die Elastizitäts- und Schubmoduln zusätzlich auf $5/6$ zu ermäßigen.

Nach dem derzeitigen Stand der Überarbeitung von DIN 1052 Teil 1 sind Kriechverformungen nur bei biegebeanspruchten Bauteilen zu berücksichtigen. Die E- und G-Werte von Holz und Holzwerkstoffen sind bei einer Feuchte bis 18 % mit dem Faktor $\eta = 1,5 - g/q$, bei höherer Feuchte mit $\eta = 5/3 - 4/3 \cdot g/q$ abzumindern (g = ständige Last, q = Gesamtlast). Die Abminderung erfolgt erst bei einem Beanspruchungsverhältnis von $g/q > 0,5$. Diese Vorschläge befinden sich jedoch noch - unter Einbeziehung der Ergebnisse aus der vorliegenden Arbeit - in der Diskussion.

Die im Folgenden dargestellten Zusammenhänge sollen diese Diskussion unterstützen und zu einer realistischeren Berücksichtigung des Kriechverhaltens beim Formänderungsnachweis in DIN 1052 Teil 1 beitragen.

Es werden zunächst die wichtigsten Einflüsse auf das Formänderungsverhalten unter Langzeitbelastung in grafischer Form dargestellt und diskutiert. Mit Hilfe verschiedener Ausgleichsfunktionen werden dann die Möglichkeiten einer rechnerischen Erfassung und Extrapolation von Kriechkurven auf das während der üblichen Lebensdauer eines Bauwerkes zu erwartende Verformungsverhalten untersucht. Anhand dieser Erkenntnisse wird schließlich ein Vorschlag zur künftigen Berücksichtigung von Langzeitbelastungen beim Formänderungsnachweis zur Diskussion gestellt.

3 Einflüsse auf die Kriechverformungen von Holz und Holzwerkstoffen unter Dauerlast

3.1 Versuchsmaterial und Auswertung

Die nachfolgend dargestellten Kriechkurven stammen aus zahlreichen am Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen der Universität Karlsruhe sowie am (ehemaligen) Forschungsinstitut für Holzwerkstoffe und Holzleime, Karlsruhe-Durlach, durchgeführten Kriechversuchen an Vollholz und Holzwerkstoffen. Außerdem wurde eine Vielzahl von Kriechversuchen aus der Literatur ausgewertet und in eigener Darstellung wiedergegeben. Es wurde stets darauf geachtet, daß nur solche Versuche in die Auswertungen einbezogen wurden, bei denen alle Angaben über Versuchsmaterial und -durchführung vollständig vorlagen, die für eine eindeutige Bewertung der Ergebnisse und für einen Vergleich mit anderen Untersuchungen erforderlich sind. Das ist deshalb besonders wichtig, da die Meßwerte sehr stark von der jeweiligen Prüftechnik beeinflußt werden (siehe Abschnitt 3.5).

Die Quelle ist im Text zu den einzelnen Bildern jeweils in
| | mit angegeben.

Weiter wurde in die Auswertungen eine Reihe neuer, bei Beginn der Arbeit noch nicht abgeschlossener und noch nicht veröffentlichter Kriechversuche aufgenommen.

Folgende Versuchsmaterialien wurden bei der grafischen Darstellung berücksichtigt:

Vollholz: fehlerfreie, relativ kleine Proben aus Fichte, Kiefer, Buche; Bauholz (Fichte, Kantholz 80 x 110 mm);

Schichtholz aus Kiefern furnieren, Hochkant-Biegeträger

Bau-Furniersperrholz BFU-100 aus Buche und Limba,
phenolharzverleimt;

Bau-Stabsperrholz BST-100, Absperrfurniere Buche,
Mittellage Fichte/Tanne;

Flachpreßplatten V20, V100, V100G unterschiedlicher Verleimung
(einschließlich Zementbindung),
Struktur und Dicke;

Holzfasерplatten HFH, kleine Proben und Biegeträger hochkant;
HFH-beplankte Strangpreßplatte SV2.

Holzwerkstoffe wurden nur ausgewertet, wenn ihre Qualität
mindestens den entsprechenden Gütenormen entsprach.

Bei Vollholz wurden Biege-, Zug-, Druck- und Torsionsversuche
ausgewertet. Bei Holzwerkstoffen beschränken sich die Kriech-
versuche bisher überwiegend auf Biegebeanspruchung - den im
Holzbau häufigsten Beanspruchungsfall plattenförmiger Werk-
stoffe. Angaben über Zug-, Druck- und Torsions- bzw. Schub-
kriechen von Holzwerkstoffen sind in der Literatur kaum zu
finden.

Einbezogen wurden außerdem mehrere Versuchsreihen an Vollholz
und Holzwerkstoffen unter zyklisch wechselndem Belastungsgrad,
um den Einfluß zwischenzeitlicher Teilentlastungen auf das
Kriechverhalten unter verschiedener klimatischer Beanspruchung
zu ermitteln. Variiert wurden ferner die Höhe der Belastung
(Belastungsgrad in % der jeweiligen Bruchlast), und die Klima-
beanspruchung (konstantes Normalklima und Feuchteklima, defi-
niertes Wechselklima unterschiedlicher Amplitude und Frequenz,
natürliches Außenklima unter Dach).

Die Auswertung der Kriechversuche wird wie folgt durchgeführt:

Die gemessenen absoluten Kriechformänderungen zur Zeit t (Durchbiegungen f_t , Dehnungen ε_t bzw. Winkeländerungen γ_t) werden im allgemeinen relativiert, in dem sie auf die quasi-elastische Anfangsverformung ($f_0, \varepsilon_0, \gamma_0$) 1 Minute nach Lastaufbringung bezogen werden; das Verhältnis f_t/f_0 bzw. $\varepsilon_t/\varepsilon_0$ bzw. γ_t/γ_0 wird als "Kriechfaktor" bezeichnet und eignet sich - ebenso wie die relative Kriechzunahme, z.B. $(f_t - f_0)/f_0$ - gut für eine vergleichende Darstellung verschiedener Kriechkurven.

Bei den dargestellten Kriechkurven wird meist ein linearer Zeit- und Verformungs-Maßstab verwendet. Für Vergleiche zwischen sehr unterschiedlich langen Versuchszeiten oder verschiedener Extrapolations-Funktionen ist dagegen die doppelt-logarithmische Darstellung besser geeignet.

Die Kriechkurven werden meist unmittelbar in Form von Plotter-Diagrammen wiedergegeben, die nach einem eigens für diesen Zweck entwickelten Programm im Rechenzentrum der Universität Karlsruhe erstellt wurden. Bei einem Teil der Kurven ist zur Verdeutlichung der Zusammenhänge außer den Meßpunkten eine rechnerisch ermittelte Ausgleichsfunktion (siehe Abschnitt 8.2) mit eingezeichnet. Die Meßpunkte sind meist Mittelwerte aus mehreren Einzelproben.

3.2 Einfluß der Beanspruchungsart

3.2.1 Vollholz

Für Vollholz liegen relativ zahlreiche Untersuchungen über das zeitabhängige Verformungsverhalten unter verschiedenen Beanspruchungsarten vor, z.B. |19, 39, 78, 92, 113, 204, 241, 252, 260, 264, 265, 291, 307, 334|¹⁾.

¹⁾Zahlen in | | verweisen auf die betreffenden Literaturstellen in Abschnitt 11.

Demnach kriecht Vollholz bei Schub erheblich stärker als bei Biegung, Druck oder Zug parallel zur Faserrichtung [39, 201]. Nach [307] liegt das Schubkriechen zwischen dem Kriechen bei Zugbeanspruchung längs und quer zur Faserrichtung (Kriechzeit nur 16,5 h).

Druckkriechen ist stets größer als Zugkriechen, sowohl bei Beanspruchung parallel [19, 39, 92, 334] als auch senkrecht zur Faserrichtung des Holzes [19, 113] sowie bei dynamischer Beanspruchung [291]. Entsprechend ist auch die Relaxation unter Druckbeanspruchung größer als unter Zugbeanspruchung [78].

Biegekriechen scheint ebenfalls größer zu sein als Zugkriechen parallel zur Faser [93, 201].

Weitere Einzeluntersuchungen über das Kriechverhalten von Vollholz unter jeweils einer der genannten statischen Beanspruchungsarten sind zum Beispiel folgenden Literaturstellen zu entnehmen:

Zug	: 30, 33, 78, 89, 128, 149, 150, 153, 165, 307, 308, 365
Zug ⊥	: 63, 186, 197, 234, 304, 310, 320, 379
Druck	: 7, 11, 13, 14, 66, 68, 144, 146-148, 152, 157, 165, 178, 317, 358
Druck ⊥	: 8, 9, 10, 66, 153, 172, 175, 231, 269, 289, 310
Biegung	: 15, 20, 26, 29, 51, 61, 67, 87, 88, 98, 99, 102, 103, 105, 109, 110, 116, 120, 127, 129, 131, 151, 152, 154, 159, 162, 165, 173, 177, 182, 191, 194, 206, 222, 223, 235, 240, 245, 262, 263, 271, 281, 283, 290, 296, 301, 305, 308, 309, 314, 335, 338, 341a, 356, 362, 373, 377
Schub	: 27, 237, 238, 329
Torsion	: 2-5, 27, 32, 198, 201, 253, 299

Kriechversuche an Vollholz unter dynamischer Beanspruchung sind beispielsweise in folgenden Veröffentlichungen beschrieben:

Zug ||: |165, 248, 291, 330|; Druck ||: |165, 291|;
Biegung: |28, 34, 114, 165, 174, 222, 271, 329|;
Torsion: |255, 297, 298|; Schub: |27|.

Relaxationsversuche an Vollholz enthalten u.a. folgende Literaturstellen:

Zug ||: |78, 153, 248, 260|; Zug ⊥: |234|; Druck ||: |14, 78|;
Druck ⊥: |153, 231, 288|; Biegung: |15, 26, 102, 103, 120, 181,
182, 254, 273, 341, 351, 377|; Torsion: |3, 299|.

Nach |241| und |264| kann im linear-viskoelastischen Verformungsbereich aus dem relativen Kriechen auf das entsprechende Relaxationsverhalten geschlossen werden und umgekehrt. Das wird durch |265| bestätigt, wonach Kriechen, Relaxation und Dämpfungsvermögen des Holzes "mechanistisch" miteinander verknüpft sind. Nach |260| soll die Relaxation bei Vollholz nur von der Holzsubstanz, d.h. der Porenstruktur abhängig sein.

Eigene Auswertungen umfangreicher Kriechversuche an kleinen, fehlerfreien Prüfkörpern aus Fichtenholz |201| im Innenklima 20/55 (Temperatur $(20 \pm 6)^{\circ}\text{C}$, relative Luftfeuchtigkeit $(55 \pm 20)\%$, Holzfeuchte $(11 \pm 3\%)$ bestätigen den erheblichen Einfluß der Beanspruchungsart auf das Formänderungsverhalten unter Dauerlast: In Bild 1 sind die Kriechfaktoren einiger Fichtenproben unter Zug-, Druck-, Biege- und Torsionsbeanspruchung vergleichend einander gegenübergestellt.

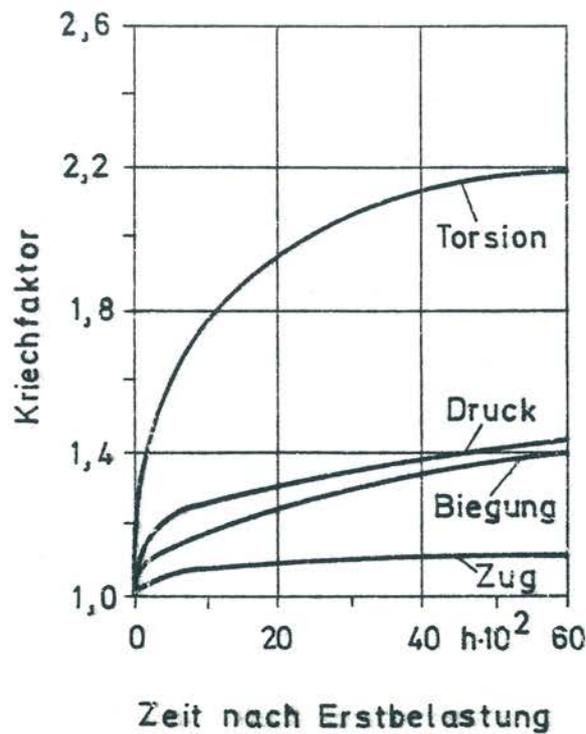


Bild 1: Einfluß der Beanspruchungsart auf das Kriechen von Fichte im Klima 20/55

Die Formänderungen wurden bei den Biegeproben (Einfeldträger, 2-Lastanordnung, stehende Jahrringe, 15 x 30 mm (H), Belastungsgrad BG = 30 %) mit Meßuhren, bei den Torsionsproben (Rundstäbe, \varnothing 25 mm, BG = 36 %) durch Ablesen der Winkeländerungen, bei den Zugproben (Querschnitt 12 x 12 mm im eingeschnürten Bereich, BG = 67 %) und den Druckproben (Querschnitt 30 x 30 mm, BG = 54 %) mit Hilfe direkt auf das Holz (radial und tangential) aufgeklebter Dehnungsmeßstreifen bestimmt.

Da die Dehnungsmessungen mit DMS nach etwa 1 Jahr Dauerlast teilweise fehlerhaft wurden (siehe Abschnitt 3.5.2), sind in Bild 1 nur die ersten 6000 h der insgesamt über 8-10 Jahre laufenden Kriechversuche wiedergegeben. In Bild 2 (siehe Anlage) sind die einzelnen Meßwerte direkt aufgetragen; zusätzlich wurde hier eine Biegeprobe mit liegenden Jahrringen mit ausgewertet.

Die Versuche zeigen mehr oder weniger deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Beanspruchungsarten:

Bei Torsionsbeanspruchung beträgt die relative Kriechzunahme (Kriechfaktor minus 1) von Fichte im etwas schwankenden Innenklima 20/55 während der gesamten, ca. 9-jährigen Versuchsdauer etwa das 2-3-fache des entsprechenden Biegekriechens. Aber auch zwischen dem Biegekriechen bei stehender (tangentialer) und liegender (radialer) Anordnung der Jahrringe zur Kraft- richtung bestehen noch meßbare Unterschiede (unterschiedlicher Einfluß der leichteren Frühholzbereiche). Die geringsten Kriechverformungen werden unter Zugbeanspruchung gemessen. Bei reiner Biegung (ohne Schubeinfluß) liegen die Kriechkurven im allgemeinen in der gleichen Größenordnung wie bei Druckbeanspruchung.

Bei den Biegeproben wurden neben der Durchbiegung auch die Dehnungen am Druck- und Zugrand mittels DMS gemessen. In Bild 3 (Anlage) sind die aus Durchbiegung, Zug- und Druck-Dehnung ermittelten Kriechfaktoren am Beispiel der Einfeld-Biegeträger mit stehenden Jahrringen unter verschiedenem Belastungsgrad dargestellt. Bis zu einem Belastungsgrad von 40 % ist auch hier das Zugkriechen geringer als das Druck- und Biegekriechen. Bei höherer Beanspruchung sind diese Unterschiede nicht mehr erkennbar; die Proben gehen nach einiger Zeit zu Bruch. Aufgrund der Unsicherheiten der DMS-Messungen bei längeren Kriechzeiten können diese Ergebnisse allerdings noch nicht verallgemeinert werden.

Das gegenüber reinem Biegekriechen mehrfach stärkere Schubkriechen von Holz geht anschaulich auch aus folgenden Versuchen hervor:

Biegestäbe aus fehlerfreier Fichte (15 x 30 mm) wurden im o.g. Innenklima 20/55 unter zentrischer Einzeilast bei Stützweitenverhältnissen l/h von 22, 10 und 5 unter verschiedener konstanter Biegespannung (BG = 9 - 18 - 36 %) über 7 Jahre belastet. In Bild 4 sind die Ergebnisse am Beispiel der Proben mit stehenden Jahrringen und einem Belastungsgrad von 18 % dargestellt (siehe auch Bild 27, Anlage). Daraus folgt, daß die relative Durchbiegungszunahme ($f_t/f_0 - 1$) beim Stützweitenverhältnis $l/h = 5$, d.h. bei einem relativ hohen Schubanteil an der Gesamtdurchbiegung, etwa 4 mal so groß ist wie bei $l/h = 22$. Bei $l/h = 10$ ist das relative Kriechen noch rund doppelt so hoch wie bei $l/h = 22$.

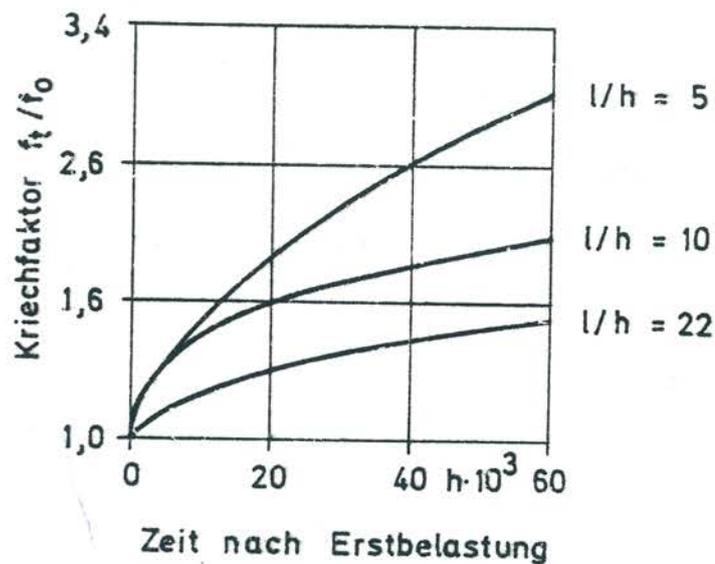


Bild 4: Einfluß des Schubanteils auf das Biegekriechen unter zentrischer Belastung (Fichte 20/55)

3.2.2 Holzwerkstoffe

Über den Einfluß der Beanspruchungsart auf das Kriechverhalten von Holzwerkstoffen liegen nur wenige Untersuchungen vor.

Bei Sperrholz sind zumindest qualitativ ähnliche Verhältnisse zu erwarten wie bei Vollholz; der Schubeinfluß bei Biegeversuchen mit hohem Querkraftanteil liegt nach [284] auch bei Furniersperrholz aus Fichte und aus Birke in der gleichen Größenordnung wie bei Fichten-Vollholz (s. Abschnitt 3.2.1). Nach etwa 1 Jahr unter verschiedener, konstanter Dauerlast im Klima 20/65 war das Kriechen der Proben mit hohem Schubverformungsanteil etwa 3-3,5 mal so groß wie das an Vergleichsproben (querkraftfrei) ermittelte Biegekriechen; im Klima 20/92 (65 Tage) erhöhte sich dieses Verhältnis nur unwesentlich auf etwa 3,5-3,7.

Bei Spanplatten und Faserplatten, bei denen der Rohstoff Holz in stärker zerkleinerter Form vorliegt und die Leimfugen zwischen den einzelnen Spänen bzw. Fasern nicht mehr vollflächig ausgebildet sind, ist eine andere Reihenfolge der Kriechneigung zu erwarten.

Bei Spanplatten ist offensichtlich das Kriechen unter Biegebeanspruchung geringer als unter Zug; das Schubkriechen (parallel zur Plattenebene) ist - bedingt durch die lockere Mittelschicht - am größten [116, 207]. Ein Hinweis auf die gegenüber Vollholz und Sperrholz größere Schubempfindlichkeit von Spanplatten geht z.B. aus dem relativ starken Abfall der Querkraftfestigkeit bzw. der Blockscherfestigkeit von dauerbelasteten Spanplatten (siehe Abschnitt 4.2) sowie aus dem mit abnehmender Stützweite und damit wachsendem Schubeinfluß stark zunehmendem Abfall des Biege-E-Moduls von Spanplatten-Kriechproben (V 20) hervor [116]. Nach [116] und [164] sind die Kriechverformungen der Mittelschicht etwa doppelt so groß wie die

der Deckschichten; das Kriechen der ganzen Platte wird im Normalklima überwiegend von den Deckschichten |164|, im Wechselklima 20/95-20/25 dagegen mehr von der Mittelschicht bestimmt |116|. Das Schubkriechen aus Querkraft ist oberhalb von $1/h \approx 15$ vernachlässigbar gering |164|.

Bei Querdruckbeanspruchung sind Kriechen und Relaxation, aber auch die Rückfederung nach Entlasten stärker als bei Druck parallel zur Plattenebene |258|.

Bei Hartfaserplatten sind Zug- und Druckkriechen etwa gleich groß |186|. Bei Schubbeanspruchung parallel sollen die Kriechverformungen geringer sein als bei Biegung; unter Schub senkrecht zur Plattenebene und unter Zug parallel scheint das Kriechen am ausgeprägtesten zu sein |206|. Auch im Wechselklima 20/90-60/40 (vergleiche Bild 26) war das Zugkriechen von 4 mm Hartfaserplatten nahezu doppelt so groß wie das entsprechende Biegekriechen |389|.

3.3 Einfluß des Belastungsgrades

3.3.1 Konstantlast

Das Kriechen, d.h. die unter konstanter Belastung mit der Zeit t zunehmende Verformung ϵ , läßt sich vereinfacht durch eine idealisierte Kriechkurve nach Bild 5 darstellen.

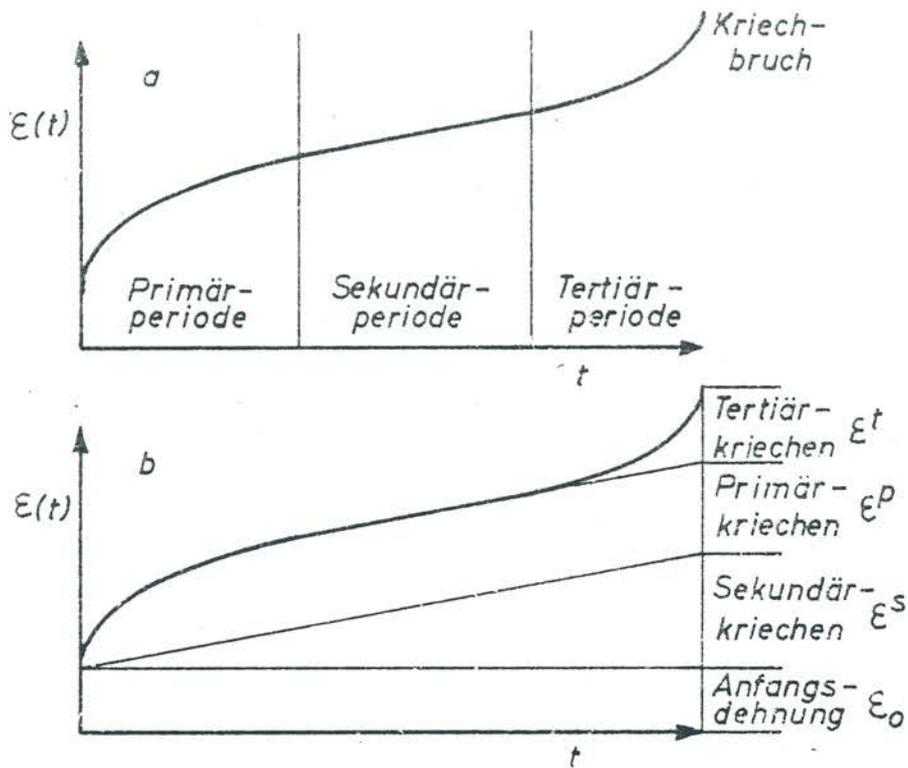


Bild 5: a) Idealisierte Kriechkurve und
b) Einteilung in die verschiedenen Komponenten

Die Neigung dieser Kurve, d.h. die Verformungs- oder Kriechgeschwindigkeit, fällt zunächst mit der Zeit degressiv ab (primäres Kriechen), wird dann konstant (sekundäres Kriechen) und steigt schließlich wieder bis zum Bruch der Probe progressiv an (tertiäre Kriechperiode). Diese idealisierte Form einer Kriechkurve kann Abwandlungen der verschiedensten Art erfahren (s. Bild 6).

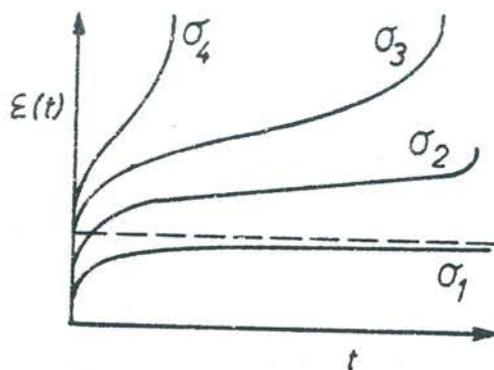


Bild 6: Verschiedene Möglichkeiten des Kriechverlaufes

Bei hohen Spannungen wird der sekundäre Teil des Kriechens häufig unterdrückt; bei niedrigen Spannungen läuft das primäre Kriechen gegen einen Dehnungsgrenzwert asymptotisch aus; oder es treten weder sekundäre noch tertiäres Kriechen auf und der Bruch tritt schon im Bereich des Primärkriechens bei niedriger Dehnung ein. Der tertiäre Kriechbereich ist bei vielen Werkstoffen mit sprödelastischem Verhalten überhaupt nicht oder nur bei hohen mechanischen Beanspruchungen zu finden.

Kriechgrenze

=====

In verschiedenen Arbeiten wurde versucht, diejenige Grenzspannung zu ermitteln, oberhalb der die zeitabhängigen Formänderungen des Holzes und der Holzwerkstoffe ausgelöst werden. Für diese "Kriechgrenze" werden Werte zwischen 5 % und 15 % der Kurzzeitfestigkeit angegeben, z.B. [150, 286, 317, 372]. Nach [185] soll es bei Holzwerkstoffen keine derartige Kriechgrenze geben.

Da die genannten Untersuchungen aber nur über relativ kurze Belastungszeiten und meist ohne Klimabeanspruchung durchgeführt wurden, können diese Angaben nicht verallgemeinert werden. Mit einer ausreichend empfindlichen Meßmethode, mit längerer Belastungszeit und vor allem bei erhöhter Klimabeanspruchung ist schon unter dem Eigengewicht der Proben mit meßbaren Kriechformänderungen zu rechnen. Eigene Kriechversuche mit Buchen-

Vollholz und Bau-Furniersperrholz BFU-BU-100 im Wechselklima 20/95-20/25 unter verschieden hoher Biegebeanspruchung bestätigen das (siehe Bild 11a + b, Anhang): Das relative Kriechen liegt schon unter dem Eigengewicht der Proben (2 % der Bruchspannung) in der gleichen Größenordnung wie z.B. bei einem Belastungsgrad von 20-30 %. Daß eine solche untere "Kriechgrenze" wahrscheinlich gar nicht besteht, wird auch durch die Ergebnisse dynamischer Untersuchungen bestätigt [330].

Linearitätsgrenze/Fließgrenze

=====

Die Höhe der aufgebrachten Spannung beeinflusst das Kriechverhalten von Vollholz und Holzwerkstoffen ganz entscheidend. Mit der Spannung nimmt das absolute Kriechen zunächst proportional, oberhalb einer vom physikalischen Zustand und der Belastungszeit abhängigen "Grenzspannung" jedoch überproportional zu. Trägt man anstelle der absoluten Kriechverformungen (wie in Bild 6) den relativen Kriechfaktor über der Zeit auf, so ist der Verlauf der Kriechkurven bis zu dieser "Grenzspannung" praktisch gleich, bei höherem Belastungsgrad liegen die relativen Kriechkurven signifikant höher. Diese Grenze des lastproportionalen Kriechens - häufig auch als "Linearitätsgrenze" bezeichnet - ist für die praktische Bemessung von großer Bedeutung, da oberhalb dieser Grenzbelastung mit überproportional verstärktem Kriechen und erhöhter Kriechgeschwindigkeit gerechnet werden muß, die nach entsprechender Belastungsdauer unter Umständen sogar zum Bruch während der baupraktisch üblichen Lebensdauer führen kann.

In der Literatur konnte in Biege-, Zug- und Druckversuchen sowohl ein linearer als auch ein nichtlinearer Verformungsanteil nachgewiesen werden. Die Zahlenangaben über diese "Linearitätsgrenze", d.h. den Übergang vom linear zum nichtlinear viskoelastischen Verformungsverhalten, schwanken je nach Beanspruchungsart und Feuchtigkeitsgehalt bei Vollholz in einem weiten Bereich zwischen ca. 30 % und 84 % der statischen Kurzzeitfestigkeit [92, 102, 119, 152, 223, 248, 251, 265, 267, 307, 374]. Aber auch bei gleicher mechanischer und

klimatischer Beanspruchung gehen die Zahlenwerte noch relativ weit auseinander. Entsprechend umstritten ist daher bis heute diese Grenze des linear-viskoelastischen Verhaltens und damit der Gültigkeit des Boltzmann'schen Überlagerungsprinzips für das zeitabhängige Verformungsverhalten von Holz [18, 248, 265, 267, 307, 374].

Oberhalb der "Linearitätsgrenze" nimmt das Kriechen überproportional zu, den verzögert-elastischen Verformungen überlagern sich viskose, d.h. plastische Formänderungen, die sich - unter konstanten physikalischen Bedingungen - auch nach langer Entlastungszeit nicht mehr zurückbilden. Man nennt diesen Übergangsbereich zwischen linearem und nichtlinearem Kriechen daher auch "Fließgrenze", z.B. [52, 141, 150, 162, 168, 182, 263, 283, 334, 372]. Diese Grenze bleibender Verformung wird auch als derjenige maximale Belastungsgrad definiert, bis zu dem die Kriechgeschwindigkeit mit der Zeit gegen Null geht, d.h. bei dem sich die Verformungen einem Endzustand nähern [167, 334]. Nach anderen Veröffentlichungen (Ivanov, zitiert in [141]) ist die Grenze des plastischen Fließens identisch mit der Proportionalitätsgrenze und gleich der Dauerfestigkeit. Entsprechend groß sind auch hier die Unterschiede in den Zahlenangaben für Vollholz (ca. 40 - 88 %).

Nach [290] ist das relative Kriechen von Vollholz parabolisch abhängig vom Belastungsgrad; der Kriechfaktor hat bei etwa 35 % ein Minimum und steigt mit ab- und zunehmendem Belastungsgrad jeweils an.

Bei Brettschichtholz bestehen im Klima 20/75 keine Unterschiede im Kriechfaktor zwischen Biegespannungen von 7 und 16 N/mm² [386].

Unter Berücksichtigung aller ausgewerteter Quellen kann man den Werkstoff Holz im Bereich der Gebrauchsspannungen, d.h. unterhalb eines Belastungsgrades von etwa 40 %, zumindest näherungsweise als einen linear-viskoelastischen Festkörper

betrachten und mit zeitabhängigen Werkstoffkennwerten beschreiben.

Bei Holzwerkstoffen gehen die Angaben über die Höhe der "Linearitätsgrenze" bzw. der "Fließgrenze" erwartungsgemäß noch weiter auseinander |52, 90, 97, 168, 284, 285, 286a|. Mit zunehmender Zerkleinerung der Holzstruktur und mit zunehmender Feuchtigkeitsbeanspruchung erhöht sich der nicht-lineare Verformungsanteil, d.h. die Grenze des linear-viskoelastischen Verhaltens erniedrigt sich. Während im trockenen Klima Grenzwerte zwischen ca. 30 % und 60 % angegeben werden, fällt die Linearitätsgrenze z.B. bei biegebeanspruchten Spanplatten im Feuchtklima 20/90 auf etwa 20 % der statischen Kurzzeitfestigkeit ab |90|.

Bei Biegeversuchen an Spanplatten im Klima 20/65 soll der Kriechfaktor mit steigendem Belastungsgrad (bis 20 %) abfallen |134|.

Eigene Auswertungen

=====

Um den für die Bemessung von Holzbauteilen wichtigen Übergangsbereich zwischen linearem und nichtlinearem Kriechen in Abhängigkeit von Materialtyp und Klimabeanspruchung nach Möglichkeit genauer als bisher zu erfassen, wurden alle verfügbaren eigenen Untersuchungen sowie die aufschlußreichsten Kriechversuche aus der Literatur einer entsprechenden Auswertung unterzogen.

In Bild 7a-e sind die Kriechfaktoren von Vollholz und Holzwerkstoffen in Abhängigkeit vom Belastungsgrad an einigen Beispielen dargestellt, und zwar Fichte (kleine fehlerfreie Proben) im Innenklima 20/55 unter Biege- (7a) und Torsionsbeanspruchung (7b), sowie - jeweils bei Biegung - Hartfaserplatten HFH im Normalklima 20/65 (7c), Baufurniersperrholz BFU-100 aus Buche (7d) und Spanplatte FP-V100, phenolharzverleimt (7e), jeweils im Wechselklima 20/95-20/25.

Kriechfaktor

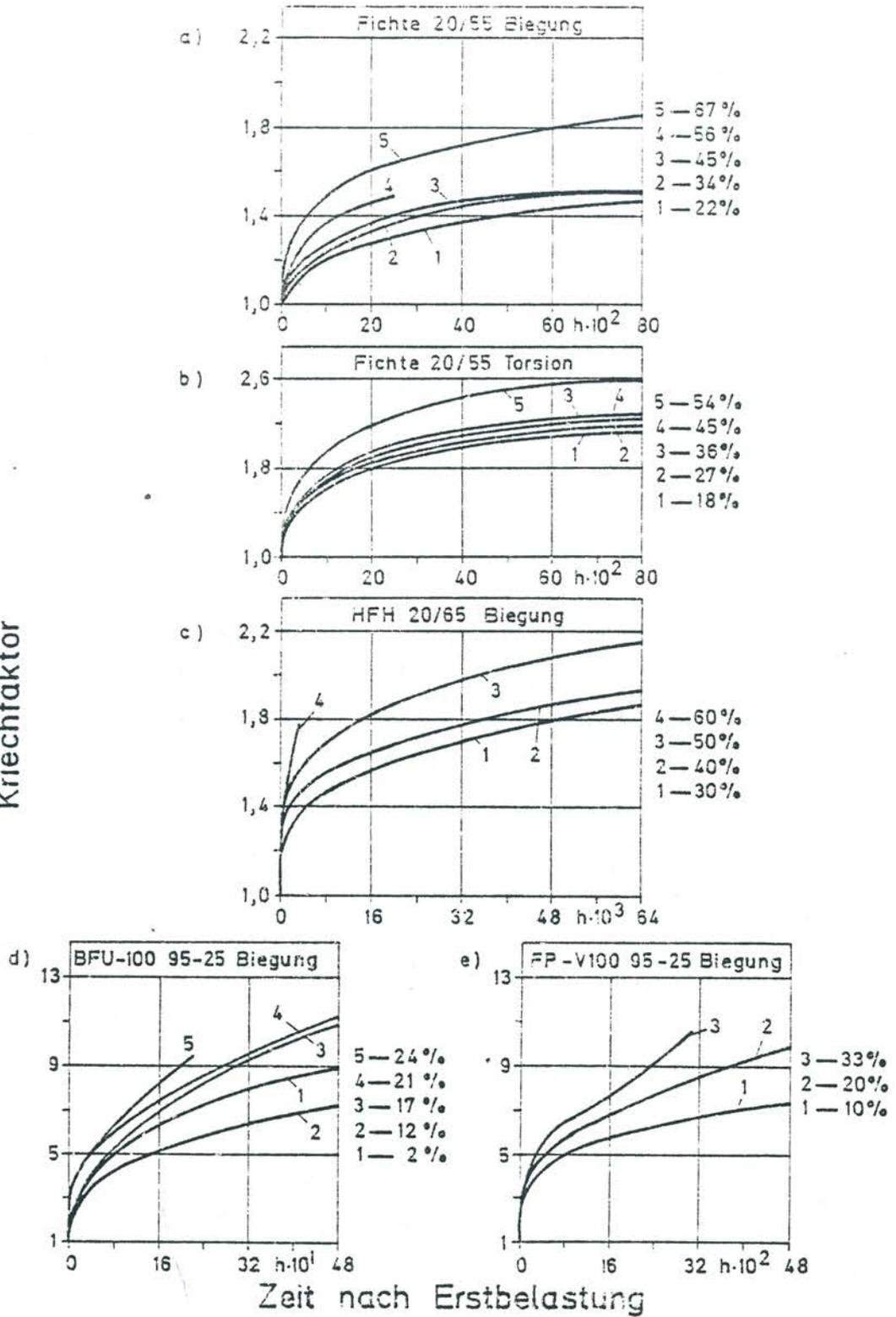


Bild 7a-e: Einfluß des Belastungsgrades bei Fichte, Buchen-Furniersperrholz (BFU-BU-100), Spanplatte (FP-V100, 3PF), Hartfaserplatte (HFH) in Abhängigkeit von der Klimabeanspruchung.

Weitere Einzelauswertungen sind in den Bildern 8a-d, 9a-d, 10a-f und 11a-e (siehe Anhang) dargestellt.

Aus den Bildern 8 und 9 geht der Einfluß des Belastungsgrades bei Fichte (fehlerfreie Proben) im Klima 20/55 hervor, und zwar sowohl unter querkraftfreier Biegebeanspruchung (Einfeldträger, stehende (8a) und liegende (8b) Jahrringe), als auch unter Biegung mit Querkraft (Durchlaufträger mit 2 Feldern, l/h jeweils ca. 23, mit stehenden (8c) und liegenden (8d) Jahrringen sowie Einfeldträger, $l/h = 10$, mit stehenden (9a) und liegenden (9b) Jahrringen) hervor; außerdem sind die Kriechfaktoren unter Zug- (9c) und Druckbeanspruchung (9d) mit angegeben.

Bei Fichtenholz ist demnach im trockenen Innenraumklima, unabhängig von der Beanspruchungsart, bis zu einem Belastungsgrad von etwa 50 % noch kein gesicherter Unterschied in den Kriechfaktoren zu erkennen, d.h. die Kriechverformungen sind dem aufgebrachten Spannungsniveau proportional. Der "Sprung" im Kriechverlauf des Einfeldträgers mit stehenden Jahrringen (BG = 50 %) sowie das beginnende "Tertiärkriechen" beim Einfeldträger mit liegenden Jahrringen (BG = 40 %) sind auf technische Störungen (Kippen der 30 mm hohen und 15 mm breiten Träger) zurückzuführen. Die Schwankungen im Verlauf der Kriechkurven beruhen auf Klimaschwankungen; die Holzfeuchtigkeit der unbelasteten Vergleichsproben bewegte sich im Laufe der 8-11jährigen Versuche zwischen ca. 8 % und 14 %. Die Kriechversuche unter Zug- und Druckbeanspruchung konnten aufgrund der unsicheren DMS-Messungen nicht über die gesamte Versuchszeit ausgewertet werden.

In Bild 10 ist der Einfluß des Belastungsgrades auf das Kriechverhalten verschiedener Holzwerkstoffplatten unter Biegebeanspruchung im Konstantklima 20/75 bzw. 20/65 dargestellt. Daraus folgt, daß sowohl bei Bau-Furniersperrholz (10a),

als auch bei rohen und furnierten Flachpreßplatten (10b, d, e), als auch bei einer zementgebundenen Spanplatte (10c) zumindest bis zu einem Belastungsgrad von etwa 45 % noch nicht mit überproportionalen Kriechverformungen zu rechnen ist (die Versuchswerte sind [391] entnommen). Bei den ausgewerteten Hartfaserplatten-Versuchen [97] deutet sich dagegen ein überproportionales Kriechen bereits ab einem Belastungsgrad von ca. 30 % an (7c bzw. 10f).

Der Einfluß des Belastungsgrades im definierten, relativ scharfen Wechselklima geht aus Bild 11 hervor. Hier treten überproportionale Kriechverformungen (unter Biegebeanspruchung) erwartungsgemäß schon bei geringerem Belastungsgrad auf; die Unterschiede zwischen Vollholz und den verschiedenen Holzwerkstoffen kommen deutlicher zutage: Bei Buchenvollholz (Bild 11a) und bei Furniersperrholz aus Buche (Bild 11b) ist im untersuchten Spannungsbereich (bis ca. 32 % bzw. 24 %) noch kein gesicherter Einfluß des Belastungsgrades erkennbar.

Bei Bauspanplatten FP-V100 (Bild 11c und 11d, aus [95] entnommen), ist der Belastungseinfluß unter der gewählten, scharfen Wechselklimabeanspruchung (siehe Abschnitt 3.4.1) stark abhängig von der Hygroskopizität und damit vor allem von der Verleimungsart der Platten: bei der relativ wenig feuchtigkeitsempfindlichen, modifizierten Harnstoff-Melamin-Mischharzverleimung (8HMF) ist bis 33 % noch kein Einfluß des Belastungsgrades nachweisbar. Dagegen deutet sich bei der stärker hygroskopischen phenolharzverleimten Platte (3PF) schon bei einem Belastungsgrad von 20 % ein überproportionales Kriechen an. Diese Unterschiede zwischen verschiedenen verleimten Spanplatten werden im natürlichen Außenklima (siehe Bild 18a-d, Teil B) bestätigt.

Die ausgewerteten Kriechversuche an Hartfaserplatten [389] lassen dagegen bis 30 % der Bruchspannung noch keinen gesicherten Einfluß erkennen (Bild 11e).

3.3.2 Wechsellast

Holztragwerke stehen im allgemeinen nicht während ihrer gesamten Lebensdauer ununterbrochen unter der maximal zulässigen Dauerlast. Die Gesamtbelastung setzt sich vielmehr zusammen aus ständigen Lasten (Eigengewicht, längerfristig wirkenden Nutzlasten) sowie aus relativ kurzfristig wirkenden Verkehrslasten (wie z.B. Schnee), deren Anteil und Wirkungsdauer an der Gesamtbelastung je nach Bauteil, geographischer Lage (Schnee) usw. erheblich schwanken kann. In der Praxis ist daher ein ständiger Wechsel zwischen Perioden höherer und verringerter Belastung die Regel. In den Zeiten niedrigerer Teilbelastung können sich die Formänderungen teilweise wieder zurückbilden. Die Größenordnung der dabei eintretenden Erholung ist für eine wirtschaftliche Bemessung der Bauteile besonders interessant, um sie nicht für die unter der Maximalbelastung zeitweilig auftretende höchste Verformung dimensionieren zu müssen.

In der Literatur werden zwar wiederholt Kriechversuche unter zyklisch wechselnder Beanspruchungshöhe beschrieben; die meisten betreffen jedoch Versuche mit relativ kurzen Zykluszeiten (Minuten bis Stunden), z.B. [149, 150, 186, 224, 237, 271, 272], und sind daher unter dem Aspekt eventueller bleibender Kriechverformungen weniger interessant. Versuche mit längeren Be- und Entlastungsperioden (Tage bis Wochen), die für eine Beurteilung des Einflusses von nur zeitweise wirkenden Nutz- oder Verkehrslasten wichtiger sind, finden sich nur relativ selten [95, 151, 201, 230, 373]. In 3 Arbeiten wird über Wechsellastversuche an Holzbauteilen berichtet [94, 256, 386].

Die Kriechverformungen von Vollholz unter Wechsellast lassen sich ebenfalls in 3 Kriechperioden (analog Bild 5) einteilen [373]. Die Bruchzeit ist etwa doppelt so lange wie bei Konstantlast unter dem gleichen Belastungsgrad; die elastische

Durchbiegung bei Lastwechsel nimmt im tertiären Kriechbereich, d.h. vor Bruchbeginn, zu |373|.

Nach |185| sollen Zwischenentlastungen das Kriechen bei Wiederbelastung bei Hartfaserplatten nicht verringern. Die resultierende Verformung bei vielen Be- und Entlastungsperioden gleicher Dauer soll die Hälfte der Verformung unter konstanter Maximallast betragen |186|.

Um zu überprüfen, inwieweit sich periodische Teil-Entlastungen auf das Kriechverhalten auswirken, wurden mehrere in Karlsruhe durchgeführte Wechsellastversuche an Vollholz und an Spanplatten unter Biegebeanspruchung einer entsprechenden Auswertung unterzogen (siehe auch |95, 201|). Die Ergebnisse sind in Bild 12a-c am Beispiel des Kriechverhaltens von Vollholz und Spanplatten unter zyklisch wechselnder Biegebeanspruchung dargestellt und mit den Kriechformänderungen unter entsprechenden Konstantlasten verglichen. Der Belastungsgrad wechselte bei den Fichten-Proben (Klima 20/55) jeweils wöchentlich zwischen 7 % und 14 % bzw. zwischen 14 % und 28 % (Bild 12a), bei den Spanplatten FP-V100(3PF) im natürlichen Außenklima unter Dach (Bild 12c) sowie im verschärften Wechselklima 20/95 - 20/30 (12b) alle 3 Wochen zwischen 20 % und 10 % bzw. zwischen 33 % und 10 %. Die Spanplattenversuche im Außenklima erfolgten an 300 mm breiten Plattenabschnitten, alle übrigen Versuche an schmalen Biegestäben. Die Spanplattenbilder im Außenklima enthalten neben den Kriechkurven unter konstanter Spannung (20 % und 33 %) nur die am Ende der jeweiligen Hochlaststufe gemessenen Durchbiegungen.

Weitere Einzelauswertungen aus diesen Wechsellastversuchen sind in den Bildern 13-18 (siehe Anlage) wiedergegeben.

Bild 13a-e enthält die absoluten Durchbiegungen fehlerfreier Fichtenträger (Einfeldträger, querkraftfreier Bereich, Jahrringlage stehend und liegend) im Innenklima 20/55. Der Belastungsgrad betrug bei den Trägern mit stehenden Jahrringen 6/12 % sowie 12/24 %, bei liegenden Jahrringen 7/14 % bzw.

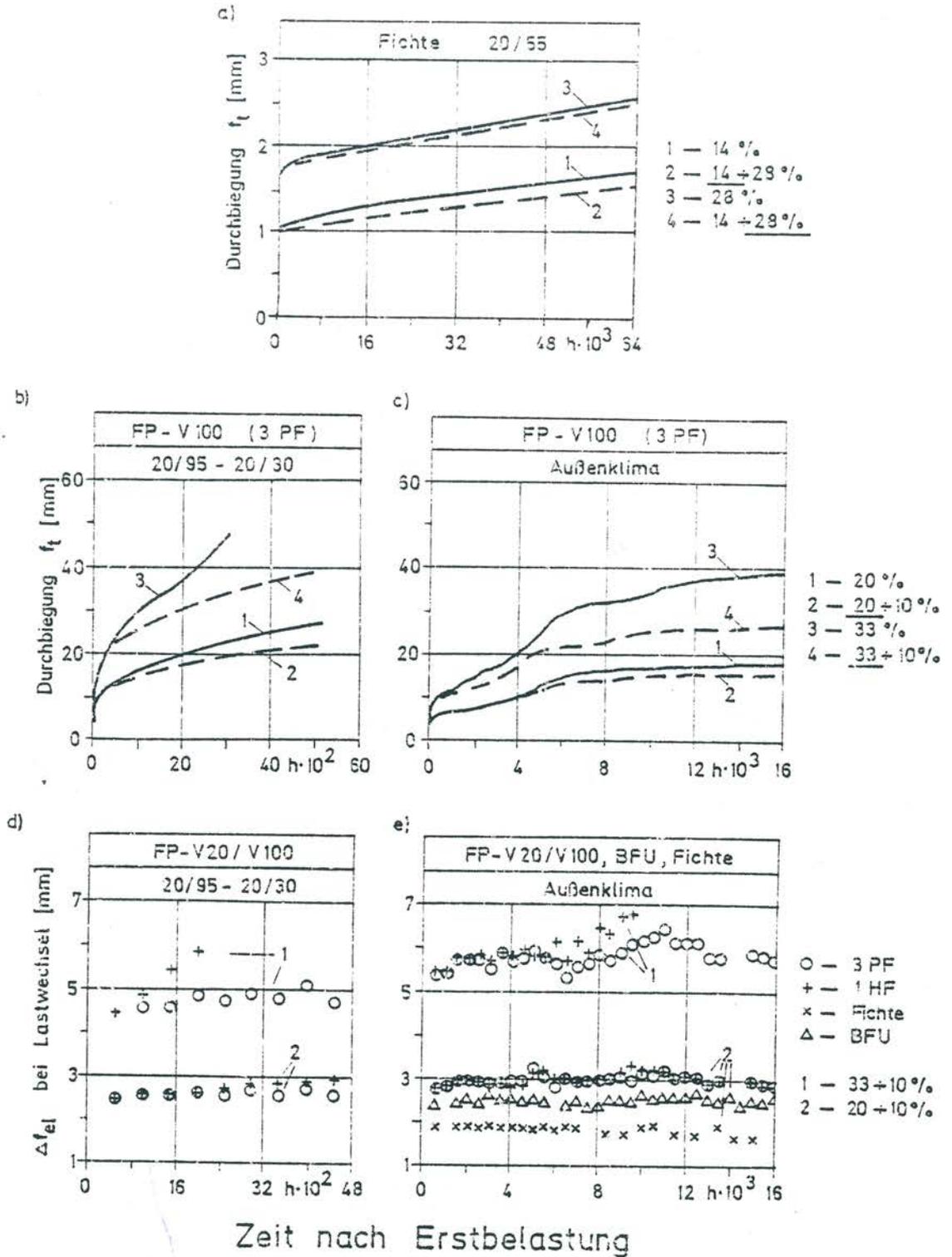


Bild 12a-e: Vergleich des Kriechverhaltens unter konstanter und zyklisch wechselnder Biegebeanspruchung von Holz (20/55) und Holzwerkstoffen (Wechsel-/Außenklima); a-c : absolute Durchbiegung f_t ; d + e; elastische Formänderung bei Lastwechsel.

14/28 %. In Bild 13e sind die Anfangsbereiche der Kriechkurven (ohne Klimaschwankungen) nochmals mit vergrößertem Zeitmaßstab aufgetragen. In Bild 14a-d sind die entsprechenden relativen Kriechkurven der betreffenden Einfeldträger aus Bild 13 dargestellt.

Aus Bild 15a-h gehen die Kriechdurchbiegungen von 4 verschiedenen verleimten, industriell hergestellten Holzspanplatten unter alle 3 Wochen wechselnder Last (20-10 % bzw. 33-10 %) im definierten Wechselklima 20/95-20/30 (3 Tage 20/95, 4 Tage 20/30, 30 Wochen Probenbreite 50 mm) hervor.

Die entsprechenden Wechsellastversuche an den selben Spanplatten (300 mm breite Biegeproben) im natürlichen Außenklima unter Dach sind Bild 16a-d zu entnehmen.

In den Bildern 12-16 sind jeweils nur die "Hüllkurven" der Wechsellastproben, d.h. die Durchbiegungen bzw. Kriechfaktoren am Ende der jeweiligen Hoch- und Niedriglaststufe, eingetragen. In Bild 17a-d wird zum Vergleich der gesamte gemessene Durchbiegungsverlauf der Wechsellastproben aufgezeichnet und mit dem Kriechen unter den betreffenden Konstantlasten verglichen; Bild 18a-d enthält die entsprechende Darstellung der Kriechfaktoren. Bei den Proben der Bilder 17 und 18 handelt es sich um Parallelproben der Prüfkörper in Bild 16; sie sind unter geringfügig milderen Klimabedingungen geprüft worden (andere geografische Lage).

Die Bilder 12-18 lassen folgendes erkennen:

Bei Vollholz (Fichte) liegen die oberen und unteren Hüllkurven der Wechsellastversuche praktisch auf dem gleichen Niveau wie die entsprechenden Konstantlastverformungen. Zumindest bei den gewählten Versuchsbedingungen hinsichtlich Zyklendauer (2 x 1 Woche) und Biegebeanspruchung (6 % bis 28 % der statischen Kurzzeitfestigkeit) tritt einerseits zwar eine volle Erholung bei Teilentlastung ein, andererseits erreichen die Formänderungen während der Hochlastperioden weitgehend wieder

diejenigen der entsprechenden Konstantlastprobe. (Der stärkere Sprung im Durchbiegungsverlauf der Probe unter 24 % Konstantlast (Bild 13c) ist auf eine größere Störung in der Klimaführung bei ca. 13000 h zurückzuführen, die auch bei den übrigen Fichtenproben erkennbar wird). Die entsprechende Darstellung der Kriechfaktoren (Bild 14) bestätigt dieses Verhalten unter Wechsellast: es sind keine gesicherten Unterschiede zwischen dem relativen Kriechen der Hochlast- bzw. Niedriglastperiode und der zugehörigen Konstantlastprobe erkennbar.

Bei den Spanplatten ist dagegen zumindest im relativ scharfen Wechselklima sowie im natürlichen Außenklima mit einem andersartigen Formänderungsverhalten bei Wechsellast zu rechnen:

Im definierten Wechselklima 20/95-20/30 (Bild 15) wächst mit steigender Anzahl der Lastzyklen die Differenz zwischen der Niedriglaststufe (10 %) und der entsprechenden Konstantlastprobe 10 %; d.h. die jeweils 3-wöchigen Hochlastperioden erhöhen die nach 3 Wochen Lastabsenkung verbleibende Durchbiegung, und zwar sowohl bei 20 % als auch bei 33 % Belastungsgrad während der Hochlastperiode. Andererseits erreichen die Durchbiegungen während der Hochlastphase bei den weniger hygroskopischen, d.h. "spröderen" aminoplastverleimten Spanplatten 8HMF und 1HF jeweils wieder weitgehend die Durchbiegungen der Proben unter entsprechender Konstantlast (Bild 15a-d). Mit zunehmender Hygroskopizität der Spanplatten bewirken die Lastabsenkungen einen zunehmenden Erholungseffekt, d.h. die Durchbiegungen der Wechsellastproben liegen bei der jeweiligen Hochlastphase deutlich unterhalb der Durchbiegung der entsprechenden Konstantlastproben (Bild 15e-h). Bei der besonders alkalireichen und damit besonders hygroskopischen Phenolharzverleimung 4PF (heute nicht mehr am Markt) wird das besonders deutlich.

Es muß allerdings beachtet werden, daß das hier gewählte, relativ scharfe Wechselklima unter baupraktischen Bedingungen nicht vorkommt, und daß daher die Ergebnisse aus derartigen

Versuchen auf keinen Fall direkt, d.h. quantitativ auf praktische Verhältnisse übertragen werden dürfen. Qualitative Unterschiede und Tendenzen lassen sich unter diesen stark zeitraffenden Versuchsbedingungen jedoch gut erkennen, wie in Abschnitt 3.4.1 näher dargelegt wird.

Im natürlichen Außenklima unter Dach (Bild 16) fehlen Konstantlastversuche mit dem Belastungsgrad 10 %; daher können hier nur die oberen Hüllkurven der ebenfalls alle 3 Wochen zwischen 20 % bzw. 33 % und 10 % wechselnden Lastwechselproben mit den entsprechenden Konstantlastproben (20 % bzw. 33 %) verglichen werden. Die im definierten Wechselklima erkannten Tendenzen werden im natürlichen Außenklima bestätigt: Bei den sorptions-trägeren Spanplatten 8HMF und 1HF liegen die Durchbiegungen während der Hochlastperiode auf der gleichen Höhe wie die der entsprechenden Konstantlastproben (Bild 16a + b). Mit zunehmender Sorptionsgeschwindigkeit - bedingt durch die höhere Hygroskopizität - wird bei den Platten 3PF und vor allem bei 4PF die positive "Entlastungswirkung" der Niedriglastperioden deutlich sichtbar (Bild 16c + d), insbesondere bei dem relativ hohen Belastungsgrad von 33 %. Im Bereich der heute üblichen Gebrauchsbeanspruchungen (BG = 20 %) wird der Erholungseffekt allerdings erst bei der stark hygroskopischen Platte 4PF signifikant. In den Bildern 17 und 18 werden diese Zusammenhänge - unter etwas milderem Außenklimabedingungen - sowohl bei absoluter als auch bei relativer Darstellung der Kriechkurven bestätigt. Das relativ starke Kriechen unter konstanter Dauerlast von 33 % wird durch zwischenzeitliche Lastabsenkungen - wie sie auch beim praktischen Einsatz, z.B. in Dachschalungen, häufig vorkommen - spürbar verringert.

Elastische Formänderungen bei Lastwechsel

=====

Um zu überprüfen, in wieweit bei derartigen Wechsellastversuchen insbesondere unter verschärften klimatischen Beanspruchungen bereits irreversible Schwächungen der Werkstoffe aufgetreten sind, wurde die elastische Formänderung unmittelbar

bei jedem Lastwechsel gemessen und über der Zeit aufgetragen. Nehmen diese elastischen Formänderungsanteile mit steigender Zyklenzahl deutlich zu, so ist dies ein untrügliches Zeichen für eine beginnende irreversible Materialschwächung.

In Bild 12 d sind die elastischen Formänderungen Δf_{e1} bei Lastwechsel für 2 Spanplattentypen (1HF, 3PF) im definierten Wechselklima 20/95-20/30, in Bild 12e für diese beiden Spanplatten sowie für Fichte und Bau-Furniersperrholz BFU-100 aus Buche im natürlichen Außenklima unter Dach beispielhaft dargestellt (S. 29)

In Bild 19a-d (Anhang) sind die elastischen Formänderungsanteile weiterer Wechsellastversuche angegeben: Fichte im Klima 20/55 (19a); Fichte, Bau-Furniersperrholz BFU-100 aus Buche und aus Limba, sowie eine andere phenolharzverleimte Spanplatte FP-V100 im natürlichen Außenklima (19b); die 4 Spanplattentypen aus Bild 15 + 16 im definierten Wechselklima 20/95-20/30 (19c) und im natürlichen Außenklima (19d).

Bild 20a-d enthält die Ergebnisse der Bilder 19c + d nochmals zusammengefaßt in einem anderen Ordinatenmaßstab.

Diese Auswertung der Wechsellastversuche zeigt deutlich, daß weder bei den Fichtenproben im relativ wenig schwankenden Innenraumklima 20/55, noch bei Fichte und bei feuchtebeständig verleimten Furniersperrholz - und Spanplattenproben im natürlichen Außenklima eine Zunahme der elastischen Formänderungen bei Lastwechsel und damit eine bleibende Schwächung im Laufe der bis zu 8 Jahren Wechsellastbeanspruchung aufgetreten ist. Selbst unter relativ hoher Biegebeanspruchung (33 - 10 %) zeigen die V100-Spanplatten während 2 Jahren Außenklima noch keine Zunahme der elastischen Durchbiegung bei Lastwechsel. Lediglich die nicht feuchtebeständige, harnstoffharzverleimte Spanplatte 1HF zeigt unter der hohen Wechselbeanspruchung (33-10 %) eine deutlich zunehmende Schwächung, die nach etwa 11000h zum Bruch führte. Unter "normaler", d.h. etwa zulässiger Biegespannung (20-10 %, Bild 20b) zeigt selbst

die V20-Spanplatte nach 2 Jahren noch keine bleibende Schwächung. Das bestätigt erneut, daß der Dauerstandversuch im natürlichen Außenklima zumindest bei bisher üblichem relativ niedrigen Belastungsgrad nicht in der Lage ist, zwischen feuchtebeständigen und nicht feuchtebeständigen Spanplatten-Verleimungen zu differenzieren. Hierzu müssen die Beanspruchungen hinsichtlich Klima und maximalem Belastungsgrad entsprechend verschärft werden, um in vertretbaren Prüfzeiten zu aussagefähigen Ergebnissen zu kommen. Die hier erstmals vorgenommene Auswertung von Wechsellastversuchen hinsichtlich der elastischen Formänderungen bei Lastwechsel stellt eine hilfreiche Ergänzung der in [117] vorgeschlagenen Prüfrichtlinien zur klebstoffunabhängigen Beurteilung der Dauerhaftigkeit vor allem neuer Spanplattenverleimungen dar.

Im relativ scharfen Wechselklima 20/95-20/30 und bei relativ hoher Wechsellastbeanspruchung (33-10 %) werden dagegen außer bei der Platte 1HF auch bei den Platten 8HMF und 4PF (stark hygroskopisch) bleibende Schwächungen erkennbar; lediglich die "normale" Phenolharzplatte 3PF zeigt noch keine gesicherte Zunahme der elastischen Durchbiegungen. Unter normaler Biegebeanspruchung (20-10 %) sind nur bei der Harnstoffharzplatte deutliche Schwächungen festzustellen (Bild 20b).

3.4 Einfluß der Klimabeanspruchung

3.4.1 Einfluß der Feuchtigkeit

Das zeitabhängige Verformungsverhalten von Holz und Holzwerkstoffen wird vom Feuchtigkeitsgehalt des Umgebungsklimas je nach Art der Feuchtigkeitsbeanspruchung in unterschiedlichem Ausmaß beeinflusst.

Während z.B. bei Spanplatten im konstanten Feuchtklima erheblich höhere absolute und relative Kriechverformungen erreicht werden als im entsprechenden Wechselklima mit gleichem

Sorptionsmaximum, liegen bei Vollholz und Furniersperrholz umgekehrte Verhältnisse vor: bei ihnen beeinflußt das Wechselklima das Kriechen wesentlich stärker als das entsprechende konstante Feuchtklima [116].

Im Wechselklima wiederum hängt das Formänderungsverhalten entscheidend von der Differenz zwischen Feucht- und Trockenstufe sowie von der Dauer der einzelnen Klimazyklen ab.

Vollholz zeigt im stationären Feuchtigkeitszustand, d.h. bei konstanter Feuchte, kaum plastisches Verhalten, ähnlich wie kristalline Hochpolymere [340]. Bei Feuchteänderung wird Holz dagegen relativ stark plastisch [261]. Schon geringe Feuchteänderungen bewirken eine Zunahme der Kriechverformungen, die wesentlich größer ist als sich aus Kriechversuchen unter entsprechend erhöhter, aber konstanter Feuchte ergeben würde. Eine reine Superposition aus Zeit- und Feuchteeinfluß ist daher auf Verformungszunahmen durch Sorption unter Last nicht anwendbar [120, 254]. Derartige "mechanosorptive" Vorgänge sind keine Zeitfunktion, sondern eine Feuchteänderungsfunktion [122], die zumindest bei relativ geringen Feuchtigkeitsamplituden im Wechselklima durch eine Potenzfunktion ($a \cdot t^b$) gut angenähert werden kann. Nach [385] sind diese "mechanosorptiven" Vorgänge noch nicht eindeutig erforscht.

Mit steigender Feuchtigkeitsamplitude nimmt das relative Kriechen zu, z.B. von $\epsilon_t/\epsilon_0 = 1,5$ ($\Delta u = 0 \%$) auf 6,5 ($\Delta u = 16 \%$) bei Buche unter Querkzug [304]. Der Sorptionseinfluß auf das Kriechverhalten von Holz steht in einem linearen Zusammenhang mit dem Ausmaß der Feuchtigkeitsänderung [127, 269, 341], ist aber bei gleicher Feuchtigkeitsamplitude unabhängig von der jeweiligen Lage im hygroskopischen Bereich, von der Sorptionsgeschwindigkeit, von vorherigem Kriechen bei konstantem Feuchtigkeitsgehalt, und von der Temperatur [304]. Die Geschwindigkeit der Formänderungen ist aber von der Geschwindigkeit der Feuchtigkeitsänderungen abhängig.

Unabhängig von der Belastungsart läßt sich bei wiederholten Befeuchtungs-Trocknungs-Zyklen feststellen, daß die Formänderungen von Holz bei faserparalleler Belastung während der Trocknungsperiode stark zunehmen, bei der anschließenden Befeuchtung jedoch je nach Belastungsgrad zunächst mehr oder weniger deutlich abnehmen. Dieses "Kriechphänomen" wurde in zahlreichen Untersuchungen beobachtet und auf sehr verschiedene Weise zu deuten versucht, z.B. in [13, 89, 105, 109, 116, 121, 127, 137, 139, 145, 212, 265, 300, 338]. Der Einbau der Wassermoleküle in die Molekularstruktur der Cellulose scheint hierbei eine wesentliche Rolle zu spielen. Eine gute, wenn auch noch nicht lückenlose Erklärung liefern die Überlegungen in [330], basierend auf der Ontogenese der Zellwand.

Die Summe der Formänderungen bei stufenweiser Sorption entspricht etwa der Verformung, die man erhält, wenn die gesamte Feuchteänderung in einem Schritt erfolgt. Feuchtigkeitsänderungen oberhalb des Fasersättigungsbereiches beeinflussen das Kriechverhalten nicht mehr wesentlich. Bei Desorption nimmt der Sorptionseinfluß mit steigendem Belastungsgrad ab, bei Adsorption dagegen zu [304].

Mit dem Einfluß konstanter, definiert oder natürlich wechselnder Feuchtigkeit auf das Langzeitverhalten von Holz befaßt sich noch eine Vielzahl weiterer Arbeiten, z.B. [9, 10, 29, 37, 60, 68, 113, 162, 177, 178, 194, 231, 236, 269, 281, 306, 351].

Über den Feuchtigkeitseinfluß auf das Kriechverhalten von Holzwerkstoffen sind vor allem in den letzten 10 Jahren zahlreiche grundlegende Arbeiten veröffentlicht worden. Der Feuchteeinfluß bei Furniersperrholz wird z.B. in [116, 176, 186, 284-286a, 327, 328, 385] untersucht, bei Spanplatten in [12, 41, 47, 52, 60, 69, 95, 113, 116, 124, 134, 137, 160, 166, 176, 180, 186, 230, 247, 258], bei Holzfaserplatten (HFH) in [125, 186, 259, 271, 300, 337]. Dagegen liegen über mittelharte Holzfaserplatten (HFM) noch keine diesbezüglichen Arbeiten vor.

Danach haben die unterschiedlich starke Auflösung der gewachsenen Holzstruktur sowie die zusätzliche Struktur-Komponente "Leimfuge" bei den Holzwerkstoffen ein verändertes Kriechverhalten zur Folge. Das relative Kriechen ist meist erheblich stärker feuchtigkeitsabhängig als bei Vollholz. Allgemein kann mit zunehmendem Auflösungsgrad der Holzstruktur und der dabei gleichzeitig zunehmenden Anzahl örtlich begrenzter, immer kleiner werdender Leimfugen ein zunehmender Feuchtigkeits-einfluß auf das Kriechverhalten festgestellt werden. Holz-faserplatten kriechen daher in der Regel deutlich stärker als Spanplatten und Sperrholz [169, 176, 186, 271, 272]. Die Unterschiede zwischen Spanplatten und Sperrholz sind in starkem Maße von der Spanstruktur und der Verleimung der Spanplatten abhängig (siehe Abschnitt 5). Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, daß das feuchtigkeitsabhängige Kriechen von Spanplatten bei entsprechend großflächigen Spänen mit hohem Schlankheitsgrad mindestens ebensogut, z.T. sogar besser sein kann wie bei Furniersperrholz, z.B. [116, 126, 176].

Als eine entscheidende Einflußgröße hinsichtlich des Kriechverhaltens von Spanplatten hat sich die Hygroskopizität und damit das Sorptionsverhalten der Platten erwiesen [95, 117]; sowohl im natürlichen Außenklima als auch im definierten Wechselklima wurden stramme und hochgesicherte Korrelationen zwischen den Holzfeuchtigkeitsamplituden und den Kriechfaktoren ermittelt. Eine entsprechende Sorptionsabhängigkeit des Kriechverhaltens muß grundsätzlich auch bei anderen Werkstoffen aus Holz vorliegen.

Sehr aufschlußreiche Zahlenangaben über die jahreszeitlichen Schwankungsbereiche der Plattenfeuchtigkeit verschiedener Holzwerkstoffe in unterschiedlichen Einsatzbereichen während 2 Jahren sind in [186] angegeben und in folgender Tabelle zusammengefaßt:

Plattentyp	Feuchte-Maximum/-Minimum (%)			
	Außenklima (unter Dach)	Kriechkeller über Erdreich	Garage unbeheizt	Innen beheizt
BFU-100, 7 mm	20/11	> 36/18	20/12	11/6
FP-V20, 10 mm	15/10	> 24/17	14/10	9/6
HFM, 12 mm	14/9	22/16	14/9	7/4,5
HFH, 6,4 mm	11/7	18/13,5	10/7	6/3,5
HFE, 6,4 mm	9/6	14/11	8,5/6	5/3,5

Demnach unterscheiden sich die untersuchten Holzwerkstoffe in ihrem Sorptionsverhalten sehr stark voneinander:

Die Feuchtigkeitsamplituden liegen beim Furniersperrholz (Kiefer) je nach Klimabereich zwischen 5 % (innen, beheizt) und 9 % (Außen), bei der Spanplatte und der mittelharten Holzfaserverplatte zwischen 3 % und 5 %, bei der harten Holzfaserverplatte zwischen 2,5 % und 4 % und bei der ölgehärteten HFE sogar nur noch zwischen 1,5 % und 3 %.

Interessant ist vor allem die Beobachtung, daß zwischen der Klimabeanspruchung im umbauten, nicht beheizten Raum (Garage) und dem Außenklima unter Dach **kein** nennenswerter Unterschied bestanden hat.

Die außergewöhnlich starke Feuchtigkeitsbelastung im "Kriechkeller" unmittelbar über dem nicht durch eine Dampfsperre abgedeckten Naturboden ist auf die ständig sehr hohe relative Luftfeuchtigkeit in diesem Bereich zurückzuführen (Schwankungen der Wochenmittel in 2 Jahren nur zwischen 85 % und 95 %). Unter derart extremen Feuchtigkeitsbeanspruchungen sollten Holzwerkstoffe nicht mehr eingesetzt werden.

Über den Einfluß wechselnder Feuchtigkeitsbeanspruchung auf das Kriechverhalten von Holzverbindungen und Holzbauteilen wird in mehreren Arbeiten berichtet [36, 94, 122, 179, 205, 210, 336, 348, 360, 382]. Untersuchungen an Bodentafeln mit verschiedenen Spanplatten- bzw. Furniersperrholz-Bepunktungen ergaben, daß die relativen Kriechverformungen im Wechselklima 22/45-22/65 (je 48h, 4 Zyklen) bei Spanplatten ca. 1,5 x, bei Sperrholz ca. 2 x so groß sind wie im Konstantklima 22/50;

im Wechselklima 22/45-22/85 (je 48h) war das Kriechen bei den Spanplatten etwa 3,5 x, beim Sperrholz sogar 7 x so stark [122]. Als Ursache wird die wesentlich größere Feuchtigkeitsamplitude des Furniersperrholzes angesehen. Das gewählte Wechselklima (22/45-22/65) bewirkte etwa die gleiche Kriechgeschwindigkeit wie 1 Jahr Raumklima ($\varphi \sim 10 \dots 70 \%$, Feuchte ca. 3 ... 11 %). Weitere Ergebnisse werden in Abschnitt 6 diskutiert.

Die Größenordnung des zeitabhängigen Verformungsverhaltens von Holz und Holzwerkstoffen unter gleichzeitiger mechanischer und klimatischer Beanspruchung unter baupraktischen Bedingungen wurde bisher i.a. durch möglichst wirklichkeitsnahe Dauerstandversuche im natürlichen Außenklima an möglichst großen Prüfkörpern ermittelt. Dabei werden die Prüfstände üblicherweise im Freien aufgestellt und durch obere Abdeckung lediglich gegen unmittelbare Regen- und Sonneneinwirkung geschützt. Derartige Kriechversuche im natürlichen Außenklima unter Dach liefern zwar brauchbare Werte über die zu erwartenden Kriechverformungen und damit über die im ungünstigsten Fall bei der Bemessung entsprechender Bauteile aus diesen Werkstoffen erforderliche Abminderung der Rechenwerte (E, G). Nachteilig an derartigen Versuchen im Außenklima ist aber einerseits die relativ lange Versuchsdauer, die zur realistischen Abschätzung der auch langfristig zu erwartenden Kriechformänderungen notwendig ist (mindestens 2 Jahreszyklen); andererseits sind derartige Versuche schlecht reproduzierbar, da die jahreszeitlich bedingten Klimaschwankungen von Jahr zu Jahr erhebliche Unterschiede aufweisen können, und da der jeweilige Zeitpunkt des Versuchsbeginns die gemessenen Kriechwerte erheblich beeinflussen kann (siehe auch Abschnitte 3.4.2 und 8.3.2).

Im Zusammenhang mit der Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Spanplattenverleimungen [117] hat sich außerdem gezeigt, daß die Verleimungsbeständigkeit durch Kriechversuche an relativ

breiten Plattenabschnitten im natürlichen Außenklima in vertretbaren Zeiträumen nicht ausreichend beurteilt werden kann.

Es wurde daher versucht, durch Verlagerung der Kriechversuche in ein definiertes, reproduzierbares Laborklima, durch Verstärkung des Wirkungsgrades - ohne Überschreitung der natürlichen Klimarandbedingungen - und durch Verringerung der Probenbreite die Kriechformänderungen soweit zu beschleunigen und zu verstärken, daß eine bessere Differenzierung der verschiedenen Werkstoffe aus Holz bzw. ihrer Verleimungen hinsichtlich ihres Kriechverhaltens möglich wird [95, 116, 117]. Bisher fehlt jedoch eine umfassende vergleichende Gegenüberstellung derartiger natürlicher Außenklima- und definierter Laborklimabeanspruchungen.

Im Folgenden werden daher entsprechende Vergleichsversuche für Vollholz, Baufurniersperrholz und verschiedenen verleimte Holzspanplatten dargestellt und bezüglich ihrer zeittraffenden Wirkung beurteilt.

3.4.1.1 Vergleich des Kriechens im natürlichen Außenklima und im definierten Laborklima

In Bild 21 ist der Einfluß unterschiedlicher Klimabeanspruchung auf das Kriechverhalten von Vollholz (Buche), Bau-Furniersperrholz (BFU-BU100) sowie einer phenolharzverleimten V100-Spanplatte unter Biegebeanspruchung beispielhaft dargestellt.

Um die sehr unterschiedlichen Beanspruchungszeiten besser vergleichbar zu machen, wurde hier eine logarithmische Darstellung der Zeit- und der Verformungsachse gewählt. Dem Kriechen breiter Plattenabschnitte im natürlichen Außenklima unter Dach - dem ungünstigsten praktischen Beanspruchungsfall für Holzwerkstoffe in den nach DIN 68 800 Teil 2 zugelassenen Anwendungsbereichen - sind dabei die Kriechfaktoren schmaler Biegestäbe aus demselben Versuchsmaterial im Normalklima 20/65, im definierten Feucht- (20/95) und Wechselklima (20/95-20/25) gegenübergestellt.

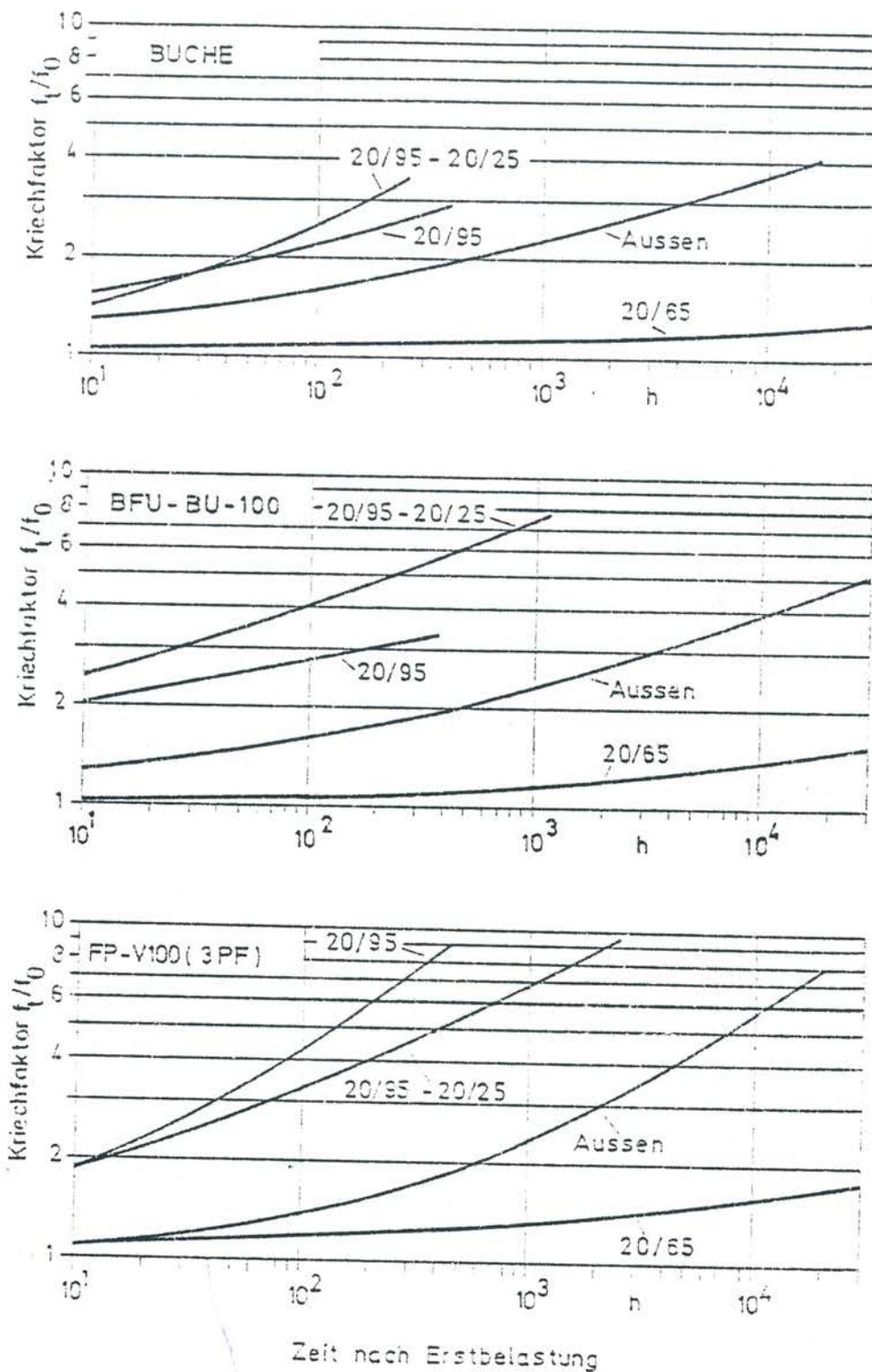


Bild 21: Einfluß der Klimabeanspruchung bei Vollholz, Furniersperrholz und Spanplatte unter Biegebeanspruchung

In den Bildern 22-24 sind entsprechende Vergleiche für zahlreiche weitere Werkstoffe aus Holz dargestellt (siehe Anhang). Außer den Meßwerten sind die jeweiligen Ausgleichsfunktionen mit eingezeichnet (Funktion (3), siehe Abschnitt 8.2).

Bild 22a zeigt die Ergebnisse von Vollholzproben, wobei im Außenklima Fichtenholz unter wöchentlich zwischen 8 % und 14 % wechselndem Belastungsgrad, für die anderen Klimabeanspruchungen Buche (unter konstanter Belastung) ausgewertet wurden. Der Kriechfaktor von Bau-Furniersperrholz BFU-BU-100 aus Buche (Stabachse parallel bzw. quer zur Faserrichtung der Deckfurniere) ist in Bild 22b bzw. 22c dargestellt. Bei den Furnierplatten wurde zusätzlich eine Versuchsreihe mit milderem Wechselklima 20/80-20/45 mit ausgewertet.

Daraus folgt, daß sowohl bei Vollholz als auch bei Furniersperrholz die Kriechverformungen im Wechselklima 20/95-20/25 etwa doppelt so groß sind wie im entsprechenden konstanten Feuchtklima 20/95. Im natürlichen Außenklima ist das Kriechen wesentlich geringer; allerdings werden hier deutliche Unterschiede zwischen Vollholz einerseits und Furniersperrholz andererseits erkennbar:

Der Kriechfaktor erreicht bei Fichte auch nach ca. 7 Jahren Außenklima (Wechselast) nur knapp 3,0; bei Buchen-Sperrholz liegen die Werte nach ca. 3 Jahren bei 6,0 (||) bzw. - bei knapp 5,0 (!). Nahezu identische Kriechfaktoren wie im Außenklima ergeben sich bei Sperrholz in der untersuchten Zeitspanne im Wechselklima 20/80-20/45 (je 24h). Im konstanten Normalklima 20/65 ist das Kriechen vergleichsweise gering: Die Kriechfaktoren nach mehr als 10 Jahren Dauerlast liegen bei Vollholz etwa bei 1,5, bei Sperrholz knapp unter 2,0 (die Erhöhung der beiden letzten Meßwerte ist auf eine Klimastörung zurückzuführen).

In Bild 23 sind die entsprechenden Kriechkurven von verschiedenen industriell hergestellten, phenolharzverleimten Holzspanplatten FP-V100 im natürlichen Außenklima, im Wechsel- und im Feuchteklima aufgetragen. Die beiden 19 mm Platten (3PF und 4PF, Bild 23a und 23c) sind mit verschiedenen Phenolharzen mit sehr unterschiedlichem Alkaligehalt hergestellt worden

(Versuchswerte aus [95] entnommen), die 35 mm "Dachplatte" 3PF/G ist wie 3PF verleimt, enthält aber zusätzlich ein Holzschutzmittel [117]. Die Kriechversuche wurden im Außen- und Wechselklima stets, im Feuchtklima 20/95 teilweise mit 2 Belastungsgraden (20 % und 33 %) durchgeführt.

Bild 24 enthält die entsprechenden Kriechkurven von einer 19 mm (24a) und einer 36 mm (24b) dicken Holzspanplatte mit verschiedenen modifizierten Harnstoff-Melamin-Mischharzverleimungen (8HMF aus [95], 11 HMF aus [117]), sowie einer 19 mm dicken, harnstoffharzverleimten V20-Spanplatte (24c, 1HF aus [95]); auch hier handelt es sich ausschließlich um Industriepplatten.

Die Bilder 23 und 24 bestätigen, daß bei Spanplatten - bedingt durch die stärkere Auflösung der Holzstruktur und die nicht mehr vollflächigen Leimfugen - das konstante Feuchtklima 20/95 eine erheblich härtere Klimabeanspruchung darstellt als das Wechselklima mit gleichem Sorptionsmaximum. Das Kriechen im Außenklima ist auch bei Spanplatten wesentlich geringer als im definierten Wechselklima mit entsprechenden Klimarandbedingungen.

Je nach Plattentyp und Verleimung liegt der Kriechfaktor der Spanplatten nach 2 Jahren Dauerlast im Außenklima zwischen etwa 3,0 und 10,0, im definierten Wechselklima (30 Wochen) zwischen etwa 6,0 und 18,0. Auf die Ursachen dieser Unterschiede wird in Abschnitt 5.2 näher eingegangen.

Mit Verringerung der Probenbreite (erhöhter Schmalflächenanteil) und Erhöhung der Anzahl und Frequenz der Klimawechsel im definierten Wechselklima wird gegenüber der Beanspruchung breiter Proben im natürlichen Außenklima eine wesentliche Beschleunigung und Verstärkung der Kriechformänderungen und damit eine beträchtliche Verschärfung der Dauerstandversuche erreicht. Die Erhöhung des Wirkungsgrades gegenüber praktischen Einsatzbedingungen erfolgte lediglich in Form einer Zeitraffung, nicht jedoch durch Verschärfung der Klimarandbedingungen, die in den Anwendungsbereichen der Holzwerkstoffklassen 100 und 100G durchaus vorkommen können.

3.4.1.2 Zeitraffer-Wirkung verschiedener Klimabeanspruchungen

Das Ausmaß dieses Zeitraffer-Effektes ist je nach Werkstoff und Plattentyp verschieden. Wertet man die Bilder 22-24 z.B. dahingehend aus, daß man die erforderliche Belastungsdauer bis zum Erreichen eines bestimmten Kriechfaktors ermittelt, und diese Zeiten für verschiedene Klimabeanspruchungen miteinander vergleicht, so läßt sich die zeitraffende Wirkung anschaulich in Zahlen ausdrücken: In Tabelle 2 sind die entsprechenden Zeitvielfachen bis zum Erreichen der Kriechfaktoren

Tabelle 2: Vergleich der erforderlichen Belastungsdauer, ausgedrückt als Zeitvielfaches, bis zum Erreichen eines bestimmten Kriechfaktors f_t/f_o im natürlichen Außenklima, bezogen auf das Wechselklima 20/95-20/25; Breite der Proben im Außenklima 300-400 mm (Fichte 190 mm), im Wechselklima 30-50 mm; Belastungsgrad ca. 20 % (in Klammern 33 %).

Material (Dicke)	Zeitvielfache zum Erreichen von $f_t/f_o =$			
	3	4	5	\bar{x}
Buche/Fichte (15 mm)	500	1)	1)	500
BFU-BU-100 (10 mm)	107	110	114	110
BFU-BU-100 ⊥ (10 mm)	53	91	150	98
FP-V100 3PF (19 mm)	65(28)	40(21)	30(18)	45(22)
FP-V100 3PF/G (35 mm)	236(177)	122(120)	74(82)	144(126)
FP-V100 4PF (19 mm)	27(15)	22(13)	19(12)	23(13)
FP-V100 8HMF (19 mm)	18(21)	15(15)	13(13)	15(16)
FP-V100 11HMF (36 mm)	80(115)	39(72)	24(50)	48(79)
FP-V20 1HF (19 mm)	21(24)	17(20)	14(22)	17(22)

1) Im Außenklima während Versuchsdauer (7 Jahre) nicht erreicht.

$f_t/f_o = 3, 4$ und 5 für Vollholz, Furniersperrholz und verschiedene Spanplatten zusammengefaßt. Ein Zeitvielfaches von 500 bedeutet z.B., daß zur Erreichung des betreffenden Kriechfaktors im Außenklima die 500 fache Belastungsdauer benötigt wird wie im Wechselklima $20/95-20/25$; oder - anders ausgedrückt - der Zeittraffereffekt in diesem definierten Wechselklima verkürzt die erforderliche Belastungszeit für eine bestimmte Kriechverformung auf $1/500$ der Zeit im natürlichen Außenklima.

Mit zunehmendem Kriechfaktor, d.h. mit steigender Belastungsdauer, wird die zeittraffende Wirkung des definierten Wechselklimas gegenüber dem natürlichen Außenklima bei Furniersperrholz und besonders bei Vollholz noch verstärkt, bei Spanplatten dagegen abgemindert. Das ist die Folge der unterschiedlichen Steigung der Ausgleichsfunktion bei verschiedener Klimabeanspruchung: Im definierten Wechselklima ist die Steigung bei Vollholz und Sperrholz i.a. größer, bei Spanplatten kleiner als im Außenklima.

Bei den ausgewerteten Versuchen betragen die durchschnittlichen Zeitvielfachen bei Vollholz etwa 500 und mehr, bei Furniersperrholz aus Buche etwa 100 ; bei Spanplatten schwanken diese Zeittraffer-Werte je nach Plattentyp, Dicke und Verleimung zwischen etwa 15 und 150 .

Diese relativ großen Unterschiede lassen sich wie folgt erklären: Bei den schmalen Biegestäben wird der Einfluß der Schmalflächen (wesentlich höhere Sorptionsgeschwindigkeit als durch die dichteren Oberflächen) mit zunehmender Plattendicke immer größer; damit muß sich zwangsläufig die zeittraffende Wirkung des definierten Wechselklimas bei den 35 mm bzw. 36 mm dicken Plattentypen 3PF/G bzw. 11HMF (Breite jeweils 30 mm) gegenüber den 19 mm dicken Platten (Breite 50 mm) wesentlich verstärken. Ein weiterer Grund für die unterschiedliche Zeittraffung bei den untersuchten Spanplatten liegt in der sehr

unterschiedlichen Hygroskopizität und dem daraus resultierenden Sorptionsverhalten der Platten bzw. ihrer Verleimungen; die beschleunigende Wirkung des Wechselklimas ist bei den weniger hygroskopischen, aminoplastverleimten Spanplatten (1HF, 8HMF) erwartungsgemäß wesentlich geringer als bei der phenolharzverleimten Platte 3PF (die extrem hygroskopische Type 4PF kann hier außer Betracht bleiben; sie wurde nur zu Vergleichszwecken in die Untersuchungen [95] mit einbezogen). Weitere Ursachen für das unterschiedliche Kriechverhalten der verschiedenen Spanplatten werden in Abschnitt 5.2 diskutiert.

Der Einfluß des Belastungsgrades in Tabelle 2 läßt im untersuchten Bereich noch keine eindeutige Tendenz erkennen. Bei den phenolharzverleimten Spanplatten scheint die zeitraffende Wirkung des Wechselklimas mit höherem Belastungsgrad abzunehmen, bei den aminoplastverleimten Platten dagegen zuzunehmen.

Unter Berücksichtigung dieser Einflußfaktoren läßt sich zusammenfassend feststellen, daß die Kriechformänderungen von Holzspanplatten nach 1-2 Jahren im natürlichen Außenklima (breite Plattenabschnitte) im definierten Wechselklima 20/95-20/30 (30 Zyklen à 1 Woche, schmale Proben) je nach Plattentyp und Verleimung bereits nach 4-6 Wochen, im konstanten Feuchtklima 20/95 sogar schon nach 3-12 Tagen erreicht werden.

3.4.1.3 Verstärkungsgrad unterschiedlicher Klimabeanspruchungen

Vergleicht man in den Bildern 22-24 die Kriechfaktoren nach einer bestimmten Belastungsdauer bei unterschiedlicher Klimabeanspruchung miteinander, erhält man zusätzliche Erkenntnisse über die jeweilige Verstärkung des Wirkungsgrades:

In Tabelle 3 ist das Verhältnis der Kriechfaktoren im definierten Wechselklima und im natürlichen Außenklima nach einer Belastungsdauer von 100h, 1000h und 10000h angegeben, wobei das relative Kriechen im Außenklima jeweils gleich 1 gesetzt wird.

Tabelle 3: Verhältnis des relativen Kriechens im Wechselklima 20/95-20/25, bezogen auf natürliches Außenklima; Belastungsgrad BG = 20 %; Probenbreite im WK 30-50 mm, im Außenklima 300-400 mm (Fichte 190 mm)

Material	Verhältnis der Kriechfaktoren f_t/f_o nach			
	10^2	10^3	$10^4 h$	\bar{x}
Buche/Fichte	1,5	2,0	3,1	2,2
BFU-BU-100	2,5	3,1	3,6	3,1
BFU-BU-100 ↓	1,6	2,8	5,4	3,3
FP-V100 (3PF)	2,7	3,2	2,7	2,9
FP-V100 (3PF/G)	3,3	3,9	3,2	3,5
FP-V100 (4PF)	2,5	3,2	3,0	2,9
FP-V100 (11HMF)	2,5	2,9	2,5	2,6
FP-V100 (8HMF)	1,5	1,9	2,3	1,9
FP-V20 (1HF)	2,0	2,9	2,9	2,6

Tabelle 4: Vergleich der Kriechfaktoren breiter Biegeproben im natürlichen Außenklima (unter Dach) mit denen schmaler Biegestäbe im definierten Wechselklima; Mittelwerte aus dem Belastungsdauer-Bereich 100h bis 10000h; Belastungsgrad ca. 20 %

Material	Klima - Vergleich (in () Probenbreite in mm)	Verhältnis der Kriechfaktoren	Ausgewertete Quelle
Fichte/Buche	Außen(190): 20/95-20/25(30) je 24h	1:2,2	116
BFU-BU 100	Außen(400): 20/95-20/25(30) je 24h	1:3,1	116
BFU-BU 100	Außen(200): 20/95-20/25(30) je 24h	1:3,5	116
FP-V100 (PF)	Außen(300): 20/95-20/30(50) 3d / 4d	1:3,1	95
FP-V100 (HMF)	Außen(300): 20/95-20/30(50) 3d / 4d	1:2,3	95
FP-V20 (HF)	Außen(300): 20/95-20/30(50) 3d / 4d	1:2,6	95

Die durchschnittliche Verstärkungswirkung des Wechselklimas im Lastdauer-Bereich bis 10 000h (ca. 1,1 Jahre) ist in Tabelle 4 für Vollholz, Sperrholz und die verschiedenen Spanplatten-Verleimungen nochmals zusammengefaßt.

Der Verstärkungsgrad der Kriechversuche an schmalen Biegestäben im definierten Wechselklima gegenüber dem Kriechen breiter Proben im natürlichen Außenklima unter Dach liegt demnach je nach Werkstoff zwischen ca. 2,0 und 3,5. Bei den Spanplatten wird auch hier der Einfluß des Schmalflächenanteils und des Sorptionsverhaltens (s.o.) deutlich.

Für überschlägige Umrechnungen kann der mittlere Verstärkungsgrad bei Vollholz mit 2,0, bei Furniersperrholz mit 3,0 und bei Holzspanplatten mit 2,5 angenommen werden.

Weitere Vergleiche der Kriechfaktoren von breiten Proben verschiedener, harnstoffharzverleimter V20-Spanplatten bei unterschiedlicher Klimabeanspruchung sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Demnach sind die Kriechfaktoren im natürlichen Außenklima

<u>Tabelle 5:</u> Vergleich der Kriechfaktoren breiter Biegeproben von Holzspanplatten (FP-V20) bei unterschiedlicher Klimabeanspruchung; Belastungsgrad ca. 20 %.				
Material	Belast.- dauer (h)	Klima-Vergleich (Probenbreite in mm)	Verhältnis der Kriech- faktoren	Ausgewer- tete Quelle
FP-V20	5040	20/65 : Außen (250) (400)	1 : 2,1	116
	60 000	" "	1 : 3,5	116
FP-V20	5040	20/65 : 20/85-20/30 (300) je 7d (300)	1 : 2,0	394
FP-V20	5040	20/65 : 20/95 (300) (300)	1 : 3,3	394
FP-V20	5040	20/85-20/30 : 20/95 je 7d (300) (300)	1 : 1,4	394

und im definierten Wechselklima 20/85-20/30 nach 30 Wochen Belastung etwa doppelt so groß, im konstanten Feuchtklima 20/95 sogar 3,3 mal so groß wie im Normalklima 20/65. Mit zunehmender Belastungsdauer erhöht sich erwartungsgemäß die Verstärkungswirkung des Außenklimas gegenüber dem Normalklima 20/65 erheblich (erhöhte Kriechgeschwindigkeit aufgrund der relativ geringen Widerstandsfähigkeit der Harnstoffharzverleimung gegenüber häufiger wechselnder Klimabeanspruchung).

Die natürlichen Klimaschwankungen im natürlichen Außenklima unter Dach stellen praktisch den ungünstigsten Beanspruchungsfall dar, der bei konstruktiv und bauphysikalisch richtigem Einsatz, d.h. bei Vermeidung von Kondenswasserbildung bzw. stauender Nässe, vorkommen kann. Die hier auch an breiten Holzwerkstoff-Proben gemessenen Kriechfaktoren nach längerer Belastungszeit sind immer noch relativ hoch und legen es nahe, in Anwendungsfällen mit relativ hoher und wechselnder Feuchtigkeitsbeanspruchung nach Möglichkeit keine ungeschützten Holzwerkstoffe einzusetzen. Die mit einem entsprechend diffusionsdichten Oberflächenschutz zu erzielende Verbesserung des Kriechverhaltens ist beträchtlich [116]. In welchem Ausmaß der Kriechfaktor hierdurch gesenkt werden kann, geht anschaulich auch aus Bild 25 (Anhang) hervor, in dem ungeschützte, nur an den Schmalflächen geschützte sowie allseitig geschützte V100-Spanplatten unter Wechsellast im natürlichen Außenklima aus [230] ausgewertet wurden (phenolharzverleimt; Probendicke 25 mm, Breite 300 mm, mehrfach mit einem relativ dampfdichten DD-Lack gestrichen). Der Feuchtigkeitsgehalt unbelasteter Vergleichsproben mit und ohne Oberflächenschutz ist in Bild 25b dargestellt. Während der etwa 7jährigen Versuchsdauer betrug die Feuchtigkeitsamplitude bei den ungeschützten und bei den nur kantengeschützten Proben im Mittel etwa 6 %, bei allseitig geschützten Proben dagegen nur etwa 0,5-1 %. Entsprechend groß ist der Unterschied im Kriechverhalten; der Verstärkungsfaktor geschützt: ungeschützt beträgt etwa 1:2,2 bis 2,3, sowohl bei der hohen als auch bei der niedrigen Laststufe.

Über den Einfluß unterschiedlicher Klimabeanspruchung auf das Kriechverhalten von Holzfaserverplatten liegen dagegen nur spärliche Informationen vor. In Bild 26 (siehe Anhang) sind einige der wenigen erreichbaren Kriechversuche mit längerer Belastungsdauer zusammenfassend wiedergegeben : Neben 2 Versuchsreihen im Normalklima 20/65 mit flachliegenden bzw. hochkant angeordneten Biegeproben (Quelle: [97] bzw. [256]) sind 2 Serien im definierten Wechselklima 20/90-60/40 (Flachbiegung und Zug parallel zur Plattenebene; Quelle [389]) sowie 1 Versuch mit 400 mm breiten, HFH-beplankten Strangpreßplatten (HFH-SV2 nach DIN 68764 Teil 1) im natürlichen Außenklima dargestellt. Dabei sind die betreffenden Kriechfaktoren über der Belastungszeit einmal linear (Bild 26a) und einmal doppelt-logarithmisch aufgetragen (Bild 26b); als Ausgleichsfunktion wurde hier die Funktion (1) gewählt, mit der die Versuchswerte ebenfalls gut angepaßt werden können (siehe Abschnitt 8.2).

Die Kriechkurven lassen erhebliche Unterschiede sowohl zwischen den verschiedenen Materialien und Beanspruchungsarten als auch zwischen den Klimabeanspruchungen erkennen. Im Normalklima 20/65 ist das Kriechen der Hochkant-Biegeträger (mehrere Hartfaserplatten zu einer Träger-Breite von 50 mm verleimt, Trägerhöhe 100 mm, Stützweite 2200 mm) etwa 3 mal so groß wie bei flach liegenden Biegeproben ($B = 75$ mm, $H = 4,8$ mm, $L_S = 170$ mm; anderes Plattenfabrikat) und liegt in der gleichen Größenordnung wie das Kriechen der mit 2,5 mm dicken HFH beplankten, 12 mm dicken Strangpreßplatte (12/17HFH-SV2, Schmalflächen mit 15 mm breiten Fichten-Einleimern geschützt).

Durch das außerordentlich scharfe Wechselklima 20/90-60/40 werden die Kriechverformungen erwartungsgemäß weiter verstärkt (anderer Plattentyp); das Zug-Kriechen ist hier - im Gegensatz zu Vollholz - wesentlich stärker als das Biege-Kriechen.

Diese Auswertungen bestätigen die Erkenntnisse aus [186, 271], daß das Kriechen von harten Holzfaserverplatten mit zunehmender Feuchtigkeitsbeanspruchung deutlich stärker zunimmt als bei Spanplatten und Sperrholz.

3.4.2 Einfluß der Temperatur

Sowohl bei erhöhter Holzfeuchtigkeit als auch bei erhöhter Temperatur, die während der Versuche konstant gehalten werden, vergrößern sich die zeitabhängigen Verformungen des Vollholzes. Die kombinierte Wirkung von hoher Feuchtigkeit und hoher Temperatur ist größer als nach Boltzmann aus der Summe der beiden einzelnen Zustandsgrößen zu erwarten wäre. Eine Temperaturerhöhung beeinflußt die Kriechverformungen umso stärker, je höher die Holzfeuchtigkeit und je länger die Einwirkungsdauer ist [9, 10].

Bei steigender Temperatur und Feuchtigkeit nehmen die plastischen, d.h. irreversiblen Formänderungen zu. Gleichzeitig nimmt die Fließgrenze ab [67]. Das bestätigt, daß es bei Holz keine allgemein gültige Fließgrenze gibt. Eine derartige Grenze ist sowohl von der Belastungszeit als auch vom physikalischen Zustand des Werkstoffes abhängig.

In mehreren Arbeiten wird im Temperaturbereich zwischen 20°C und 50°C ein relativ geringer, aber linearer Anstieg des Kriechens mit steigender Temperatur festgestellt [z.B. 67, 152, 154, 253, 265, 350]. Über 50°C steigt die Kriechgeschwindigkeit jedoch stark an und der Feuchtigkeits-einfluß wächst erheblich [253]. Es wird angenommen, daß oberhalb von ca. 50°C verstärkt Wasserstoff-Brücken zwischen den Cellulosemolekülen aufbrechen und dadurch eine schnellere bzw. größere Verformung unter Last ermöglicht wird [67].

Bei Relaxations-Versuchen an unbehandeltem und an delignifiziertem Holz zeigte sich, daß der Einfluß der Temperatur umso geringer wird, je weniger Lignin im Holz enthalten ist [102]. Das bedeutet, daß die amorphe Lignin-Matrix in der Holzzellwand bei Temperaturerhöhung stärker kriecht als das überwiegend kristalline Cellulose-Gerüst.

Nach [262] sind der Einfluß der Zeit und der Temperatur auf das Bruchverhalten des Holzes gleichrangig; demnach könnten

lange Kriechversuche unter Raumtemperatur durch kürzere Versuche unter erhöhter Temperatur ersetzt werden. In anderen Arbeiten, z.B. [350], wird diese Möglichkeit der Aufstellung sogenannter "master-curves" jedoch in Frage gestellt (siehe auch Abschnitt 8.1.3).

Der Einfluß von Temperaturänderungen während der Dauerstandversuche wird z.B. in [154] untersucht. Danach wird die Geschwindigkeit der Verformungszunahme zwar von der Geschwindigkeit der Temperaturänderung beeinflusst; nach Erreichen der Temperaturkonstanz stellt sich aber jeweils der gleiche Endwert der Kriechgeschwindigkeit ein.

Weitere Untersuchungen, die sich u.a. mit dem Einfluß der Temperatur auf das Kriechverhalten von Vollholz befassen, sind z.B. in [8, 51, 173, 291, 297, 306, 355] aufgeführt.

Bei Holzwerkstoffen ist grundsätzlich mit einer qualitativ ähnlichen Beeinflussung des Kriechens durch die Temperatur zu rechnen. Bedingt durch die mehr oder weniger starke Auflösung des natürlichen Holzgefüges und durch die zusätzliche Strukturkomponente "Verleimung" kann der Temperatureinfluß jedoch u.U. erheblich verstärkt werden.

Sowohl bei Spanplatten [366] als auch bei Hartfaserplatten [125] fallen mit steigender Temperatur der Biege-E-Modul und die Biegefestigkeit ab, während gleichzeitig die Bruchdurchbiegung ansteigt.

Vergleichende Untersuchungen an Vollholz (Buche), Sperrholz (BFU-BU-100) und Spanplatten (FP-V20 und V100) bei 5°C, 20°C sowie 50°C unter konstanter relativer Luftfeuchtigkeit (65 %) haben keinen gesicherten Unterschied im Biegekriechen zwischen 5 und 20°C ergeben [116]. Bei 50°C war das Kriechen bei allen Materialien signifikant erhöht; der Temperatureinfluß war bei Vollholz deutlich geringer, bei Spanplatten je nach Verleimungsart mehr oder weniger deutlich größer als beim untersuchten Buchenfurniersperrholz.

Bei Temperaturerhöhung von 20°C auf 50°C unter Last war das Kriechen stärker als im stationären Zustand (50°C konstant).

Beim praktischen Einsatz von Holz und Holzwerkstoffen überlagern sich normalerweise Temperatur- und Feuchtigkeitsinflüsse. Mit steigender Temperatur ist i.a. - zumindest bei nicht abgedichteter Oberfläche - ein Absinken der Holzfeuchtigkeit verbunden. Welcher der beiden Klima-Parameter im einzelnen das Kriechverhalten stärker beeinflusst, ist von der jeweiligen Größenordnung der Temperatur- und Feuchteänderung abhängig.

Diese Wechselwirkung zwischen Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit und der daraus resultierenden Holzfeuchtigkeit wird am Beispiel der Kriechversuche mit Spanplatten im natürlichen Außenklima deutlich [95]. Die Kriechgeschwindigkeit wird z.B. im Herbst bei sinkender Temperatur und gleichzeitig steigender relativer Luftfeuchtigkeit deutlich erhöht, um dann während der kalten Wintermonate - trotz der höheren Feuchte der Außenluft - nahezu auf Null zurückzugehen (das erklärt auch den in mehreren Arbeiten behaupteten "Stillstand" der Kriechverformungen, der in Wirklichkeit jedoch nur vorübergehend auftritt). Mit Erhöhung der Temperatur im Frühjahr steigt die Kriechgeschwindigkeit wieder mehr oder weniger deutlich an, um sich im Sommer auf einem "durchschnittlichen" Niveau einzupendeln (vergleiche z.B. die Bilder 17, 23 und 24 des Anhangs; Versuchsbeginn war jeweils am 20. April). Auch bei Furniersperrholz (Bild 22b und c) sowie besonders bei den allseitig relativ dampfdicht beschichteten Spanplatten (Bild 25a) wird der Einfluß der jahreszeitlichen Temperaturschwankungen im Außenklima deutlich erkennbar. Bei Vollholz (Fichte, Bild 22a) sind die temperatur- und feuchtebedingten Schwankungen im Kriechverlauf während der einzelnen Jahreszyklen wesentlich schwächer ausgeprägt.

Sollen aus derartigen Kriechversuchen im natürlichen Außenklima unter Dach zuverlässige Erkenntnisse über das langfristig zu erwartende Formänderungsverhalten gezogen werden (z.B. durch Extrapolation auf längere Belastungszeiträume, siehe Abschnitt 8.3.2), so sollten diese Versuche mindestens über 2-3 Jahre laufen, um auch nur annähernd mit repräsentativen Ergebnissen rechnen zu können. Dies ist aufgrund der von Jahr zu Jahr variierenden Schwankungsbreite und Frequenz der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur unerlässlich.

Lehrstuhl für Ingenieurholzbau
und Baukonstruktionen
Universität Karlsruhe
o. Prof. Dr.-Ing. J. Ehlbeck

3.5 Einfluß der Prüftechnik

Bisher sucht man in der Literatur vergebens nach allgemeingültigen Kriechkennzahlen für Holz oder Holzwerkstoffe unter bestimmter mechanischer und klimatischer Beanspruchung. Das liegt vor allem daran, daß das Kriechverhalten einerseits von zahlreichen prüftechnischen Parametern erheblich beeinflusst wird, andererseits aber noch keine einheitlichen, standardisierten Prüfverfahren zur Bestimmung vergleichbarer Kriechkennzahlen für die wesentlichsten Beanspruchungsarten zur Verfügung stehen. Weltweit konnten nur 3 Normen ermittelt werden, die sich mit Teilaspekten hinsichtlich der Prüfung des Kriechverhaltens von Vollholz (JIS Z 2118-1963) bzw. von Möbel-Einlegeböden (DIN 68874; TGL 23837) befassen. Für die Prüfung von Kunststoffen sind DIN 53444 (Zeitstand-Zugversuch) bzw. DIN 53441 (Spannungsrelaxationsversuch) maßgebend; Kernverbunde werden im Zeitstandversuch nach DIN 53297 geprüft.

Die gemessenen Kriechformänderungen werden sowohl von der jeweiligen Prüfanordnung und Meßtechnik als auch von der gewählten Probengröße, der Probenauswahl und vom Stichprobenumfang wesentlich beeinflusst; aber auch Art und Höhe der mechanischen und der klimatischen Beanspruchung

bestimmen das Kriechen ganz entscheidend.

Im Folgenden sollen einige der wesentlichsten prüftechnischen Einflüsse bei Holz und Holzwerkstoffen anhand von Beispielen dargestellt und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das gemessene Kriechverhalten diskutiert werden.

3.5.1 Einflüsse aus der Prüfmethodik

Kriechversuche können unter ruhender oder mit unterschiedlicher Frequenz wechselnder Zug-, Druck-, Biege-, Schub- oder Torsionsbeanspruchung durchgeführt werden; die Auswirkungen der Beanspruchungsart wurden in Abschnitt 3.2 erörtert. Die Wahl der Beanspruchungsart richtet sich jeweils nach der Aufgabenstellung und dem zu prüfenden Material. So ist beispielsweise für die Bemessung von plattenförmigen Holzwerkstoffen das Formänderungsverhalten unter Biegebeanspruchung von größtem Interesse. Bei Vollholz kommt der Zug- und vor allem der Druckbeanspruchung ebenfalls große Bedeutung zu.

Aber auch prüftechnische Gesichtspunkte spielen eine wesentliche Rolle. Biegeversuche haben den prüftechnischen Vorteil, daß mit relativ kleinen äußeren Lasten relativ hohe Biegespannungen erzeugt werden; die Belastungsvorrichtungen sind einfach herzustellen.

Druck- oder Zugversuche haben zwar den Vorteil, daß bei ihnen annähernd Normalspannungen vorliegen, und daß die Spannungs- und Formänderungszustände daher einfacher in Gleichungen zu fassen sind als beim mehrachsigen Biegeversuch. Bei hygroskopischen und quellbaren Hochpolymeren - also auch bei Werkstoffen aus Holz - treten bei wechselnden Klimabedingungen zu den reinen Kriechverformungen noch Formänderungen aus Sorptionsvorgängen hinzu; d.h. den äußeren mechanischen Kräften überlagern sich innere Spannungen. Die an unbelasteten Vergleichsproben gemessenen,

sorptionsbedingten Formänderungen können aber nicht direkt auf die belasteten Proben übertragen werden. Die eindeutige Trennung von reiner Kriechverformung und sorptionsbedingter Formänderung bei Druck- und Zugversuchen erscheint daher problematisch.

Bei Biegeversuchen können die sorptionsbedingten Längen- und Breitenänderungen der Biegestäbe vernachlässigt werden |116|. Der Einfluß der Dickenänderungen kann gegebenenfalls durch ein geeignetes Meßverfahren ausgeschaltet werden, indem Meß- und Bezugspunkte in die neutrale Achse gelegt werden |116|.

Das Kriechen kann bei Biegebeanspruchungen mit Querkraft (z.B. bei zentrischer Belastung, oder in den Kragarmen bei 4-Punkt-Lastanordnung) je nach den gewählten Stützweitenverhältnissen durch den in der gemessenen Gesamtdurchbiegung enthaltenen Schubverformungsanteil u.U. erheblich verstärkt werden (siehe auch Abschnitt 3.2.1).

In Bild 27 (Anhang) ist der Einfluß des Stützweitenverhältnisses l/h am Beispiel von fehlerfreien Fichtenstäben unter zentrischer Einzellast im Klima 20/55 nochmals dargestellt ($l/h = 22, 10$ und 5 ; liegende und stehende Jahrringlage).

Die durch Klimaschwankungen hervorgerufenen Sprünge in den Kriechkurven nehmen mit abnehmender Stützweite deutlich zu; d.h. das Schubkriechen reagiert offenbar stärker auf Klimaschwankungen als das Biegekriechen.

Der Schubanteil an der gemessenen Durchbiegung kann demnach erst oberhalb eines Stützweitenverhältnisses von ca. 20 vernachlässigt werden. Das wird durch andere Versuche an Vollholz und an Brettschichtholz bestätigt |329|.

Bei Biegebeanspruchung von Spanplatten im Wechselklima 20/95-20/30 sowie im Feuchtklima 20/95 unter 4-Punkt-Last war bei einer Länge der Kragarme von je $9 \times h$, d.h. bei einer Gesamtlänge mit Querkraft von $18 \times h$, noch kein erhöhtes Kriechen gegenüber dem reinen Biegekriechen im

querkraftfreien Stabbereich festzustellen [95].

Durch entsprechend starke Verringerung des Stützweitenverhältnisses (z.B. auf ca. 5) kann mit Hilfe derartiger, versuchstechnisch relativ einfacher Biegeversuche das Schubkriechen von Holz und Holzwerkstoffen bestimmt werden [284].

Weitere Untersuchungen über den Einfluß der Stützweite auf das Kriechverhalten sind z.B. in [16, 47, 151 und 279] enthalten.

3.5.2 Einflüsse aus der Meßtechnik

Die Messung der Kriechverformungen kann je nach Beanspruchungsart, Genauigkeitsanforderungen und dazu meßtechnisch erforderlichem Aufwand auf sehr verschiedene Art und Weise erfolgen.

Kriechdurchbiegungen werden häufig über einen Meßbügel mit eingesetzter Meßuhr (auf 1/100 mm genau) gemessen, wobei als Meßbasis entweder die gesamte Stützweite oder nur ein Teilbereich der Biegeprobe, z.B. der querkraftfreie Bereich bei 4-Last-Anordnung, verwendet wird.

Wird dabei der Meßfühler unmittelbar auf die Holz- bzw. Holzwerkstoffoberfläche aufgesetzt, so kann bei wechselnden Klimabedingungen je nach Dickenquellung und Oberflächenstruktur des Prüfkörpers ein systematischer Fehler in den Durchbiegungsmessungen enthalten sein. Bei größeren Stützweiten bzw. Meßlängen ist dieser relative Fehler jedoch i.a. vernachlässigbar gering. Bei hohen Anforderungen an die Meßgenauigkeit und vor allem bei kurzer Meßbasis sollten die Auflager des Meßbügels und der Bezugspunkt des Meßfühlers jedoch in die neutrale Achse des Biegestabes gelegt werden, wie z.B. in [116] beschrieben.

Anstelle der mechanischen Verformungsmessungen können auch verschiedene optische Meßverfahren (wie z.B. Nivelliergerät, Meßmikroskop oder entsprechend angebrachte Spiegel) zur

Anwendung kommen [89, 92, 247, 365, 386]. Auch spannungs-optische Verfahren kommen gelegentlich zum Einsatz [25, 365].

Derartige optische Meßmethoden eignen sich nicht nur für Biegeversuche, sondern auch für Verformungsmessungen unter Zug-, Druck-, Schub- oder Torsionsbeanspruchung.

Die Messung der Kriechverformungen erfolgt häufig diskontinuierlich; dabei werden die Meßwerte anfangs in relativ kurzen Zeitabständen (Minuten und Stunden), mit fortschreiten der Zeit, d.h. mit abnehmender Kriechgeschwindigkeit, in größeren Interwallen (Tage bis Wochen) bzw. - bei definierten Wechselklimaversuchen - am Ende jeder Klimaperiode abgelesen. Unter natürlich wechselnden Klimabeanspruchungen, wie z.B. im Außenklima, werden bei diskontinuierlicher Messung nur die gröberen Formänderungen, nicht aber die kurzwelligeren klimabedingten Schwankungen erfaßt. Will man diese kurzwelligeren Kriechformänderungen mit erfassen, so sind hierfür kontinuierliche Meßverfahren mit automatischer Erfassung und Aufzeichnung der Meßwerte besser geeignet. Als Meßwertnehmer kommen hierfür entweder induktive Geber [116, 382] oder Dehnungsmeßstreifen (DMS) in Betracht [1, 78, 111, 158, 222, 319, 320, 325, 371, 376, 379].

Bei direkt auf den Prüfling aufgeklebten DMS muß allerdings mit einer gewissen Verstärkung der Prüfkörperoberfläche im Bereich der Klebfuge und damit einer etwas verringerten Verformung gerechnet werden, wie mehrere Arbeiten nachweisen [319, 320, 325, 371]. Außerdem reagieren DMS empfindlich auf Feuchteeinwirkung; bei wechselnden Klimabedingungen sind daher Kompensationsstreifen erforderlich [371]. Über den Einfluß längerer Belastungsdauer auf die Meßgenauigkeit der DMS ist bisher wenig bekannt geworden. In [320] wurde nach 4h Belastung einer Biegeprobe aus Holz eine maximale Abweichung der DMS-Werte gegenüber Meßuhrwerten von 1 % gefunden. Bei Kunststoffversuchen war nach bis zu 14500h noch kein wesentliches

Kriechen der DMS-Klebfugen festzustellen [325]. Dagegen waren die DMS-Messungen der in [201] begonnenen und in der vorliegenden Arbeit weitergeführten und ausgewerteten Kriechversuche an Fichteproben im Klima 20/55 (siehe Abschnitt 3.2.1) ab einer Belastungsdauer von etwa 1 Jahr nicht mehr zuverlässig auswertbar. Inwieweit das auf ein Kriechen der DMS-Klebfuge, auf die z.T. erheblichen Klimaschwankungen oder auf beides zurückzuführen ist, konnte nicht eindeutig geklärt werden. Bei Kriechverformungsmessungen mit direkt aufgeklebten DMS ist daher zunächst noch eine gewisse Vorsicht geboten. Indirekte Messungen mit sogenannten DMS-Bügeln (Federstahlbügel mit aufgeklebten DMS) scheinen dagegen besser für Langzeitversuche geeignet zu sein [379].

3.5.3 Einfluß der Probengröße

Das Kriechverhalten von Vollholz und von Holzwerkstoffen wird von der Probengröße je nach Art der mechanischen und der klimatischen Beanspruchung in sehr unterschiedlichem Ausmaß beeinflusst.

Während Kriechversuche früher überwiegend an kleinen, fehlerfreien Proben durchgeführt wurden, sind in jüngerer Zeit vermehrte Untersuchungen an größeren Prüfkörpern, die den baupraktisch üblichen Abmessungen nahe kommen, bekannt geworden, z.B. in [54, 112, 116, 117, 159, 191, 192, 194, 198, 230, 286, 382]. Eine Reihe von Arbeiten befaßt sich mit vergleichenden Untersuchungen an großen und kleinen Proben, z.B. [20, 29, 66, 95, 99, 116, 117, 137, 162, 191, 193, 198, 200, 243, 309 und 311].

Demnach muß bei Vollholz sowohl hinsichtlich des Festigkeitsverhaltens als auch des Formänderungsverhaltens mit deutlichen Unterschieden zwischen kleinen, fehlerfreien Proben und Bauholz gerechnet werden. Dauerstandversuche unter verschiedener mechanischer und Feuchtigkeitsbeanspruchung [191-200] haben beispielsweise ergeben, daß sowohl der Feuchtigkeitseinfluß als auch der

Zeiteinfluß stark vom Festigkeitsniveau abhängen; bei niedriger Anfangsfestigkeit ist bei Bauholz kein gesicherter Zeit- und Feuchtigkeitseinfluß mehr nachweisbar. Bei kleinen fehlerfreien Proben dagegen sind diese Einflüsse stets signifikant.

Je größer der Probenquerschnitt, desto geringer wird der Einfluß wechselnder Feuchtigkeitsbeanspruchungen auf das Kriechen [29]. Aufgrund der relativ niedrigen Diffusionsgeschwindigkeit von Feuchtigkeit über den Holzquerschnitt ist dieser Einfluß der Probengröße insbesondere bei kurzweiligen Feuchteschwankungen (Stunden bis Tage) stark ausgeprägt. Langfristigere Feuchteänderungen (Monate bis Jahre) werden dagegen bis in tiefere Schichten größerer Holzquerschnitte wirksam und verstärken damit das Kriechen [382].

In Bild 28 (Anhang) ist der relative Kriechmodul E_C (in %) über der Belastungszeit aus Biegeversuchen an Kantholz-Trägern ($B = 80$ mm; $H = 110$ mm) und an kleinen fehlerfreien Stäben ($B = 10$ mm, $H = 30$ mm, liegende Jahrringe, Belastungsgrad 20 % bis 60 %) aus Fichte im Klima 20/55 dargestellt. In Bild 28a sind nur die ersten 300 Tage, in Bild 28b die gesamte Versuchsdauer (ca. 8,7 Jahre) wiedergegeben. Der Belastungsgrad des Kantholz-Trägers wurde nach 500 Tagen (12000h) von 20 % auf 25 % erhöht; daher ist ein Vergleich zwischen großem und kleinem Probenquerschnitt nur bis zu diesem Zeitpunkt möglich. Mit Ausnahme der Probe 20 % L ist das Kriechen der kleinen, fehlerfreien Proben deutlich stärker als das des Kantholz-Trägers. Außerdem ist zu erkennen, daß die kleinen Querschnitte besonders auf kurzweiligere Klimaschwankungen empfindlicher reagieren als der größere Kantholz-Querschnitt.

Bei Holzwerkstoffen ist im konstanten Normalklima noch kein gesicherter Einfluß der Probengröße bzw. der Probenbreite zu erwarten, zumindest solange keine größeren "Fehlerstellen" (z.B. Äste in den Furnieren etc.) die Homogenität der Plattenstruktur stören. Dagegen muß unter wechselnden Feuchtigkeitbeanspruchungen vor allem bei Holzwerkstoffen mit unterschied-

licher Sorptionsgeschwindigkeit der Oberflächen und der Schmalflächen mit einem Einfluß der Probenbreite gerechnet werden.

Eigene Untersuchungen haben dies bestätigt. In Bild 29 (Anhang) sind die Kriechfaktoren von 10 mm dickem Bau-Furniersperrholz BFU-BU-100 längs und quer zur Deckfurnierfaserrichtung (29a + b) und von 19 mm dicken Bau-Spanplatten FP-V100 (3PF) und FP-V20 (29c + d) im natürlichen Außenklima unter Dach sowie von 13 mm (29e) und 22 mm (29f) dicken V20-Spanplatten und dem o.gen. Furniersperrholz (Bild 29g) im konstanten Normalklima 20/65 in Abhängigkeit von der Probenbreite dargestellt.

Tabelle 6 enthält die zahlenmäßige Auswertung der Kriechkurven in Bild 29. Dabei wurde der Kriechfaktor der breitesten Proben

Tabelle 6: Vergleich der Kriechfaktoren breiter und schmaler Biegeproben von Bau-Furniersperrholz (BFU-BU-100) und Holzspanplatten (FP-V100 und FP-V20) bei unterschiedlicher Klimabeanspruchung					
Material	Klima °C/%RLF	Belast. dauer (h)	Probenbreite (mm)	Verhältnis der Kriech- faktoren	ausge- wertete Quelle
BFU-BU-100	20/65	100 000	250:50/30	1:1,0/1,0	116
FP-V20 (HF)	20/65	100 000	250:50/30	1:1,1/1,1	116
BFU-BU-100	Außen	16 000	400:50/30	1:1,0/1,7	116
	Außen	16 000	200:50/30	1:0,9/1,4	116
BFU-BU-100 ↓	Außen	16 000	200:50/30	1:1,1/1,3	116
FP-V100 (3PF)	Außen	10 000	400:50/30	1:1,3/1,4	116
	Außen	40 000	400:50/30	1:1,4/1,5	116
	Außen	60 000	400:50/30	1:1,4/1,5	116
FP-V20 (HF)	Außen	10 000	400:50/30	1:1,4/1,5	116
	Außen	40 000	400:50/30	1:1,5/1,9	116
FP-V20 (HF)	20/85- 20/30 (je 7 Tage)	5 040	300:50	1:1,4	394

gleich 1 und ins Verhältnis zu den Kriechfaktoren der 50 mm und der 30 mm breiten Proben gesetzt.

Im Klima 20/65 besteht weder bei Spanplatten noch bei Sperrholz ein Einfluß der Probenbreite im untersuchten Bereich zwischen 30 mm und 250 mm. Die Kriechfaktoren betragen nach ca. 11 Jahren konstanter Dauerlast (BG = 20 %) bei Sperrholz etwa 2,0, bei den Spanplatten etwa 2,5.

Im natürlichen Außenklima werden dagegen deutliche Unterschiede sowohl zwischen Furniersperrholz und Spanplatten als auch zwischen den verschiedenen Spanplattenverleimungen erkennbar: Bei Furniersperrholz (aus 7 x 1,5 mm dicken Buchenfurnieren) besteht ein Einfluß der Probenbreite nur bei den schmalsten Stäben (30 mm). Das ist auf die unterschiedliche Sorptionsgeschwindigkeit längs und quer zur Holzfaserrichtung im Zusammenhang mit dem Anteil und der Länge der senkrecht zur Schmalfläche liegenden Furniere zurückzuführen. Demnach ist die höhere Sorptionsgeschwindigkeit durch die quer zur Stabachse liegenden Furnierlagen nur bis zu 30 mm Länge wirksam; bei längeren Diffusionswegen in Faserrichtung überwiegt zumindest bei dem hier untersuchten Plattenaufbau die Sorption über die Außenfurniere (Sorptionsrichtung quer zur Faserrichtung).

Bei den beiden Spanplattentypen V100 und V20 (beide auf derselben Anlage hergestellt; nahezu identische elastomechanische Eigenschaften im statischen Kurzzeitversuch) besteht im natürlichen Wechselklima eine klare Abhängigkeit des Kriechfaktors von der Breite der Biegeproben. Maßgebend hierfür ist das Verhältnis zwischen dem jeweiligen Anteil der sorptionsaktiveren Schmalflächen und der sorptionsträgeren Oberflächen (stärker verdichtete und höher beleimte Deckschichten). Die relativen Unterschiede zwischen 30 mm und 50 mm breiten Proben sind nur noch gering (Ausnahme: 30 mm-Probe V20 nach 4,5 Jahren, beginnender tertiärer Kriechbereich). Mit zunehmender Beanspruchungsdauer verstärkt sich der Einfluß der Probenbreite leicht.

Sehr anschaulich geht aus Bild 29c und d auch die unterschiedliche Feuchtebeständigkeit der beiden Spanplattenverleimungen hervor: mit abnehmender Probenbreite wird die Differenzierung zwischen nicht beständiger Harnstoffharzverleimung und beständiger Phenolharzverleimung immer ausgeprägter; die 30 mm und 50 mm breiten V20-Proben sind nach rund 5,4 bzw. 6,5 Jahren Dauerbeanspruchung beim 12,5fachen ihrer Anfangsdurchbiegung gebrochen. Die Kriechfaktoren der V20-Proben lagen rund 60-90 % höher als die der entsprechenden V100-Proben, wobei die Unterschiede mit abnehmender Probenbreite und damit zunehmender Feuchtigkeitsbeanspruchung signifikant zunahmen.

Daraus folgt, daß die bisher im Rahmen von Zulassungsprüfungen neuer Holzwerkstoff-Verleimungen durchgeführten Zeitstandbiegeversuche an relativ breiten Plattenabschnitten im natürlichen Außenklima zwar Unterschiede in Ausmaß und Geschwindigkeit von Kriechformänderungen erkennen lassen, daß dieser natürliche Wechselklimaversuch aber selbst bei identischer Verfahrenstechnik und bei mehrjähriger Beanspruchung noch keine ausreichende Differenzierung zwischen beständigen und nicht beständigen Verleimungen ermöglicht [117].

Durch Verringerung der Probenbreite von 400 mm auf 50 mm bzw. 30 mm verstärkt sich der Kriechfaktor von Spanplatten im Außenklima durchschnittlich um 40 % bzw. 50 %. Der Verstärkungsgrad der 50 mm breiten V20-Proben im Außenklima entspricht nach Tabelle 6 demjenigen im definierten Wechselklima 20/85-20/30 (15 Zyklen zu je 2 x 7 Tage).

3.5.4 Einfluß der Probenahme

3.5.4.1 Stichprobenumfang

Wie bei den verschiedenen physikalischen Kurzzeiteigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen ist auch bei Kriechversuchen mit einer bestimmten Streuung der Messungen an Einzelproben zu rechnen. Je nach Ausmaß dieser Streuungen (Variationskoeffizienten) muß ein unterschiedlich großer Stichprobenumfang gewählt werden, um ausreichend sichere Aussagen über das durchschnittliche, zu erwartende Kriechverhalten zu erhalten. Andererseits sind Kriechversuche prüftechnisch relativ aufwendig, so daß man bestrebt ist, mit möglichst wenig Einzelproben auszukommen. Damit gewinnt die Art der Probenahme bzw. die Auswahl der Kriechproben eine erhebliche Bedeutung.

Über die Streuung von Einzel-Kriechversuchen wird in verschiedenen Arbeiten berichtet [22, 62, 95, 97, 110, 116, 125, 159, 187, 190, 192, 198, 207, 331, 357, 366, 373]. Bei Biegeversuchen mit Brettschichtholz sowie Schichtholz (Microlam) aus Nadelholz, Querschnitt jeweils $50 \times 150 \text{ mm}^2$, betrug der Variationskoeffizient der Kriechverformungen ($f_t - f_0$) nach 1-2 Jahren im beheizten Innenraum zwischen 10 % und 20 % und lag damit in der gleichen Größenordnung wie bei vielen physikalischen Holzeigenschaften [331]. Bei Holzwerkstoffen beträgt die Streuung der Einzelproben aus einer Platte je nach Fabrikat ca. 2 % bis 10 % [187]. Diese Streuungen innerhalb einzelner Platten werden jedoch zusätzlich überlagert von entsprechenden Schwankungen zwischen verschiedenen Platten eines Fabrikates.

In den Bildern 30 bis 34 (siehe Anhang) wird der Schwankungsbereich verschiedener Holzwerkstoffproben unter konstanter Biegebeanspruchung im Normalklima 20/65, im natürlichen Außenklima sowie im definierten Wechselklima dargestellt.

Bild 30 enthält die Kriechkurven von je 5 Einzelproben aus 1 Platte Bau-Furniersperrholz BFU-BU-100 (a + b) sowie Bau-Stabsperrholz BST-100 (c + d) längs und quer zur Faserrichtung der Deckfurniere im Normalklima 20/65. Nach ca. 8 Jahren Dauerlast liegt die Streuung des Kriechfaktors der 50 mm breiten Proben zwischen $\pm 0,1$ und $\pm 0,2$ (Variationskoeffizient ca. 8 - 13 %).

Die entsprechenden Streuungen des Kriechfaktors von V20-Spanplatten im Normalklima 20/65 sind Bild 31a (13 mm dick) bzw. Bild 31b (22 mm) zu entnehmen; sie betragen knapp $\pm 0,1$ (Variationskoeffizient ca. 4,5 - 5,5 %), allerdings ohne die direkt vom Plattenrand entnommene 5. Probe, die bei der untersuchten 22 mm-Platte ein wesentlich stärkeres Kriechen zeigte. Dieser ausgeprägte Randzonen-Einfluß ist von der jeweiligen Spanstreuung abhängig und kann von Fabrikat zu Fabrikat stark variieren [116].

In Bild 32 ist die relative Durchbiegunszunahme von je 3 breiten und 3 schmalen Biegeproben aus einer phenolharzverleimten V100-Spanplatte (a+b) sowie einer harnstoffharzverleimten V20-Spanplatte (c+d) im natürlichen Außenklima dargestellt (siehe auch Bild 29c+d). Bei der untersuchten V100-Platte sind die Schwankungen des relativen Kriechens ebenfalls sehr gering (ca. $\pm 0,2$ bei breiten und schmalen Proben). Bei der nicht feuchtbeständig verleimten V20-Platte sind die Streuungen deutlich größer und liegen im sekundären Kriechbereich, d.h. vor Erreichen der bruceinleitenden tertiären Kriechphase, bei etwa $\pm 0,5$ bis $\pm 0,6$. Die entsprechenden Variationskoeffizienten, bezogen auf den jeweiligen Kriechfaktor f_t/f_0 , betragen ca. 4-5 % bei der V100- und ca. 6-10 % bei der V20-Platte.

Aus Bild 33 ist die Schwankungsbreite der Kriechkurven von 300 mm breiten Proben aus verschiedenen verleimten und unterschiedlich dicken V100-Spanplatten (33a-e) sowie aus 24 mm dicken zementgebundenen **Flachpreßplatten** (33f) im natürlichen

Außenklima zu entnehmen. Die 35 mm bzw. 36 mm dicken Platten wurden einmal mit 1/5 der Normfestigkeit (33a+c) und einmal mit einem Belastungsgrad von 33 % (33b+d) zentrisch beansprucht. Bei diesen Versuchen (Bild 33a-f) wurden die Prüfkörper zudem aus verschiedenen Platten des jeweiligen Plattentyps entnommen. Die Streuungen der Kriechkurven der kunstharzgebundenen Spanplatten sind als sehr niedrig zu bezeichnen ($\pm 0,2$ bis $\pm 0,5$, entsprechend einem Variationskoeffizienten von ca. 4-11 %). Bei den zementgebundenen Platten schwanken die Einzelwerte mit $\pm 0,7$ ($V = 15$ %) etwas stärker.

Bei Biegeversuchen (4-Punkt-Last) an 50 mm breiten Proben verschieden verleimter und belasteter Industrie-Spanplatten im definierten Wechselklima 20/95-20/30 (30 Zyklen à 1 Woche) streuten die Kriechkurven der jeweils 3 Einzelproben wie in Bild 34 dargestellt. Bei dem bewußt hoch gewählten Belastungsgrad von 33 % sind sowohl bei der verstärkten Harnstoff-Melamin-Mischharzverleimung (8 HMF, Bild 34b) als auch bei der Phenolharzverleimung (3PF, Bild 34d) eine bzw. zwei Proben vor Versuchsende gebrochen.

Die Streuung der relativen Durchbiegungszunahme der aus verschiedenen Platten entnommenen, schmalen Biegestäbe im verschärften Wechselklima (siehe Abschnitt 3.4.1) ist erwartungsgemäß erheblich größer und liegt zwischen ca. $\pm 0,5$ und $\pm 2,2$ (Variationskoeffizienten ca. 13-25 %).

Der Stichprobenumfang zur Bestimmung des Kriechverhaltens von Spanplatten unter Biegebeanspruchung sollte demnach bei Verwendung breiter Plattenabschnitte (ca. 300 mm) mindestens 3, bei schmalen Biegestäben (30-50 mm) mindestens 5 Einzelproben je Plattentyp, Fabrikat und Plattendicke betragen; um brauchbare Aussagen über die mittleren zu erwartenden Kriechformänderungen und deren Schwankungsbreite zu erhalten, sind die Proben jeweils aus verschiedenen Platten mit möglichst großem zeitlichem Produktionsabstand zu entnehmen.

Bei Sperrholz und bei Holzfaserplatten sollte mindestens der gleiche Stichprobenumfang gewählt werden.

Bei Vollholz richtet sich die erforderliche Probenanzahl vor allem nach dem jeweiligen Probenquerschnitt und damit nach der Holzgüte. Hier ist insbesondere zwischen Kriechversuchen an kleinen, fehlerfreien Prüfkörpern einerseits und an größeren Bauholzdimensionen unter Einbeziehung der natürlichen, wuchsbedingten Struktur-Inhomogenitäten wie z.B. Äste, Faserabweichungen, Rißbildungen etc. andererseits zu unterscheiden. Da außerdem das Festigkeitsniveau und das Verfahren der Probenauswahl von Einfluß auf die Streuung der Einzelwerte sein können, ist eine allgemeingültige Festlegung des jeweiligen Stichprobenumfanges bei Vollholz noch nicht ohne weiteres möglich. Geht man davon aus, daß die Variationskoeffizienten der Kriechverformungen in der gleichen Größenordnung liegen wie bei den entsprechenden Kurzzeiteigenschaften [331], kann die Probenanzahl je nach den Genauigkeitsanforderungen im Einzelfall festgelegt werden.

3.5.4.2 Probenahme

Bei Kriechversuchen kommt - ebenso wie bei der Ermittlung der Dauerstandfestigkeit - einer möglichst genauen Festlegung des tatsächlichen Belastungsgrades der einzelnen Proben besondere Bedeutung zu (vergl. Abschnitt 3.3). Dieser kann jedoch naturgemäß erst nach Beendigung der Versuche an den Kriechproben selbst ermittelt werden. Man ist daher auf möglichst genaue Schätzungen angewiesen. Dazu wird häufig das Verfahren der "paarweisen" Probenahme (matched pairs) verwendet, bei dem jeweils die Festigkeit der beiden Nachbarproben der Kriechprobe ermittelt und daraus ein Schätzwert für die erwartete Festigkeit der Kriechprobe gebildet wird, nach dem dann der jeweilige Belastungsgrad festgelegt werden kann. Dieses Verfahren ist jedoch nur für kleine fehlerfreie Vollholzproben sowie für Proben aus Holzwerkstoffplatten geeignet. Bei größeren Bauholz-Querschnitten sind die Festigkeitsunterschiede benachbarter Prüfkörper jedoch so groß, daß diese

Methode nur sehr ungenaue Schätzwerte liefert. Für Langzeitversuche an Bauholz werden daher andere Verfahren für die Probenauswahl vorgeschlagen, z.B. in [99, 159, 192, 222, 305, 381].

Ist man aus versuchstechnischen Gründen gezwungen, sich auf wenige oder gar auf nur eine Einzelprobe je Kriechversuch zu beschränken, so müssen die Schwankungen zwischen den einzelnen Proben eines Materials so gering wie möglich gehalten werden, um trotz der geringen Stichprobe zu aussagefähigen Ergebnissen zu gelangen. Dazu wählt man zunächst einen Stammabschnitt bzw. eine Holzwerkstoff-Platte so aus der jeweiligen Grundgesamtheit aus, daß die Eigenschaften des ausgewählten Musters den durchschnittlichen elastomechanischen Eigenschaften der Grundgesamtheit möglichst nahe kommen. Als nächstes werden aus dem Muster möglichst viele Einzelproben in den Abmessungen der geplanten Kriechversuche entnommen. Nach Klimatisierung 20/65 werden Rohdichte und Elastizitätsmodul aller Proben bestimmt. Für die Kriechversuche werden daraus diejenigen Proben ausgesucht, die dem Mittelwert von Rohdichte und E-Modul am nächsten kommen. Um den Belastungsgrad der Einzelproben möglichst genau im Voraus festlegen zu können, wird die Festigkeit der beiden Nachbarproben jeder Kriechprobe bestimmt. Der Mittelwert dient als Bezugsgröße für den jeweiligen Belastungsgrad der Kriechprobe.

Durch diese Art der Probenahme kann der übliche Schwankungsbereich der Kriechformänderungen stark verringert und damit auch der jeweilige Stichprobenumfang erheblich verkleinert werden [116].

3.5.5 Einflüsse aus dem Versuchsablauf

Die gemessenen Kriechverformungen hängen nicht nur von der jeweiligen Prüfanordnung, Meßtechnik, sowie Größe und Anzahl der Proben ab, sondern können auch durch die eigentliche Versuchsdurchführung mehr oder weniger stark beeinflusst werden. Neben dem Einfluß der gewählten Startbedingungen bzw. der Beanspruchungs-Vorgeschichte (siehe z.B. [246, 285, 306, 334]) sowie der Belastungsgeschwindigkeit [167, 192, 206, 311], kommt der Genauigkeit der Klimasteuerung im definierten Laborklima (konstant oder wechselnd) eine entscheidende Bedeutung zu, um reproduzierbare und vergleichbare Kriechkurven zu erhalten.

Beispielsweise haben Biege-Kriechversuche mit 9 verschiedenen Spanplattentypen im Feuchtklima 20/95, die jeweils an Parallel-Proben in 3 verschiedenen Instituten durchgeführt worden waren, Unterschiede im Kriechfaktor zwischen den Instituten, d.h. zwischen den tatsächlichen Klimabeanspruchungen, bis zu einem Verhältnis von ca. 1:2 ergeben [95].

Aber auch bei wiederholten Kriechversuchen im selben Klimaschrank können - trotz "gleicher" Klimaeinstellung - erhebliche Unterschiede in den gemessenen Kriechverformungen auftreten. In Bild 35 (Anhang) wird dies am Beispiel von wiederholten Biegeversuchen an Buchenvollholz (35a, kleine fehlerfreie Proben) und Bau-Furniersperrholz aus Buche (35b, Belastungsgrad ca. 22 %; 35c, BG = 2 %) im Wechselklima 20/95-20/25 (je 24h) gezeigt [116]. Läßt man die Vollholzprobe (+) in Bild 35a außer Betracht (eindeutiger Ausreißer), so betragen die Schwankungen der relativen Durchbiegungszunahme $(f_t - f_0)/f_0$ nach 10 Zyklen (480h) bei Vollholz ca. $\pm 1,2$ ($V = 13 \%$) und bei Sperrholz ca. $\pm 2,0$ ($V = 20 \%$). Aufgrund der vorgenommenen Probenauswahl - für die Wiederholungen wurden Parallel-Proben aus demselben Stammabschnitt bzw. derselben Platte mit möglichst gleichem E-Modul und gleicher Rohdichte verwendet - können diese relativ starken Streuungen nur zum geringeren Teil

auf materialbedingte Unterschiede zwischen den Proben zurückgeführt werden. Ein erheblicher Teil beruht offensichtlich auf Schwankungen in der internen Steuerung des Klimaschranks. Diese Fehlerquelle kann beim heutigen Stand der Klimatechnik nur durch Verwendung entsprechend genauer (und damit aufwendiger) Präzisions-Klimaaggregate vermieden oder zumindest begrenzt werden.

Bei Versuchen im definierten Wechselklima kann der Wirkungsgrad, d.h. die Verstärkung der Kriechverformungen z.B. gegenüber natürlich wechselnder Klimabeanspruchung, nicht nur durch Variieren der jeweiligen Klimarandbedingungen (Amplitude der relativen Luftfeuchtigkeit und/ oder der Temperatur) sondern auch durch die Wahl der Dauer der einzelnen Klimazyklen, d.h. durch die Frequenz der Klimawechsel, wesentlich beeinflusst werden. Je länger die einzelnen Sorptionsperioden eines Wechselklimas dauern, desto größer wird auch die Differenz zwischen den durchschnittlichen Holzfeuchtigkeitsgehalten, d.h. die Feuchtigkeits-Amplitude der Kriechproben. Als Folge dieser wachsenden Feuchtigkeits-Amplitude ist unter sonst identischen Versuchsbedingungen mit einem verstärkten Kriechen zu rechnen. Oberhalb einer vom Diffusionswiderstand und von den Probenabmessungen abhängigen Zyklendauer erreichen die Proben bereits während der einzelnen Klimastufen annähernd einen Gleichgewichtszustand mit dem Umgebungsklima. Das weitere Kriechen einer Klimaperiode wird danach nur noch von der mechanischen Beanspruchung bei dem entsprechenden Feuchtigkeitsgehalt bestimmt [116].

Aus Bild 36 geht die Verstärkungswirkung einer verlängerten Zyklendauer sowie einer zusätzlichen Verschärfung der Klimarandbedingungen (Erhöhung der Temperatur der Trockenstufe von 20°C auf 35°C) im entsprechenden Wechselklima bei 3 verschiedenen verleimten Spanplatten hervor.

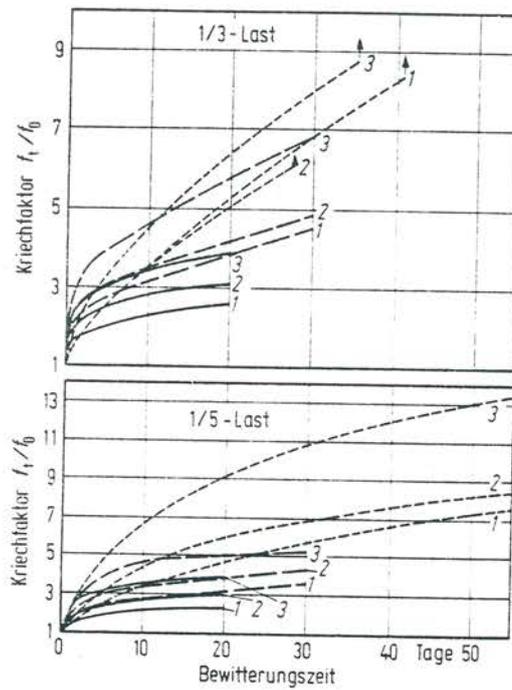


Bild 36: Kriechverhalten von 3 verschiedenen verleimten Spanplatten im definierten Wechselklima mit unterschiedlichem Wirkungsgrad; Biegespannung = $1/3$ (oben) bzw. $1/5$ (unten) der mittleren Bruchfestigkeit; Einzelproben 560×30 mm: \uparrow = Bruch |117|.

———— 20/95-20/25 je 24h - - - - 20/95-20/25 je 48h

----- 20/95-35/25 je 48h

1 = HF; 2 = 10 MHF; 3 = PF

In Tabelle 7 sind die Feuchtigkeits- und Dicken-Amplituden der 3 Spanplattentypen aus Bild 36 im definierten Wechselklima in Abhängigkeit von Klima und Zyklendauer zusammengefaßt.

Tabelle 7: Gewichts- und Dickenänderungen verschieden verleimter Spanplatten im Wechselklima in Abhängigkeit von den Klimarandbedingungen und von der Zyklendauer (Werte aus [117])			
Plattentyp	Klimabeanspruchung	Gewichts-Amplitude (%)	Dicken-Amplitude (%)
HF (FP-V20)	20/80-20/45(je 24h)	2,4	1,1
	20/95-20/25(je 24h)	4,4	1,7
	20/95-35/25(je 48h)	10,1	4,7
10 HMF (FP-V100)	20/80-20/45(je 24h)	2,2	0,8
	20/95-20/25(je 24h)	3,7	1,4
	20/95-35/25(je 48h)	8,5	3,9
PF (FP-V100)	20/80-20/45(je 24h)	2,6	1,1
	20/95-20/25(je 24h)	4,6	1,7
	20/95-35/25(je 48h)	11,7	4,7

Bild 37 (Anhang) zeigt den Einfluß der Zyklendauer im Wechselklima 20/95-20/25 am Beispiel der Kriechfaktoren von Furniersperrholz BFU-BU-100 [116].

Die Ergebnisse bestätigen, daß sich das Kriechen mit wachsender Zyklendauer stark erhöht. Zwischen den Zyklen 2 x 48h und 2 x 7 Tage bestehen i. a. nur noch zufällige Unterschiede im Durchbiegungsverlauf (auch bei den verschiedenen Spanplatten in [116]); d.h. in den 30 mm breiten Biegeproben wird mit einer

Klimaperiode von 48h annähernd ein Feuchtigkeitsgleichgewicht erreicht. Das weitere Kriechen ist überwiegend lastabhängig. Kurzfristige Feuchtigkeitsschwankungen im Umgebungsklima (z.B. 6h) haben einen deutlich geringeren Einfluß auf die Kriechverformungen.

All diese Einflußfaktoren aus der Prüftechnik sind bei der Planung und Durchführung von Kriechversuchen zu beachten, um die Ergebnisse überhaupt miteinander vergleichen und richtig bewerten zu können. In Abschnitt 10 wird daher ein Vorschlag für einheitliche Prüfrichtlinien unter Berücksichtigung dieser Einflüsse zur Diskussion gestellt.

4 Eigenschaften nach Entlasten

4.1 Rückbildung der Kriechverformungen

Die Gesamtverformung unter langfristiger mechanischer Beanspruchung setzt sich bei viskoelastischen Werkstoffen wie z.B. Holz und Holzwerkstoffen im wesentlichen aus 3 Komponenten zusammen: den elastischen Verformungen bei Belastungsbeginn (f_0 bzw. ϵ_0 bzw. γ_0) - im folgenden elastische "Anfangsverformung" genannt - überlagern sich zeitabhängige "verzögert-elastische" sowie "bleibende", häufig als "plastisch" oder "irreversibel" bezeichnete Formänderungsanteile. Die beiden letztgenannten, von der Art, Höhe und Dauer der mechanischen und klimatischen Beanspruchung abhängigen Verformungsanteile werden als "Kriechverformungen" zusammengefaßt.

Eine Trennung zwischen dem verzögert-elastischen und dem bleibenden Anteil der Kriechverformungen kann in sogenannten "Rückkriechversuchen" durch Bestimmung der Rückbildung der Formänderungen nach Entlasten der Kriechproben erfolgen. Derartige Entlastungs-Messungen werden zwar in der Literatur wiederholt beschrieben - für Vollholz z.B. in [29, 147, 223, 224, 281, 314, 334], für Holzwerkstoffe in [12, 95, 176, 186] und für Bauteile in [138, 386]. Aufgrund der meist nur relativ kurzen Entlastungszeiten erlauben diese Arbeiten aber i.a. noch keine Aussage über den tatsächlichen, auch nach längerer Entlastungsdauer bleibenden Verformungsanteil. Die Rückbildung des verzögert-elastischen, d.h. reversiblen Anteils der zeitabhängigen Kriechverformungen benötigt - ebenso wie sein Anwachsen unter Last - entsprechend lange Zeit.

In den Bildern 38-43 (siehe Anhang) wird daher die längerfristige Rückbildung der Kriechverformungen von Vollholz- und Holzwerkstoff-Proben in Abhängigkeit von der Art und Höhe der mechanischen und klimatischen Beanspruchung während der Belastungsperiode dargestellt (alles eigene Messungen an den in den vorigen Abschnitten aufgeführten Kriechproben). Die

Entlastungszeiten liegen zwischen ca. 500h und 45000h. Die Meßwerte werden wiederum mit Hilfe der Funktion (3) rechnerisch angenähert (siehe Abschnitt 8.2).

Bild 38 enthält die an Fichtenholz (fehlerfrei) im Klima 20/55 gemessenen Kriech- und Rückkriech-Verformungen am Beispiel der mit 10 N/mm^2 beanspruchten Einfeldträger mit Querkraft in Abhängigkeit von der Stützweite und der Jahrringlage (38a+b).

In Bild 39 ist die Rückbildung der Durchbiegung der verschiedenen Einfeldträger mit Querkraft (Fichte, 20/55) in Abhängigkeit vom Belastungsgrad (39a+b), vom Stützweitenverhältnis (39c+d) sowie von der Jahrringlage aufgetragen. Bild 39e enthält zum Vergleich die Rückbildung der Kriechverformungen eines Biegeträgers aus Fichte mit Bauholzabmessungen (Kantholz $8 \times 11 \text{ cm}^2$).

Der Verlauf der Entlastungsverformungen von kleinen fehlerfreien Fichtenproben (Einfeldträger, 4-Punktlast) im Klima 20/55 in Abhängigkeit vom Belastungsgrad und von der Jahrringlage ist Bild 40a + b zu entnehmen. Das entsprechende Rückkriechen von Fichte nach vorausgegangener, unterschiedlich hoher Zugbeanspruchung geht aus Bild 40c hervor (DMS-Messungen).

In Bild 41 ist die Rückbildung der Durchbiegungen von Bau-Furniersperrholz aus Buche im natürlichen Außenklima unter Dach in Abhängigkeit von der Probenbreite und der Achsrichtung der Biegestäbe dargestellt. Die Messungen konnten hier bis zu 5 Jahren nach Entlastung fortgesetzt werden.

Das Rückkriechen von jeweils 300 mm breiten Biegeproben aus zahlreichen Holzspanplatten im Außenklima ist in Bild 42 aufgetragen. Neben verschiedenen Verleimungen auf Kunstharzbasis (Harnstoffharze, Phenolharze, unterschiedlich verstärkte Harnstoff-Melamin-Mischkondensate, Isocyanat sowie kombinierte Phenolharz-/Isocyanat-Verleimungen, Bild 42a-d) wurden auch zementgebundene Holzspanplatten verschiedener Dicke (42e)

mit ausgewertet. Während in den Bildern 42a-c Industrieplatten verschiedener Verfahrenstechnik miteinander verglichen werden, handelt es sich in Bild 42d um identisch hergestellte Labor-spanplatten und in Bild 42e um Zementspanplatten verschiedener Dicke aus einer Industrieanlage.

In Bild 43 ist die Rückbildung der Kriechverformungen schmaler Biegestäbe aus verschiedenen verleimten Industriespanplatten (aus [95]) im definierten Wechselklima 20/95-20/30 über 11300h Entlastungszeit dargestellt. Dabei wurden die entlasteten Proben nach ca. 4800h vom Wechselklima in das konstante Normalklima 20/65 umgelagert. In den 260 Tagen im Klima 20/65 hat sich allerdings keine weitere Verringerung der Durchbiegungen mehr ergeben.

Eine zusammenfassende Auswertung zahlreicher Entlastungsversuche von Vollholz und Holzwerkstoffen im Klima 20/55, im Außenklima und im definierten Wechselklima enthält Tabelle 8. Neben Angaben über die Querschnittsabmessungen, den Belastungsgrad sowie die Zeitdauer unter Last (t) und nach Entlastung (t_e) sind die elastischen Verformungsanteile bei Belastungsbeginn (f_o) und bei Entlastung (f_{oe}) sowie die auch nach längerer Entlastungszeit bleibenden Durchbiegungen (f_{b1}) angegeben.

Demnach sind die elastischen Verformungen bei Be- und Entlastung der Vollholzproben im relativ konstanten Innenklima 20/55 nahezu gleich. Das hat sich auch bei den anderen, hier nicht gesondert aufgeführten Fichtenproben unter Biege-, Zug-, Druck- und Torsionsbeanspruchung gezeigt.

Das entsprechende Verhältnis f_{oe}/f_o nach 11 Jahren Dauerlast (BG = 20 %) im konstanten Normalklima 20/65 (nicht in Tabelle 8 aufgeführt) lag bei Vollholzproben aus Buche, Kiefer und Fichte zwischen 1,00 und 1,02, bei Bau-Furniersperrholz BFU-BU-100 (|| + ⊥) verschiedener Breite zwischen 1,05 und 1,08,

Tabelle 8: Durchbiegungsanteile von Vollholz und Holzwerkstoffen in Abhängigkeit von Klima, Belastungsgrad und Probengröße.
 f_o = elastische Durchbiegung bei Belastungsbeginn
 f_{oe} = elastische Rückbildung der Durchbiegung beim Entlasten
 f_{bl} = bleibende Durchbiegung

Klima Material	Breite/ Dicke (mm)	Belast.- grad (%)	t/t _e (h·10 ⁻³)	Durchbiegungsanteile (mm)			
				f _o	f _{oe}	f _{bl}	f _{oe} /f _o
20/55 Fichte	15/30	10	95,0/2,1	0,55	0,56	0,31	1,02
		20	95,0/2,1	1,12	1,17	0,66	1,04
		30	86,5/4,2	2,01	2,06	1,04	1,02
		40	86,5/4,2	2,78	2,93	2,02	1,05
Außen BFU-BU-100	400/10	20	25,4/33,3	5,54	6,59	8,99	1,20
	200/10	20	35,1/23,7	4,98	6,67	13,71	1,34
	100/10	20	35,1/23,7	4,79	6,09	9,81	1,27
	50/10	20	35,1/23,7	5,01	6,21	8,08	1,24
	30/10	20	15,5/43,2	5,64	9,26	7,74	1,64
Außen FP-V100 PF(L) PF/IC(L) IC(L)	300/18	20	13,1/0,34	6,54	6,48	25,70	0,99
	300/18	20	13,1/0,34	6,47	6,20	23,42	0,96
	300/18	20	13,1/0,34	6,72	6,52	19,93	0,97
FP-V100 8HMF 3PF 4PF	300/19	20	18,1/0,84	4,21	5,16	4,53	1,23
	300/19	20	18,1/0,84	3,59	4,52	10,30	1,26
	300/19	20	18,1/0,84	4,92	7,08	32,62	1,44
FP-V100 11HMF 3PF/G	300/36	15	34,3/1,87	1,39	2,04	3,08	1,47
	300/35	23	34,3/1,87	1,87	2,84	5,98	1,52
FP-Zement	300/24	15	11,9/0,50	1,68	1,27	6,95	0,76
	300/18	21	11,9/0,50	1,60	1,13	7,24	0,71
	300/12	22	11,9/0,50	2,02	1,61	8,45	0,80
20/95-20/25 Buche (je 24h) BFU-BU-100	30/15	20	0,48/0,02	0,101	0,151	0,385	1,50
	30/10	20	0,43/18,6	0,107	0,183	0,538	1,71
20/95-20/30FP-V100 (3/4d) 8HMF 3PF 4PF	50/19	10	5,04/11,3	1,70	2,10	1,51	1,24
		20	5,04/11,3	3,26	4,10	3,10	1,26
	50/19	10	5,04/11,3	1,36	1,71	2,81	1,26
		20	5,04/11,3	2,65	3,58	7,59	1,35
	50/19	10	5,04/11,3	1,74	2,11	8,98	1,21
20	20	5,04/11,3	3,55	4,37	22,94	1,23	

bei Stabsperrholz BST-100 zwischen 1,02 und 1,04, und bei Spanplatten FP-V20 verschiedener Dicke und Breite zwischen 1,02 und 1,10.

Daraus folgt, daß sich das elastische Formänderungsverhalten von Vollholz, Sperrholz und Spanplatten im relativ konstanten und trockenen Innenraumklima unter baupraktisch üblichen mechanischen Beanspruchungen auch nach langjähriger Dauerlast nicht wesentlich verändert.

Nach langfristiger Belastung unter gleichzeitig erhöhter Feuchtigkeitsbeanspruchung kann sich das elastische Verhalten je nach Material und Beanspruchung unterschiedlich stark verändern (Tabelle 8). Die elastische Rückbildung der Durchbiegung beim Entlasten f_{oe} liegt häufig mehr als 20 % über der entsprechenden Anfangsdurchbiegung f_0 . Lediglich bei den sehr hochwertigen, unter optimalen Bedingungen hergestellten Laborspanplatten (L) im Außenklima sind die elastischen Verformungen unverändert geblieben. Bei den zementgebundenen Spanplatten geht bei Entlastung nur ein Teil der elastischen Anfangsverformung sofort zurück. Aber auch der verzögert-elastische Verformungsanteil bildet sich nach Entlastung nur ganz geringfügig zurück; entsprechend hoch sind die bleibenden Kriechverformungen.

Worauf diese auch in der Literatur vereinzelt festgestellten Veränderungen im elastischen Verhalten im Einzelnen beruhen, muß zunächst offen gelassen werden [186, 223].

Auch nach mehrjähriger Entlastung bei gleicher Klimabeanspruchung wie unter Last gehen die Kriechverformungen in keinem Fall wieder völlig auf Null zurück (Tabelle 8). Das stimmt mit den Beobachtungen in [186] über das 4-jährige Rückkriechen von verschiedenen Holzwerkstoffen überein.

Diese "bleibenden" Formänderungen erweisen sich allerdings oft nur als blockiert-elastische, quasipermanente Verformungen, die sich z.B. dann rückbilden können, wenn der Werkstoff im entlasteten Zustand über die bei der Belastung herrschende

Feuchtigkeit hinaus befeuchtet und wieder getrocknet, bzw. über die Verformungstemperatur hinaus erwärmt und wieder abgekühlt wird. Holz besitzt derartige "sorptionsreversible" und "thermoreversible" Eigenschaften [330]. Das Ausmaß dieser Rückfederungen ist dabei abhängig 1. vom Zeitpunkt, an dem sie eingeleitet werden, 2. von der Höhe der Befeuchtung bzw. Erwärmung und 3. von eventuell bereits eingetretenen Gefügezerrüttungen (kleinste Rißbildungen im Micellarbereich).

Nach [116] ist die Sorptionsreversibilität sowohl bei Buchenvollholz als auch bei Furniersperrholz und Spanplatten mehrfach größer als die Thermo-Reversibilität, d.h. die während der Dauerbelastung in den Biegeproben "eingefrorenen" Kriechspannungen werden durch Befeuchten der entlasteten Proben stärker relaxiert als durch Erwärmen. Während beispielsweise die im Konstantklima 20/65 und 20/25 erreichten maximalen Durchbiegungen f_t durch entsprechende Regenerationsbehandlung nach Entlasten völlig reversibel waren, ging die "bleibende" Verformung nach Kriechen im Wechselklima 20/95-20/25 in keinem Fall wieder ganz auf Null zurück.

Ebenfalls völlig reversibel waren die in Kriechversuchen unter konstanter relativer Luftfeuchtigkeit (65 %) bei 5°C und bei 20°C erreichten Verformungen. Eine auf 50°C erhöhte Kriechtemperatur kann jedoch geringe, irreversible Verformungen der Biegestäbe nach Regenerationsbehandlung bewirken, die besonders bei Spanplatten unter erhöhter Last deutlich ausgeprägt waren. Temperatur-Wechsel zwischen +50°C und -30°C ergaben auch bei Buchenvollholz und Furniersperrholz erhöhte bleibende Verformungen [116].

4.2 Restfestigkeit nach Entlastung

Im Zusammenhang mit der Festlegung von Bemessungs-Kenngrößen interessiert u.a. die Frage, ob und gegebenenfalls wie stark sich die elastomechanischen Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen durch eine vorangegangene Langzeitbelastung verändern.

In der Literatur befassen sich verschiedene Arbeiten mit dem Einfluß der Kriech-Vorgeschichte auf die nach Entlasten verbleibende Festigkeit und Steifigkeit. Entsprechende Untersuchungen an Vollholz werden z.B. in [29, 34, 128, 129, 149, 165, 314, 331, 334], an Holzwerkstoffen in [60, 116, 140, 186, 206, 256, 331] beschrieben. Über die Restfestigkeit von Bauteilen aus Holz und von Verbindungsmitteln wird z.B. in [179, 205, 229, 282, 336, 360] berichtet. Vergleichbare Untersuchungen an Kunststoffen sind u.a. aus [35, 76, 81, 85, 86, 219, 280, 293] zu entnehmen.

Bei Vollholz hat die Kriechvorgeschichte nach [334] solange keinen signifikanten Einfluß auf Festigkeit und E-Modul nach Entlasten, solange die Kriechspannung unterhalb der Linearitätsgrenze bleibt. Auch nach Wechsellastbeanspruchung (100 Zyklen) war bei 9 verschiedenen Holzarten (Rohdichte 0,25... 1,06 g/cm³) im Innenraumklima (Holzfeuchte zwischen 9 % und 13 %) noch kein Abfall des E-Moduls und der Zugfestigkeit festzustellen [149]. Bei Trocknung von Vollholz von einem Feuchtigkeitsgehalt weit über Fasersättigung auf ca. 10 % unter Zugspannung erhöhen sich die elastomechanischen Eigenschaften sogar um ca. 20-25 % [128].

Im definierten Wechselklima 20/90-20/30 unter Last verringert sich dagegen der Elastizitätsmodul je nach Belastungsgrad und Probenquerschnitt um 10-35 % [34].

Aber auch bei Brettschichtholz [331] und bei verschiedenen Holzwerkstoffen [186, 206] unter konstanter oder wechselnder Dauerlast und nicht allzu stark wechselnden Klimabeanpruchungen sind noch keine gesicherten Abminderungen der Anfangsfestigkeiten zu erwarten. Als Erklärung wird ein Abbau der Spannungsspitzen bzw. eine Spannungsumlagerung nach örtlichem Brechen einzelner, maximal belasteter Späne oder Leimbrücken vermutet [186].

Bei entsprechenden Untersuchungen an Bauteilen und an Holzverbindungen wurden ebenfalls keine signifikanten Verschlechterungen nach Entlasten festgestellt. So haben sich beispielsweise Fachwerkträger mit verschiedenen Verbindungsmitteln nach 5 bzw. 10 Jahren unter maximal zulässiger Dauerlast im natürlich wechselnden Klima unter Dach bezüglich ihrer Steifigkeit und Festigkeit nicht verändert [205, 360].

Nagelverbindungen wiesen nach 200 Tagen unter zulässiger Belastung im Innenklima ($\varphi = 50-95\%$) noch ihre volle Anfangsfestigkeit auf, auch wenn die Verbindungen bei hoher Holzfeuchte (naß) hergestellt wurden [229].

Verleimte Rahmenecken zeigten nach 60 Tagen im Normalklima 20/65 bis zu einem Belastungsgrad von 40 % noch keinen wesentlichen Festigkeitsabfall [282].

Ähnliche Ergebnisse werden auch von glasfaser- bzw. kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffen berichtet [81] bzw. [280].

Zumindest bei GFK besteht nach [219] kein Zusammenhang zwischen der Restfestigkeit und der Zeitstandfestigkeit; aus der Restfestigkeit kann daher nicht auf die zu erwartende Lebensdauer geschlossen werden. Demnach stellt die Restfestigkeit lediglich eine Sicherheitsreserve, aber kein Dimensionierungskriterium dar. Das wird durch andere Versuche mit Kunststoffen bestätigt, bei denen die Restfestigkeit etwa gleich der Kurzzeitfestigkeit war, wenn vor dem Langzeitbruch eine

plötzliche, zügige Spannungserhöhung bis zum Bruch erfolgte [76]. Vergleichbare Versuche mit Holz und Holzwerkstoffen sind nicht bekannt.

Da bei Vollholz und vor allem bei Holzwerkstoffen noch relativ wenig Erfahrungen über den Einfluß gleichzeitiger mechanischer und klimatischer Langzeitbeanspruchung auf die elastomechanischen Eigenschaften nach Entlasten vorliegen, wurden diese Eigenschaften an zahlreichen der in den vorigen Abschnitten beschriebenen Kriechproben nach längerer Entlastungszeit und Rückklimatisierung 20/65 ermittelt. In Tabelle 9 ist die prozentuale Veränderung der E-Moduln und Festigkeiten von Holz, Sperrholz und Spanplatten nach meist langjähriger Belastung unter sehr verschiedener Klimabeanspruchung vergleichend zusammengestellt.

Demnach hat selbst eine 8-11jährige Dauerbelastung unter teilweise wesentlich höherem als zugelassenem Belastungsgrad im trockenen Innenraumklima (20/55 bzw. 20/65) bei Vollholz und Sperrholz keine und bei Flachpreßplatten nur eine sehr geringe (unter 10 %) Abminderung der Kurzzeit-Biegeeigenschaften bewirkt. Bei den harnstoffharzverleimten Spanplatten wird allerdings eine stärkere Schwächung der relativ lockeren (und damit schubempfindlicheren) Mittelschichtzone erkennbar.

Im natürlichen Außenklima ist der Eigenschaftsabbau bei Vollholz, Furniersperrholz und Holzspanplatten ebenfalls noch relativ gering und bleibt meist unter 20 %. Die auch hier bei V20-Spanplatten (nicht feuchtbeständige Verleimung) festgestellte, stärkere Schwächung der Mittelschicht ist bei den V100-Verleimungen nicht aufgetreten. Selbst im relativ scharfen Laborklima werden die Biegeeigenschaften nach Kriechen bei Vollholz und Sperrholz nicht, bei Spanplatten nur relativ wenig beeinträchtigt.

Aus vergleichenden Untersuchungen belasteter und unbelasteter Spanplattenproben verschiedener Verleimung im Wechselklima 20/95-20/25 folgt, daß zumindest der größte Teil des Abfalls

Tabelle 9: Einfluß der Langzeitbelastung (Kriechen) unter verschiedener Klimabeanspruchung auf die elastomechanischen Eigenschaften von Vollholz und Holzwerkstoffen (Mittelwerte aus mehreren Versuchsreihen)

Material	Querschnitt HxB mm	Rohdichte kg/m ³	Klima θ/φ °C/%	Belastungs-		Eigenschafts- änderung (%)		
				Art	Grad %	Dauer Jahre	E-Modul	Festigkeit
Fichte	30x15	460	20/55	Biegung	5-50	3-11	- 1	- 2
Fichte	12x12	450	20/55	Zug	5-20	3-11	+ 2	- 1
Fichte	30x30	450	20/55	Druck	15-65	3-11	-	+ 12
Fichte	25 2	450	20/55	Torsion	9-44	3-11	+ 5(G)	+ 2
Fichte	32x190	450	Außen ¹	Biegung	3/14 ²	7	(- 3) ³	(- 14)
Kiefer	15x30	620	20/65	Biegung	20	11	- 1	+ 1
Buche	15x30	670	20/65	Biegung	20	11	+ 3	+ 6
Buche	15x30	670	20/95	Biegung	20	30d	- 1	-
Baufurnier- sperrholz	10x30...200	760	20/65	Biegung	20	11	- 2	± 0
	10x30	760	20/95	Biegung	20	30d	- 3	-
BFU-BU-100	16x300	780	95-25	Biegung	20	30d	- 3	-
BFU-Limba	15x300	640	Außen	Biegung	8/16	7	(- 7)	(- 17)
			Außen	Biegung	6/12	7	(- 8)	(+ 6)
Bau-Stab- sperrholz BST-100	19x30...50	550	20/65	Biegung	25	11	- 1	+ 11
Flachpreß- platten V20	13/22 x 30...250 19x30 19x300	600- 630 620 670	20/65	Biegung	20-33	11	- 9	- 2/- 26 (β _{2⊥})
			20/95	Biegung	20-33	30d	- 11	-
			95-25	Biegung	20-33	30d	-	-
			Außen	Biegung	20	1,6	-	- 14/- 32 (τ _{II})
Flachpreß- platten V100-div. ⁴	13...44x30 16-19x30	550-750 640-700	20/65	Biegung	20	11	- 8	- 6
V100-PF ⁵	25/38x300	680/610	20/95	Biegung	20-33	30d	- 10	-
dto mit allseitigem Oberflächenanstrich	19x300	670-770	Außen	Biegung	10/20	8	- 23	- 11
V100-div. (Industriepplatten)	19x300	670-770	Außen	Biegung	20	1,5	- 7	- 6
V100-div. (Laborplatten)	18x300	640-660	Außen	Biegung	20	1,5	-	- 18/- 13 (τ _{II})

- 1 Außen = natürliches Außenklima, überdacht
- 2 Wechsellast-Versuche mit wöchentlichem Lastwechsel
- 3 Werte in Klammern = Einzelversuch
- 4 V100-Spanplatten mit verschiedenen zugelassenen Verleimungen
- 5 V100-Spanplatten mit ausschließlicher Phenolharz-Verleimung

G = Schubmodul τ_T = Torsionsfestigkeit

τ_{||} = Scherfestigkeit parallel zur Plattenebene

β_{Z⊥} = Querzugfestigkeit

des Elastizitätsmoduls der Kriechproben nach Entlasten auf den reinen Klimaeinfluß (ohne Last) zurückzuführen ist [116].

Diese Ergebnisse zeigen, daß zumindest bei Bauteilen aus Vollholz, Sperrholz und Spanplatten unter zulässiger Dauerbelastung auch unter baupraktisch üblichen Klimaschwankungen nicht mit einem wesentlichen Abfall der elastomechanischen Eigenschaften und damit einer Beeinträchtigung der Tragfähigkeit gerechnet werden muß. Die dabei langfristig auftretenden Kriechverformungen müssen jedoch gegebenenfalls bei der konstruktiven Bemessung berücksichtigt werden (siehe auch Abschnitt 9).

5 Unterschiede im Kriechverhalten von Vollholz und Holzwerkstoffen

Wie schon in den Abschnitten 3.2 bis 3.4 ersichtlich wurde, können im Kriechverhalten von Holz und Holzwerkstoffen je nach Material, Beanspruchungsart, Belastungs- und Klimabedingungen u.U. erhebliche Unterschiede bestehen. Bild 44 zeigt an einigen Beispielen das Kriechen verschiedener Materialien im Konstantklima 20/65 sowie im natürlichen Außenklima unter Dach.

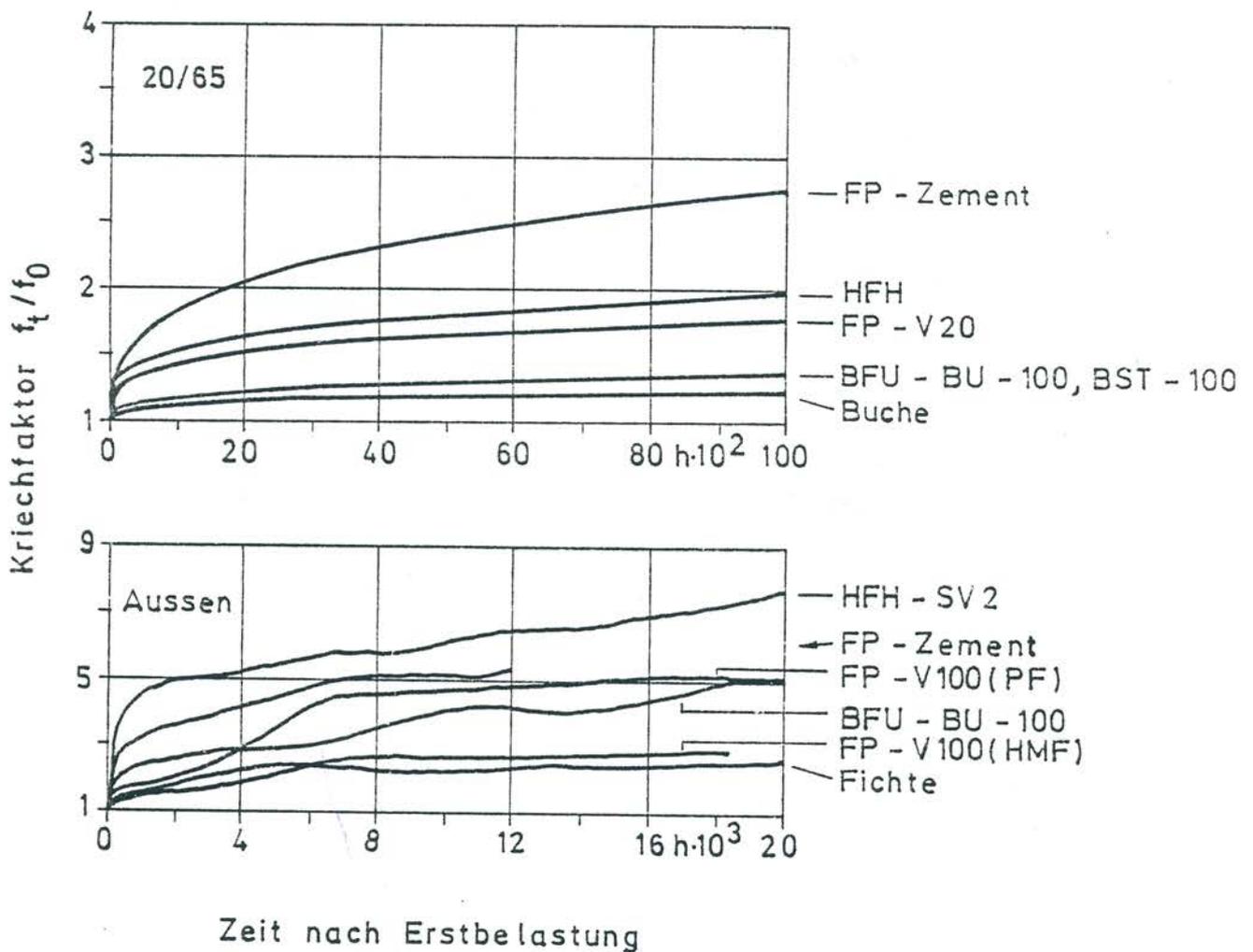


Bild 44: Kriechverhalten von Holz und Holzwerkstoffen (Beispiele)
a) im Klima 20/65 und
b) im Außenklima

In den Bildern 45 - 53 (siehe Anhang) sind zahlreiche weitere Materialvergleiche im Klima 20/65, im Außenklima, im definierten Wechselklima sowie im konstanten Feuchtklima dargestellt. Soweit in den Bildern eine rechnerische Kurvenanpassung mit eingezeichnet ist, erfolgte sie jeweils nach der Ausgleichsfunktion (3) nach Abschnitt 8.2).

Aus Bild 45 geht das Biege-Kriechen von Buche, Furniersperrholz, Stabsperrholz, Spanplatten (harnstoffharz- und zementgebunden) und Holzfaserplatten HFH im Normalklima 20/65 hervor (45a/b). Einen entsprechenden Vergleich von Schichtholz aus Fichte sowie von HFH - jeweils unter Hochkantbiegebeanspruchung - mit Buchenvollholz zeigt Bild 45c/d; zusätzlich ist das Biegekriechen (hochkant) einer phenolharzverleimten V100-Spanplatte dargestellt, deren Feuchtigkeitsgehalt während der Belastung von 25 % auf 13 % gesenkt wurde. Neben der linearen Darstellung des Kriechfaktors über der Belastungszeit (45a + c) sind zum Vergleich dieselben Kriechkurven im doppelt-logarithmischen Maßstab wiedergegeben (45b + d).

Nach ca. 10 Jahren konstanter Dauerlast im konstanten Normalklima 20/65 liegen demnach die mittleren Kriechfaktoren etwa bei 1,5 für Vollholz, bei 2,0 für Sperrholz und bei 2,5 für Spanplatten. Die Größenordnung dieser Kriechzahlen wird in zahlreichen eigenen und in der Literatur genannten Kriechversuchen bestätigt [z.B. 12, 21, 47, 116, 142, 176, 284, 366]. Solange die Versuche im wirklich konstanten und relativ trockenen Innenraumklima durchgeführt werden, sind die ausschließlich strukturbedingten Schwankungen zwischen verschiedenen Produkten eines Werkstofftyps relativ gering und können bei Vollholz bis zu ca. $\pm 0,3$, bei Sperrholz ca. $\pm 0,4$ und bei Spanplatten etwa $\pm 0,5$ erreichen.

Allgemeingültige Angaben über das Kriechverhalten von Holz-faserplatten im konstanten Normalklima sind noch nicht ohne weiteres möglich. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen

Literaturangaben sind z.T. beträchtlich [z.B. 12, 21, 97, 186, 256, 259]. Im Durchschnitt scheint das Kriechen der Holzfaserverplatten stärker zu sein als das der Spanplatten (z.B. Bild 45a/b). Inwieweit das außergewöhnlich starke Kriechen der hochkant beanspruchten HFH in Bild 45c/d als typisch für diese Beanspruchungsart gelten kann, muß mangels weiterer derartiger Untersuchungen zunächst offen gelassen werden. Daß zumindest manche Holzfaserverplatten unter Hochkant-Biegebeanspruchung wesentlich stärker kriechen als z.B. unter Flachbiegung, geht auch aus verschiedenen Dauerstandversuchen an I-Trägern mit Stegen aus HFH hervor [141, 185, 211, 336]. Bei Faserplatten, bei denen der Auflösungsgrad der natürlichen Holzstruktur am ausgeprägtesten ist, wirken sich offensichtlich schon im trockenen Innenklima strukturelle und herstelltechnische Unterschiede zwischen den einzelnen Produkten wesentlich stärker auf das Formänderungsverhalten aus als bei den übrigen Holzwerkstoffen.

Zementgebundene Holzspanplatten zeigen zumindest im Klima 20/65 ebenfalls vergleichsweise hohe Kriechverformungen (Bild 45a/b, Werte aus [391] entnommen). Unter wechselnden Klimabedingungen kann sich diese "Rangfolge" allerdings ändern (s.u.).

Wie das Kriechen durch Feuchtigkeitsänderungen unter Last verstärkt werden kann, geht anschaulich aus dem Beispiel der phenolharzverleimten V100-Spanplatte in Bild 45c/d hervor, deren hohe Anfangsfeuchtigkeit bei Belastungsbeginn ($u = 25\%$) während der Kriechdauer auf etwa 13% abnahm. Der Feuchtigkeitseinfluß auf das Kriechverhalten von Holz und Holzwerkstoffen wird nachfolgend näher diskutiert, zunächst anhand von Materialvergleichen im natürlich wechselnden Außenklima, danach im definierten Laborklima (vergleiche auch Abschnitte 3.4.1 und 5.2).

In Bild 46 ist der Einfluß des Außenklimas unter Dach (Standort: Karlsruhe) auf das Kriechen am Beispiel von Fichten-Vollholz, Buchen-Furniersperrholz (BFU-BU-100), verschieden verleimten V100-Spanplatten (3PF und 8HMF), zementgebundenen Spanplatten sowie von HFH-beplankten Strangpreßplatten (HFH-SV2) dargestellt (Bild 46a; Mittelwerte aus jeweils 3-5 Plattenabschnitten; Probenbreite 300-400 mm, bei Fichte 190 mm). Die entsprechenden Feuchtigkeitsschwankungen einiger unbelasteter Parallelproben während 7 Jahren Außenklima sind Bild 46b zu entnehmen.

Bild 47 zeigt die Kriechfaktoren von Fichte (aus Bild 46a) im Vergleich mit 2 Bau-Furnierplatten BFU-100 aus Buche bzw. aus Limba sowie mit einer phenolharzverleimten V100-Spanplatte im Außenklima (7 Jahre) unter wöchentlich zwischen voller und halber Belastungshöhe wechselnder Biegebeanspruchung (Werte aus |230|). Dabei wurden die beiden Hüllkurven jeder Probe, d.h. die jeweils am Ende der Hochlast- bzw. der Niedriglaststufe erreichten Kriechfaktoren, getrennt aufgetragen (jeweils mit gleichem Symbol gezeichnet).

Aus den Bildern 46a und 47 folgt, daß das Kriechen von Sperrholz und Spanplatten im Außenklima je nach Holzart, Plattenstruktur und Verleimung in weiten Grenzen variieren kann: am Markt erhältlich sind sowohl Sperrholz- und Spanplatten mit einem ebenso günstigen Kriechverhalten wie Fichtenvollholz (z.B. die untersuchten Produkte BFU-100 aus Limba, 8HMF) als auch Platten mit mehrfach stärkeren Kriechverformungen. Wie groß die Unterschiede zwischen einzelnen Produkten eines Normtyps sein können, geht für Bau-Furniersperrholz BFU-100 beispielhaft aus Bild 47, für Bau-Spanplatten auch aus den folgenden Bildern 48 und 49 anschaulich hervor.

In Bild 48 sind die Kriechkurven von 4 verschiedenen verleimten Holzspanplatten im natürlichen Außenklima unter Dach (Karlsruhe) dargestellt, wobei die konstante Dauerlast einmal 20 %

(Bild 48a), einmal 33 % (48b) der Kurzzeitfestigkeit betrug. Die entsprechenden Schwankungen der Plattenfeuchte sind in Bild 48c aufgetragen (alle Werte aus [95] entnommen). Während die Platten 1HF und 3PF auf derselben Anlage hergestellt wurden und sich daher hauptsächlich in ihrer Verleimung unterscheiden (Harnstoffharz bzw. Phenolharz mittlerer Alkalität), unterscheiden sich die Platten 8HMF und 4PF außer in der Verleimung (verstärktes Harnstoff-Melamin-Mischharz bzw. Phenolharz mit sehr hohem Alkaligehalt) zusätzlich in ihrer Struktur und Herstelltechnik. Die Platten 1HF und 4PF sind unter der hohen Biegebeanspruchung (BG = 33 %) während der zweijährigen Versuchsdauer gebrochen.

Bild 49 enthält weitere Kriechkurven von Holzspanplatten unterschiedlicher Verleimung (49a+b) bzw. von zementgebundenen Spanplatten unterschiedlicher Dicke (49c) im Außenklima Karlsruhe. Bei Bild 49a handelt es sich um Industrie-Spanplatten unterschiedlicher Verleimung und Verfahrenstechnik, bei Bild 49b dagegen um identisch hergestellte Laborplatten (Verleimungen: Phenolharz mittlerer Alkalität; Isocyanat (MDI); Kombination aus beiden (Deckschicht KPF, Mittelschicht KIS)). Die 12 mm, 18 mm und 24 mm dicken Zementplatten stammen alle aus einer Industrieanlage.

Der Einfluß definierter Laborklimabeanspruchung auf die Kriechverformungen verschiedener Werkstoffe aus Holz geht aus den Bildern 50-53 hervor.

In Bild 50 wird der Verlauf der Kriechfaktoren von Buchen-Vollholz, Buchen-Furniersperrholz sowie von 3 verschiedenen verleimten Holzspanplatten im Wechselklima 20/95 - 20/25 (BU, BFU, Zyklendauer je 2 Wochen) bzw. 20/95 - 20/30 (FP-V100, Zyklendauer je 1 Woche) miteinander verglichen.

Bild 51 zeigt einen Vergleich von Buchen-Vollholz, Buchen-Sperrholz und Spanplatten (3PF, 8HMF) im Wechselklima 20/95 - 20/25 bzw. 20/95-20/30 mit härten Holzfaserverplatten HFH einmal unter Zug- (51a), einmal unter Biegebeanspruchung (51b + c) im

Wechselklima 20/90 - 60/40 mit verschärften Trocknungsbedingungen. Zur besseren Auflösung der anfänglichen Kriechverformungen wurden die Kriechfaktoren aus Bild 51b in Bild 51c zusätzlich im doppeltlogarithmischen Maßstab dargestellt.

Das Kriechverhalten verschiedener Spanplatten unter Hochkant-Biegebeanspruchung im Feuchtklima 20/95 (3PF, 18BIS) bzw. bei Desorption von $u = 25\%$ auf $u = 13\%$ geht aus Bild 51d hervor.

In Bild 52 sind die Kriechfaktoren der 4 in Bild 48 (Außenklima) gezeigten Spanplatten im Wechselklima 20/25° - 20/30 in Abhängigkeit vom Belastungsgrad dargestellt (Bild 52a - c, Probenbreite 50 mm). In diesem relativ scharfen Wechselklima sind unter einem Belastungsgrad von 20 % nur die Proben der nicht feuchtebeständigen Harnstoffharzverleimung 1HF vor Versuchsende gebrochen, unter der höchsten Belastung (33 %) dagegen auch einzelne Proben der relativ beständigen Verleimungen 3PF, 4PF und 8HMF [95, 117].

Der Verlauf der Feuchtigkeitsamplituden unbelasteter Vergleichsproben - dargestellt als Maximum bzw. Minimum am Ende jeder Klimaperiode - geht aus Bild 52d hervor.

Der Einfluß unterschiedlicher Harnstoff-Formaldehyd-Harze (E1- und E2-Leime) auf das Kriechverhalten identisch hergestellter Laborspanplatten im Wechselklima 20/85 - 20/30 (15 Zyklen à 2 Wochen, BG = 25 %, Breite 50 mm) ist in Bild 53 dargestellt [394].

Die in den Bildern 48-53 in Form von Beispielen zusammengestellten Kriechkurven zeigen sehr deutlich, daß sowohl zwischen Vollholz und den verschiedenen Holzwerkstoffen als auch innerhalb der einzelnen Materialgruppen erhebliche Unterschiede im Kriechverhalten bestehen können. Auf die wesentlichsten materialbedingten Ursachen - Unterschiede in der Struktur, in der Verleimung und im Sorptionsverhalten der Werkstoffe -

soll im Folgenden anhand einer Literaturübersicht in kurzer Form eingegangen werden - vor allem im Hinblick auf eine bessere Berücksichtigung derartiger Materialeinflüsse bei der Planung und Auswertung künftiger Kriechversuche (siehe Abschnitt 10).

5.1 Einflüsse aus der Werkstoff-Struktur

5.1.1 Vollholz

Bei Vollholz können die Kriechverformungen sowohl von makroskopischen als auch von mikroskopischen Wuchsmerkmalen bis hin zur molekularen Struktur der Zellwand mehr oder weniger stark beeinflusst werden.

Ebenso wie die elastomechanischen Kurzzeiteigenschaften werden auch die rheologischen Eigenschaften von der Holzart beeinflusst [110, 150, 246, 306]. Nach [150] kann ein Großteil der Unterschiede im Kriechverhalten verschiedener Holzarten auf entsprechende Rohdichteunterschiede zurückgeführt werden; demnach nehmen die Kriechverformungen mit steigender Rohdichte ab. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt [260]. Der Rohdichteinfluß wird jedoch erheblich überlagert von weiteren Kriecheinflüssen, wie z.B. der Zellstruktur und Faserlänge (Nadelholz, ring- oder zerstreuporige Laubhölzer) oder dem Gehalt an Inhaltsstoffen, die das Sorptionsverhalten und damit auch das Kriechen positiv oder negativ beeinflussen können. Entsprechende Unterschiede können zwischen Kern- und Splintholz bestehen [246].

Das Biegekriechen von Rotbuche z.B. ist nach [110] größer als das von Kiefernholz. Die Dauerstandfestigkeit von Furniersperrholz aus Buche ist deutlich niedriger als die von Limba- oder Makore-Platten [233]. Auch Birke zeigt - obwohl schwerer - ein ungünstigeres Kriechverhalten als z.B. Fichte [286a].

Ebenso besteht eine Differenzierung im Kriechen zwischen Frühholz und Spätholz [153, 330, 352]. Je nach Beanspruchungsart und -richtung ist der Einfluß des Frühholzanteiles jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt.

Aufgrund der Anisotropie des Holzes ist ein deutlicher Einfluß der Schnittrichtung (längs, tangential, radial) sowie des Faser-Kraft-Winkels auf das Kriechverhalten festzustellen. Mit zunehmendem Winkel zwischen Faser- und Beanspruchungsrichtung nimmt das Kriechen zu [20, 307]. Das Biegekriechen unter radialer Kraft (liegende Jahrringe) ist zumindest im Konstantklima stärker als unter tangentialer Beanspruchung (stehende Jahrringe) [201, 246, 281]. Nach [281] bewirken Feuchtewechsel jedoch eine höhere Kriechgeschwindigkeit bei stehenden Jahrringen als bei liegenden. Bei Untersuchungen an Brettschichtholzträgern [329] war das Kriechen bei Lamellen mit stehenden Jahrringen (Kernbretter) schlechter als mit liegenden (Seitenbretter). Aus den in den Bildern 8, 9 und 14 (Anhang) dargestellten Kriechkurven läßt sich noch kein eindeutiger Einfluß der Jahrringlage erkennen.

Die Kenntnisse über den Einfluß von Ästen und Kerben auf das Kriechverhalten von Vollholz sind noch lückenhaft. Äste in den Zuglamellen von Brettschichtholz erhöhen nach [37] das Kriechen. In Kriechversuchen mit BSH aus Lamellen der Güteklasse I und III waren die Kriechverformungen der Träger mit hohem Astanteil nur geringfügig höher als die der Güteklasse I [286]. Bei BSH-Versuchen mit unterbrochener Randlamelle auf der Zugseite (künstliche Kerbe) war kein Unterschied gegenüber nicht gekerbten Vergleichsträgern festzustellen [386].

Allgemein muß mit einem zunehmenden Ast-Einfluß gerechnet werden je mehr die Äste in zugbeanspruchten Bereichen liegen (örtliche Faserablenkungen verringern die Zugfestigkeit mehr als die Druckfestigkeit) und je größer der Astflächenanteil ist. Ob sich die Spannungskonzentrationen und die daraus resultierenden örtlichen Spannungsumlagerungen im Bereich der Äste

bzw. Kerben auch auf das Kriechverhalten ähnlich auswirken wie bei entsprechenden Dauerfestigkeitsversuchen [197, 310], ist noch unklar.

Unterschiede im Kriechverhalten von Vollholz können sich außerdem aus dem Feinbau der Zellwand ergeben. In verschiedenen Arbeiten wurde der jeweilige Anteil von Cellulose, Hemicellulose und Lignin an der Holzsubstanz als signifikanter Einflußfaktor aufgezeigt [z.B. 53, 64, 89, 102, 115, 148, 324, 365]. So nehmen die Kriechverformungen z.B. mit steigendem Ligninanteil bei Zug- und Biegebeanspruchung zu [102]. Mit abnehmendem Hemicelluloseanteil steigt der Kristallinitätsgrad, es kommt zu vermehrten Cellulose-Cellulose-Bindungen und damit zu geringerem Kriechen [324]. Die Kriechverformungen erfolgen nach übereinstimmender Meinung zahlreicher Autoren überwiegend in den amorphen Bereichen der Zellwandbausteine [184, 236, 264, 304, 324, 383]; mit steigendem Kristallinitätsgrad sinkt das Kriechen. Ein weiterer Einflußfaktor wurde im Winkel der Mikro-fibrillen zur Faserlängsachse bzw. zur Kraftrichtung erkannt [48, 139, 148, 183, 236]. Die hauptsächlichen Kriechverformungen finden demnach in den Bereichen der Zellwand statt, in denen amorphe Bestandteile überwiegen, d.h. in den Mittellamellen und zwischen den Cellulose-Fibrillen, sowie in Bereichen mit stärkerer Fibrillen-Neigung, z.B. in Druckholz-zonen von Nadelholz, wo außerdem der erhöhte Ligninanteil kriechverstärkend wirkt [148]. Das erklärt z.B. auch die Feststellungen in [68], daß sich unter Dauerlast die ersten Gleitebenen und kleinen Druckfalten (im Mikrobereich) bei Nadelholz im Kreuzungsbereich zwischen Tracheiden und Holzstrahlen ausbildeten.

Einzelne Arbeiten versuchen, anhand derartiger Erkenntnisse Modellvorstellungen über das Kriechverhalten [370] bzw. das Bruchverhalten [332] von Holzzellen zu entwickeln. Auf diesem Gebiet bedürfen allerdings noch verschiedene Widersprüche und offene Fragen der Aufklärung.

5.1.2 Holzwerkstoffe

Bei Holzwerkstoffen überlagern sich diesen Einflüssen von Seiten der reinen Holzstruktur noch weitere Faktoren, wie z.B. Auflösungsgrad der natürlichen Holzstruktur (in Furniere, Späne, Fasern), Verleimungsart und Beleimungsgrad, eventuelle Zusatzstoffe, sowie zahlreiche verfahrenstechnische Einflüsse (z.B. Art der Zerkleinerung der Holzstruktur, Trocknung, Beleimung, thermische bzw. hydrothermische Beanspruchung sowie Verdichtung beim Preßvorgang usw.). Sämtliche hier aufgezählten Faktoren können das Kriechverhalten mehr oder weniger stark beeinflussen - entweder in positiver oder in negativer Richtung.

Systematische Untersuchungen über Struktur-Einflüsse auf das Kriechen von Sperrholz sind bisher in der Literatur nicht bekannt. Lediglich der Einfluß der Holzart der Furniere geht aus den oben genannten Arbeiten [230, 284-286a] hervor. Furniersperrholz aus Buche oder Birke kriecht demnach stärker als z.B. solches aus Nadelholz, Limba oder Makore. Angaben über den Einfluß der Furnierart (Schäl-, Messerfurniere), des Plattenaufbaues (z.B. Aufbaufaktoren nach DIN 68705 Teil 5) oder der Verleimung sind in keiner der ausgewerteten Arbeiten enthalten (für Furniersperrholz z.B. [15, 16, 36, 39, 111, 126, 131, 176, 186, 187, 188, 230, 239, 272, 284-286a, 327, 328], für Stabsperrholz [16, 169]).

Entsprechende Kriechversuche an Spanplatten sind erst in allerjüngster Zeit bekannt geworden [21, 134, 164, 176, 244, 247, 380, 384]. Im makroskopischen Bereich kann die Kriechverformung der Spanplatten als Summe aus a) Kriechverformungen der Späne, b) Kriechverformungen der Klebfugen und c) Verschiebungen zwischen den Spänen aufgefaßt werden [247].

Stark vereinfachend kann man annehmen, daß das Kriechverhalten des in der Platte fixierten Spans etwa dem des Vollholzes entspricht. Die Kriechverformungen des Spanes werden dabei in

vielfältiger Weise von der Holzart und Holzstruktur (s.o.), von der Span-Geometrie, von der Schnittrichtung und dem Faser-Last-Winkel und damit von der Spanorientierung, sowie von den verfahrenstechnischen Bedingungen (z.B. mechanische Zerstörungen bzw. Strukturänderungen beim Zerspanen, beim Transport oder bei der Verdichtung in der Presse; Trocknungstemperatur etc.) beeinflußt. Z.B. kriechen Spanplatten aus Buchenspänen stärker als solche aus Nadelholzspänen [247]. Die Kriechverformung von Spanplatten mit statistisch regelloser Spanorientierung liegt zwischen der von parallel und senkrecht zur Faserlängsrichtung beanspruchtem Vollholz [113]. Spanplatten mit orientierten Spänen kriechen weniger als solche mit regelloser Spanorientierung [123, 176]. Nach [384] verringert sich das Kriechen einschichtiger Spanplatten signifikant mit zunehmender Spanlänge, mit abnehmender Spandicke und mit steigendem Beleimungsgrad. Entsprechende Untersuchungen an 3-schichtigen Spanplatten mit konstantem Mittelschichtspan und verschiedenen Deckschichtspänen ergaben die höchsten Kriechverformungen mit Schleifstaub-Deckschichten, gefolgt von Feinstspänen, Defibratorfaserstoff und Normalspänen [380]. Platten mit Abfallspänen in der Mittelschicht kriechen stärker als solche aus reinen Schneidspänen [176]. Die Zunahme der Kriechverformung mit abnehmender Spanlänge kann damit erklärt werden, daß sich bei Abnahme der Spanlänge die Scherflächen verringern und damit gleichzeitig die Scherspannungen zwischen den Spänen erhöhen [380].

Die Fixierung der Späne in der Spanplatte erfolgt über - meist punktförmige, d.h. keineswegs vollflächige - Leimbrücken. Die Leimfuge hat die Aufgabe, die bei Belastung der Spanplatte durch äußere (mechanische) Kräfte oder durch innere (sorptionsbedingte) Quell- bzw. Schwindbeanspruchungen entstehenden Spannungen zwischen den einzelnen Spänen zu übertragen. Damit kommt auch der Leimfuge selbst und dem Übergangsbereich Klebstoff/Holzspan eine besondere Bedeutung als möglicher Einflußfaktor auf das Kriechverhalten der Spanplatte zu.

In verschiedenen Arbeiten wird über den Einfluß der Verleimungsart berichtet, z.B. in [60, 95, 116, 117, 124, 160, 176, 244, 247, 275, 276, 384]. Im konstanten Normalklima ist demnach bei den heute üblichen Spanplattenleimen (Aminoplaste, Phenoplaste, Isocyanate) der Anteil der reinen Leimfuge an der Kriechverformung der Platte nur gering. Bei Verwendung thermoplastischer Klebstoffe muß allerdings mit einem wesentlich stärkeren Kriechen der Leimfuge und damit auch der ganzen Platte gerechnet werden.

Bei zusätzlicher Feuchtigkeitsbeanspruchung sind dagegen deutlichere Unterschiede im Kriechverhalten verschieden verleimter Spanplatten zu erwarten, wie aus zahlreichen Veröffentlichungen sowie aus den eigenen Auswertungen (siehe z.B. Abschnitte 3.4, 3.5 und 5) hervorgeht. Das hygroskopische Verhalten der Klebstoffe ist hierbei offensichtlich von entscheidender Bedeutung [95, 117]. Auf die daraus resultierenden Unterschiede im Sorptionsverhalten der Holzwerkstoffe wird in Abschnitt 5.2 näher eingegangen.

Über den Einfluß des Beleimungsgrades auf das Kriechen von Spanplatten wird z.B. in [160, 176, 384] berichtet. Während sich die Kriechverformungen harnstoffharzverleimter Spanplatten im Innenklima bei [160] mit steigendem Festharzanteil erhöht haben, zeigten entsprechende Untersuchungen bei [384] genau das gegenteilige Verhalten. Die Ursache für diese Differenzen ist unklar. Möglicherweise sind hierfür verfahrenstechnische Unterschiede (z.B. unterschiedliche Beleim- oder Preßtechnik) verantwortlich. Im Außenklima bewirkte eine Erhöhung des Beleimungsgrades eine deutliche Verbesserung des Kriechverhaltens [160].

Bei der Spanplattenherstellung werden häufig Zusatzstoffe wie z.B. Hydrophobierungsmittel oder Holzschutzmittel zugegeben. Auch diese können u.U. das Kriechverhalten beeinflussen. Der Einfluß des Paraffinzusatzes wird z.B. in [135, 160, 244, 384] untersucht. Nach [160] erhöht sich das Kriechen harnstoffharz- und phenolharzverleimter Spanplatten im

Innenraumklima durch die Zugabe von Paraffin deutlich. Im Gegensatz dazu führte eine Erhöhung des Paraffinanteils in anderen Versuchen [384] zu einer Verringerung der Kriechverformungen harnstoffharzverleimter Spanplatten. Im Außenklima wirkte sich die Zugabe von Quellschutzmittel (Paraffin) dagegen eindeutig positiv aus [160]. Ebenso nimmt die Dauerstandfestigkeit im Außenklima mit Paraffinzusatz deutlich zu [135].

Durch Zugabe eines (nicht genannten) Pilzschutzmittels hat sich das Kriechverhalten phenolharzverleimter Spanplatten im Außenklima nur geringfügig erhöht [180]. Weitere Untersuchungen hierzu fehlen bisher.

Über den Einfluß der Rohdichte auf das Kriechen von Spanplatten liegen ebenfalls widersprüchliche Angaben vor [40, 160, 259, 384]. Die Ursachen dafür dürften einerseits in den unterschiedlichen Versuchs- und Auswertemethoden, andererseits jedoch auch darin liegen, daß i.a. die durchschnittliche Rohdichte der ganzen Platte als Bezugsbasis verwendet wird anstatt des je nach Verfahrenstechnik mehr oder weniger stark variierenden Rohdichteprofiles. Flachgepreßte Spanplatten können vereinfacht als dreischichtiges Verbundelement aus den stärker verdichteten und meist höher beleimten Deckschichten und der weniger verdichteten, geringer beleimten Mittelschicht betrachtet werden. Dieser Schichtenaufbau - das Beplankungsverhältnis - kann von Produkt zu Produkt je nach Rohdichte- und Beleimungsprofil erhebliche Unterschiede aufweisen, die sich unter anderem auch in einem unterschiedlichen Kriechverhalten niederschlagen. Über den Einfluß der Plattenschichten auf die Kriechverformungen liegen erst wenige Arbeiten vor [116, 134, 164, 380]. Zwischen Deck- und Mittelschicht bestehen strukturell bedingt erhebliche Unterschiede im Kriechverhalten; so kann die Mittelschicht mehrfach stärkere Kriechverformungen erreichen als die Deckschichten [116, 176]. Aufgrund der Spannungsverteilung im Biegestab wird die Kriechverformung der

ganzen Spanplatte bei üblichen Stützweitenverhältnissen jedoch im wesentlichen durch die Deckschichten bestimmt [164]. Bei reiner Schubbeanspruchung hängt das Kriechen dagegen überwiegend von der Mittelschicht ab. Interessant ist weiter die Beobachtung, daß das Zug-Kriechen der Deckschichten größer ist als das Druck-Kriechen; das wurde sowohl bei Biegeversuchen am ganzen Plattenquerschnitt [134, 164] als auch bei reiner Zug- bzw. Druckbeanspruchung der isolierten Deckschichten festgestellt [164]. Wie bei Vollholz ist auch bei Spanplatten ein Einfluß der Belastungsart (Zug, Druck, Schub) auf die Kriechverformung bzw. die Kriechgeschwindigkeit vorhanden. Das stärkste Kriechen tritt unter Schubbelastung auf.

Zu diesen strukturbedingten Kriecheinflüssen sind noch weitere, systematische Untersuchungen erforderlich.

Bei Holzfasерplatten ist die natürliche Holzstruktur noch stärker aufgelöst als bei Spanplatten. Die im Vergleich zu einer Vollholz- oder Furnierverklebung schon bei Spanplatten stark verringerten Kontaktstellen zwischen den Spänen sind bei Faserplatten noch weiter reduziert. Dadurch wird ein gegenseitiges Verschieben oder Abgleiten benachbarter Fasern bzw. Faserverbände unter Last erleichtert [247].

Ein weiterer Einfluß, der das vergleichsweise ungünstigere Kriechverhalten von Holzfasерplatten mit bewirken kann, liegt in der hydrothermischen Vorbehandlung des Holzes bei der Zerkleinerung; durch den Dämpfvorgang wird die Plastizität des Holzes wesentlich erhöht [247].

Auch bei Faserplatten muß mit einer mindestens ebenso ausgeprägten Beeinflussung der Kriechverformungen durch die Plattenstruktur gerechnet werden wie bei Spanplatten. So kriechen beispielsweise im Trockenverfahren hergestellte Hartfasерplatten (HFH) stärker als im Naßverfahren hergestellte [300, 336, 337]. Systematische Untersuchungen über Struktureinflüsse auf das Kriechverhalten von harten und mittelharten Holzfasерplatten sind bisher allerdings nicht bekannt geworden.

Zu den Struktur-Einflüssen im weiteren Sinne können auch die verschiedenen Beschichtungen von Holzwerkstoffen gerechnet werden. Je nach dem angestrebten Ziel - dekorative, Schutz- und/oder verstärkende Funktion - kommen die verschiedensten Beschichtungsmaterialien zur Anwendung, die auch das Kriechverhalten der beschichteten Holzwerkstoffe mehr oder weniger stark beeinflussen können.

Während Flüssigbeschichtungen sowie dünne Dekorfilme und PVC-Folien keine nennenswerte Verbesserung des Kriechens bewirken [21, 137, 226], können dickere und biegesteifere Beschichtungsmaterialien, wie z.B. Furniere, DKS, GFK oder Metalle, die Kriechverformungen erheblich verringern.

Allerdings kann das Kriechen auch durch dünne und relativ biegeweiche Beschichtungen dann wesentlich verbessert werden, wenn mit erhöhter Feuchtigkeitsbeanspruchung zu rechnen ist (Anti-Sorptionswirkung, siehe z.B. Bild 25).

Untersuchungen an furnierten Spanplatten sind z.B. in [16, 46, 52, 137, 226 und 295] beschrieben, an furnierten Holzfasernplatten in [54]. Mit zunehmender Furnierdicke nähert sich das Kriechverhalten dieser Verbundwerkstoffe immer mehr demjenigen des entsprechenden Vollholzes.

Durch Verstärkung mit Aluminiumblechen [226] oder mit glasfaserverstärkten Kunststoffen [36] können die Kriechverformungen auf einen Bruchteil derjenigen der unbeschichteten Trägermaterialien verringert werden. Selbst bei Vollholz hat sich z.B. das Biegekriechen nach 5 Jahren Außenklima durch die GFK-Beplankung noch auf $f_t/f_0 = 2,1$ ermäßigt.

Eine rechnerische Behandlung der Verstärkungswirkung von Beschichtungen wird in [104, 169, 295] versucht. Hierzu sind allerdings noch umfangreichere experimentelle Bestätigungen erforderlich.

5.2 Einfluß des Sorptionsverhaltens

Holz und Holzwerkstoffe haben als hygroskopische Materialien das Bestreben, ihren Feuchtigkeitsgehalt dem jeweiligen Umgebungsklima anzupassen. Dabei können zwischen den verschiedenen Holzarten und vor allem zwischen den verschiedenen Holzwerkstoffen erhebliche Unterschiede in der Ausgleichsfeuchtigkeit bei gegebenem Umgebungsklima bestehen. Je höher dabei die jeweilige Ausgleichsfeuchte ist, desto größer werden u.a. auch die Verformungen unter Last; d.h. das Kriechen wächst mit steigendem hygroskopischem Potential des Materials.

Während die Unterschiede in der Hygroskopizität und damit im Sorptions- und Kriechverhalten der verschiedenen Werkstoffe aus Holz im unteren und mittleren Bereich der relativen Luftfeuchte noch verhältnismäßig gering sind, werden die Differenzen bei höherer Luftfeuchte zunehmend größer und sind in der Nähe des Fasersättigungsbereiches am ausgeprägtesten. So liegen beispielsweise die Ausgleichsfeuchten von Vollholz bei Fasersättigung, d.h. bei annähernd gesättigter Luft, zwischen etwa 23 % und 35 % Holzfeuchte. Bei unterschiedlich verleimten Holzspanplatten schwanken die Werte sogar zwischen etwa 20 % und über 60 % [393]. Entsprechende Werte von Holzfaserverleimplatten sind nicht bekannt; je nach Herstellungsverfahren und Nachbehandlung der Platten sind jedoch ebenfalls erhebliche Unterschiede in der Fasersättigungsfeuchte zu erwarten.

Unter praktischen Einsatzbedingungen und bauphysikalisch richtiger Konstruktion werden diese hohen Materialfeuchten normalerweise nicht erreicht. Außerdem sind Holz und Holzwerkstoffe als relativ sorptionsträge zu bezeichnen; d.h. bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchtigkeit in einem stationären Umgebungsklima vergehen meist mehrere Wochen. Dennoch können erhebliche Unterschiede in der Sorptionsgeschwindigkeit bestehen. Diese hängt nicht nur von den äußeren Randbedingungen

ab, wie z.B. vom Unterschied zwischen Ist- und angestrebter Ausgleichsfeuchte oder von der Sorptionsrichtung (Feuchtigkeitsaufnahme oder -abgabe), sondern wird entscheidend von der Hygroskopizität des Materials mit beeinflusst.

5.2.1 Sorptionsverhalten im konstanten Feuchtklima

Wie groß dieser Einfluß der Hygroskopizität sein kann, wird in Bild 54 (Anhang) am Beispiel von 3 verschiedenen verleimten und nach verschiedenen Verfahren hergestellten Industrie-Spanplatten im Konstantklima 20/95 gezeigt, in dem die Feuchtigkeitsaufnahme und die Dickenzunahme ganzer Proben sowie der Deck- und Mittelschicht getrennt über der Sorptionszeit aufgetragen sind [117]. Die Gewichtsänderung ist bei der Platten-type 4PF (stark alkalisches Phenolharz) nicht nur wesentlich stärker, sondern erfolgt auch deutlich schneller als bei dem weniger alkalischen Phenolharz 3PF und bei der modifizierten Harnstoff-Melaminharzverleimung 8 HMF. Die Feuchtigkeitsaufnahme der Deckschichten ist anfangs wesentlich höher, d.h. sie erfolgt wesentlich schneller als bei der Mittelschicht. Das dürfte auf die erheblich größere Sorptionsfläche der Deckschichten (Schmalfläche + 1 Oberfläche, $50 \times 50 \text{ mm}^2$) gegenüber den Mittelschichten (nur Schmalflächen sorbieren) zurückzuführen sein. Nach etwa 15-30 Tagen bestehen jedoch keine nennenswerten Unterschiede mehr zwischen der Feuchtigkeitsaufnahme der ganzen Proben sowie der Deck- und Mittelschichten. Die Ursache für das anfängliche "Überschwingen" der Feuchtigkeitsaufnahme insbesondere bei der Platte 4PF bedarf noch der Klärung.

Während die Feuchtigkeitsaufnahme im Klima 20/95 häufig schon nach 10-20 Tagen ihr Maximum erreicht, nimmt die entsprechende Dickenquellung auch nach Erreichen dieser "Ausgleichsfeuchte" noch weiter zu: bei den PF-verleimten Proben wird die maximale Dickenquellung etwa nach 50-55 Tagen, bei der aminoplastverleimten Platte 8HMF selbst während der gesamten Versuchsdauer von 74 Tagen erst annähernd erreicht.

Die Dickenänderungen weisen erhebliche Unterschiede während der gesamten Versuchszeit auf: die wesentlich stärker verdichteten Außenschichten quellen etwa 2-3 mal stärker als die weniger verdichteten Mittelschichtzonen. Aufgrund der vergleichsweise geringen Dicke der Deckschichten wirkt sich diese stärkere Dickenquellung jedoch nur relativ wenig auf die resultierende Quellung des gesamten Querschnitts aus [117].

Solange derartige Quell- bzw. auch Schwindbewegungen nicht zum Stillstand gekommen sind, muß mit Änderungen im inneren Spannungszustand des Materials gerechnet werden, die sich der äußeren Beanspruchung der Kriechproben in sehr komplexer Form überlagern. Nach [269] sind diese äußeren und inneren Kräfte nicht superponierbar. Schon relativ geringe Feuchteschwankungen von $\pm 1\%$ haben z.B. einen deutlichen Einfluß auf das Druck-Kriechen von Vollholz gezeigt.

In welchem Ausmaß das Sorptionsverhalten von Spanplatten je nach Plattenstruktur, Verleimungsart und Beleimungsgrad variieren kann, geht auch aus Tabelle 10 hervor [117].

Sowohl zwischen den verschiedenen Verleimungsgruppen als auch zwischen den verschiedenen Plattentypen innerhalb der einzelnen Gruppen können demnach Unterschiede in der Feuchtigkeitsaufnahme von über 2:1 bestehen. Besonders ausgeprägt sind diese Unterschiede bei den phenolharzverleimten Platten; neben der unterschiedlichen Verfahrenstechnik spielt hier die alkalibedingte Hygroskopizität eine entscheidende Rolle. Im Feuchtklima 20/95 beispielsweise bewegt sich die Feuchtigkeitsaufnahme der untersuchten PF-Platten zwischen 7 % und 23 %, bei den aminoplastgebundenen Platten zwischen 5,5 % und 12 %, bei den untersuchten Isocyanatplatten zwischen 5,2 % und 7,4 % (jeweils bezogen auf den Gleichgewichtszustand 20/65). Das bestätigt, daß auch phenolharzverleimte Spanplatten bei entsprechend niedrigem Alkaligehalt ein ebenso günstiges Sorptionsverhalten aufweisen können wie z.B. aminoplast- oder isocyanatgebundene Platten [117].

Tabelle 10: Feuchtigkeits-/Dickenänderungen von verschiedenen verleimten Holzspanplatten im Feuchtklima 20/95 bzw. im Wechselklima 20/95-20/25 in %, bezogen auf den normalklimatisierten Anfangszustand 20/65; in () Klimadauer in Tagen (Werte einer Zeile stammen nicht immer vom selben Plattentyp)

Verleimung	Ausgleichsfeuchtigkeit 20/65	Änderung im Feuchtklima 20/95 $\Delta G/\Delta d$	Änderung im Wechselklima	
			20/95 $\Delta G/\Delta d$	20/25 $\Delta G/\Delta d$
HF	9,7	10 / 9 (74)	2,5 1,6 (1)	-2,2 -0,9 (1)
	9,3	10 / 11 (74)	6,1 4,8 (2)	-4,8 -0,2 (2) ^b
	9,7	7,4/ 6,2 (30) ^a	2,0 1,0 (1)	-2,5/ -0,7 (1)
	9,6	8,2/ 7,3 (30) ^a	5 / 4 (3)	-1 / +1,2 (4) ^a
	8,7 (L)	7,5/ 6,5 (30) ^a		
	10,4 (L)	5,4/ 3,6 (13) (L)		
HMF	10,3	9,5/ 6 (74)	1,6-0,9 (1)	-2,1 -0,6 (1)
	9,9	7 / 4 (33)	3,5 1,7 (1)	-1,2 -0,2 (1)
	10,1	12 / 6,3 (30) ^a	2,0 1,0 (1)	-1,5 -0,5 (1)
	12,9 (B1)	7,8/ 4,5 (30) ^a	3,9 2,9 (2)	-4,8/ -1,0 (2) ^b
	9,1 (L)	11,4/ 6,3 (21)	2,7/2,1 (2)	-4,3/ -0,7 (2) ^b
	9,6 (L)	5,7/ 3,6 (13) (L)	3,5 1,7 (3)	-1,2/ +0,1 (4) ^a
		5,9/ 3,5 (13) (L)		
PF	10,7	15 / 8 (74)	2,3 1,3 (1)	-2,2/ -0,4 (1)
	11,5	11,5/ 6,4 (33)	4,4 2,1 (1)	1,4/ 0,3 (1)
	9,9	11,5/ 7,8 (30) ^a	3,0 1,7 (1)	-2,2/ -0,8 (1)
	11,2	21 / 7,7 (30) ^a	6,8 3,9 (2)	-5,0/ -0,9 (2) ^b
	10,2 (L)	23 / 8,6 (30) ^a	5,8 3,6 (3)	-1 / +1,0 (4) ^a
	8,7 (L)	7,4/ 4,6 (13) (L)	11 3,3 (3)	-1 / +0,5 (4) ^a
	9,5 (L)			
IC	8,6 (L)	6,8/ 5,3 (21)	4,1/3 (3)	-2,1/ -0,3 (1) (L)
	8,4 (L)	7,4/ 5,0 (21)	5,5 4,0 (2)	-1,5/ +0,5 (2) (L)
	9,6	6,6/ 4,5 (21)	7 5,5 (2)	-2 / +1 (2) (L)
	9,7	7,2/ 4,8 (21) (L)	5,7 4,5 (2)	-1,2/ +1,1 (2) (L)
	8,6 (L)	6,9/ 4,9 (21) (L)		
	8,9 (L)	5,2/ 3,6 (21) ^a		
		5,7/ 3,8 (21) ^a		
	5,7/ 4,1 (21) ^a			
PF/IC	8,0	—	7,9 5,1 (2)	-3,5/ +0,1 (2) ^b
	8,8 (L)	—	8,8/5,5 (2)	-2,4/ +0,4 (2)
			PF-DS: 23 / — (2)	
		IC-MS: 10 / — (2)		-2 / — (2)
BIS	5,0	7 3,5 (74)	3,5 1,4 (3)	+0,2/ +0,5 (4) ^a
	4,3	5,3 2,8 (30) ^a		

(L) = Laborplatten; (B1) = mit Flammschutzmittel

a Probenfläche größer als 50 mm x 50 mm

b Trockenstufe 35°C/25% r.L.

5.2.2 Sorptionsverhalten unter wechselnden Klimabedingungen

Aufgrund der Sorptionsträgheit von Holz und Holzwerkstoffen einerseits und den natürlichen Klimaschwankungen unter baupraktischen Bedingungen andererseits werden derartige Ausgleichsfeuchtigkeiten in Wirklichkeit aber kaum erreicht. Dennoch können sich Unterschiede in der Hygroskopizität der Werkstoffe auch unter wechselnden Klimabeanspruchungen mehr oder weniger deutlich in unterschiedlichem Sorptions- und Kriechverhalten niederschlagen, wie im Folgenden anhand von Beispielen gezeigt wird.

In Bild 55 (Anhang) sind die Gewichts- und Dickenänderungen der 4 verschiedenen verleimten Spanplattentypen aus Bild 48 bzw. Bild 52 im natürlichen Außenklima bzw. im definierten Wechselklima 20/95-20/30 vergleichend zusammengestellt [95]. Während zweijähriger natürlicher Bewitterung unter Dach zeigen sich aufgrund der unterschiedlichen Hygroskopizität ausgeprägte Unterschiede in den Feuchtigkeits-Amplituden, d.h. in der Schwankungsbreite der Plattenfeuchte (Bild 55a). Aus dem Verlauf der Feuchteänderungen folgt, daß sich den jahreszeitlich bedingten, langwelligen Schwankungen (im Sommer niedrigere, im Winter höhere Plattenfeuchten) kurzwelligere Schwankungen mit kleineren Amplituden in Abhängigkeit von der jeweiligen Witterungslage zum Zeitpunkt der (wöchentlichen) Messungen überlagern. Sowohl die langwelligen als auch die kurzwelligen Feuchteschwankungen sind bei der stark alkalischen Phenolharzplatte 4PF am stärksten, bei 8HMF am geringsten.

Im definierten Wechselklima liegen die Unterschiede in der gleichen Größenordnung (Bild 55b+d; es sind nur die Maxima bzw. Minima am Ende jeder Klimaperiode aufgetragen).

In Tabelle 11 sind die Gewichts- und Dicken-Amplituden der 4 Platten im Außenklima sowie zu Beginn und am Ende der 30-wöchigen definierten Wechselklimabeanspruchung zusammengefaßt [117].

Tabelle 11: Gewichts- und Dickenänderungen im natürlichen Außenklima (unter Dach) und im Wechselklima 20/95-20/30 (30 Zyklen; 1 Zyklus = 3 Tage 20/95 + 4 Tage 20/30); Amplitude (Maximalwert-Minimalwert), Mittelwerte aus 1 = 4 (Außenklima, Probengröße 300x300 mm) bzw. 1 = 5 (95-30, Probengröße 50x500 mm) Einzelwerten

Plattentyp	Klima	Gewichts-Amplitude %	Dicken-Amplitude %
1HF	Außenklima	4,6	2,9
	20/95-20/30a	5,8	2,5
	b	6,2	3,3
8HMF	Außenklima	3,6	1,7
	20/95-20/30a	4,6	1,5
	b	4,6	1,9
3PF	Außenklima	7,0	3,7
	20/95-20/30a	6,0	2,5
	b	6,0	3,0
4PF	Außenklima	12,2	4,3
	20/95-20/30a	11,5	2,4
	b	11,5	2,7

a Zu Beginn der Bewitterung

b Am Ende der Bewitterung

Die Feuchtigkeitsamplituden der Platten mit der geringsten (8HMF) und mit der stärksten Hygroskopizität (4PF) verhalten sich etwa wie 1:3,4 (Außenklima) bzw. wie 1:2,5 (Wechselklima 20/95-20/30).

Die entsprechenden Dickenänderungen unterscheiden sich zwar ebenfalls deutlich bei den 4 Verleimungen (Bild 55c + d); die ausgeprägten Hygroskopie-Unterschiede zwischen den beiden Phenolharzplatten wirken sich bei der Dicke jedoch praktisch nicht mehr aus bzw. werden von anderen Struktureinflüssen überlagert.

Weitere Gewichts- und Dickenänderungen verschiedener Spanplatten in verschiedenen, definierten Wechselklimaversuchen sind den Tabellen 7 und 10 zu entnehmen (s.o.). Tabelle 7 bestätigt beispielsweise, daß sich die unterschiedliche Hygroskopizität der untersuchten Spanplatten erst oberhalb einer relativen Luftfeuchte von etwa 80 % deutlicher auf das Sorptionsverhalten auswirkt.

Einen Vergleich des Sorptionsverhaltens der beiden Spanplatten 3PF und 8HMF mit einer weiteren PF-Spanplatte, einer phenolharzverleimten Buchen-Furnierplatte sowie mit Fichten-Vollholz im natürlichen Außenklima zeigt Bild 46b (Anhang).

5.2.3 Zusammenhang zwischen Sorptions- und Kriechverhalten

Die an unbelasteten Vergleichsproben festgestellten Unterschiede im Sorptionsverhalten der verschiedenen Spanplattentypen kommen im Kriechverhalten der betreffenden Platten noch deutlicher zum Ausdruck (vergleiche z.B. die Bilder 46, 48 und 52). Die höhere Feuchtigkeitsaufnahme der Platten 4PF bewirkte eine wesentlich schnellere und stärkere Kriechverformung unter Dauerbiegebeanspruchung. Das Verhältnis der maximalen Kriechfaktoren der Platten 8HMF:4PF betrug im Außenklima etwa 1:3,5 und entspricht somit genau dem entsprechenden Verhältnis der Feuchtigkeitsamplituden. Dagegen war das Sorptions- und das Kriechverhalten der Plattentypen 3PF und 1HF, die beide auf derselben Anlage mit gleicher Verfahrenstechnik und gleicher Struktur hergestellt worden waren, weitgehend gleich [117].

Im definierten Wechselklima 20/95-20/30 werden die verschiedenen Verleimungstypen noch deutlicher differenziert. Das Verhältnis der Kriechfaktoren 8HMF:4PF lag ebenfalls bei etwa 1:3,5, bei einem Sorptionsverhältnis von ca. 1:2,5; betrachtet man die beiden Phenolharztypen 3PF und 4PF allein, betragen die entsprechenden Verhältnisse immer noch 1:1,9 (Feuchteamplituden) bzw. 1:1,8 (Kriechen) und sind damit nahezu identisch [95].

Der Hygroskopizität der Spanplatte als Ganzes und den daraus resultierenden Sorptionseigenschaften kommt demnach eine grundlegende Bedeutung im Hinblick auf das Kriechverhalten (und andere Gebrauchseigenschaften) der Platten zu. Die erheblichen Unterschiede im Wirkungsgrad der verschiedenen Klimabeanspruchungen (siehe Abschnitt 3.4.1) sind zu einem großen Teil auf das unterschiedliche Sorptionsverhalten zurückzuführen.

Entsprechende, systematische Untersuchungen über die Zusammenhänge zwischen dem hygroskopisch bedingten Sorptionsverhalten und dem Kriechen bei den anderen Holzwerkstoffen und bei Vollholz sind nicht bekannt. Daß hier zumindest qualitativ ähnliche Abhängigkeiten bestehen, ist aus einer Vielzahl von Einzeluntersuchungen zu erkennen.

6 Kriechverhalten von Holzbauteilen und Verbindungsmitteln

Die vorliegende Arbeit muß sich aus verschiedenen Gründen auf das Kriechverhalten von Vollholz und Holzwerkstoffen als Hauptbestandteile von Holzbauteilen beschränken. Eine umfassende Analyse und Diskussion des Formänderungsverhaltens unter Dauerlast der aus diesen Halbzeugen hergestellten Bauteile einschließlich ihrer Verbindungsmittel würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

Bei der umfassenden Literaturlauswertung wurden jedoch zahlreiche Veröffentlichungen zu diesem Themenkomplex mit erfaßt und sollen daher hier zur Information mit aufgeführt werden.

6.1 Holzbauteile

Über Kriechversuche an Brettschichtholz-Trägern wird in verschiedenen Arbeiten berichtet [37, 286, 352, 382, 386]. Nach 2 Jahren im Konstantklima 20/75 lag der Kriechfaktor f_t/f_0 bei Fichtenträgern (BSH) je nach Belastungsgrad zwischen 1,2 und 1,6 [386]. Nach mehrjähriger Dauerbelastung im natürlichen Außenklima unter Dach wurden an Nadelholz-Trägern Kriechfaktoren zwischen ca. 1,6 [382] und 3,1 [286] gemessen. In [352] wurde festgestellt, daß das Kriechen der BSH-Träger überwiegend in der Leimfuge selbst und nicht in den Übergangszonen Leim/Holz erfolgt. Der Holzfasernbelag war bei Kriechproben geringer als bei unbelasteten Vergleichsproben. Mit steigender Leimfugendicke nimmt das Kriechen zu. Verstärkungen mit Asbestfasern, Glasfasern sowie Glasfasergeweben in den Leimfugen bewirkten alle eine Verbesserung des Kriechverhaltens [352]. Vorgespannte BSH-Träger mit 10 mm Rundstahl-Verstärkung in der Zugzone zeigten nach 8 Jahren Dauerlast (im Innenklima 3,5 Jahre und anschließend im Außenklima 4,5 Jahre) einen Kriechfaktor unter 2,0. Nach Entlastung war keine nennenswerte Abnahme des Elastizitätsmoduls und der Vorspannkraft festzustellen [37].

Die Dauerstandfestigkeit von BSH-Trägern aus Fichtenholzlamellen bei etwa 12 % Holzfeuchte beträgt nach [329] etwa 63 - 68 % der statischen Biegefestigkeit, die Dauerschwingfestigkeit im Schwellbereich ca. 58 - 59 %.

Entsprechende Kriechversuche an Fachwerkträgern mit verschiedenen Verbindungsarten werden in [42, 43, 59, 94, 141, 205, 318, 360] behandelt. Nach [59] lag der Kriechfaktor von Fachwerkträgern aus Fichte mit Nagelplattenverbindungen nach 7 Tagen Belastung bei ca. 1,5. Nach 10 Jahren betragen die Werte 2,2 - 3,2 [205]. Die Steifigkeit und die Bruchlasten waren nach 10 Jahren nicht abgefallen. Die Nagelgeometrie beeinflusst nach [318] die Kriechverformungen erheblich. Vergleichsversuche an Fachwerkträgern mit verschiedenen Verbindungsmitteln im Außenklima unter Dach ergaben bei geleimten Furniersperrholz-Knoten Kriechfaktoren von 1,6 - 1,8, bei genagelten BFU-Knoten von 2,0 - 3,0. Nach diesen Untersuchungen findet der Hauptanteil der Kriechverformungen im ersten Jahr der Beanspruchung statt. Nach Entlasten wurde kein Festigkeitsabfall festgestellt. In der gleichen Größenordnung lag das Kriechen nach 4,5 Jahren Außenklima bei Versuchen an Fachwerkträgern mit Nagelplatten, genagelten Stahlblechen und genagelten Furnierplatten-Knoten [94] : die Kriechfaktoren unter Konstantlast lagen zwischen 2,0 und 3,3, unter Wechsellast (Schneeperioden simuliert) zwischen 2,3 und 3,9. Die Unterschiede zwischen verschiedenen Verbindungsarten verringern sich nach [42, 43] mit der Belastungsdauer aufgrund von Last- bzw. Spannungsumlagerungen beim Auftreten von Verschiebungen. Nach [42, 360] sind die Kriechverformungen der Fachwerksträger abhängig von der Steifigkeit der Verbindungsmittel.

Eine zerstörungsfreie Methode zur Bestimmung der Dauerfestigkeit von Fachwerkträgern wird in [141] zur Diskussion gestellt.

Das Kriechverhalten von verleimten Doppel-T-Trägern wird z.B. in [132, 185, 211, 228, 256, 336, 348] beschrieben. Während nach [211] Träger mit Stegen aus Hartfaserplatten (HFH) ähnlich beständig sein sollen wie mit Stegen aus Furniersperrholz (BFU), schwanken die Ergebnisse anderer Veröffentlichungen über I-Träger mit HFH-Stegen sehr stark : nach 2 Jahren Innenraumklima lag der Kriechfaktor nach [336] bei ca. 1,8, nach 2 Jahren Außenklima unter Dach bei 3,1 und im Wechselklima 30/20-30/80 (je 48h) nach knapp 2 Jahren je nach HFH-Type zwischen 5,1 und 9,5. Nach 200 Tagen Innenraumklima (mit erheblichen Schwankungen) betrug die Kriechfaktoren nach [228] ca. 2-3. Bei Trägern aus mehreren, miteinander verleimten HFH-Lamellen unter Hochkant-Biegebeanspruchung betrug der Kriechfaktor nach 3,5 Jahren Innenklima bereits 5,0 bis 7,5 [256]. Die schon in Abschnitt 5.1 angesprochenen, erheblichen Strukturunterschiede bei Holzfaserverplatten sind möglicherweise eine Erklärung für diese unterschiedlichen Ergebnisse.

Bei I-Trägern mit Stegen aus BFU (statt aus HFH, s.o.) wurden in [336] nach knapp 2 Jahren Dauerlast im Innenklima Kriechfaktoren von ca. 1,6, im Außenklima von 2,0 und im Wechselklima von 4,7-5,0 gemessen. Andere Versuche mit Stegen aus Birken-BFU im Außenklima ergaben nach 240 Tagen Kriechfaktoren von ca. 2,7 bzw. 4,4, bei einem Durchbiegungsanteil aus Querkraft von 15-20 % bzw. 40-45 % an der Gesamtdurchbiegung [348]; bei zusätzlicher, relativ kurzfristiger Austrocknung der Träger von $u = 17\%$ auf $u = 10\%$ erhöhte sich das Kriechen auf das 1,4-fache.

Über das langfristige Formänderungsverhalten von Holztafeln mit Holzwerkstoffbeplankungen wird in [100, 122, 210] berichtet. So ergaben beispielsweise Kriechversuche an 3-teiligen Tafeln mit aufgenagelten Spanplatten nach 1 Jahr Außenklima unter Dach Kriechfaktoren von etwa 4,0 [210]. In anderen

Untersuchungen mit genagelten BFU- und verschiedenen Spanplatten-Bepunktungen (OSB, wafers, shavings) wurden nach 2 Jahren Dauerlast im Innenklima Kriechfaktoren von 2,4 (BFU) bis 3,5 (shavings) gemessen |122|; im Wechselklima 22/45-22/65 (je 48h) betragen die Werte nach 400h 1,5 (BFU) bis 1,8 (shavings), im Wechselklima 22/45-22/85 (je 48h) 3,2 (BFU) bis 2,4 (shavings); bei Bewässerung und anschließender Austrocknung lagen die Kriechfaktoren bei Bepunktung mit OSB-Platten bei 2,6, mit BFU bei 5,6 und mit Spanplatten aus shavings bei 6,2. Eine deutliche Verstärkung der Kriechverformungen wird demnach bei einer relativen Luftfeuchte von 85 % festgestellt; als "Grenze" für verstärktes Kriechen wird eine Luftfeuchte von ca. 75 % angegeben |122|.

In |100| werden orientierende Versuche mit einseitig bepunkteten Dach- bzw. Deckentafeln (genagelt) unter Schneelast beschrieben und entsprechende Berechnungsmodelle angegeben. Dabei wird (zu Recht) auf viele offene Fragen hingewiesen, die hier noch bestehen.

Mit dem langfristigen Durchbiegungsverhalten von Fachböden befassen sich z.B. |16, 17, 21, 169, 170, 277|. Bei Regalböden aus Holzwerkstoffen unter gleichmäßig verteilter Last wurden nach 140 Tagen Innenraumklima Kriechfaktoren zwischen 1,2 und 2,3 je nach Material und Beschichtung gemessen (Spanplatten, Strangpreßplatten roh und furniert sowie mittelharte Holzfaserverplatten) |21|. Nach Versuchen von |16| betrug das Verhältnis der Kriechfaktoren von Stabsperrholz : Furniersperrholz : Spanplatte nach 150 Tagen "Wohnraumklima" 1:1,14:1,18. In |169, 170| wird eine sogenannte "Kriechzahl" ρ definiert als die Kriechverformung ($f_t - f_0$), bezogen auf die Anfangsverformung (f_0), und es werden einige Zahlenwerte für Vollholz, Sperrholz, Spanplatten und mittelharte Faserplatten mit und ohne Beschichtung genannt (ohne Versuche).

Berechnungsverfahren zur Bestimmung des Kriechverhaltens von waagrecht tragenden Möbelteilen werden in |17| und |277| angegeben.

6.2 Verbindungsmittel

Untersuchungen über das Verschiebungsverhalten von Nagelverbindungen unter Dauer-Scherbeanspruchung sind z.B. [79, 138, 167, 228, 229, 231, 250, 381] zu entnehmen.

Einfache Nagelverbindungen (mit 1 Nagel) zeigten unter Belastungen bis zu 180N bei Furniersperrholz bzw. 45N bei Gipskartonplatten in 21 Tagen kaum Kriechverschiebungen [138], allerdings waren die Verschiebungen nach Entlastung nur zu etwa 30 % reversibel. Eine Aufhebung der inneren Reibung zwischen den verbundenen Teilen - hier durch Einlegen einer PE-Folie simuliert - erhöht die Kriechverschiebungen beträchtlich.

Langjährige Dauerstandversuche mit verschiedenen Nagel- und Dübelverbindungen ergaben, daß die Bruchverformungen stark schwanken können (bei Nägeln zwischen 11 mm und 22 mm, bei Dübeln zwischen 2 mm und 16 mm) [167, 381].

Bei Druckscherversuchen an zweiseitigen Nagelverbindungen mit Fichte im relativ stark schwankenden Innenraumklima ergaben sich nach 200 Tagen unter zulässiger Last Kriechfaktoren von 1,5-2,5 bei trocken und von 3-8 bei naß hergestellten Verbindungen, wobei die absoluten Verschiebungen im ersten Fall unter 1,5 mm blieben, bei naßer Nagelung dagegen bis über 3 mm erreichten [228, 229]; die Restfestigkeiten nach Entlasten waren jedoch bei allen Versuchen noch unverändert.

Druckscherversuche zweiseitiger Nagelverbindungen aus Kiefer ergaben ein stärkeres Kriechen bei Belastung quer zur Holzfaserrichtung als längs zur Faser [250]. Querdruck-Relaxationsversuche an Fichte mit Bolzenverbindungen werden in [231] beschrieben.

Eine ausführliche Literaturlauswertung u.a. über das Kriechverhalten von Nagelverbindungen in Holzkonstruktionen enthält [79]. Außerdem werden Vorschläge für künftige systematische Langzeitversuche mit Nagelverbindungen zur Diskussion gestellt.

Weitere Kriechversuche an genagelten Verbindungen sind in [42, 43, 94, 360] enthalten (siehe Abschnitt 6.1).

Entsprechende Langzeitversuche mit Nagelplatten sind z.B. in |179| beschrieben: nach 3,5 Jahren Dauerlast (Zug) im Außenklima zeigten trocken hergestellte Nadelholzverbindungen Kriechfaktoren von etwa 6,0; bei im saftfrischen Zustand hergestellten Verbindungen mit Eukalyptusholz lag der Kriechfaktor nach 5,5 Jahren bei ca. 10. Nach Entlasten betrug die Restfestigkeit der Nadelholzverbindungen (trocken) noch ca. 80-100 %, die der Laubholzverbindung (grün) 60-70 % der Anfangsfestigkeit. Die Steifigkeit der Verbindungen hatte sich etwa halbiert.

Weitere Angaben über Nagelplattenverbindungen sind z.B. |59, 94, 205, 360| zu entnehmen (siehe Abschnitt 6.1).

Neben den mechanischen Verbindungsmitteln spielen Verklebungen als Verbindungsmöglichkeit tragender Holzkonstruktionen eine bedeutende Rolle, wie z.B. bei Brettschichtholz, bei Doppel-T-, Kasten- und Fachwerkträgern (aufgeleimte Knotenplatten), aber auch bei vielen anderen Montageverklebungen sowie bei der Beschichtung von Holzwerkstoffplatten. Unter Langzeitbelastung kommt daher auch dem Kriechverhalten der Verklebungen eine wesentliche Bedeutung zu. Entsprechende Untersuchungen sind allerdings noch nicht sehr zahlreich |77, 132, 133, 161, 225, 282, 323, 329, 343, 352, 360, 379|.

Systematische Versuche über den Einfluß verschiedener Klebstoffe auf das Kriechverhalten von Brettschichtholz sind in |329, 352| beschrieben. Nach |352| findet das Kriechen überwiegend in den Leimfugen selbst statt (s.o.) und steigt mit zunehmender Leimfugendicke.

Dauerstandversuche an Fachwerkträgern mit aufgeleimten Knotenplatten aus Furniersperrholz im Außenklima werden z.B. in |360| behandelt. Demnach zeigen diese Träger ein geringeres Kriechen als entsprechende Träger mit aufgenagelten Knotenplatten oder mit Nagelplatten als Verbindungsmittel.

Bei Versuchen mit I-Trägern hat sich gezeigt, daß z.B. Klebstoffe mit einem relativen Kriechen von 100 % (d.h. Kriechverformung = elastische Anfangsverformung) im verleimten Träger nur ein zusätzliches relatives Kriechen von etwa 5 % bewirken. Auch hier beeinflußt die Leimfugendicke das Kriechen [132].

Die Verformungen geklebter Rahmeneckverbindungen unter Dauerlast werden in [282] beschrieben. Das stärkste Kriechen zeigten PVAc-Verklebungen (im Vergleich zu Harnstoff- und Phenolharzen). Keilgezinkte Konstruktionen verformten sich weniger als gezapfte. Die Restfestigkeit nach 60 Tagen Dauerlast war nur geringfügig abgefallen (ca. 7 %).

Kriechversuche an reinen Leimfilmen unter Zugbeanspruchung [343] ergaben eine Zunahme der Kriechgeschwindigkeit mit steigendem Belastungsgrad und mit steigender relativer Luftfeuchtigkeit (von 30 % auf 65 % bei 26^oC). Bei Filmen aus Phenol-Resorcin-Harz war die Kriechgeschwindigkeit wesentlich geringer als bei Epoxidharz; bei PVAc war sie am größten. Auch nach verschiedenen anderen Untersuchungen zeigen PVAc-Verklebungen ein mehrfach stärkeres Kriechen als duroplastische Verklebungen [z.B. 161, 225, 282, 352, 379].

Verschiedene Prüfverfahren zur Bestimmung des Kriechverhaltens von Holzverklebungen werden z.B. in [77, 161, 225, 379] vorgestellt. Über mögliche Auswertungen von Kriechversuchen mit Verklebungen wird in [323, 379] berichtet.

Bei den meisten der genannten Untersuchungen handelt es sich um überwiegend orientierende, qualitative Arbeiten über das Kriechverhalten von Holz-Verklebungen. Bevor hierzu allgemeingültige Aussagen gemacht werden können, sind noch umfangreiche systematische Untersuchungen unter Einbeziehung der Beanspruchungsart (Schub, Zug) sowie der Feuchtigkeits- und Temperaturbeanspruchung durchzuführen.

7 Zusammenhänge zwischen Kriechverhalten und Kurzzeiteigenschaften

Kriechversuche sind naturgemäß relativ zeitaufwendig. In zahlreichen Arbeiten wird daher versucht, eventuelle Zusammenhänge zwischen dem gemessenen Kriechverhalten und verschiedenen Kurzzeiteigenschaften der untersuchten Werkstoffe zu ermitteln, um so wenigstens orientierende Anhaltspunkte über das jeweils zu erwartende Kriechverhalten zu bekommen.

Entsprechende Auswertungen von Vollholz-Versuchen sind z.B. [87, 88, 114, 222, 265 und 373] zu entnehmen. So konnte beispielsweise eine gesicherte Korrelation zwischen der Kriechverformung und dem Quadrat der Resonanzfrequenz nachgewiesen werden [222]. Da die Resonanzfrequenz wiederum eine Funktion des E-Moduls und der Rohdichte ist, bestehen engere Zusammenhänge zwischen dem Kriechen und dem Verhältnis E/ρ als mit dem E-Modul alleine. Das Verhältnis E/ρ wird als "spezifische Elastizität" bezeichnet und als Indikator für die Kristallinität des Holzes angesehen (je höher die Kristallinität, desto geringer wird das Kriechen). Sollten sich diese Zusammenhänge bei weiteren Versuchen bestätigen, so bestünde damit eine Möglichkeit, Holz zerstörungsfrei für Langzeitbelastung zu klassifizieren.

Nach den Untersuchungen in [373] bestehen zwischen der Bruchzeit von Dauerstandproben und der Biegefestigkeit von entsprechenden Vergleichsproben engere Zusammenhänge als mit anderen Eigenschaften oder Eigenschaftskombinationen der Kontrollprobe oder der Kriechprobe zu Beginn der Dauerlast.

Nach [114] können Langzeitversuche unter normaler Temperatur nicht durch Kurzzeit-Schwingungsversuche unter erhöhter Temperatur ersetzt werden (siehe Abschnitt 8.1.3).

Bei Trocknung von Vollholz unter Last ergaben sich enge Korrelationen zwischen dem Kriechen und der Anfangsfeuchte (über Fasersättigung) sowie dem Extraktgehalt des Holzes [87, 88].

Messungen der Schallemission an Biegeproben unter Dauerlast zeigten, daß sich die Schallfrequenz bei Beginn der tertiären Kriechphase stark erhöht [265].

Bei Kriechversuchen an zahlreichen Brettschichtholzträgern im Konstantklima 20/75 war kein Zusammenhang zwischen den Kriechdurchbiegungen und dem Elastizitätsmodul E_0 der Träger festzustellen [386].

Entsprechende Angaben über die Zusammenhänge zwischen dem Kriechverhalten und den Kurzzeiteigenschaften bei Holzwerkstoffen sind selten und beschränken sich fast ausschließlich auf Spanplatten [47, 91, 95, 116, 123, 124, 134, 176].

So fanden z.B. [47, 116, 123, 134] keine Beziehung zwischen dem Kriechen und dem Anfangs-E-Modul der untersuchten Spanplatten. Dagegen stellten [91, 176] engere Zusammenhänge fest, die allerdings im oberen E-Modul-Bereich wieder verschwanden. In [95] wurden sowohl im Feuchtklima 20/95 als auch im Wechselklima 20/95-20/30 gesicherte Korrelationen zwischen dem Kriechfaktor f_t/f_0 und dem Elastizitätsmodul E_0 , der mittleren Rohdichte und dem Rohdichteprofil, sowie der maximalen Dickenquellung gefunden. Besonders enge Zusammenhänge bestehen sowohl im definierten Wechselklima als auch im natürlich wechselnden Außenklima mit der maximalen Feuchtigkeitsaufnahme sowie mit der Feuchtigkeitsamplitude, d.h. mit dem Sorptionsverhalten der Platten [95, 117, 124]. Gesicherte Zusammenhänge bestehen nach [47, 95, 116, 124] auch zwischen den Kriechverformungen und der maximalen Dickenzunahme bzw. der Dickenänderung; je größer die Dicken-Amplitude, desto stärker wird das Kriechen.

Bei Furniersperrholz [123] und bei Holzfaserplatten HFH [97] konnten keine eindeutigen Beziehungen zwischen dem Kriechverhalten und dem Anfangs-E-Modul festgestellt werden. Weitere Angaben zu derartigen Zusammenhängen bei diesen beiden Holzwerkstoffen sind nicht bekannt.

Auch bei Klebstoffen kann aus der im Kurzzeitversuch ermittelten Schubfestigkeit bzw. dem Schubmodul noch keine Aussage über das zu erwartende Kriechen gemacht werden [77].

8 Möglichkeiten einer Vorhersage des langfristigen Formänderungsverhaltens aus relativ kurzfristigen Kriechversuchen

In der einschlägigen Literatur wird eine in jüngerer Zeit zunehmende Tendenz erkennbar, das Kriechverhalten von Baustoffen rechnerisch zu erfassen und auf längere Beanspruchungszeiträume zu extrapolieren.

Eines der Hauptziele von experimentellen Untersuchungen über das viskoelastische Verhalten von Werkstoffen ist die Bestimmung der Zusammenhänge zwischen den Materialeigenschaften und der Zeit. Diese Zusammenhänge können in Form von zeitabhängigen Kriech- bzw. Verformungsmoduln oder Relaxationsmoduln angegeben werden; häufig werden die Ergebnisse auch direkt als Verformung bzw. als Spannung über der Zeit dargestellt.

Diese viskoelastischen Zusammenhänge können entweder durch unmittelbares graphisches Aufzeichnen der Versuchswerte dargestellt werden, oder die Daten werden durch geeignete mathematische Funktionen angenähert, oder es werden mechanische Analogien (Modelle aus Federn und Dämpfern) verwendet [306].

8.1 Bisherige Methoden zur rechnerischen Erfassung von Kriechvorgängen

Die Vielzahl der in der Literatur erwähnten Möglichkeiten einer rechnerischen Beschreibung des zeitabhängigen Formänderungs- bzw. Festigkeitsverhaltens läßt sich entsprechend der verschiedenen Betrachtungsweisen in 4 Hauptgruppen einteilen:

1. Rein mathematische Ansätze
2. Mechanische Ersatzmodelle (rheologische Modelle)
3. Temperatur-Zeit-Funktionen
4. Molekularkinetische Betrachtungsweisen

Tabelle 12: Zusammenstellung der ausgewerteten Literaturstellen (Nr. aus Abschnitt.11) über verschiedene Näherungsfunktionen zur Beschreibung des Kriech- und Bruchverhaltens von Baustoffen

Funktionsart	Potenzfunktionen, Exponentialfunktionen (E)	Sonstige, rein mathematische Funktionen, z.B. Polynome (P) Bruchtheorien(B) Dauerstandfestigkeit (D)	Rheologische Modelle, teils in erweiterter Form (+)	Temperaturzeit-Funktionen (master curves)	Molekular-kinetische Betrachtungsweisen	Sonstige
Material						
Vollholz	61,66,149,154,253,304,307,314,334,373 E: 149,169,170	29,260,320,340 B: 22,98-100 D: 206,263,362	18,157,163,237,265,289,291,317,338 + : 120,121,163 172,177,178 236,283,288 369	114,119,234,252,301,355	14,63,145,234,246,302,354,355	18,34,131
Furniersperrholz	176,187,284,327,328,385 E: 168,186,323	286 D: 142,230,233	188			131,285,286a,328,385
Spanplatten	52,126,137,176,180,187,226 E: 164,186	P: 135,166,180,189 D: 142,166,180,207,209	69,166,275-277,295 + : 247	366		131
Faserplatten	54,155,187,256; E: 186	49,50; D: 142,206	155	125		
Beschichtete Holzwerkstoffe	52,54,137,226 E: 169,170		277,295			
Holzbauteile	122,123,256,382; E: 138	59,205,318,321; P: 282; D: 141-143,167	43	136		
Kunststoffe	80,83,84,86,96,202,312,342; E: 84	96,342; P: 92	70-76,80-84,312 + : 76	342	213	216,221,342
Polymere allgemein			241; +:287			
Beton			292,346; + : 274			242,292,347
Metalle	333			363,364		353

In Tabelle 12 sind die im Rahmen dieser Arbeit ausgewerteten Literaturangaben über die rechnerische Beschreibung des Kriech- und Dauerstandverhaltens zusammengestellt. Dabei wurde einerseits zwischen verschiedenen Werkstoffen und andererseits zwischen den verschiedenen Gruppen von Näherungsfunktionen unterschieden.

8.1.1 Rein mathematische Ansätze

Vor allem für Holzwerkstoffe und Holzbauteile überwiegen in den bisher bekannt gewordenen Arbeiten die rein mathematischen Ansätze. Obwohl derartige Funktionen rein empirisch aus den Meßdaten ermittelt werden und keine physikalische Deutung der Kriech- oder Relaxationsvorgänge enthalten, haben sie den Vorzug der relativ einfachen und meist ausreichend genauen Beschreibung des tatsächlichen Werkstoffverhaltens.

Die zeitabhängige Gesamt-Verformung $\epsilon(t)$ wird allgemein wie folgt dargestellt:

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 + \epsilon_{cr}(t) \quad (1)$$

wobei ϵ_0 die rein elastische, spontane Verformung und $\epsilon_{cr}(t)$ die zusätzliche, zeitabhängige Verformung, das Kriechen, bedeuten.

Der Kriechanteil läßt sich z.B. durch eine Potenzfunktion der allgemeinen Form

$$\epsilon_{cr}(t) = at^m \quad (2)$$

darstellen [61 u.a.]. Hierin sind a und m keine Konstanten, sondern experimentell zu bestimmende, materialspezifische Parameter, die außer vom Werkstoff noch vom Feuchtigkeitsgehalt, von der Temperatur, vom Belastungsgrad, von der Zeit und von weiteren Einflüssen abhängen können. Über Art und Ausmaß dieser Abhängigkeiten der Parameter a und m werden in der Literatur allerdings sehr unterschiedliche, z.T. widersprüchliche Angaben gemacht, z.B. in [61, 84, 137, 154, 304, 327, 373].

Zur Berücksichtigung dieser und weiterer Einflußgrößen werden die verschiedensten Erweiterungsformen dieser Potenzfunktion vorgeschlagen, z.B. in [76, 84, 284, 334].

Der Vorteil dieser Darstellung als Potenzfunktion besteht darin, daß sich im doppelt-logarithmischen Maßstab Geraden ergeben. Damit wird es möglich, aus zwei bekannten, zeitlich genügend weit auseinander liegenden Verformungswerten sowohl Zwischenwerte abzulesen als auch künftige Verformungen nach längerer Beanspruchungsdauer durch geradlinige Extrapolation vorauszusagen.

Allerdings enthält diese doppeltlogarithmische Darstellung zwangsläufig eine unterschiedliche Gewichtung der Meßfehler [62]. Der Fehler kann sich hauptsächlich bei längerer Belastungsdauer bemerkbar machen, wo die Differenz der großen Zahlen durch das Logarithmieren in sehr kleine Zahlenwerte umgewandelt wird [84].

In verschiedenen Arbeiten wird eine Anpassung der Kriechverformungen durch Exponentialfunktionen z.B. der Form

$$\epsilon_{cr}(t) = a (1 - e^{-bt}) \quad (3)$$

oder ähnlich vorgeschlagen, wobei a und b wiederum experimentell zu ermittelnde Materialparameter bedeuten [z.B. 84, 164, 169, 170, 186]. Auch die rechnerische Beschreibung von Dauerfestigkeitsversuchen mit Hilfe einer derartigen Exponentialfunktion wurde schon versucht [328].

In [186] wird zur Berechnung des Kriechverlaufes eine andere (kompliziertere) Exponentialfunktion vorgeschlagen. Eine Überprüfung anhand von langjährigen Kriechversuchen an Holzwerkstoffen im Normalklima 20/65 hat ergeben, daß eine Extrapolation auf längere Belastungszeiten (über etwa 10^3 h) zu hohe rechnerische Kriechverformungen liefert.

Dauerfestigkeitsversuche werden häufig durch halblogarithmische Näherungsfunktionen der Form

$$\sigma_t = a - b \cdot \log t \quad (4)$$

sowie mit verschiedenen Varianten hiervon beschrieben, z.B. in [108, 166, 230, 233].

Entsprechende Versuche, auch die Kriechverformungen mit dieser Funktion anzunähern, sind zwar mehrfach bekannt geworden (z.B. in [59, 141-143]); es hat sich jedoch gezeigt, daß diese Funktionen den tatsächlichen Kriechverlauf nur anfangs ausreichend genau wiedergeben können [116]. Mit zunehmender Belastungsdauer weichen die Meßwerte immer stärker von der Ausgleichsgeraden ab in Richtung verstärkten Kriechens. Eine Extrapolation aufgrund dieser Gleichungen führt vor allem bei Holzwerkstoffen zu viel zu günstigen Voraussagen über das zu erwartende Kriechverhalten bei längeren Belastungszeiten und liegt damit auf der unsicheren Seite.

Da zwischen dem zeitabhängigen Verformungsverhalten und der Dauerstandfestigkeit ein unmittelbarer Zusammenhang besteht [120, 141], muß auch die Eignung der Gleichung (4) zur Vorhersage der Dauerfestigkeit in Frage gestellt werden. Entsprechende theoretische und experimentelle Überlegungen zum Bruchverhalten von Holz in [22, 98, 99] bestätigen dies.

Auch mit Polynomen 2. Grades der Form

$$\varepsilon_{cr}(t) = a + b \cdot \log t + c \cdot (\log t)^2 \quad (5)$$

wird das langfristige Formänderungsverhalten zumindest bei Spanplatten zu günstig vorhergesagt, z.B. in [166, 189]. Extrapolationen mit derartigen Funktionen sollten nach [166] daher nur bis zu 10^4 Stunden erfolgen.

Vereinzelt werden in der Literatur noch andere, rein mathematische Näherungsfunktionen zur Beschreibung des Kriechverhaltens vorgeschlagen, z.B. in [29, 49, 50, 328, 342], deren Bestätigung in weiteren Untersuchungen allerdings noch aussteht.

Als Nachteil aller rein mathematischen Darstellungsformen wird mitunter angeführt, daß diese Ansätze nur empirisch sind und die im Werkstoff mit der Zeit eintretenden Veränderungen nicht vorstellbar machen [76]. Die fehlende physikalische Bedeutung der Kriechparameter ist jedoch zumindest für den Konstrukteur nicht störend, da er weniger an einer genauen Kenntnis der physikalischen Vorgänge während des Kriechens interessiert ist als vielmehr an einem möglichst einfachen Berechnungsverfahren, das ihm unter Einbeziehung zulässiger Fehlergrenzen eine hinreichend genaue Abschätzung des zeitabhängigen Werkstoffverhaltens unter Beachtung der wesentlichen Einflußgrößen ermöglicht [84].

Als weitere Nachteile werden genannt, daß diese Art der Beschreibung keine unmittelbare Auskunft über den jeweils zu erwartenden Festigkeitsverlust, über den Zeitpunkt des Bruches sowie über die sogenannte "Restfestigkeit" gibt [76]. Diese Größen sind zumindest bei Holz und Holzwerkstoffen sowie den daraus hergestellten Bauteilen nur von untergeordneter Bedeutung, da unter den üblichen baupraktischen Beanspruchungen diese Grenzzustände nicht erreicht werden.

8.1.2 Mechanische Ersatzmodelle

Die von der Rheologie her bekannten Modelle zerlegen die Formänderung von Werkstoffen wie Holz, Kunststoffe, Beton oder Metalle in elastische und in plastische oder viskose Verformungsanteile, die durch Federn und Dämpfer veranschaulicht werden. Durch Reihenschaltung einer elastischen Feder und eines viskosen Dämpfers (Maxwell-Kombination) können jedoch nur die

elastischen und die rein plastischen Fließverformungen der Gesamtformänderung beschrieben werden. Werden die rheologischen Grundelemente parallel geschaltet (Kelvin-Kombination), so kann damit ein zeitabhängiger, aber völlig reversibler Deformationsverlauf, der sogenannte "verzögert-elastische" Formänderungsanteil, dargestellt werden.

Durch Hintereinanderschalten dieser beiden Kombinationen zum sogenannten 4-Parameter-Modell läßt sich die tatsächlich beobachtete zeitabhängige Verformung zahlreicher Baustoffe unter einer (nicht zu hohen) Dauerlast mit ausreichender Genauigkeit beschreiben.

Diese Deutung des Verformungsverhaltens hat dazu geführt, daß man Baustoffe, die unter Beanspruchung ein derartiges Formänderungsverhalten aufweisen, als viskoelastische Materialien bezeichnet [76]. Reagieren Feder und Dämpfer direkt proportional auf die jeweilige Beanspruchungshöhe, so spricht man von linear-viskoelastischem Verhalten (konstante Feder- und Dämpfer-Kennwerte). Eine solche lineare Beziehung zwischen Spannung und Verformung weisen die meisten Werkstoffe besonders bei höheren Beanspruchungen jedoch nicht mehr auf, so daß nach Abwandlungen und Erweiterungen dieser Modellgesetze gesucht wurde, die sich jedoch nicht mehr in der relativ einfachen Form des 3- oder 4-Parameter-Modells darstellen lassen [342].

Dies deutet darauf hin, daß das Kriechverhalten des Werkstoffs im allgemeinen von mehr als 4 Parametern abhängig sein muß. Betrachtet man einen Werkstoff als Agglomerat von elastischen und viskosen (zähen) Teilchen, so müssen sehr viele Elementarmodelle mit jeweils verschiedenen Einzelparametern eingeführt werden, um das wahre Verhalten genau wiedergeben zu können. Da diese Größen aber meist unbekannt sind, und die mathematische Behandlung der Modelle mit zunehmender Zahl der Elementelemente immer umständlicher wird, eignet sich die Modelltheorie in abstrakter Form nur zur Deutung experimentell festgestellter Zusammenhänge [116].

Die bisherigen rheologischen Modelle setzen voraus, daß alle Verformungen des untersuchten Prüfkörpers allein durch mechanische, von außen auf ihn einwirkende Kräfte verursacht werden, daß also beim Fehlen dieser Kräfte keinerlei Verformungen des Körpers und seines Modells stattfinden dürfen. Bei einem Holzkörper, der seine Feuchtigkeit ändert, können jedoch Verformungen auch dann eintreten, wenn äußere Kräfte entweder ganz ausbleiben, oder sogar dann, wenn diese Verformungen durch Einwirkung äußerer Kräfte verhindert werden sollen. In einem Holzkörper, der Wasser absorbiert oder desorbiert, können nämlich innere Kräfte entstehen, die sich den äußeren Kräften positiv oder negativ überlagern und dadurch die beobachteten Verformungen des Holzes vergrößern oder verkleinern. In das rheologische Modell des Holzes müßten außer den schon vorhandenen, passiv verformbaren Federn und Dämpfern noch zusätzliche, aktiv wirkende Elemente eingeführt werden, die sich auch beim Fehlen äußerer Kräfte bei Änderung der physikalischen Bedingungen (Feuchtigkeit, Temperatur) von selbst verformen müßten. Eine derartige einfache Ergänzung des rheologischen Modells von Holz wäre dann sinnvoll, wenn die mechanischen und feuchtigkeitsbedingten Formänderungen in einfacher Form superponiert werden dürften. Zahlreiche Arbeiten haben jedoch erwiesen, daß das keineswegs der Fall ist. Ein unter Druckspannung stehender und gleichzeitig desorbierender Holzkörper weist z.B. sehr starke Verkürzungen auf, die die algebraische Summe seiner mechanischen Verkürzung und seiner Schwindung um ein Vielfaches übersteigen. Bei gleichzeitiger Druckbeanspruchung und Adsorption kann dagegen entweder eine Verkürzung oder auch eine Verlängerung eintreten, was von verschiedenen Einflußfaktoren wie Höhe der Druckspannung, Intervall der Feuchtigkeitsänderung sowie Temperatur und Art des Befeuchtungsmediums (Wasser oder feuchte Luft) abhängig ist. Das erklärt sich aus der Tatsache, daß durch Adsorption und Desorption von Wasser in den Zellwänden nicht nur Längen- und Winkeländerungen im Holzgewebe, sondern auch weitgehende Änderungen in der elastischen und plastischen Verformbarkeit des belasteten Holzes hervorgerufen

werden. Selbst bei sehr kleinen Feuchtigkeitsschwankungen ändern sich also alle rheologischen Kenngrößen eines belasteten Holzkörpers auf sehr komplexe Weise, so daß entsprechende Versuche sein wirkliches rheologisches Verhalten durch ein entsprechend ergänztes Modell darstellen zu wollen, zumindest als problematisch erscheinen müssen [269]. Die bisher bekannt gewordenen Vorschläge zur Erweiterung der klassischen rheologischen Modelle um ein sogenanntes "mechano-sorptives" Element zur besseren Erfassung der Feuchteinflüsse unter Last, z.B. in [120, 177, 236], beschränken sich zunächst noch auf reine Trocknungsperioden [177] bzw. entbehren einer quantitativen, d.h. experimentellen Bestätigung noch völlig [236]. Die Vielzahl der Anforderungen an ein solches erweitertes mechanosorptives Kriechmodell wird in [121] sehr anschaulich qualitativ aufgezeigt. Gleichzeitig wird jedoch festgestellt, daß bisher noch keines der vielen aus der Literatur bekannten Modelle in der Lage ist, die verschiedenen Einflüsse umfassend richtig zu beschreiben, und daß hier noch viele Fragen offen sind.

Die bisher geschilderten rheologischen Modelle berücksichtigen außerdem noch nicht den Einfluß möglicher Zerstörungsvorgänge auf die Verformungen des Holzes bei langdauernder, entsprechend hoher Belastung. In [287] wird der zerstörungsbedingte Verformungsanteil durch ein zusätzliches, kombiniertes Element in Reihe mit dem 4-Parameter-Modell (Burger-Kombination) dargestellt. Es besteht aus nicht dehnbaren Fäden, die zwischen 2 parallel angeordneten Plättchen als Dämpfer auftreten. Wird einer oder mehrere dieser ursprünglich lockeren Fäden in den Spannungszustand versetzt, so wird eine weitere Zunahme der Verformung unmöglich, ohne ein Reißen der gespannten Fäden hervorzurufen. Nach dem Zerreißen dieser Fäden werden weitere Fäden gespannt unter Einbeziehung einer ganzen Reihe der mit ihnen verbundenen viskosen Dämpfer, was schließlich je nach den Kriechbedingungen entweder zur Verstärkung des Systems oder zum Reißen weiterer Fäden führt. Wenn alle Fäden gerissen sind, ist das System zerstört.

In mehreren Arbeiten wird zwar die Anwendbarkeit dieses erweiterten Modells auf Holz bzw. Holzwerkstoffe diskutiert [172, 247, 283], eine experimentelle Bestätigung steht jedoch noch aus.

Das Kriechen von Beton wird in [274] als eine kritisch gedämpfte Schwingung betrachtet und durch ein erweitertes 3-Parameter-Modell mit nichtlinearer Dämpfung rechnerisch gut angenähert. Eine Übertragung dieses Modells auf verschiedene Kriech- und Relaxationsversuche an Holz wurde in [288] versucht, allerdings mit unterschiedlichem Erfolg.

In [163] wird betont, daß man durch Parallel- bzw. Reihenschaltung der üblichen Symbole (Feder und Dämpfer) in verschiedener Kombination zwar dem Verhalten homogener Stoffe im linearen Elastizitätsbereich und lokalbruchfreien Plastizitätsbereich einigermaßen gerecht werden kann, daß es aber kaum möglich sein wird, dem komplizierten Gebilde des vielzelligen, aus verschiedenen Hohlelementen und Wandschichten zusammengesetzten Holzes auf diese Weise theoretisch genügend nahe zu kommen. Bei den elastischen Vorgängen ist zu unterscheiden zwischen rein elastischen, linearen Formänderungen, reversiblen Verformungen mit unstetigem Verlauf (z.B. Knicken, Beulen), und zwischen Vorgängen, deren Spannungs-Formänderungs-Charakteristik nicht mehr geradlinig verläuft (als Folge von Verschiebungen des Spannungsbildes im System bei großen Verformungen oder bei Eintreten von reversiblen molekularen Strukturänderungen). Bei den plastischen Vorgängen ist nach [163] zu trennen in "1. rein plastische Verschiebungen in Strukturzonen, die als (zäh-)flüssig betrachtet werden können. Für sie ist das Symbol des Kolbendämpfers durchaus angebracht. 2. Bleibende Verschiebungen aufgrund von irreversiblen Veränderungen der Struktur (z.B. Ausrichtung oder Neugruppierung von Molekülen) ohne Brucherscheinungen, und 3. Bleibende Verschiebungen, die mit lokalen Brucherscheinungen zusammenhängen."

Für den nichtlinearen viskoelastischen Verformungsanteil wird in [369] ein Modell vorgeschlagen, bei dem die dem Dämpfer

parallel geschaltete Feder eine nichtlineare Beziehung zwischen Spannung und Verformung aufweist. Damit wird eine bessere Wiedergabe der zeitbedingten elastischen und Festigkeitseigenschaften ermöglicht, wie am Beispiel von Druckversuchen an Kiefernholz gezeigt wird.

Nach [76] haben die klassischen rheologischen Modelle ebenfalls den Nachteil, daß sie trotz der größeren Anschaulichkeit weder den zeitabhängigen Festigkeitsverlust, noch den Bruchzeitpunkt noch das Phänomen der Restfestigkeit erfassen. Es wurde daher ein erweitertes, "struktur-rheologisches" Modell entwickelt [75, 76], mit dem nicht nur die Beschreibung der zeitabhängigen Verformungen, sondern auch eine qualitative Deutung sowie eine quantitativ zutreffende Erfassung des Festigkeitsverlustes unter Dauerlast, des Bruchverhaltens sowie der Restfestigkeit von Kunststoffen möglich werden. Inwieweit dieses für homogene, isotrope Hochpolymere wie Kunststoffe entwickelte Modell auch auf anisotrope, inhomogene Baustoffe wie z.B. Holz und Holzwerkstoffe übertragen werden kann, ist noch offen. Hierzu sind noch verschiedene systematische Untersuchungen erforderlich, die aber aufgrund der vielseitigen Möglichkeiten eines solchen Modells dringend empfohlen werden können. Konkrete Anhaltspunkte zur Planung und Durchführung derartiger Kriechversuche sind z.B. den Arbeiten [70-76] zu entnehmen (siehe auch Abschnitt 10).

8.1.3 Temperatur-Zeit-Beziehungen

Nach dem für chemische Reaktionen allgemein gültigen Gesetz von Arrhenius verdoppeln sich die Geschwindigkeiten der im Innern von Kunststoffen ablaufenden chemischen Veränderungen in vielen Fällen mit je 10 K Temperaturerhöhung [76].

Es ist daher mehrfach versucht worden, diese Temperatur-Zeit-Beziehung auch zur Vorhersage des langfristigen Kriechverhaltens von Baustoffen bei normaler Temperatur aus dem experimentell ermittelten Kurzzeit-Verhalten bei erhöhter Temperatur zu verwenden, z.B. in [119, 125, 366].

Eine mögliche Anwendung der "Reaktions-Geschwindigkeits-Theorie" ergibt sich mit der Larson-Miller-Gleichung

$$K = T (C + \log t) \quad (6)$$

worin T die absolute Temperatur, t die Zeit und C eine Materialkonstante bedeuten. Diese Gleichung wurde ursprünglich zur Vorhersage des Kriechverhaltens und der Dauerfestigkeit von Metallen verwendet.

Eine abgewandelte Methode zur Kriech-Voraussage stellt die Goldfein-Gleichung

$$K = \frac{T \cdot T_0}{T_0 - T} (C + \log t) \quad (7)$$

dar, die zunächst bei Kunststoffen zur Anwendung kam. Darin bedeutet T_0 die absolute Temperatur, bei der die Materialfestigkeit gerade auf Null abgefallen ist.

In den letzten Jahren wurde in verschiedenen Arbeiten die Möglichkeit untersucht, diese Gleichungen auch bei Holz und Holzwerkstoffen anzuwenden (siehe Tabelle 12). Nach [119] konnten diese Zusammenhänge zwischen Temperatur und Kriechgeschwindigkeit nur bei absolut trockenem Holz bestätigt werden, nicht dagegen bei feuchtem Holz. Bei anderen Versuchen an trockenem Holz wurde dagegen mit steigender Temperatur ein überproportionaler Anstieg des Kriechens besonders über 70°C festgestellt [301]. Eine häufig unzureichende Übereinstimmung zwischen Versuchswerten und Berechnung nach Gleichung (6) wird auch in [355] gefunden.

Bei entsprechenden Untersuchungen zur Vorhersage des Biegekriechens von Spanplatten wurden Master-Modul-Kurven sowohl nach Gleichung (6) als auch nach Gleichung (7) ermittelt, wobei für die Materialkonstante C ein Wert von 24 als beste Lösung gefunden wurde [366]. Demnach liefern zwar beide Gleichungen

bei niedrigem Belastungsgrad und kurzen Zeiten vernünftige Schätzwerte; keine der Methoden kann jedoch das bei höherem Belastungsgrad und längerer Belastungsdauer steigende Kriechen richtig voraussagen. Ähnlich wie mit Gleichung (4) in Abschnitt 8.1 werden auch hier zu günstige und damit unsichere Voraussagen erhalten, insbesondere mit der Goldfein-Gleichung (7).

Versuche mit Hartfaserplatten zeigten, daß die Kriechkurven bei niedriger Belastung mit Gleichung (7) gut angepaßt werden können bei C-Werten zwischen 17 und 20. Bei höherer Belastung und längeren Zeiten liegen die Rechenwerte aber ebenfalls niedriger als die gemessenen Kriechverformungen [125].

Nach [342] sind die Gleichungen (6) und (7) aber selbst bei Kunststoffen nicht geeignet, da keine einheitliche Konstante C für die Master-Kurven besteht.

Temperatur-Zeit-Beziehungen haben daher bis heute noch keine größere Bedeutung zur rechnerischen Beschreibung von Kriechvorgängen erlangt. Außerdem fehlen bisher entsprechende Untersuchungen an Holz und Holzwerkstoffen, die neben der Temperatur auch die bei hygroskopischen Materialien so wichtige Einflußgröße Feuchtigkeit mit einbeziehen.

8.1.4 Molekularkinetische Betrachtungsweisen

Neben der rein mathematischen und der modellmäßigen Beschreibung des rheologischen Verhaltens der Werkstoffe wird verschiedentlich versucht, durch physikalische Betrachtungsweise zu vertiefter Einsicht in den Mechanismus des Kriechens zu gelangen. Dabei spielen die verschiedenen Versetzungstheorien - bei Hochpolymeren spricht man von Platzwechselfvorgängen - eine besondere Rolle [354].

Primäre Valenzkräfte - aufgefaßt als elektrostatische Erscheinung - bauen die Makromoleküle der Hochpolymeren auf [387]. Die Grenze ihrer Wirksamkeit wird durch den effektiven Wirkungsradius von 1,2 bis 1,6 Å bestimmt [388]. Haben die Makromoleküle

eine gewisse Größe erreicht, so entwickeln sich an ihnen sekundäre Bindungsmechanismen, die als Ursache von Makromolekülverbänden (Knäuel, Bündel, Micelle, Kristallite) zu betrachten sind. Die Intensität der sekundären Kraftfelder hängt von Form und räumlicher Anordnung der Makromoleküle sowie von Zahl und Verteilung funktionaler Gruppen ab. Die Molekülverbände entwickeln erst durch ihren besonderen Ordnungsgrad bestimmte technologische Eigenschaften. Eine Vorstellung von der Struktur der Makromolekülverbände bildet daher die Grundlage für ein tieferes Verständnis der mechanischen Eigenschaften von Hochpolymeren.

Beim Ordnungsgrad der Makromoleküle unterscheidet man zwischen amorphen und kristallinen Zuständen als ideale Grenzfälle. Man versteht unter amorph denjenigen Zustand, bei dem die Strukturelemente völlig regellos angeordnet sind. Die wirre Lagerung linearer, höchstens sehr schwach vernetzter Atomverbände führt zur "Hochelastizität" oder zum "Gummizustand" [388]. Eine dichte, räumliche Verknüpfung ohne Orientierung wird in gewissen Temperaturbereichen als "Glaszustand" bezeichnet.

Zustände oder Körper, deren Strukturelemente einen hohen Ordnungsgrad aufweisen, nennt man kristallin. Sie sind ausgezeichnet durch hohe Gitterenergie. Eindimensionale Atomverbände erhalten kristallinen Charakter durch symmetrische oder periodische Anordnung der Strukturelemente. Wird diese Symmetrie gestört, sei es durch unregelmäßige Folge der Elemente oder durch asymmetrischen Einbau andersartiger Strukturelemente (z.B. Wassermoleküle zwischen Cellulosemicelle des Holzgewebes), so nähert man sich mit abnehmendem Ordnungsgrad mehr und mehr dem amorphen Zustand.

Das Auftreten kristalliner oder amorpher Phasen ist somit vom Bauplan der Makromoleküle und von ihrer Anordnung abhängig. Unter den Hochpolymeren gibt es nun solche, die von vornherein beträchtliche kristalline Bereiche enthalten (z.B. Cellulose und Cellulosederivate). Andere werden erst unter mechanischer

Beanspruchung kristallähnlich geordnet (z.B. Kautschuk). Manche Polymere verharren dagegen auch bei mechanischer Beanspruchung im amorphen Zustand (z.B. Polyacrylate).

Beansprucht man einen hochpolymeren Werkstoff z.B. auf Zug, so beginnen die im spannungslosen Zustand lockeren, mehr oder weniger verknäuelten Moleküle sich zu strecken und versuchen schließlich, aneinander abzugleiten. Die Streckung wird durch die gegenseitigen Bindungskräfte der Moleküle umso mehr behindert, je weiter die Dehnung und damit die Orientierung der Molekülverbände fortgeschritten ist. Dieser degressive Verlauf der Verformung entspricht dem "Primärkriechen" (vergl. Bild 5) und ist vollkommen reversibel. Bei Überschreiten einer von Belastungszeit, Temperatur und Weichmachergehalt abhängigen Spannungsgrenze brechen die ersten, schwächeren Sekundärbindungen auf. Diese molekularen Reißstellen bleiben aber nicht offen; die einzelnen Moleküle haben vielmehr das Bestreben, sich in entspanntem Zustand an nähergelegenen Punkten erneut miteinander zu verbinden, die Mikrorisse heilen sozusagen wieder aus. Dieser Vorgang wird als "Platzwechsel" bezeichnet. Bei Metallen gibt es die ähnliche Erscheinung der sogenannten Versetzungen [392].

Da diese neu gebildeten Bindungen in ihrer anfänglichen Lage noch ungespannt sind, kann sich das Kriechen nun mit örtlich erhöhter Geschwindigkeit fortsetzen. Derartige molekulare Reißstellen bilden und schließen sich aber mit zunehmender Spannung in ständig wachsender Zahl und sind mehr oder weniger zufällig über den Probenquerschnitt verteilt, so daß die "resultierende" Kriechkurve dennoch einen stetigen Verlauf annehmen kann. Das Verhältnis der sich bildenden zu den sich wieder schließenden Bruchstellen erreicht im Bereich der "sekundären" Kriechperiode einen gewissen stationären Gleichgewichtszustand, die Kriechgeschwindigkeit wird konstant. Oberhalb einer bestimmten Belastung werden jedoch zunehmend mehr Haftstellen gesprengt als neue gebildet werden können, der Kriechverlauf geht in den

"tertiären" Teil mit progressiv wachsender Verformungsgeschwindigkeit über und führt schließlich zum Bruch der Probe (s. Bild 5).

Unter konstanten physikalischen Bedingungen und zweckmäßig gewählten Abmessungen des Prüfkörpers ist die Struktur also die entscheidende Einflußgröße für das rheologische Verhalten eines Hochpolymeren. In einer grundlegenden Arbeit [330] werden die Beziehungen zwischen der Struktur des Holzes und seinem linearviskoelastischen Verhalten behandelt. Die Arbeit kommt zu dem Ergebnis, daß Holz als heterogene Mischung aufzufassen ist. Das Mischsystem "Holz" besteht dabei aus den drei Einzelkomponenten Lignin-Matrix, Copolymerisat Lignin/Polyosen und der S_2 -Schicht. Jede Einzelkomponente besitzt ihr charakteristisches linear visko-elastisches Verhalten. Das Verhalten der heterogenen Mischung "Holz" ergibt sich aus der Überlagerung der Eigenschaften der drei Einzelkomponenten.

Bei Holzwerkstoffen muß dazu als vierte Komponente noch das rheologische Verhalten der Leimfugen und der Übergangszonen Holz/Leim berücksichtigt werden (siehe Abschnitt 5.1).

Trotz vieler Versuche in dieser Richtung muß es daher ziemlich aussichtslos erscheinen, das Kriechverhalten dieser "Mischsysteme" mit so verschiedenartigen Einzelkomponenten molekular-kinetisch exakt deuten zu wollen. Die von Holzart zu Holzart und vor allem von Holzwerkstoff zu Holzwerkstoff stark schwankende Zusammensetzung der heterogenen Mischung macht eine quantitative Aussage nahezu unmöglich [116].

Bisher wurde nur eine Untersuchung mit dem Ziel einer quantitativen, rechnerischen Beschreibung des rheologischen Verhaltens von Holz mit Hilfe der molekularen Platzwechseltheorie (Wasserstoff-Bindungen) bekannt [354]. Unter Annahme verschiedener Konstanten konnte zwar für den durchgeführten Kriech-Versuch eine gute Übereinstimmung mit dem Rechenverfahren

gefunden werden. Gleichzeitig wird jedoch zutreffend betont, daß hier noch zahlreiche offene Fragen geklärt werden müssen, bevor derartige molekularkinetische Betrachtungsweisen eine größere Bedeutung zur quantitativen Beschreibung des Kriechverhaltens von Holz erlangen können. Viele dieser Fragen dürften aber zumindest mit vertretbarem Aufwand kaum zu lösen sein.

Die allermeisten der zahlreichen ausgewerteten Arbeiten über eine rechnerische Erfassung des Kriechverhaltens beschränken sich auf relativ kurze Versuchszeiten im Bereich von Stunden bis Wochen und erfassen daher oft nur Teile der primären Kriechperiode nach Bild 5. Kriechzeiten über 1 Jahr sind relativ selten, und die Ergebnisse können zumindest bei den heterogenen Werkstoffen aus Holz und bei Holzbauteilen noch nicht verallgemeinert werden. Hinzu kommt, daß ein Vergleich verschiedener Arbeiten oft dadurch erschwert oder gar unmöglich gemacht wird, daß die klimatischen Randbedingungen sowie wichtige prüftechnische Einflußgrößen meist sehr unterschiedlich gewählt wurden, z.T. auch nicht angegeben sind.

Im folgenden Abschnitt soll daher versucht werden, anhand von langjährigen, eindeutig definierten Kriechversuchen an Vollholz und Holzwerkstoffen die Eignung der am häufigsten verwendeten Kriechfunktionen zur Annäherung der Meßwerte sowie zur Extrapolation auf längere Beanspruchungszeiten zu überprüfen.

8.2 Eigene Auswertung von Kriechversuchen mit mathematischen und Modell-Funktionen

8.2.1 Erfassung der aus Versuchen gewonnenen Daten

Erst durch den Einsatz eines Großrechners (Univac 1108 des Rechenzentrums der Universität Karlsruhe) wurde es möglich, eine Auswertung in einem so großen Umfang durchzuführen. Insgesamt wurden damit mehr als 1700 Einzelversuche bzw. Meßstellen ausgewertet.^{+))}

Dazu wurden zunächst sämtliche Meßergebnisse auf einer Datei (Magnetband) gespeichert. Um ein späteres Auffinden und Abrufen der einzelnen Versuche auf dem Magnetband zu ermöglichen bzw. zu vereinfachen, wurde jeder Versuch durch die wesentlichen Materialkenndaten (z.B. Materialtyp, Holzarten, Herstellungsart, Verleimung, Oberflächenbeschichtung), durch Art und Dauer der mechanischen und klimatischen Beanspruchung (Belastungsart und -grad, Temperatur, Luftfeuchtigkeit etc.), durch die Probenabmessungen, sowie durch eine Versuchs-Nummer eindeutig gekennzeichnet. Damit wurde es möglich, als Suchkriterium entweder die gewünschte Versuchs-Nummer oder - z.B. für vergleichende Auswertungen - eine bestimmte Kombination von Versuchskenndaten einzugeben.

Die einzelnen Meßwerte wurden jeweils nach folgendem Schema auf die Datei eingegeben: jedem Zeitwert ($T = 0$ = Belastungsbeginn) wird genau ein Verformungswert (Durchbiegung bzw. Dehnung bzw. Winkeländerung) zugeordnet. Durch einfache Wiederholung eines Zeitwertes wird ein Wechsel im Belastungsgrad gekennzeichnet, eine doppelte Wiederholung des Zeitwertes kennzeichnet eine Entlastung.

^{+))} Für die Erstellung und Weiterentwicklung der dazu erforderlichen Rechner-Programme sei auch an dieser Stelle den Herren Dr. Mistler und Dipl.-Ing. Görlacher vielmals gedankt.

8.2.2 Auswertung der Versuchsergebnisse

Die Auswertung konnte wahlweise mit folgenden Größen, die sich aus den gespeicherten Verformungswerten ableiten lassen, durchgeführt werden:

- | | |
|--|-----------------------------|
| 1. Absolute Gesamtverformung zur Zeit t | f_t |
| 2. Absolute Verformungszunahme, bezogen auf die Anfangsverformung f_0 zur Zeit $t = 1 \text{ min}$ | $\frac{f_t - f_0}{f_0}$ |
| 3. Kriechfaktor | $\frac{f_t}{f_0}$ |
| 4. Relative Verformungszunahme | $\frac{f_t - f_0}{f_0}$ |
| 5. Relativer Kriechmodul in % | $\frac{f_0}{f_t} \cdot 100$ |

Bei Wechsellastversuchen wurde f_0 der zweiten Laststufe aus dem gemessenen f_0 der ersten Laststufe wie folgt berechnet:

$$f_0(2. \text{ Laststufe}) = f_0(1. \text{ Laststufe}) \cdot \frac{\sigma(2. \text{ Laststufe})}{\sigma(1. \text{ Laststufe})}$$

8.2.3 Wahl der Kriechfunktionen

Die Literaturlauswertungen in Abschnitt 8.1 haben gezeigt, daß rheologische Modellfunktionen sowie empirische Potenzfunktion bisher am häufigsten und am "erfolgreichsten" zur rechnerischen Anpassung von experimentell erhaltenen Kriechkurven verwendet werden.

Für die Auswertungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden daher vier der am aussichtsreichsten erscheinenden Kriechfunktionen ausgewählt, von denen je zwei durch Nullsetzen eines Parameters ineinander überführbar sind. Allgemein lassen sich

diese Funktionen in der Form

$$Y = f(X, \beta_i) \quad (8)$$

darstellen, mit Y als abhängiger Variable (Verformung bzw. eine daraus abgeleitete Größe), X als unabhängiger Variable (Zeit) und β_i als Parameter.

Im Einzelnen handelt es sich um folgende Ansätze:

$$\text{Funktion (1) : } Y = \beta_1 + \beta_2(1 - e^{-\beta_3 X}) + \beta_4 X$$

$$\text{Funktion (2) : } Y = \beta_1 + \beta_2(1 - e^{-\beta_3 X})$$

$$\text{Funktion (3) : } Y = \beta_1 \cdot X^{\beta_2} + \beta_3$$

$$\text{Funktion (4) : } Y = \beta_1 \cdot X^{\beta_2}$$

Die Funktionen (1) und (2) beruhen auf rheologischen Modellansätzen und sind physikalisch begründet. Funktion (1) entspricht dem 4-Parameter-Modell und berücksichtigt neben den elastischen und verzögert-elastischen Anteilen auch einen irreversiblen, plastischen Anteil der Verformung; dabei bleibt die Kriechgeschwindigkeit im sekundären Kriechbereich konstant und führt daher theoretisch in einer endlichen Zeit zum Bruch des Werkstoffes. Beim 3-Parameter-Modell (Funktion (2)) fehlt die plastische Komponente (β_4), die Kriechgeschwindigkeit geht daher gegen Null (nähere Einzelheiten zum 3- und 4-Parameter-Modell siehe z.B. [70]).

Die Potenz-Funktionen (3) und (4) sind rein empirische Formeln, die aber den Vorteil großer Einfachheit besitzen. Zunächst sind den Parametern β_i keine physikalisch begründbaren Eigenschaften zugeordnet. Nimmt man jedoch β_3 als den elastischen Anteil der Verformung an (z.B. f_0 bei Lastaufbringung), so ergibt sich (4) aus (3), wenn in (4) nur der Kriechanteil der Verformung verwendet wird (z.B. $f_t - f_0$ oder $(f_t - f_0)/f_0$).

Ein Grenzwert der beiden Funktionen (3) und (4) kann nicht angegeben werden; jedoch nimmt die Kriechgeschwindigkeit für $\beta_2 < 1$ kontinuierlich ab.

8.2.4 Anpassung der Meßwerte

Die Anpassung der Meßwerte an die Kriechfunktionen erfolgte über das in den Ingenieurwissenschaften allgemein anerkannte Prinzip vom Minimum der Fehlerquadrate:

$$S = \sum_{i=1}^N (Y_i - Y)^2 \stackrel{!}{=} \text{MIN} \quad (9)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \beta_i} = 0 \quad (10)$$

mit Y_i = Versuchswerte
 Y = Kriechfunktion
 β_i = freie Parameter

a) $Y = \beta_1 + \beta_2 (1 - e^{-\beta_3 X}) + \beta_4 X :$

Durch Einsetzen der Funktion (1) in (9) und (10) erhält man ein Gleichungssystem mit 4 Unbekannten $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$, das in β_3 nichtlinear ist. Mit einem geschätzten Wert β_3 lassen sich die restlichen Parameter bestimmen.

Zur Verbesserung des geschätzten Näherungswertes β_3 wird das Newton'sche Näherungsverfahren angewendet. Man erhält ein verbessertes β_3^1 nach folgender Gleichung:

$$\beta_3^1 = \beta_3 - \frac{\frac{\partial S}{\partial \beta_3}}{\frac{\partial^2 S}{\partial \beta_3^2}} \quad (11)$$

Mit diesem verbesserten Wert wird das Gleichungssystem erneut gelöst. Wenn sich β_3 durch Anwendung von (11) nicht mehr verändert, wird das Verfahren abgebrochen (eine ausführlichere Beschreibung des Verfahrens ist in [275] angegeben; über eine weitere Lösungsmöglichkeit wird in [62] berichtet).

b) $Y = \beta_1 + \beta_2 (1 - e^{-\beta_3 X})$:

In diesem Fall (3-Parameter-Modell) entsteht ein Gleichungssystem mit 3 Unbekannten, das wie unter a) beschrieben gelöst wird.

c) $Y = \beta_1 \cdot X^{\beta_2}$:

Durch Logarithmieren läßt sich die Gleichung linearisieren. In (9) und (10) eingesetzt ergibt sich ein lineares Gleichungssystem mit zwei Unbekannten β_1 und β_2 , das eindeutig lösbar ist.

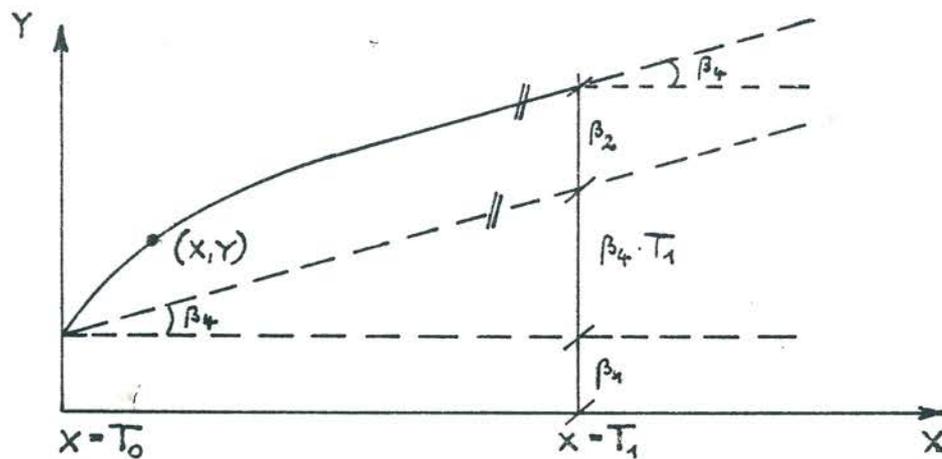
d) $Y = \beta_1 \cdot X^{\beta_2} + \beta_3$:

Hierbei wird ebenfalls das unter c) angegebene Lösungsverfahren angewendet; β_3 ist dabei ein "fester" Wert, der so lange kontinuierlich verändert wird, bis das Bestimmtheitsmaß (siehe unten) ein Maximum erreicht.

8.2.5 Problematik der Anpassung

Rheologische Modelle (1) und (2):

Für das 3- und 4-Parameter-Modell ist es notwendig, einen Näherungswert $\hat{\beta}_3$ zu schätzen. Dieser Wert muß hinreichend nahe am "physikalisch richtigen" Wert liegen. Eine schnelle Schätzung, die in der Regel ausreichend genau ist, läßt sich mit folgenden Annahmen durchführen:



- β_1 entspricht etwa dem Meßwert an der Stelle $x = T_0 = 0$ (Verformung 1 min nach Aufbringen der Last)
- β_4 gibt die Steigung der Kriechkurve im sekundären Kriechbereich an (für 3-Element-Modell ist $\beta_4 = 0$)
- Der Meßwert an der Stelle $x = T_1$ setzt sich wie folgt zusammen: $Y_{x=T_1} = \beta_1 + \beta_4 \cdot T_1 + \beta_2$;
daraus läßt sich β_2 bestimmen
- Nach Einsetzen eines beliebigen Meßwertepaares (X, Y) und der oben näherungsweise ermittelten Werte in die Kriechfunktion läßt sich β_3 bestimmen; das Wertpaar (X, Y) wird zweckmäßigerweise aus dem primären, stärker gekrümmten Bereich der Kriechkurve entnommen, da nur in diesem Bereich ein ausgeprägter Einfluß von β_3 vorhanden ist.

Potenzfunktionen (3) und (4):

Das Linearisieren von Gleichungen durch Logarithmieren bringt eine unterschiedliche Gewichtung von Meßfehlern und Meßungenauigkeiten - die durch die Regressionsanalyse ausgeglichen werden sollen - mit sich. Dies ist nach [62] nicht zu begründen und müßte zumindest theoretisch abgelehnt werden. In der vorliegenden Arbeit wurde dieses Verfahren dennoch beibehalten, da es ohne großen Rechenaufwand angewendet werden kann, was insbesondere für spätere Versuche, die mit den Ergebnissen dieser Arbeit verglichen werden sollen, wesentlich ist. Außerdem wird mit diesem Verfahren eine völlig ausreichende Genauigkeit der Anpassung erreicht, wie unten gezeigt werden wird. Eine Lösungsmöglichkeit, die ohne den Kunstgriff des Logarithmieren auskommt - dafür aber erheblich aufwendiger und mit anderen Schwierigkeiten behaftet ist - wird in [62] vorgestellt.

Bestimmtheitsmaß:

Die Beurteilung der Anpassung mit Hilfe eines Bestimmtheitsmaßes ist ebenfalls nicht unumstritten. Doch gilt auch hier für den Praktiker der Vorteil der einfachen und schnellen Vergleichbarkeit bei meist ausreichendem Informationsgehalt.

Das Bestimmtheitsmaß B wird nach allgemein bekannten Formeln wie folgt berechnet:

a) $Y = \beta_1 + \beta_2(1 - e^{-\beta_3 X}) + \beta_4 \cdot X :$
mit $Z = e^{-\beta_3 X}$ wird

$$B = \frac{-\beta_2 \left(\sum_{i=1}^N Y_i \cdot Z_i - \frac{\sum Z_i \cdot \sum Y_i}{N} \right) + \beta_4 \left(\sum X_i \cdot Y_i - \frac{\sum X_i \cdot \sum Y_i}{N} \right)}{\sum Y_i^2 - \frac{(\sum Y_i)^2}{N}} \quad (12)$$

b) $Y = \beta_1 + \beta_2 (1 - e^{-\beta_3 X})$:

wie a), jedoch $\beta_4 = 0$

c) $Y = \beta_1 \cdot X^{\beta_2} + \beta_3$ und $Y = \beta_1 \cdot X^{\beta_2}$:

mit $Y = \ln Y$

und $X = \ln X$ wird

$$B = \frac{\beta_2 (\sum X_i \cdot Y_i - \frac{\sum X_i \cdot \sum Y_i}{N})}{\sum Y_i^2 - \frac{(\sum Y_i)^2}{N}} \quad (13)$$

Auch hierzu werden in [62] weitere Möglichkeiten der statistischen Auswertung von Elementarfehlern angegeben.

8.3 Genauigkeit der Anpassung und Extrapolation mit Hilfe der Funktionen (1) bis (4)

8.3.1 Kriechverformungen im Normalklima 20/65

In Bild 56a-e sind die 4 Funktionen am Beispiel des Biegekriechens von Buchenvollholz im Normalklima 20/65 hinsichtlich ihrer Anpassung an die gesamten gemessenen Kriechverformungen (56a) sowie hinsichtlich ihrer Extrapolationsmöglichkeiten (56b-e) bei Auswertung kürzerer Meßzeiten (0-80 000h, 0-10 000h und 0-2000h) vergleichend dargestellt.

Bei Einbeziehung des gesamten Kriechzeitraumes (80 000h) werden die Meßwerte von den Funktionen (1) und (3) sehr gut, von (2) und (4) relativ gut erfaßt (bei Funktion (4) wurde hier die Gesamtverformung f_t verwendet). Mit zunehmender Verkürzung des rechnerisch ausgewerteten Kriechzeitraumes werden deutliche Unterschiede bezüglich der Extrapolationsfähigkeit erkennbar: während (4) und besonders (2) (Vernachlässigung des plastischen Verformungsanteils) ein zu günstiges Kriechverhalten vorhersagen,

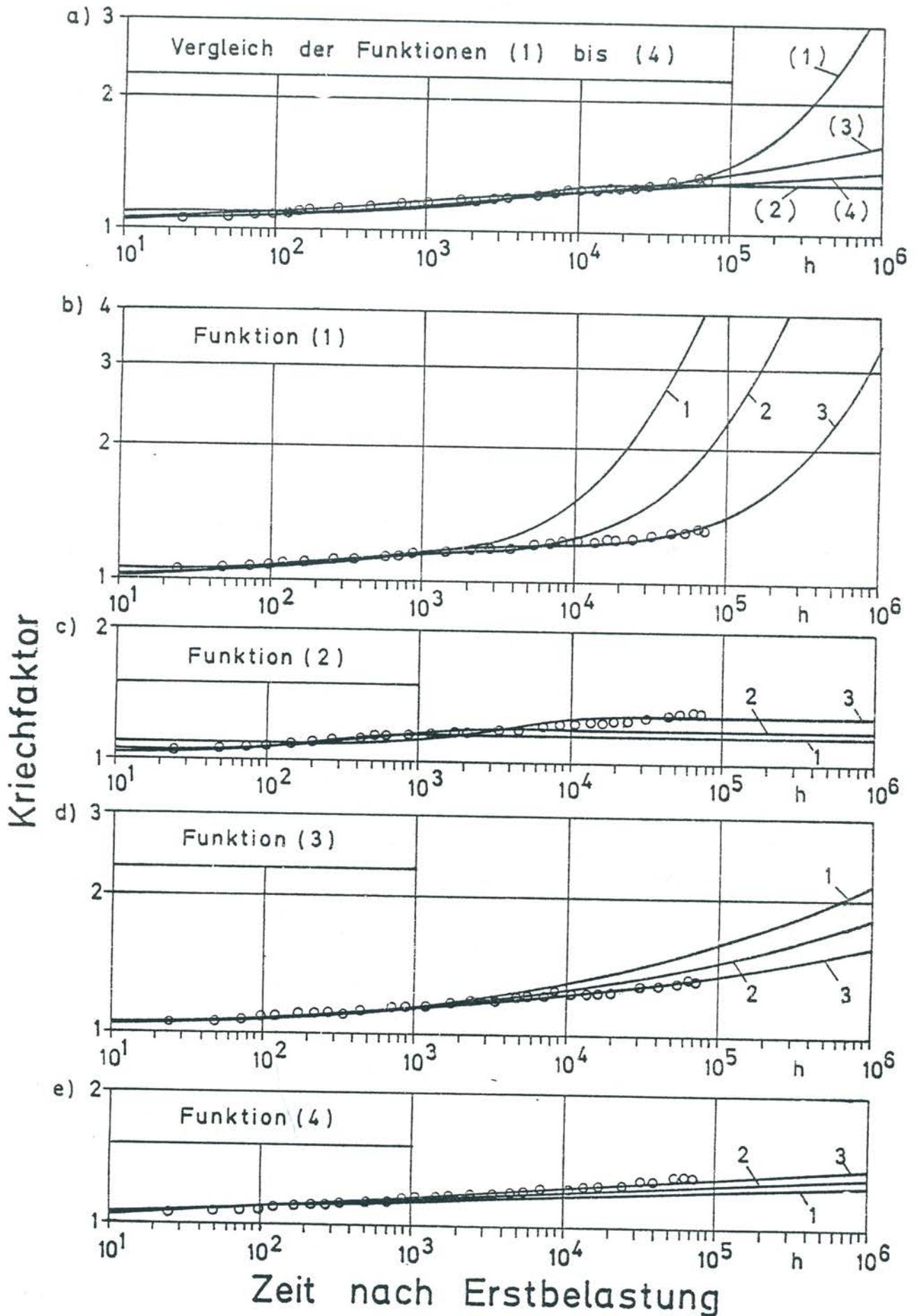


Bild 56a-e: Mathematische Annäherung des Kriechverhaltens (Buche 20/65) durch die Kriechfunktionen (1) bis (4) (Bild 56a); Extrapolationsmöglichkeiten in Abhängigkeit von der ausgewerteten Meßzeit (Bild 56b-e)
1 = 0-2000h 2 = 0-10 000h 3 = 0-80 000h

liegen die Extrapolationen mit (3) und besonders mit (1) (konstante Kriechgeschwindigkeit im sekundären Bereich) bei abnehmender Prüfzeit zunehmend auf der ungünstigen, d.h. sicheren Seite. Am besten geeignet für eine Vorhersage des zu erwartenden Kriechverhaltens scheint daher die relativ einfache Potenzfunktion (3) zu sein (sofern bei der Funktion (4) nur der Kriechanteil ausgewertet wird, sind auch mit dieser Funktion ähnlich gute Anpassungen und Extrapolationen möglich, s.u.).

Ähnliche Zusammenhänge konnten auch bei entsprechenden Auswertungen von Kriechversuchen im natürlichen Außenklima und im definierten Wechselklima festgestellt werden (siehe Abschnitte 8.3.2 und 8.3.3).

In den Bildern 57-61 (siehe Anhang) sind zunächst weitere Extrapolationen im Normalklima 20/65 am Beispiel von Vollholz und Holzwerkstoffen zusammengestellt.

Bild 57 enthält einen Vergleich der vier Funktionen bei Auswertung des gesamten Versuchszeitraumes (ca. 80 000h) und Extrapolation bis 10^6 h (ca. 110 Jahre), aufgezeigt an Biegeversuchen mit Buchen-Vollholz (57a), Bau-Furniersperrholz aus Buche BFU-BU-100 (57b) und Holzspanplatten FP-V20 (57c).

In Tabelle 13 werden die nach Funktion (1)-(4) errechneten Durchbiegungen mit den gemessenen Kriechverformungen verglichen; außerdem ist das Bestimmtheitsmaß der jeweiligen Anpassungs-Regression mit angegeben. Zusätzlich sind die Auswertungen von fehlerfreien Kiefern- und Fichtenstäben im Klima 20/65 sowie von Fichtenstäben im relativ stark schwankenden Innenraumklima 20/55 aufgeführt.

Aus Bild 57 und Tabelle 13 folgt, daß sich die gemessenen Kriechverformungen auch bei weiteren Holzarten und bei Holzwerkstoffen mit den Funktionen (1) und (3) sehr gut, mit (2) und (4) relativ gut anpassen lassen. Das höchste Bestimmtheitsmaß und damit die beste Anpassungsgüte wird im Konstantklima 20/65 stets mit der Potenzfunktion (3) erreicht, während

Tabelle 13: Vergleich der nach Funktion (1) bis (4) berechneten Extrapolationswerte f_{rech} mit den Meßwerten f_{ist} im Normalklima 20/65 (Buche, Furniersperrholz, Spanplatte) bzw. im Inneraumklima 20/55 (Fichte)

Klima	Material (N) ¹⁾	T (h)	f_{ist} (mm)	f_{rech} nach Funktion				
				(1)	(2)	(3)	(4) ²⁾	
20/65	Buche (50)	10^3	3,1	3,2	3,1	3,1	3,1	
		10^4	3,4	3,3	3,4	3,4		
		10^5	3,7	3,8	3,5	3,7	3,7	
		$f_0=2,7$ mm	10^6	-	9,1	3,5	4,3	4,4
		B ³⁾	-	0,965	0,908	0,988	0,969	
	Kiefer (50)	10^3	3,3	3,4	-	3,2	3,2	
		10^4	3,6	3,5	-	3,6	3,6	
		10^5	4,0	4,2	-	4,0	4,1	
		$f_0=2,4$ mm	10^6	-	11,0	-	4,7	4,9
		B	-	0,961	-	0,978	0,942	
	Fichte (50)	10^3	3,5	3,5	-	3,4	3,4	
		10^4	3,6	3,6	-	3,6	3,6	
		10^5	3,8	4,0	-	3,8	3,9	
		$f_0=2,9$ mm	10^6	-	7,9	-	4,1	4,3
		B	-	0,958	-	0,973	0,926	
	BFU-BU-100 (56)	10^3	5,6	5,5	5,5	5,6	5,6	
		10^4	6,5	6,5	6,6	6,4	6,4	
		10^5	7,9	8,1	7,3	8,0	8,1	
		$f_0=4,8$ mm	10^6	-	23,1	7,3	11,2	11,5
		B	-	0,988	0,965	0,997	0,995	
FP-V20 (50)	10^3	2,1	2,1	2,0	2,1	2,1		
	10^4	2,4	2,4	2,5	2,5	2,5		
	10^5	3,0	3,4	2,8	3,0	3,1		
	$f_0=1,6$ mm	10^6	-	12,8	2,8	4,0	4,1	
	B	-	0,975	0,919	0,996	0,990		
20/55 (stärker schwankend)	Fichte 20L (133)	10^3	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8	
		10^4	1,8	1,9	1,9	1,9	2,0	
		10^5	(2,6) ⁴⁾	2,8	2,8	2,8	2,5	
		$F_0=1,6$ mm	10^6	-	9,2	3,1	3,7	3,8
	B	-	0,983	0,983	0,972	0,889		

1) N = Anzahl der Wertepaare

2) Mit $(f_t - f_0)$ ausgewertet, auf f_t rückgerechnet

3) B = Bestimmtheitsmaß

4) T = 72240h

mit dem 3-Parameter-Modell (2) die relativ "schwächste" Anpassung erfolgt (vor allem am Anfang (unter 100h) und am Ende der Meßperiode). Sofern in den bisherigen Bildern bereits Ausgleichsfunktionen mit eingezeichnet sind, handelt es sich stets um Funktion (3).

Sehr viel deutlicher werden die Unterschiede zwischen den Funktionen bei Extrapolation über die Versuchsdauer hinaus. Besonders Funktion (2) muß hier als ungeeignet bezeichnet werden, da sie schnell in einen waagerechten Verlauf übergeht (Kriechgeschwindigkeit = Null) und daher mit zunehmender Extrapolationszeit zunehmend auf der unsicheren Seite liegt. Daher wird im Folgenden i.a. auf Auswertungen mit Funktion (2) verzichtet.

Die Auswertungen mit der Potenzfunktion (4) liefern in Bild 57 (ebenso wie in Bild 56) zwar zu niedrigere Rechenwerte; das liegt aber nur daran, daß hier zum Vergleich die gesamte Verformung f_t (bzw. f_t/f_0) verwendet wurde anstelle der reinen Kriechverformungsanteile (Durchbiegungszunahme $f_t - f_0$ bzw. relative Durchbiegungszunahme $(f_t - f_0)/f_0$), die bei dieser Näherungsfunktion stets verwendet werden müssen (und in Tabelle 13 und den folgenden Bildern i.a. auch verwendet wurden).

Die Anpassung und Extrapolation von Biegeversuchen mit Buche, Kiefer und Fichte (20/65) durch die Funktionen (1), (3) und (4) wird in Bild 58a-c gezeigt (vergl. Tabelle 13). Ebenso wie in den folgenden Bildern, wird bei den Funktionen (1) und (3) stets der Kriechfaktor f_t/f_0 , bei Funktion (4) die relative Durchbiegungszunahme $(f_t - f_0)/f_0$ ausgewertet.

Die entsprechenden Auswertungen für Furnier- und Stabsperrholz sind Bild 59, für 13 mm und 22 mm dicke Holzspanplatten FP-V20 (gleiches Fabrikat) Bild 60, und für weitere, unterschiedlich verleimte Holz- und Flachs-Spanplatten (verschiedene Fabrikate und Dicken) Bild 61 zu entnehmen.

Aus allen 4 Bildern (58-61) ist das gleiche, offensichtlich charakteristische Anpassungsvermögen der ausgewerteten Funktionen zu erkennen: Sowohl mit dem 4-Parameter-Ansatz (1) als auch mit der Potenzfunktion (3) werden die Versuchswerte nicht nur bei Vollholz, sondern auch bei Sperrholz und Spanplatten über der gesamten Belastungszeit von ca. 9 Jahren sehr gut angepaßt. Die relative Durchbiegunszunahme reagiert zwar selbst auf kleine klimabedingte Schwankungen der Meßwerte deutlich empfindlicher als der Kriechfaktor, wird aber mit der Potenzfunktion (4) ebenfalls noch sehr gut angenähert (Bilder 58c-61c).

Auch bei Extrapolation auf 10^6 h sind keine qualitativen Unterschiede zwischen Vollholz und Holzwerkstoffen festzustellen: mit (1) werden zu hohe Verformungen vorausgesagt (sichere Seite), (3) und (4) liefern annähernd die gleichen, plausiblen Schätzwerte (Kriechfaktor $f_t/f_0 = \text{relative Durchbiegunszunahme } (f_t - f_0)/f_0 + 1$).

Verkürzt man die rechnerisch ausgewertete Versuchszeit und vergleicht die daraus resultierenden Extrapolationen mit den Meßwerten, so können damit die Extrapolationsfähigkeit der verschiedenen Funktionen beurteilt sowie Rückschlüsse auf die erforderliche Mindestdauer von Kriechversuchen für eine ausreichend sichere Extrapolation gezogen werden.

Aus Tabelle 14 wird der Einfluß der Auswertungs-Zeitspanne auf die Parameter und die Bestimmtheit der Funktionen (3) und (4) am Beispiel von Biegekriechversuchen mit Buche, Buchen-Furnier-sperrholz und V20-Spanplatten im Klima 20/65 ersichtlich. Zur Veranschaulichung sind jeweils die mit der betreffenden Zeitspanne ermittelten Extrapolationswerte für 10^6 h angegeben. Mit Verkürzung der Auswertungszeitspanne erhöhen sich demnach bei beiden Potenzfunktionen die Extrapolationswerte für eine bestimmte Belastungszeit, bei gleichzeitig abnehmender Bestimmtheit der Regression. Eine Extrapolation aus kürzeren

Tabelle 14: Einfluß der Auswertungszeitspanne auf die Parameter β_1 , β_2 , das Bestimmtheitsmaß B sowie den Extrapolationswert ($10^6 h$) der Kriechfunktionen (3) und (4) im Normalklima 20/65, gezeigt am Beispiel Buche, Furniersperrholz und Spanplatte (Einzelproben, BG = 20 %, ausgewertete Größe: bei (3) f_t , bei (4) $f_t - f_0$)

Material (HxB mm)	N	Zeit- spanne (h · 10 ³)	Funktion (3)				Funktion (4)			
			β_1	β_2	B	f_{rech} 10 ⁶ h (mm)	β_1	β_2	B	f_{rech} 10 ⁶ h (mm)
Buche (15x30) $f_0 = 2,7$ mm	17	0 - 1	0,046	0,330	0,969	7,1	-	-	-	-
	30	0 - 5	0,066	0,259	0,959	5,1	0,068	0,256	0,960	5,0
	34	0 - 10	0,079	0,242	0,986	4,9	0,070	0,249	0,963	4,9
	52	0 - 100	0,083	0,219	0,968	4,4	0,085	0,218	0,969	4,4
	50	0 - 80	0,120	0,188	0,988	4,3	0,087	0,213	0,969	4,4
	36	0,5- 80	0,151	0,163	0,993	4,1	0,120	0,179	0,993	4,1
BFU-BU-100 (10x50) $f_0 = 4,8$ mm	16	0 - 1	0,008	0,631	0,980	53	-	-	-	-
	33	0 - 5	0,036	0,418	0,993	16,5	0,093	0,318	0,989	11,8
	40	0 - 10	0,100	0,309	0,996	11,9	0,090	0,318	0,991	12,1
	56	0 - 100	0,096	0,308	0,995	11,5	0,098	0,306	0,995	11,5
	54	0 - 80	0,110	0,295	0,997	11,2	0,098	0,305	0,995	11,5
	46	0,5- 80	0,425	0,192	0,999	10,0	0,100	0,304	0,993	11,4
FP-V20 (22x50) $f_0 = 1,6$ mm	17	0 - 1	0,073	0,301	0,979	6,2	-	-	-	-
	30	0 - 5	0,093	0,251	0,979	4,6	0,094	0,250	0,979	4,6
	34	0 - 10	0,123	0,224	0,994	4,2	0,097	0,244	0,980	4,4
	52	0 - 100	0,103	0,234	0,989	4,2	0,103	0,233	0,989	4,2
	50	0 - 80	0,140	0,207	0,996	4,0	0,105	0,230	0,990	4,1
	36	0,5- 80	0,063	0,265	0,996	4,2	0,119	0,216	0,995	4,0

Versuchen liegt somit jeweils auf der sicheren Seite. Für eine annähernd zutreffende Vorhersage der langfristigen Kriechverformungen (10^5 - 10^6 h) im Klima 20/65 sind Belastungszeiten von mindestens ca. 5000h notwendig.

Einige Literaturstellen gehen von einem andersartigen Kriechverlauf am Anfang der Belastungsphase aus, z.B. [52, 54, 84, 141-143, 274] und schlagen daher vor, diese Anfangsphase bei der Auswertung nicht zu berücksichtigen. Entsprechende Auswertungen zahlreicher eigener Versuche, bei denen zunächst die ersten 500h nicht mit erfaßt wurden, haben meist zu geringfügig niedrigeren Extrapolationswerten bei i.a. erhöhter Bestimmtheit der Regression geführt (vergl. Tabelle 14, Auswertungen 500-80 000h). Läßt man dagegen nur die ersten 100h unberücksichtigt (hier nicht zahlenmäßig dargestellt), so führt das je nach Potenzfunktion, Auswertungszeitspanne und Material zu teils gleichlaufender, teils gegenläufiger Beeinflussung der Extrapolationsqualität. Allgemein gültige Angaben über Vor- oder Nachteil einer Auswertung ohne Anfangsphase können daher zumindest für Holz und Holzwerkstoffe derzeit noch nicht gemacht werden (obwohl in [84] aufgrund von entsprechenden Auswertungen an Kunststoffen die Unterdrückung der Anfangsphase (max. 100h) als "grundlegende Regel für alle zum Kriechen neigenden Werkstoffe" empfohlen wird).

In Tabelle 14 sind neben der Zeitspanne 0-80 000h auch die Zeiten 0-100 000h mit aufgeführt; hierbei sind die beiden letzten Meßwerte, die infolge einer größeren Klimastörung (höhere Feuchte) deutlich zu hoch liegen, mit ausgewertet worden, um den Einfluß von "Ausreißern" auf die Extrapolationsgüte festzustellen. Die dadurch bedingte Erhöhung der rechnerischen Durchbiegungen nach 10^6 h ist jedoch sehr gering (0... 0,3 mm). In den Bildern 56-61 sind diese 2 Meßwerte weggelassen worden.

Tabelle 15: Mittelwert (\bar{x}) und Spannweite der Parameter β_1 und β_2 sowie des Bestimmtheitsmaßes B der Kriechfunktionen (3) und (4) im Normalklima 20/65, gezeigt am Beispiel von Furnier- und Stab-Sperrholz sowie Holzspanplatten.

Material (HxB mm)		Funktion (3)			Funktion (4)		
		β_1	β_2	B	β_1	β_2	B
BFU-BU-100 (10 x 50) 1 = 4 1) ⊥ 1 = 5	\bar{x}	0,028	0,284	0,996	0,025	0,291	0,993
	min	0,021	0,264	0,994	0,019	0,266	0,989
	max	0,034	0,303	0,997	0,032	0,310	0,995
	\bar{x}	0,020	0,331	0,987	0,019	0,335	0,981
	min	0,014	0,310	0,971	0,014	0,319	0,949
	max	0,027	0,353	0,996	0,025	0,353	0,993
BST-100 (19 x 50) 1 = 5 ⊥ 1 = 5	\bar{x}	0,029	0,289	0,996	0,027	0,297	0,994
	min	0,027	0,273	0,995	0,024	0,281	0,992
	max	0,032	0,305	0,997	0,029	0,312	0,996
	\bar{x}	0,030	0,233	0,995	0,026	0,245	0,991
	min	0,021	0,216	0,993	0,018	0,229	0,987
	max	0,047	0,244	0,998	0,038	0,257	0,997
FP-V20 (13 x 50) 1 = 4 (22 x 50) 1 = 4	\bar{x}	0,109	0,218	0,994	0,084	0,239	0,986
	min	0,097	0,211	0,994	0,076	0,233	0,984
	max	0,118	0,224	0,996	0,090	0,246	0,990
	\bar{x}	0,108	0,195	0,997	0,080	0,219	0,993
	min	0,088	0,186	0,996	0,066	0,211	0,990
	max	0,127	0,207	0,998	0,092	0,230	0,995

1) die 1 Einzelproben stammen jeweils aus einer Platte.

Tabelle 15 gibt einen Überblick über die Schwankungsbreite der Parameter und des Bestimmtheitsmaßes der Kriechfunktionen (3) und (4) im Normalklima 20/65, wenn mehrere Proben aus jeweils einer Platte ausgewertet werden.

8.3.2 Kriechverformungen im Außenklima

In den Bildern 62-64 (Anhang) wird die Anpassungs- und Extrapolationsmöglichkeit von Kriechversuchen im natürlichen Außenklima unter Dach durch die vier Funktionen dargestellt.

Einen Vergleich der Funktionen (1) bis (4) - bei Auswertung des gesamten Versuchszeitraumes - zeigt Bild 62 am Beispiel breiter Biegeproben aus Furniersperrholz (62a) und verschieden verleimten Holzspanplatten FP-V100 (62b und 62c). Hier treten erwartungsgemäß deutlichere Unterschiede zwischen den Funktionen zu Tage: die Anpassung der Meßwerte ist nur noch mit (1) und (3) befriedigend genau möglich; Funktion (2) ist völlig ungeeignet; (4) kann auch hier - bei Wahl der Auswertegröße f_t/f_0 - keine brauchbare Anpassung liefern.

Bei Extrapolation über den Versuchszeitraum hinaus werden die Unterschiede noch größer:

Funktion (2) liefert erheblich zu niedrige, die Funktion (1) wiederum zu hohe Schätzwerte; die beste Extrapolation ergibt sich mit der Potenzfunktion (3).

Bild 63 verdeutlicht die unterschiedliche Anpassung und Extrapolation der Funktionen (1), (3) und (4) - hier allerdings mit richtiger Auswertung des reinen Kriechverformungsanteils - am Beispiel von vier verschiedenen Holzwerkstoffen (Bau-Furniersperrholz aus Buche, Holzspanplatten mit Phenolharz- und verstärkter Aminoplastverleimung sowie mit Zementbindung).

Berücksichtigt man die Tatsache, daß im natürlichen Außenklima stets mit mehr oder weniger starken und unregelmäßigen klimabedingten Schwankungen der Kriechverformungen gerechnet werden

muß (siehe Abschnitt 3.4.1), so ist die Qualität der Anpassung der Versuchswerte mit allen 3 Funktionen noch als überraschend gut zu bezeichnen. Die Extrapolation über den Versuchszeitraum hinaus ist mit Funktion (1) nicht mehr sinnvoll (zu hohe Schätzwerte). Mit Funktion (3) und - bei richtiger Wahl der Auswertegröße - auch mit Funktion (4) sind dagegen glaubhafte Schätzungen etwa in gleicher Größenordnung zu erwarten.

In Bild 64 wird der Einfluß der Auswertungszeitspanne auf die Extrapolationsgüte der Funktion (3) am Beispiel von Furniersperrholz und zwei verschieden verleimten Spanplatten gezeigt. Je nach den klimatischen Startbedingungen der Außenklimaversuche kann eine Verkürzung der Zeitspanne auf die ersten 2000 Belastungsstunden eine zu günstige (Bild 64a), eine zu ungünstige (64b) oder eine annähernd richtige Extrapolation (65c) auf längere Belastungszeiten ergeben. Läßt man die ersten 100h bei der Auswertung der gesamten Versuchsdauer weg, so wird dieser bei Außenklimaversuchen besonders wichtige Einfluß der Startphase erneut deutlich; die Anpassungskurven 100-80000h können über (64a), bei (64b) oder unter (64c) den entsprechenden Kurven 0-80000h liegen.

Der Einfluß der Auswertungszeitspanne auf die Qualität der Extrapolationswerte im Außenklima wird auch aus den Tabellen 16 und 17 deutlich, in denen die Parameter, das Bestimmtheitsmaß und die für eine Belastungsdauer von jeweils 10^5 h errechneten Durchbiegungen am Beispiel zahlreicher Spanplatten unterschiedlicher Verleimung und Dicke aufgeführt sind.

Demnach "stabilisieren" sich die mit Funktion (3) ermittelten Extrapolationswerte erst ab einer Auswertungszeitspanne von etwa 20 000h (Tabelle 17); d.h. für eine brauchbare Voraussage der langfristigen Kriechverformungen von Spanplatten im Außenklima ist eine Versuchsdauer von mindestens 2 Jahren erforderlich, wenn die Werte als typische Materialkennwerte verwendet

Tabelle 16: Einfluß der Auswertungszeitspanne auf die Parameter β_1 , β_2 , das Bestimmtheitsmaß B sowie den Extrapolationswert ($10^5 h$) der Kriechfunktion (3) im Außenklima, gezeigt am Beispiel von Holzspanplatten FP-V20 und FP-V100 (je 1 = 2 Proben, Breite = 300 mm; ausgewertete Größe: f_t)

Material	BG (%)	N 1)	Zeit- spanne ($h \cdot 10^3$)	β_1	β_2	B	f_{rech} $10^5 h$ (mm)
FP-V20 1HF 19 mm	20	31	0 - 5	0,024	0,643	0,960	43
		57	0 - 10	0,009	0,782	0,961	78
		100	0 - 20	0,014	0,724	0,969	64
	33	31	0 - 5	0,042	0,651	0,974	82
		57	0 - 10	0,023	0,743	0,973	127
		67	0 - 20	0,023	0,745	0,976	129
FP-V100 8HMF 19 mm	20	32	0 - 5	0,026	0,578	0,974	25
		58	0 - 10	0,020	0,631	0,973	33
		101	0 - 20	0,023	0,605	0,975	29
	33	25	0 - 5	0,000	1,433	0,986	544
		53	0 - 10	0,004	0,874	0,976	111
		100	0 - 20	0,031	0,648	0,977	63
FP-V100 3PF 19 mm	20	32	0 - 5	0,025	0,666	0,979	57
		58	0 - 10	0,020	0,707	0,981	73
		101	0 - 20	0,026	0,666	0,976	60
	33	32	0 - 5	0,088	0,613	0,986	108
		58	0 - 10	0,063	0,666	0,986	139
		101	0 - 20	0,083	0,627	0,986	120
FP-V100 4PF 19 mm	20	32	0 - 5	0,097	0,634	0,991	148
		58	0 - 10	0,093	0,643	0,993	157
		101	0 - 20	0,102	0,627	0,992	146
	33	32	0 - 5	0,228	0,660	0,987	465
		35	0 - 10	0,225	0,663	0,987	473
		35	0 - 20	-	-	-	-
FP-Zement 2) 12 mm	20	29	0 - 2	0,264	0,408	0,994	31
		46	0 - 5	0,308	0,371	0,989	24
		89	0 - 12	0,495	0,310	0,993	20
FP-Zement 2) 24 mm	20	29	0 - 2	0,144	0,442	0,981	25
		46	0 - 5	0,158	0,414	0,983	20
		88	0 - 12	0,162	0,408	0,989	19,5

1) N = Anzahl der Messungen (Wertepaare) 2) 1 = 5 Proben

Tabelle 17: Einfluß der Auswertungszeitspanne auf die Parameter β_1 , β_2 , das Bestimmtheitsmaß B sowie den Extrapolationswert ($10^5 h$) der Kriechfunktion (3) im Außenklima, gezeigt am Beispiel weiterer Holzspanplatten (je 1 = 3 Proben, Breite = 300-400 mm, BG = 20 %; ausgewertete Größe: f_t)

Material	N	Zeit- spanne (h · 10 ³)	Funktion (3)			f_{rech} 10 ⁵ h (mm)
			β_1	β_2	B	
FP-V20 (HF) 19 mm	32	0 - 5	0,119	0,431	0,960	18,4
	43	0 - 10	0,173	0,367	0,959	13,4
	59	0 - 20	0,261	0,311	0,963	10,8
	89	0 - 40	0,325	0,287	0,971	10,3
	113	0 - 80	0,269	0,309	0,975	10,9
FP-V100 (PF) 19 mm	32	0 - 5	0,213	0,302	0,967	8,3
	43	0 - 10	0,264	0,271	0,971	7,4
	59	0 - 20	0,328	0,242	0,969	6,7
	89	0 - 40	0,333	0,239	0,976	6,6
	113	0 - 80	0,330	0,241	0,980	6,6
FP-V100 (3PFG) 35 mm	24	0 - 5	0,012	0,686	0,988	34
	33	0 - 10	0,012	0,680	0,993	33
	49	0 - 20	0,015	0,641	0,991	27
	69	0 - 40	0,019	0,607	0,987	23
FP -V100 (11HMF) 36 mm	24	0 - 5	0,009	0,671	0,993	22
	33	0 - 10	0,010	0,652	0,994	19,2
	49	0 - 20	0,013	0,608	0,989	15,3
	69	0 - 40	0,015	0,583	0,969	13,6
FP-V100 (PF/IC) 18 mm	38	0 - 5	0,711	0,380	0,980	63
	67	0 - 10	0,397	0,457	0,982	83
	86	0 - 20	0,418	0,448	0,982	80

werden sollen. Mit kürzeren Versuchszeiten (2000h bis 10 000h) können - je nach dem klimabedingten Kriechverlauf im ersten Jahr der Belastung - sowohl zu niedrige als auch zu hohe Extrapolationswerte erhalten werden.

Eine entsprechend lange Versuchsdauer (20 000 - 30 000h) ist nach [82, 83] auch für eine zuverlässige Extrapolation von Kriechversuchen an Kunststoffen nötig.

8.3.3 Kriechverformungen im Wechselklima

Die Eignung der Funktionen (1) bis (4) zur Anpassung und Extrapolation von Kriechversuchen im definierten Wechselklima 20/95-20/25 wird in Bild 65 (Anhang) wiederum am Beispiel von Vollholz, Furniersperrholz und Spanplatte unter Biegebeanspruchung dargestellt.

Die beste Anpassung der Meßwerte liefert auch hier die Funktion (3), die schlechteste Funktion (2); mit Funktion (1) werden die Werte erst oberhalb einer Belastungszeit von ca. 100h gut angepaßt. Funktion (4) ergibt hier - wiederum bedingt durch die Auswertung von f_t/f_0 - keine befriedigende Anpassung.

In Bild 66 wird die Anpassungs- und Extrapolationsfähigkeit der Funktionen (1), (3) und (4) - nur Kriechanteil der Gesamtverformung ausgewertet - bei Kriechversuchen von Buche, Buchensperrholz und verschiedenen verleimten Holzspanplatten im Wechselklima gezeigt. Sieht man vom Anfangsbereich ab, so werden die gemessenen Verformungen (bzw. die daraus abgeleiteten Größen) von allen drei Funktionen sehr gut angepaßt. Eine weitere Verbesserung der rechnerischen Anpassung (hier nicht dargestellt) wird erreicht, wenn nur die "Hüllkurven", d.h. die Verformungen am Ende jeder Feucht- oder jeder Trockenperiode, ausgewertet werden.

Eine Extrapolation der Versuchswerte aus relativ kurzen, aber erheblich verschärften Wechselklimaversuchen (vergl. Abschnitt 3.4.1) auf wesentlich längere Belastungszeiten ist zwar ohne praktische Bedeutung, da die Proben i.a. vorher brechen; für einen qualitativen Vergleich der verschiedenen Funktionen sind derartige Extrapolationen aber dennoch von Interesse. Bild 66 bestätigt, daß eine Vorhersage langfristiger Kriechverformungen mit dem 4-Parameter-Ansatz (1) viel zu hohe Schätzwerte ergibt, daß andererseits jedoch mit den Potenzfunktionen (3) und (4) annähernd gleiche und glaubhaftere Langzeitverformungen vorhergesagt werden können.

Der Einfluß der Auswertungszeitspanne auf die Extrapolationsgenauigkeit der Funktion (3) im definierten Wechselklima geht aus Tabelle 18 hervor. Eine brauchbare Vorhersage des längerfristig zu erwartenden Kriechens von Spanplatten im Wechselklima 20/95-20/30 (1 Zyklus = 1 Woche) erfordert demnach eine Versuchsdauer von mindestens 2000h bis 4000h Stunden. Je nach Belastungsgrad und Sorptionsverhalten der Biegeproben werden bei kürzeren Auswertezeiten sowohl höhere als auch niedrigere Extrapolationswerte errechnet.

8.3.4 Einfluß des Belastungsgrades, der Feuchtigkeitsbeanspruchung und der Probenbreite auf die Parameter der Potenzfunktionen

In zahlreichen Arbeiten wird eine unterschiedlich starke Abhängigkeit der Kriechparameter β_1 der Potenzfunktionen von den jeweiligen Versuchsbedingungen angegeben:

Bei Vollholz, Spanplatten und bei Kunststoffen steigt beispielsweise der Parameter β_1 mit zunehmendem Belastungsgrad [61, 84, 96, 226, 304, 317]; der Einfluß auf β_2 wird dagegen nicht einheitlich dargestellt: ohne Einfluß z.B. in [61, 226, 304], mit Einfluß in [84, 96, 317].

Tabelle 18: Einfluß der Auswertungszeitspanne auf die Parameter β_1 , β_2 , das Bestimmtheitsmaß B sowie den Extrapolationswert ($10^4 h$) der Kriechfunktion (3) im Wechselklima 20/95-20/30, gezeigt am Beispiel von Holzspanplatten FP-V100 (je 1 = 3 Proben, Breite = 50 mm, ausgewertete Größe : f_t)

Material	BG (%)	N 1)	Zeitspanne (h)	β_1	β_2	B	f_{rech} $10^4 h$ (mm)
FP-V100 SHMF 19 mm	10	14	0-1000	0,252	0,384	0,987	10,3
		26	0-2000	0,329	0,337	0,988	8,9
		50	0-4000	0,329	0,337	0,991	8,9
		63	0-6000	0,327	0,338	0,991	9,0
	20	14	0-1000	0,384	0,420	0,987	21,5
		26	0-2000	0,475	0,380	0,988	18,8
		50	0-4000	0,477	0,378	0,991	18,7
		63	0-6000	0,475	0,379	0,992	18,7
	33 7)	14	0-1000	1,415	0,299	0,988	26,6
		26	0-2000	1,406	0,302	0,990	27,1
		50	0-4000	1,019	0,352	0,991	30,5
		63	0-6000	0,899	0,370	0,990	31,9
FP-V100 3PF 19 mm	10	14	0-1000	0,419	0,400	0,980	17,9
		26	0-2000	0,528	0,351	0,975	14,6
		50	0-4000	0,581	0,330	0,975	13,4
		63	0-6000	0,802	0,288	0,977	12,5
	20	14	0-1000	3,199	0,216	0,992	24,7
		24	0-2000	2,334	0,261	0,994	27,8
		48	0-4000	1,757	0,303	0,994	30,7
		60	0-6000	1,730	0,306	0,993	31,1
	33	14	0-1000	1,333	0,446	0,986	85
		26	0-2000	1,820	0,387	0,984	68
		39	0-4000	1,818	0,387	0,986	68
		39	0-6000	-	-	-	-
FP-V100 4PF 19 mm	10	14	0-1000	0,511	0,485	0,986	46,2
		26	0-2000	0,778	0,407	0,982	34,7
		50	0-4000	0,804	0,397	0,984	32,6
		63	0-6000	0,815	0,394	0,984	32,2
	20 2)	14	0-1000	0,913	0,517	0,989	111
		26	0-2000	1,579	0,423	0,985	81
		50	0-4000	1,588	0,421	0,989	80
		63	0-6000	1,587	0,421	0,990	80
	33 2)	14	0-1000	1,985	0,480	0,990	171
		24	0-2000	2,502	0,440	0,989	150
		24	0-4000	-	-	-	-
		24	0-6000	-	-	-	-

1) N = Anzahl der Messungen (Wertepaare)

2) nur 1 = 2 Proben ausgewertet (ohne Bruchproben)

Ebenfalls widersprüchliche Angaben liegen über den Einfluß der Feuchtigkeitsbeanspruchung auf die Parameter β_1 und β_2 vor, z.B. [284, 304, 317].

Angaben über den Einfluß der Probenbreite sind nur in [137] für rohe und beschichtete Spanplatten zu finden.

In den folgenden Tabellen werden daher die Parameter β_1 und β_2 sowie das Bestimmtheitsmaß der Potenzfunktionen (3) bzw. (4) in Abhängigkeit von Belastungsgrad, Feuchtigkeitsbeanspruchung und Probenbreite an einigen Beispielen dargestellt.

Belastungsgrad

Tabelle 19 zeigt den Einfluß des Belastungsgrades auf Fichtenproben im Innenklima 20/55 bei Biege-, Zug-, Druck- und Torsionsbeanspruchung. Bei Einfeld- und Durchlaufträgern sowie bei den Torsionsproben steigt demnach der Parameter β_1 mit zunehmendem Belastungsgrad; der Parameter β_2 - der der Steigung der Kriechkurve entspricht - ist im Bereich unterhalb der Fließgrenze weitgehend unabhängig von der Spannung, oberhalb scheint er etwas abzufallen. Bei den untersuchten Biegeträgern mit Querkraft sind die Tendenzen eher umgekehrt; aufgrund der wenigen Proben sind hier jedoch noch keine allgemeingültigen Aussagen möglich. Die Zug- und Druckproben lassen ebenfalls noch keine eindeutigen Tendenzen erkennen.

Der Einfluß des Belastungsgrades von verschiedenen Spanplatten-Biegeproben im Außenklima sowie im definierten Wechselklima auf die Parameter der Funktionen (3) und (4) geht aus Tabelle 20 hervor. Im natürlichen Außenklima erhöhen sich die Parameter nicht oder nur geringfügig bei Erhöhung des Belastungsgrades von 20 % auf 33 %. Dagegen wird der Einfluß im verschärften Wechselklima 20/95-20/30 deutlich: mit zunehmender Belastung nimmt β_1 i.a. ab und β_2 steigt; häufig verbessern sich damit auch die Bestimmtheitsmaße.

Tabelle 19: Einfluß des Belastungsgrades (BG) auf die Parameter β_1 und β_2 sowie das Bestimmtheitsmaß B der Kriechfunktion (3) bei Fichte im Innenklima 20/55 (Mittelwerte aus 1 Meßstellen einzelner Proben)

Beanspruchungsart (H x B)	ausgewertete Größe	BG (%)	β_1 S/L ¹⁾	β_2 S/L	B S/L
Einfeldträger (30 x 15 mm) l = 2 t = 0 - 70 000h	f_t	10	0,018/0,065	0,264/0,201	0,950/0,976
		20	0,030/0,117	0,279/0,158	0,966/0,980
		30	0,065/0,407	0,266/0,144	0,969/0,979
		40	0,085/0,195	0,294/0,242	0,977/0,982
		50	0,247/0,772	0,258/0,151	0,961/0,981
		60	0,171/0,359	0,242/0,260	0,965/0,989
		70	0,991/0,669	0,199/0,256	0,999/0,996
		80	- /1,270	- /0,205	- /0,992
Durchlaufträger (30 x 15 mm) l = 4 t = 0 - 70 000h	f_t	11	0,020/0,026	0,320/0,318	0,960/0,975
		22	0,049/0,082	0,325/0,256	0,981/0,945
		33	0,069/0,040	0,362/0,358	0,977/0,974
		44	0,082/0,069	0,381/0,329	0,969/0,977
		55	0,358/0,135	0,283/0,304	0,994/0,995
		66	0,832/0,350	0,243/0,240	0,999/0,999
		77	- /0,647	- /0,212	- /0,998
		88	- /2,090	- /0,209	- /0,995
Einfeldträger mit Querkraft (l/h = 10) l = 2 (30 x 15 mm) t = 0-70 000h	$\frac{f_t}{f_o}$	9	0,101/0,624	0,211/0,064	0,957/0,806
		18	0,109/0,149	0,218/0,171	0,966/0,834
		27	0,087/0,006	0,234/0,439	0,968/0,962
		36	0,036/0,019	0,328/0,343	0,981/0,933
Zug l = 4 (12 x 12 mm) t = 0 - 2400h	$\frac{\epsilon_t}{\epsilon_o}$	15	0,056	0,062	0,650
		24	0,130	0,153	0,983
		33	0,014	0,394	0,954
		43	0,028	0,328	0,984
		67	0,011	0,275	0,984
Druck l = 4 (30 x 30 mm) t = 0 - 2400h	$\frac{\epsilon_t}{\epsilon_o}$	12	0,345	0,101	0,774
		21	0,006	0,617	0,939
		35	0,037	0,291	0,991
		41	0,028	0,348	0,993
		54	0,016	0,382	0,986
		65	0,024	0,289	0,980
Torsion l = 1 (\varnothing = 25 mm) t = 0 - 8000h	$\frac{\gamma_t}{\gamma_o}$	18	0,135	0,229	0,952
		27	0,137	0,241	0,985
		36	0,164	0,225	0,979
		45	0,169	0,219	0,979
		54	0,228	0,219	0,990
		63	0,157	0,170	0,994

1) S = Stehende, L = liegende Jahrringe im Biegestab

Tabelle 20: Einfluß des Belastungsgrades (BG) auf die Parameter β_1 und β_2 sowie das Bestimmtheitsmaß B der Kriechfunktionen (3) und (4) im Außenklima sowie im Wechselklima 20/95-20/30, gezeigt am Beispiel verschiedener 19 mm dicker Holzspanplatten (ausgewertete Größen: bei (3) f_t/f_o , bei (4) $(f_t-f_o)/f_o$)

Klima (Breite)	Material	BG (%)	N	Funktion (3)			Funktion (4)			
				β_1	β_2	B	β_1	β_2	B	
Außen- klima (B=300 mm)	1HF(V20)	20	2	0,007	0,678	0,972	0,017	0,575	0,952	
		33	2	0,006	0,704	0,978	0,018	0,574	0,951	
	8HMF(V100)	20	2	0,024	0,450	0,966	0,027	0,438	0,943	
		33	2	0,020	0,488	0,968	0,023	0,470	0,947	
	3PF(V100)	20	2	0,022	0,547	0,977	0,024	0,535	0,962	
		33	2	0,031	0,547	0,987	0,033	0,541	0,978	
	4PF(V100)	20	2	0,039	0,561	0,992	0,040	0,558	0,987	
		33	2	0,046	0,584	0,993	0,049	0,576	0,985	
	Wechsel- klima 20/95-20/30 (B=50 mm)	1HF(V20)	10	3	0,258	0,391	0,988	0,250	0,395	0,968
			20	2	0,185	0,453	0,990	0,182	0,470	0,973
			33	1	0,154	0,505	0,992	0,197	0,533	0,961
		8HMF(V100)	10	3	0,174	0,351	0,991	0,160	0,360	0,975
20			3	0,146	0,379	0,992	0,136	0,385	0,976	
33			2	0,184	0,373	0,990	0,177	0,376	0,977	
3PF(V100)		10	3	0,574	0,291	0,977	0,425	0,325	0,925	
		20	3	0,455	0,351	0,982	0,353	0,380	0,946	
		33	3	0,366	0,404	0,987	0,332	0,415	0,960	
4PF(V100)		10	3	0,490	0,388	0,985	0,434	0,399	0,952	
		20	3	0,376	0,444	0,991	0,354	0,456	0,973	
		33	3	0,335	0,481	0,991	0,304	0,505	0,966	

Feuchtigkeitsbeanspruchung

In Tabelle 21 ist der Einfluß der Feuchtigkeitsbeanspruchung auf die Parameter und Bestimmtheit der Funktionen (3) und (4) am Beispiel von Vollholz, Sperrholz und verschiedener Spanplatten dargestellt. Demnach werden sowohl bei Vollholz als auch bei den verschiedenen Holzwerkstoffen beide Parameter deutlich von der jeweiligen Feuchtigkeitsbeanspruchung der Kriechproben beeinflusst; im Normalklima 20/65 ist die Steigung der Kriechkurve (β_2) jeweils am niedrigsten, im Außenklima meist am höchsten. Der Parameter β_1 steigt zwar i.a. ebenfalls mit zunehmender Feuchtigkeitsbeanspruchung; im Außenklima ist aber gelegentlich auch eine Umkehr dieser Tendenz zu beachten (möglicherweise bedingt durch die je nach Startzeit unterschiedliche anfängliche Klimabeanspruchung der verschiedenen Versuche).

Den entsprechenden Einfluß der Probenbreite von Sperrholz und Spanplatten auf die Parameter der Funktion (3) im Normalklima 20/65 sowie im Außenklima zeigt Tabelle 22.

Wie zu erwarten, ist im Klima 20/65 bei den untersuchten Holzwerkstoffen unter einem Belastungsgrad von ca. 20 % noch kein Einfluß der Probenbreite festzustellen. Aber auch im natürlich wechselnden Außenklima werden die Kriechparameter noch nicht eindeutig von der Breite der Kriechproben beeinflusst; lediglich bei der phenolharzverleimten Spanplatte ist eine leicht steigende (β_2) bzw. fallende (β_1) Tendenz mit zunehmender Probenbreite erkennbar (vergleiche jedoch Abschnitt 3.5.3, insbesondere Tabelle 6).

Tabelle 21: Einfluß der Feuchtigkeitsbeanspruchung auf die Parameter β_1 und β_2 sowie auf das Bestimmtheitsmaß B der Kriechfunktionen (3) und (4), gezeigt am Beispiel von Vollholz, Furniersperrholz und verschiedenen Holzspanplatten (ausgewertete Größen: bei (3) f_t/f_0 , bei (4) $(f_t-f_0)/f_0$)

Material (Dicke)	Klima	BG (%)	Breite N		Funktion (3)			Funktion (4)		
			(mm)		β_1	β_2	B	β_1	β_2	B
Buche 15 mm	20/65	20	30	1	0,044	0,188	0,988	0,032	0,213	0,969
	20/95-20/25	15	30	4	0,378	0,365	0,939	0,695	0,403	0,979
BFU-BU 100 10 mm	20/65	20	50	4	0,028	0,284	0,996	0,025	0,291	0,993
	20/95-20/25	22	30	4	1,335	0,331	0,992	1,029	0,373	0,991
	Außen	20	50	3	0,101	0,364	0,985	-	-	-
FP-V20 22 mm	20/65	20	50	4	0,108	0,195	0,997	0,080	0,219	0,993
	Außen	20	50	3	0,228	0,325	0,955	0,204	0,336	0,926
FP-V20 (1HF) 19 mm	20/95-20/30	20	50	3	0,185	0,453	0,990	0,182	0,470	0,973
	20/95	33	50	1	0,258	0,646	0,999	-	-	-
	Außen	20	300	2	0,007	0,678	0,972	0,017	0,575	0,952
FP-V100 (PF) 19 mm	20/65	20	30	2	0,101	0,240	0,963	0,083	0,256	0,988
	Außen	20	50	3	0,516	0,198	0,968	0,360	0,227	0,938
FP-V100 (3PF) 19 mm	20/95-20/30	20	50	3	0,455	0,351	0,982	0,353	0,380	0,946
	20/95	33	50	1	0,623	0,451	0,989	-	-	-
	Außen	20	300	2	0,022	0,547	0,977	0,024	0,535	0,962
FP-BIS ¹⁾ 19 mm	20/95-20/30	33	50	1	0,275	0,295	0,973	-	-	-
	20/95	33	50	1	0,518	0,370	0,988	-	-	-

1) Bindemittel: Bisulfit

Tabelle 22: Einfluß der Probenbreite auf die Parameter β_1 und β_2 sowie das Bestimmtheitsmaß B der Kriechfunktion (3) im Klima 20/65 und im Außenklima (ausgewertete Größe: f_t/f_0 ; BG = 15 ... 20 %)

Klima	Material	Breite (mm)	N 1)	β_1	β_2	B
Normal- klima 20/65	BFU-BU-100 H = 10 mm	30	5	0,014	0,354	0,990
		50	5	0,023	0,302	0,996
		100	1	0,033	0,269	0,992
		150	1	0,029	0,284	0,994
		200	1	0,027	0,293	0,992
	FP-V20 H = 13 mm	30	5	0,102	0,228	0,994
		50	5	0,102	0,225	0,993
		100	1	0,098	0,222	0,990
		250	1	0,108	0,212	0,994
	FP-V20 H = 22 mm	30	5	0,096	0,209	0,993
		50	5	0,097	0,206	0,992
		100	1	0,196	0,150	0,972
		150	1	0,229	0,143	0,978
		250	1	0,137	0,178	0,981
	Außen- klima	BFU-BU-100 H = 10 mm	30	3	0,144	0,372
50			3	0,101	0,364	0,985
100			3	0,118	0,354	0,984
200			3	0,114	0,375	0,982
400			3	0,149	0,326	0,988
BFU-BU-100 H = 10 mm		30	3	0,148	0,314	0,987
		50	3	0,146	0,295	0,987
		100	3	0,119	0,321	0,991
		200	3	0,141	0,295	0,988
FP-V20 H = 19 mm		30	3	0,269	0,325	0,953
		50	3	0,228	0,325	0,955
		100	3	0,213	0,311	0,966
		200	3	0,185	0,318	0,973
		400	3	0,150	0,321	0,976
FP-V100 (PF) H = 19 mm		30	3	0,595	0,195	0,957
	50	3	0,516	0,198	0,968	
	100	3	0,380	0,212	0,978	
	200	3	0,261	0,238	0,979	
	400	3	0,214	0,244	0,980	

1) N = Probenanzahl

9 Folgerungen für den Formänderungsnachweis

Bei allen Holzbauwerken treten unter langandauernder Belastung in der Regel neben den elastischen Verformungen zusätzliche Kriechverformungen auf. Deren Ausmaß hängt sowohl vom verwendeten Werkstoff als auch von der Art, Höhe und Einwirkungs-dauer der mechanischen und klimatischen Beanspruchungen ab. Einen zusätzlichen Einflußfaktor auf die zeitabhängigen Gesamtverformungen von Holzbauteilen stellen die Konstruktion und die Verschiebungssteifigkeit der Verbindungen dar (auf letztere kann an dieser Stelle jedoch nicht näher eingegangen werden).

Unter ungünstigen Bedingungen können diese Kriechverformungen ein Mehrfaches der elastischen Anfangsverformungen erreichen. Eine genaue rechnerische Berücksichtigung derartiger Kriechverformungen beim Formänderungsnachweis in Abhängigkeit von den zahlreichen, in der Praxis meist mehr oder weniger stark schwankenden Einflußgrößen - auch seitens der verwendeten Werkstoffe, Verbindungsmittel und der Gesamtkonstruktion - ist zumindest mit vertretbarem Aufwand nicht möglich und i.a. auch nicht erforderlich. Andererseits ist das Fehlen konkreter Hinweise zur Berücksichtigung von Kriechformänderungen in vielen Holzbau-Normen ebenfalls unbefriedigend und beim heutigen Stand der Kenntnisse nicht mehr zu rechtfertigen. Zumindest dort, wo größere zeitabhängige Verformungen die Gebrauchsfähigkeit der Konstruktion und der Bauteile und damit die Sicherheit beeinträchtigen können, sollten die wichtigsten Einflußgrößen - Art, Höhe und Dauer der mechanischen und klimatischen Beanspruchung - auf das langfristige Formänderungsverhalten von Holz und Holzwerkstoffen in Holztragwerken in möglichst einfacher, material- und beanspruchungsbezogener Form berücksichtigt werden.

Im Folgenden werden daher die in den Abschnitten 2 bis 8 gesammelten Erkenntnisse im Hinblick auf die Möglichkeiten und Grenzen einer sinnvollen Berücksichtigung beim Formänderungsnachweis zusammenfassend diskutiert.

9.1 Berücksichtigung der mechanischen Beanspruchung

9.1.1 Beanspruchungsart

Die Auswertung eigener und zahlreicher in der Literatur genannter Kriechversuche (siehe Abschnitt 3.2) hat ergeben, daß das relative Kriechen, d.h. die auf die Anfangsverformung bezogenen, zeitabhängigen Gesamt- oder Kriechverformungen, je nach Art der mechanischen Beanspruchung erhebliche Unterschiede aufweisen kann (unter sonst gleichen Bedingungen).

Bei Vollholz liegt das relative Kriechen unter Biegebeanspruchung in der gleichen Größenordnung wie bei Druckbeanspruchung parallel zur Faserrichtung, zumindest unter baupraktisch üblicher Belastungshöhe (Belastungsgrad \leq zulässige Belastung). Das Kriechen unter Zugbeanspruchung parallel zur Faserrichtung ist deutlich geringer, quer zur Faser dagegen wesentlich stärker als bei Biegung und Druck parallel. Auch bei Querdruck kriecht Holz - strukturbedingt - stärker als unter Längsdruck- oder Biegebeanspruchung.

Unter Torsions- und Schubbeanspruchung erreichen die Kriechverformungen von Holz ein Mehrfaches derjenigen unter Biegebeanspruchung: die relative Verformungszunahme beträgt z.B. bei Fichte im Innenklima unter Torsionsbeanspruchung etwa das 2-3fache des entsprechenden Biegekriechens. Bei Biegeträgern (fehlerfrei) mit Querkraft war die relative Durchbiegungszunahme - ermittelt aus der Gesamtdurchbiegung - bei einem Stützweitenverhältnis $l/h = 5$ etwa 4 mal, bei $l/h = 10$ noch etwa 2 mal so groß wie bei $l/h = 22$. Ob und in welchem Umfang sich diese Unterschiede bei erhöhter Feuchtigkeitsbeanspruchung noch vergrößern, ist nicht bekannt.

Bei Holzwerkstoffen liegen nur wenige auswertbare Angaben über den Einfluß der Beanspruchungsart auf das relative Kriechen vor.

Furniersperrholz kriecht demnach unter Schubbeanspruchung (aus Querkraft) etwa 3-3,5 mal so stark wie unter reiner Biegung.

Auch bei Flachpreßplatten ist das Schubkriechen wesentlich stärker als das Biegekriechen. Unter Biegebeanspruchung kriechen Spanplatten weniger als unter Zug oder Druck parallel zur Plattenebene. Zug- und Druckkriechen senkrecht zur Plattenebene sind - bedingt durch die lockere Mittelschichtzone - erheblich größer als parallel zur Plattenebene.

Holzfaserverleimplatten kriechen unter Biegebeanspruchung am wenigsten, unter Zug und Druck parallel zur Plattenebene deutlich stärker. Die Angaben über das Kriechverhalten unter Schubbeanspruchung sind widersprüchlich.

Aufgrund der spärlichen Literaturangaben sind diese Aussagen (bezüglich der Holzwerkstoffe) zunächst nur orientierend und mit Vorbehalt zu bewerten. Sie bedürfen noch weiterer experimenteller Bestätigung und Ergänzung.

Sofern in den bisherigen Holzbaunormen überhaupt Kriechverformungen beim Formänderungsnachweis zu berücksichtigen sind, beschränken sie sich in der Regel auf Bauteile unter Biegebeanspruchung (siehe Tabelle 1). Das ist verständlich, da im Holzbau Verformungserscheinungen an Biegeelementen die größte Bedeutung haben, und entsprechende Kriechversuche unter Biegebeanspruchung daher weitaus am häufigsten durchgeführt worden sind.

In den genannten Bemessungsvorschriften ist beim Durchbiegungsnachweis sowohl der Elastizitätsmodul als auch der Schubmodul - sofern der Schubverformungsanteil mit zu berücksichtigen ist - jeweils mit dem gleichen Abminderungsfaktor zu reduzieren. Das ist aufgrund des mehrfach stärkeren Schubkriechens nicht korrekt und kann - besonders bei Biegeträgern mit relativ hohem Schubverformungsanteil - zu einer erheblichen Unterschätzung der langfristig zu erwartenden

Gesamtverformungen führen. Bei Verformungen aus Schub- und Torsionsbeanspruchung sollte die rechnerische Abminderung daher sowohl bei Vollholz als auch bei Sperrholz und bei Spanplatten doppelt so groß gewählt werden wie beim Biege-E-Modul.

Ob und in welchem Umfang auch die unter Normalspannungen festzustellenden Kriechverformungen beim Formänderungsnachweis durch Abminderung der Kurzzeit-E-Moduln berücksichtigt werden sollten, wird je nach verwendetem Material, Konstruktion (und damit Auswirkung auf die Formbeständigkeit des betreffenden Bauteiles) unterschiedlich zu beantworten sein. Zumindest sollte in den einschlägigen Bemessungsvorschriften deutlich auf die auch unter längerer Druck- und Zugbeanspruchung zu erwartenden Kriechverformungen hingewiesen werden.

9.1.2 Belastungsgrad

Der Belastungsgrad, d.h. die Höhe der aufgebrachten Spannung bezogen auf die betreffende Kurzzeitfestigkeit, beeinflusst das zeitabhängige Verformungsverhalten von Vollholz und Holzwerkstoffen entscheidend.

Eine untere "Kriechgrenze", unterhalb der keine zeitabhängige Verformungszunahme mehr auftritt, liegt - bei genügend genauer Meßtechnik - weit unterhalb der bisher in der Literatur genannten Größenordnung von 5...15 % der Bruchlasten (wenn eine derartige Grenze überhaupt existiert). Biegeversuche an Vollholz und Holzwerkstoffen im Wechselklima haben gezeigt, daß schon unter dem Eigengewicht der Prüfkörper (Belastungsgrad = 2...4 %) relative Kriechverformungen in der gleichen Größenordnung wie z.B. bei einem Belastungsgrad von 20... 30 %, d.h. unter der maximal zulässigen Beanspruchung auftreten (wenn auch die absoluten Kriechverformungen hier noch gering sind).

Für eine realistische Berücksichtigung der Kriechverformungen sollte die Abminderung der (elastischen)Rechenwerte E bzw. G

daher schon bei relativ geringem Belastungsgrad - spätestens bei ca. 10 % - beginnen.

Mit steigender Spannung nimmt das absolute Kriechen zunächst proportional, oberhalb einer vom physikalischen Zustand und der Belastungszeit abhängigen "Linearitäts"- oder "Fließgrenze" jedoch überproportional zu.

Unterhalb dieser Grenzspannung geht die Kriechgeschwindigkeit mit der Zeit gegen Null, d.h. die Langzeitverformungen nähern sich einem "Endzustand". Wie lange es allerdings dauert, bis dieser Zustand erreicht wird, geht aus Tabelle 23 hervor: darin ist der nach verschiedener Zeit unter konstanter Biegebelastung erreichte prozentuale Anteil an der Langzeitkriechverformung nach 10^5 h für Vollholz (fehlerfrei), Sperrholz und Spanplatten im Konstantklima 20/65 und im natürlichen Außenklima unter Dach angegeben.

Tabelle 23: Zunahme der Kriechverformungen unter konstanter Biegebeanspruchung (BG ca. 20 %) mit der Zeit (Mittelwerte aus mehreren Versuchen)						
Material	Klima	10^3 h	10^4 h	$2 \cdot 10^4$ h	$3 \cdot 10^4$ h	10^5 h
		(6 Wochen)	(1,1 Jahre)	(2,2 Jahre)	(3,3 Jahre)	(11 Jahre)
Vollholz (FI, KI)	20/65	46 %	67 %	73 %	79 %	100 %
	Außen	49 %	70 %	74 %	79 %	100 %
Sperrholz (BFU-BU-100)	20/65	22 %	47 %	59 %	68 %	100 %
	Außen	21 %	47 %	58 %	66 %	100 %
Flachpreß- platten	20/65	35 %	61 %	71 %	79 %	100 %
	Außen	20 %	43 %	54 %	64 %	100 %

Demnach sind z.B. nach 1 Jahr Dauerlast je nach Material und Klimabeanspruchung erst etwa 2/5 bis 2/3, und selbst nach 3 Jahren erst 2/3 bis 4/5 des angenommenen "Endzustandes" (nach 10^5 h) erreicht.

Oberhalb der Linearitäts- bzw. Fließgrenze nimmt die Verformungsgeschwindigkeit ab einem bestimmten Zeitpunkt (Wendepunkt in der Spannungs-Verformungs-Kurve) wieder zu und führt nach entsprechender Belastungsdauer zum Bruch. Bei der Bemessung darf diese Grenze des lastproportionalen Kriechens daher auf keinen Fall überschritten werden.

Die Literaturangaben über diese Fließgrenze gehen bei Vollholz und besonders bei Holzwerkstoffen weit auseinander. Eigene Auswertungen ergaben folgendes:

Im relativ trockenen (beheizten) Innenklima ist das Kriechen bei fehlerfreiem Fichtenholz bis zu einem Belastungsgrad von ca. 50 % linear, unabhängig von der Beanspruchungsart. Bei Furniersperrholz und bei Flachpreßplatten liegt die Linearitätsgrenze etwa bei 45 % der Kurzzeitfestigkeit, bei Holzfaserthartplatten bei ca. 30 % (nur wenige Angaben).

Im relativ scharfen Wechselklima sind die Kriechverformungen der Spannung bis zu einem Belastungsgrad von mindestens 25-30 % proportional (vergleichbare Ergebnisse mit höherer Belastung fehlen). Bei Flachpreßplatten ist diese Grenze deutlich vom Sorptionsverhalten bzw. von der Hygroskopizität der Platten abhängig (vergl. Bild 11c+d).

Entsprechende Versuche im Außenklima sind nur für Spanplatten bekannt: auch hier wird die Linearitätsgrenze vom Sorptionsverhalten beeinflusst (Bild 18); bei Platten geringer Hygroskopizität sind die Kriechverformungen der Spannung mindestens bis zu einem Belastungsgrad von 33 % proportional; bei stärker hygroskopischen Spanplatten liegt die Grenze deutlich tiefer (bei ca. 20 %, in extremen Fällen sogar darunter).

Bei den anderen Holzwerkstoffen sind qualitativ ähnliche Zusammenhänge zwischen Sorptionsverhalten und Linearitätsgrenze zu erwarten; systematische Versuche fehlen jedoch.

Die zulässigen Bemessungs-Spannungen für Holz und Holzwerkstoffe liegen nach den einschlägigen Vorschriften in der Regel unterhalb dieser "Grenzspannungen" und damit auf der sicheren Seite.

Allerdings folgt aus diesen Auswertungen auch, daß die in der Literatur häufig genannte Dauerstandfestigkeit von ca. 50 - 60 % der Kurzzeitfestigkeit nur für trockenes Innenklima gültig sein kann. Bei gleichzeitiger mechanischer und klimatischer Beanspruchung muß je nach Werkstoff und Ausmaß der Klimabeanspruchung mit einer mehr oder weniger starken Reduzierung dieser Werte gerechnet werden.

9.1.3 Belastungsdauer/Wechselbelastung

Holztragwerke stehen normalerweise nicht während ihrer gesamten Nutzungsdauer ununterbrochen unter der maximal zulässigen Dauerlast. Die Gesamtbelastung setzt sich vielmehr zusammen aus ständigen Lasten (Eigengewicht, längerfristig wirkende Nutzlasten) sowie aus relativ kurzfristig wirkenden Verkehrslasten (z.B. Schnee- und Windlasten), deren Anteil und Wirkungsdauer an der Gesamtbelastung je nach Bauteil und geographischer Lage sehr unterschiedlich sein können. In der Praxis stehen daher Perioden höherer und verringerter Belastung in einem ständigen Wechsel. Während der niedrigeren Teilbelastung können sich die Formänderungen aus den Hochlastperioden zumindest teilweise wieder zurückbilden. Das Ausmaß dieser Erholung ist für eine wirtschaftliche Bemessung von besonderer Bedeutung.

Hierzu finden sich in der Literatur nur vereinzelte Angaben. Eigene Auswertungen haben ergeben, daß bei Vollholz (fehlerfreie Fichte) im trockenen Innenklima eine volle Rückbildung der während der Hochlastperiode (ca. $z_{ul} \sigma$) erreichten Verformungen auf das der Niedriglastphase (ca. $0,5 \cdot z_{ul} \sigma$) entsprechende Verformungsniveau erfolgt (vergl. Bild 12).

Entsprechende Wechsellastversuche mit Vollholz unter erhöhter Klimabeanspruchung sind nicht bekannt. Ebenso fehlen verwertbare Vergleichsversuche unter konstantem und wechselndem Belastungsgrad bei Sperrholz und Holzfaserplatten.

Wechsellastversuche an Spanplatten im definierten Wechselklima 20/95-20/30 (Bild 15) ergaben, daß zumindest unter derart verschärfter Klimabeanspruchung die Kriechverformungen während der Niedriglastperiode (3 Wochen) nicht mehr vollständig auf das Niveau der entsprechenden Konstantlastversuche zurückgehen. Andererseits liegen die Verformungen am Ende der Hochlastperiode vor allem bei erhöhter Hygroskopizität der Platten mehr oder weniger deutlich unterhalb dem entsprechenden Konstantlastniveau; im Gegensatz zu Vollholz wird hier eine gewisse Entlastungswirkung der Niedriglastperioden auf die maximalen Verformungen der Hochlastphasen erkennbar. Im natürlichen Außenklima sind diese Zusammenhänge zwar ebenfalls noch vorhanden, aufgrund der erheblich mildereren, aber praxisnahen Klimabeanspruchung jedoch wesentlich schwächer ausgeprägt.

Beim Formänderungsnachweis sind Kriechverformungen daher nur für den Anteil der ständigen und der langfristig wirkenden Lasten an der Gesamtlast zu berücksichtigen; die Verformungen aus kurzfristiger wirkenden Verkehrslasten können mit den Kurzzeit-Moduln ohne Abminderung bezüglich der Belastungsdauer erfaßt werden.

Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Einwirkungsdauer der verschiedenen Lastanteile werden in mehreren Holzbauvorschriften sogenannte Lastdauerklassen gebildet und mit entsprechend gestaffelten Abminderungsfaktoren für E und G gekoppelt (vergleiche Tabelle 1).

Eine andere Möglichkeit, den Einfluß der Lasteinwirkungsdauer auf vereinfachte, aber ausreichend genaue Weise beim Formänderungsnachweis zu berücksichtigen, besteht darin, den Abminderungsfaktor unmittelbar und kontinuierlich in Abhängigkeit vom tatsächlichen Verhältnis der langfristigen Lastanteile an der Gesamtlast des betreffenden Bauteiles anzugeben; d.h. es wird nur der Anteil der ständigen Last und der langfristig einwirkenden Lastanteile zur Ermittlung der zusätzlich zur Kurzzeitverformung unter der Gesamtlast zu erwartenden Kriechverformung berücksichtigt.

Die sich langfristig einstellende Gesamtverformung v_t errechnet sich damit z.B. wie folgt:

$$v_t = v_0 \left(1 + \varphi \frac{g}{q} \right) \quad (14)$$

mit v_0 = Anfangsverformung unter Gesamtlast, bestimmt aus den Normwerten für E bzw. G

φ = feuchtigkeitsabhängige Kriechzahl (siehe Abschnitt 9.2)

g = ständige und langfristig wirkende Last

q = Gesamtlast.

Als langfristig wirkende Lasten werden z.B. in der französischen Holzbaunorm diejenigen Lasten bei der Bestimmung der Kriechverformungen mit berücksichtigt, die mindestens 3 Monate ununterbrochen oder im Mittel mindestens 50 % der gesamten Standzeit (Lebensdauer) wirken. Nach dem 5. Entwurf der CIB-Normvorlage soll die lastdauerabhängige Abminderung von E und G bei trockenen Nutzungsbedingungen erst bei 10^5 Stunden, bei erhöhter Feuchtebeanspruchung dagegen schon bei 10 Stunden beginnen. In [249] werden alle Lasten mit einer Wirkungsdauer von mehr als 250 Tagen als ständige Lasten klassifiziert.

Eine für alle baupraktisch möglichen Fälle zutreffende, allgemeingültige Grenze zwischen "langfristigen" und "kurzfristigen", bei Ermittlung der zusätzlichen Kriechverformungen nicht mehr zu berücksichtigenden Lastanteilen zu

ziehen, dürfte kaum möglich sein. Für einen ausreichend genauen Formänderungsnachweis genügt nach obigen Auswertungen und allen bisherigen Erfahrungen jedoch eine vereinfachende Festlegung z.B. der Form, daß bei der Berechnung der Gesamtverformungen der Lastanteil g die ständigen Lasten sowie - bei Dächern - einen entsprechenden Anteil der Schneelast beinhaltet.

Da die Größe und die Einwirkungsdauer der Schneelast stark von der Höhenlage abhängen, sollte der über die mittlere Schneelast von $0,75 \text{ kN/m}^2$ hinausgehende Anteil der Regelschneelast s_0 zur Hälfte als "ständige Last" betrachtet und beim Formänderungsnachweis mit berücksichtigt werden. DIN 1055 Teil 5 erlaubt bei Dachneigungen oberhalb 30° eine entsprechende Abminderung der Regelschneelast s_0 mit dem Faktor k_0 auf $s = k_0 \cdot s_0$. Damit ergibt sich der Anteil der Schneelast, der bei Dächern der ständigen Last hinzuzurechnen ist, zu $0,5(s_0 - 0,75) s/s_0$.

Entsprechend wird z.B. in der Schweizer Holzbaunorm SIA 164 (1981) verfahren.

Weitere Vorschläge zur realistischeren Berücksichtigung von wechselnden Beanspruchungen finden sich beispielsweise in [73, 171, 251, 252, 359]. Diese Ansätze laufen im Grundsatz alle darauf hinaus, eine kriecherzeugende konstante Ersatzlast, die sogenannte "Kriechlast", zu berechnen, die bis zum Ende der vorgesehenen Lebensdauer des Bauteiles die gleiche Kriechverformung auslöst, wie sie aus dem statistisch ausgewerteten tatsächlichen Lastgang zu erwarten ist [73]. Unter Zugrundelegung linear-viskoelastischen Verhaltens und damit der Gültigkeit des Superpositionsgesetzes, werden dabei die verschiedenen, unterschiedlich lange einwirkenden Lastanteile durch mehr oder weniger aufwendige, rechnerische Ansätze zusammengefaßt und ergeben eine idealisierte Verformung unter mittlerer Lastintensität.

Die baupraktischen Beanspruchungen von Bauteilen aus Holz und Holzwerkstoffen können jedoch von Fall zu Fall stark variieren und werden oft von weiteren kriecherzeugenden Einflüssen in so komplexer Weise überlagert, daß es - zumindest beim heutigen Stand der Kenntnisse - ziemlich aussichtslos erscheinen muß, die lastabhängigen Kriechverformungen genauer als oben vorgeschlagen erfassen zu wollen. Einerseits ist der dazu erforderliche rechnerische Aufwand erheblich, andererseits ist der Gewinn an "Genauigkeit" meist nur ein scheinbarer.

In der Literatur findet man zur Berücksichtigung der Kriechverformungen häufig Ansätze der Form

$$E_t = \frac{E_0}{1 + \varphi \frac{g}{q}} \quad (15)$$

wobei E_t der sich langfristig ergebende Verformungsmodul und E_0 der Kurzzeitmodul (Normwert) ist. Der Rechenwert E_0 wird durch einen Faktor ≥ 1 dividiert.

Die Gleichungen (14) und (15) sind gleichwertig, da der E-Modul dem Reziprokwert der Verformung proportional ist.

Ebenso häufig werden die kurzzeitigen Verformungskennwerte E_0 bzw. G_0 auch mit einem Abminderungsfaktor ≤ 1 multipliziert

$$E_t = \eta \cdot E_0 \quad (16)$$

wobei der Faktor η in den bisherigen Bemessungsvorschriften (siehe Tabelle 1) meist "diskontinuierlich", d.h. gestaffelt für die jeweiligen Lastdauerklassen, angegeben wird. Eine kontinuierlich mit steigendem Dauerlastanteil (g/q) zunehmende Abminderung des Kurzzeitmoduls ist bisher - soweit bekannt - nur in der französischen Norm und in der geplanten Neufassung von DIN 1052 Teil 1 enthalten.

Während bei den "diskontinuierlichen" Verfahren die den verschiedenen Lastdauerklassen entsprechenden Verformungsanteile einzeln ermittelt und zur Gesamtverformung addiert werden müssen, ergibt sich diese bei "kontinuierlicher" Abminderung in meist einfacher Weise aus E_0 und dem Verhältnis Dauerlast/Gesamtlast, indem der Abminderungsfaktor η in Gleichung (16) z.B. wie folgt ermittelt wird:

$$\eta = 1 - \alpha \cdot \frac{g}{q} \quad (17)$$

wobei α wiederum ein feuchtigkeitsabhängiger Kriechbeiwert ist (s. Abschnitt 9.2).

Wählt man den Abminderungsfaktor für E bzw. G als Multiplikator, d.h. umgekehrt proportional zur entsprechenden Verformung, so ist die Abnahme der Moduln linear, die Zunahme der Verformungen dagegen hyperbolisch vom Dauerlastanteil g/q abhängig (z.B. Vorlage DIN 1052 Teil 1). Wird der Abminderungsfaktor dagegen als Divisor von E oder G angegeben, d.h. direkt proportional zur Verformung, so nehmen die Moduln hyperbolisch ab, die Verformung wächst linear mit g/q (z.B. Frankreich). Die für den Formänderungsnachweis maßgebende langfristige Gesamtverformung nimmt im ersteren Fall (Abminderung als Multiplikator) bei niedrigem Dauerlastanteil g/q zunächst nur langsam, bei höherem g/q relativ stark zu; im letzteren Fall (Divisor) steigt die Gesamtverformung linear mit g/q an.

Zur weiteren Vereinfachung des Formänderungsnachweises wird gelegentlich vorgeschlagen, die Abminderung der Kurzzeitmoduln bzw. die Berücksichtigung von zusätzlichen Kriechverformungen erst ab einem bestimmten Anteil der Dauerlast an der Gesamtlast durchzuführen, z.B. in der französischen Holzbaunorm ab $g/q = 0,2$, im Entwurf zur Schweizer Norm SIA 164 ab $0,4$ (im Weißdruck nicht mehr enthalten), oder in der

Neuvorlage DIN 1052 Teil 1 ab 0,5. Unter Berücksichtigung der Tatsache, daß Kriechverformungen schon unter dem Eigengewicht von Holz bzw. Holzwerkstoffen auftreten können, sollte die Abminderung der Rechenwerte E bzw. G zur realistischen Abschätzung der zu erwartenden Kriechverformungen bereits mit beginnendem Dauerlastanteil, spätestens jedoch bei $g/q = 0,3$ einsetzen.

9.2 Berücksichtigung der klimatischen Beanspruchung

Das Kriechverhalten von Holz und Holzwerkstoffen wird - außer von der mechanischen Beanspruchung - auch vom Feuchtigkeitsgehalt des Materials und des Umgebungsklimas je nach Höhe, Art und Dauer der Feuchtigkeitsbeanspruchung in sehr unterschiedlichem Ausmaß beeinflusst (vergleiche Abschnitte 3.4 und 5).

Im trockenen Innenklima kriechen Holzwerkstoffe nur wenig stärker als Vollholz. Im konstanten Normalklima 20/65 beispielsweise erreichen die Kriechfaktoren f_t/f_0 nach ca. $10^5 h$ unter konstanter Biegebeanspruchung bei Vollholz im Mittel etwa 1,5, bei Sperrholz etwa 2,0 und bei Flachpreßplatten etwa 2,5, mit relativ geringen Schwankungen zwischen verschiedenen Produkten innerhalb der einzelnen Werkstoffgruppen. Bei Holzfaserplatten sind noch keine allgemein gültigen Angaben möglich.

Beim Einsatz von auf die mittlere Gebrauchsfeuchte vorkonditioniertem Holz, Sperrholz oder Spanplatten in geschlossenen Räumen (beheizt oder unbeheizt) wird daher ein einheitlicher Kriechbeiwert von $\varphi = 1,0$ für die Gleichungen (14) bzw. (15) bzw. von $\alpha = 0,5$ für Gl. (17) bzw. (16) vorgeschlagen. Damit werden die langfristigen, rechnerischen Kriechverformungen im ungünstigsten Fall ($g/q = 1$) ebenso groß wie die Anfangsverformungen, d.h. die Normwerte von E werden halbiert.

Bei einem Beanspruchungsverhältnis von $g/q = 0,5$ (das in der Holzbaupraxis nur selten überschritten wird) verringert sich der Kurzzeit-E-Modul bei Anwendung der Gleichungen (14) oder (15) nur um $1/3$, bei Gleichung (16) nur um $1/4$.

Werden die Holzbauteile allerdings halbtrocken oder feucht eingebaut und während ihrer Austrocknung auf die Nutzungsfeuchte bereits belastet, so muß mit wesentlich höheren, tatsächlichen Kriechverformungen gerechnet werden; ebenso können sich die Kriechformänderungen bei stärkeren Schwankungen der Holzfeuchte um ihren Mittelwert deutlich erhöhen.

Im natürlichen Außenklima unter Dach, d.h. unter erhöhter Feuchtigkeitsbeanspruchung, wird die Spannweite des relativen Kriechens je nach Werkstoff erheblich breiter. Bei Vollholz wurden nach mehrjähriger Biegebeanspruchung Kriechfaktoren zwischen ca. 2,5 und 5,0 gemessen, bei Furniersperrholz zwischen ca. 2,5 und 7,5, und bei Flachpreßplatten zwischen etwa 2,0 und 10,0.

Je nach Struktur und Sorptionsverhalten muß demnach nicht nur zwischen den verschiedenen Werkstofftypen (Vollholz, Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten), sondern auch innerhalb der einzelnen Gruppen mit erheblichen Unterschieden in der feuchtebedingten Kriechzunahme gerechnet werden. Einerseits gibt es durchaus Sperrholz und Spanplatten, die das gleiche, relativ niedrige Kriechverhalten unter erhöhter Feuchtebeanspruchung aufweisen wie Vollholz; andererseits findet man in derselben Werkstoffgruppe auch Produkte, die - je nach Holzart, Auflösungsgrad, Verleimung, Verfahrenstechnik etc. - unter gleicher Beanspruchung Kriechverformungen erreichen, die bis zum Mehrfachen der niedrigsten Kriechfaktoren beitragen können.

Im definierten Wechselklima 20/95-20/25 verstärken sich die im natürlichen Außenklima unter Dach erreichten Kriechverformänderungen noch beträchtlich. Durch den prüftechnisch notwendigen Zeitraffer-Effekt und die dadurch bedingte Erhöhung des Wirkungsgrades derart verschärfter Laborklimabeanspruchungen sind die teilweise außerordentlich großen Kriechverformungen aber nur relativ, d.h. vergleichend zu bewerten und dürfen nur mit Hilfe entsprechender "Korrekturfaktoren" auf praktische Verhältnisse übertragen werden (vergleiche auch Abschnitt 10).

Aufgrund dieser von Holzart zu Holzart bzw. von Fabrikat zu Fabrikat möglichen, u.U. erheblichen Unterschiede im feuchtebedingten Kriechverhalten von Vollholz bzw. von Holzwerkstoffen kann kein allgemein gültiger und für alle Produkte gleichermaßen "zutreffender" Kriechbeiwert für erhöhte Feuchtebeanspruchung angegeben werden. Bei der Vielfalt der Produkte einer Werkstoffgruppe und der entsprechenden Streubreite des feuchtebedingten Kriechens von Produkt zu Produkt bleibt als Ausweg derzeit nur die - stark vereinfachende - Angabe eines "mittleren" Kriechbeiwertes, der ab einer bestimmten, zu erwartenden Feuchtigkeitsbeanspruchung im Bauteil für die rechnerische Berücksichtigung von Kriechverformungen nach Gleichung (14), (15) oder (16) eingesetzt wird (anstelle des niedrigeren Kriechbeiwertes für Innenklima, s.o.).

Erschwert wird die Angabe des "richtigen" Kriechbeiwertes bei erhöhter Feuchtebeanspruchung durch zwei weitere Fakten:

- a) Die feuchtebedingte Kriechzunahme ist zumindest im Durchschnitt bei Holzwerkstoffen stärker als bei Vollholz, und bei Holzfaserplatten wiederum stärker als bei Spanplatten und Sperrholz. Für eine realistische Berücksichtigung der Kriechverformungen müßte der feuchtebedingte Kriechbeiwert daher für die einzelnen Werkstoffgruppen differenziert angegeben werden.

- b) Die Art der Feuchtebeanspruchung - relativ konstante hohe oder stärker wechselnde Holzfeuchte - wirkt sich bei den einzelnen Werkstoffgruppen sehr unterschiedlich auf das Kriechverhalten aus: Vollholz und Furniersperrholz kriechen unter hoher, aber konstanter Feuchte wesentlich weniger als im Wechselklima mit gleichem Sorptionsmaximum. Bei Spanplatten (und vermutlich auch bei Holzfaserplatten) ist es genau umgekehrt; hier bewirken lange Feuchteperioden ein deutlich stärkeres Kriechen als entsprechende Feuchtwechsel. Bei "genauem" Vorgehen müßten daher verschiedene Kriechbeiwerte für erhöhte und relativ konstante sowie für erhöhte und stärker wechselnde Feuchtebeanspruchung angegeben werden, die zusätzlich noch nach den verschiedenen Werkstofftypen unterschieden werden müßten.

In der französischen Norm (CB 71) werden für Vollholz (gilt analog auch für Brettschichtholz) beispielsweise entsprechend gestaffelte Kriechbeiwerte je nach den während der Nutzung zu erwartenden Feuchteschwankungen (Amplituden $\Delta u = 0\%$, 5% , 10% und 15% , s. Tabelle 1) angegeben; ebenfalls berücksichtigt wird dort die jeweilige Einbaufeuchte; danach errechnet sich der Beiwert φ , der in Frankreich analog zu Gleichung (15) angewendet wird, zu

$$\varphi = \left(\frac{u + \Delta u}{12} \right) \cdot \left(\frac{\Delta u + 15}{20} \right) \quad (18)$$

mit u = Einbaufeuchte in %

Δu = Differenz zwischen maximaler und minimaler Nutzungsfeuchte in %.

Setzt man in Gleichung (18) Zahlenwerte ein (z.B. aus den hier ausgewerteten Kriechversuchen), so erhält man teils gute, teils weniger gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Rechnung. Die scheinbare Genauigkeit dieser Gleichung kann zwangsläufig nur für bestimmte Produkte und unter ganz bestimmten

Randbedingungen zutreffend sein. Außerdem müßten bei Übernahme einer derart detaillierten Formel in die Bemessungsvorschriften gleichzeitig entsprechende Angaben über die rechnerischen Feuchteschwankungen (Δu) für die wesentlichsten Nutzungsbereiche aufgenommen werden. Wie unterschiedlich diese Feuchteamplituden allein im natürlichen Außenklima unter Dach je nach Material sein können, geht anschaulich aus Tabelle 24 hervor.

Tabelle 24: Durchschnittliche jährliche Feuchteschwankungen von Vollholz, Furniersperrholz und Flachpreßplatten im natürlichen Außenklima unter Dach (Standort Karlsruhe; Probenbreite 300 mm)			
Material	Bewitterungsdauer (Jahre)	Feuchteschwankungen (%)	Feuchteamplitude (%)
Fichte (32x190 mm ²)	7	12...19	7
BFU-BU-100	7	10...17	7
BFU-LIM-100	7	9...16	7
FP-V20(1HF)	2	10...14	4
FP-V100(3PF)	2	10...16	6
FP-V100G(3PF/G)	3	9,5...14,0	4,5
FP-V100(PF)	7	10...16	6
FP-V100(4PF)	2	11...22	11
FP-V100(8HMF)	2	9... 12,5	3,5
FP-V100(11HMF)	3	9,5...13,5	4
FP-Zement 12 mm	1,5	18...22	4
FP-Zement 24 mm	1,5	14...17	3

Je nach Material sind demnach selbst an einem Standort, d.h. unter weitgehend gleichen Klimabeanspruchungen, Feuchteamplituden bei Spanplatten verschiedener Verleimung zwischen ca. 3 % und ca. 11 % zu erwarten. Bei Vollholz und Sperrholz ist die jährliche Schwankungsbreite (bei den hier ausgewerteten Beispielen) zwar wesentlich einheitlicher; je nach Bauteilquerschnitt und Sorptionsverhalten der Holzart muß jedoch auch bei Vollholz und Brettschichtholz sowie bei Sperrholz mit erheblichen Unterschieden der entsprechenden Feuchteamplituden gerechnet werden [382]. Aus Tabelle 24 folgt weiter, daß auch das mittlere Feuchteniveau, um das diese Schwankungen erfolgen, je nach Werkstoff außerordentlich verschieden sein kann.

Materialunabhängige Abminderungsfaktoren

Bei dieser Vielzahl der material- und beanspruchungsbezogenen Einflußgrößen auf das tatsächliche Kriechverhalten ist es daher ziemlich aussichtslos, dieses Kriechverhalten selbst durch stark verfeinerte - und damit entsprechend umständliche - Bestimmung der Kriechbeiwerte für jeden Einzelfall auch nur annähernd zutreffend rechnerisch erfassen zu wollen.

Zweckmäßiger und i.a. auch ausreichend ist eine wesentlich vereinfachte, zusammenfassende Form der französischen Methode, z.B. nach den Gleichungen (14), (15) oder (16), wobei die Kriechbeiwerte φ bzw. α für die wichtigsten feuchtebedingten Beanspruchungsbereiche zunächst materialunabhängig tabellarisch angegeben werden.

Die Schweizer Norm SIA 164 (1981) unterscheidet bezüglich der Kriechzahlen φ zwei Bereiche der Feuchtebeanspruchung :

a) vor direkter Witterung geschützte Bauteile (belüftete Innenräume, beheizt oder unbeheizt; offene überdachte Konstruktionen) mit einer durchschnittlichen Holzfeuchte von $(9\pm 3)\%$ bis $(17\pm 5)\%$; b) vor Witterung teilweise geschützte Bauteile, direkt bewitterte Bauteile, feuchte Bauteile (in feuchten, ungenügend belüfteten Räumen) sowie Bauteile unter Wasser, mit Holzfeuchten von $(13\pm 4)\%$ bis über Fasersättigung.

Für den Bereich a) wird eine Kriechzahl $\varphi = 0,5$ (bzw. $\varphi = 1,0$, wenn die Bauteile feucht eingebaut werden), für den Bereich b) einheitlich $\varphi = 2,0$ angegeben. Die zusätzlichen rechnerischen Kriechverformungen betragen danach im Fall a) 50 % (bzw. 100 %), im Fall b) 200 % der mit den Rechenwerten E_0 bzw. G_0 ermittelten Anfangsverformungen.

In der Neuvorlage zu DIN 1052 Teil 1 werden ebenfalls zwei Feuchtebereiche unterschieden: a) Feuchte im Gebrauchszustand bis 18 % mit einem Kriechbeiwert von (umgerechnet) $\varphi = 1,0$; b) Gebrauchsfeuchte über 18 % mit $\varphi = 2,0$. Versteht man unter "Feuchte im Gebrauchszustand" die mittlere Gleichgewichtsfeuchte während der Nutzung, so würde der Beanspruchungsbereich a) geschlossene und offene, überdeckte Bauwerke mit Holzfeuchten zwischen $(9\pm 3)\%$ und $(15\pm 3)\%$, aber auch allseitig der Witterung ausgesetzte Konstruktionen mit $(18\pm 6)\%$ umfassen (entsprechend der Definition der Gleichgewichtsfeuchten in dieser Neuvorlage); d.h. auch direkt bewitterte Bauteile würden unter Dauerlast ihre langfristigen Verformungen im ungünstigsten Fall ($g/q = 1$) rechnerisch nur verdoppeln. In Wirklichkeit muß hier aber nicht nur bei Holzwerkstoffen, sondern auch bei Vollholz mit wesentlich höheren Kriechverformungen gerechnet werden.

Es wird daher vorgeschlagen, die Grenze für die Anwendung des niedrigeren Kriechbeiwertes ($\varphi = 1,0$ bzw. $\alpha = 0,5$) bei einer mittleren Gebrauchsfeuchte von 15 % bzw. - analog zur SIA 164 - bei offenen, überdeckten Bauwerken zu ziehen. Selbst dann werden die tatsächlichen Kriechverformungen in den meisten Fällen noch über den rechnerischen liegen, wie die Versuche im natürlichen Außenklima unter Dach gezeigt haben.

Materialabhängige Abminderungsfaktoren

Eine Berücksichtigung der Unterschiede in der feuchtebedingten Kriechzunahme bei Vollholz und Holzwerkstoffen kann - wiederum stark vereinfachend - durch unterschiedlich starke Abminderung

der Rechenwerte E_0 bzw. G_0 bei erhöhter Feuchtebeanspruchung erfolgen.

Holzwerkstoffe dürfen zwar nicht ohne ausreichenden Oberflächenschutz der direkten Bewitterung ausgesetzt werden. Nach DIN 68800 Teil 2 sind jedoch für die Holzwerkstoffklasse 100G Anwendungsbereiche (unter Dach) mit längerfristig erhöhter Holzfeuchte bis weit über 18 % zulässig. Diese Grenze von 18 % wurde im Hinblick auf den bei höherer Feuchte notwendigen chemischen Schutz der Platten gegen Pilzbefall festgelegt. Deutlich verstärkte Kriechverformungen können jedoch - wie gezeigt - auch schon bei Feuchten unterhalb 18 % auftreten. Daher sollten die feuchtebedingten Abminderungen der Rechenwerte E_0 und G_0 bei Holzwerkstoffen schon unterhalb 18 % beginnen. Bei Flachpreßplatten ist eine etwas stärkere Abminderung als bei Sperrholz zweckmäßig, da Spanplatten bei länger anhaltender erhöhter Feuchte stärker kriechen als im entsprechenden Wechselklima (mit gleichem Feuchtemaximum). Unter Berücksichtigung dieser Gegebenheiten und der aus Literatur und eigenen Untersuchungen bekannten Abminderung der Kurzzeit-Moduln in Abhängigkeit von der Holzfeuchte werden zusätzlich folgende materialabhängigen Abminderungen der Rechenwerte E_0 bzw. G_0 für den Formänderungsnachweis vorgeschlagen:

- a) Vollholz und Brettschichtholz: wenn allseitig der Witterung ausgesetzt oder bei längerer Durchfeuchtung, Abminderung um 1/6, bei Bauteilen unter Wasser um 1/4;
- b) Baufurniersperrholz (BFU100, BFU100G): wenn Feuchte von mehr als 16 % über längere Zeitspanne (ca. ein Monat und mehr) zu erwarten, Abminderung um 1/4;
- c) Flachpreßplatten (FP-V100, FP-V100G): wenn Feuchte von mehr als 16 % über längere Zeitspanne (ca. ein Monat und mehr) zu erwarten, Abminderung um 1/3.

Vergleicht man diese Feuchte-Grenzen mit den Feuchte-Schwankungen in Tabelle 24 bzw. in den Bildern 25, 46 und 48, so wird

ersichtlich, daß beim Einsatz von Vollholz und Holzwerkstoffen in überdeckten, offenen Bauwerken in der Regel noch keine zusätzliche Abminderung der E- und G-Werte bezüglich der Materialfeuchte vorgesehen wird. Bei stärker hygroskopischen Holzwerkstoffen muß allerdings aufgrund der dadurch bedingten stärkeren Kriechverformungen u.U. mit wesentlich höheren Gesamtverformungen gegenüber den rechnerischen Formänderungen gerechnet werden. Auf diese Möglichkeit des verstärkten Kriechens bei besonders hygroskopischen Werkstoffen (z.B. Spanplatten mit stark alkalischer Phenolharzverleimung etc.) sollte zumindest in den Erläuterungen der Holzbaunorm hingewiesen werden.

Grenzen einer rechnerischen Berücksichtigung von Kriechverformungen

Es muß an dieser Stelle nochmals betont werden, daß selbst diese realistischere rechnerische Berücksichtigung der last- und feuchteabhängigen Kriechverformungen nach den hier unterbreiteten Vorschlägen - ebenso wie auch in anderen, neueren Holzbaunormen - das tatsächliche Langzeitverhalten von Holz und Holzwerkstoffen nur in stark vereinfachter Weise wiedergeben kann. Je nach Material (Struktur, Sorptionsverhalten etc.) und tatsächlicher mechanischer und klimatischer Beanspruchung können im Einzelfall mehr oder weniger starke Abweichungen (meist nach oben) von den berechneten Verformungen auftreten.

Grundsätzlich sind die Kurzzeitmoduln umso stärker abzumindern bzw. die daraus errechneten Verformungen umso stärker zu erhöhen, je größer die Verformungsempfindlichkeit der Konstruktion, je höher der Beanspruchungsgrad (g/q), je höher die durchschnittliche Gebrauchsfeuchte, je größer die zeitabhängigen mittleren Feuchteunterschiede, und je kleiner die Querschnittsabmessungen der Bauteile sind.

Der Einfluß der Temperatur ist zwar ebenfalls nachgewiesen. Normalerweise wird er jedoch durch den Feuchteeinfluß überlagert und kann daher kaum getrennt berücksichtigt werden.

Obwohl einige der genannten Parameter nach dem heutigen Stand der Kenntnisse durch entsprechende Näherungsfunktionen erfaßt und beschrieben werden können (vergl. Abschnitt 8), ist eine Gleichung zur "genauen" Berechnung der Kriechfaktoren, die alle signifikanten Einflüsse den tatsächlichen baupraktischen Gegebenheiten entsprechend mit einbezieht, heute und wahrscheinlich auch künftig nicht denkbar; sie müßte außerdem so umfangreich und kompliziert werden, daß sie zumindest für den Formänderungsnachweis in den Bemessungsvorschriften viel zu unhandlich und damit unbrauchbar wäre.

9.3 Vorschlag zur Berücksichtigung der Kriechverformungen in DIN 1052

Aus den Überlegungen in den Abschnitten 9.1 und 9.2 ergibt sich zusammenfassend folgender Vorschlag zur Berücksichtigung der Kriechverformungen in DIN 1052 Teil 1 (Abschnitt-Nr. offen gelassen), wobei die Abminderung in Form eines Multiplikators gemäß Gleichung (16) erfolgt:

"(...) Berücksichtigung der Kriechverformungen

Bei auf Biegung beanspruchten Bauteilen sind für den Durchbiegungsnachweis nach Abschnitt (...) die Elastizitätsmoduln von Holz und Holzwerkstoffen mit dem Multiplikationsfaktor

$$\eta = 1 - \alpha \cdot \frac{g}{q} \quad (1)$$

abzumindern.

Hierin bedeuten:

- α = feuchtigkeitsabhängiger Kriechbeiwert
- g = ständige Last
- q = Gesamtlast.

Bei einer mittleren Feuchte des Holzes und der Holzwerkstoffplatten im Gebrauchszustand bis zu 15 % ist mit $\alpha = 1/2$, darüber mit $\alpha = 2/3$ zu rechnen.

.//.

Bei Dächern ist der Anteil der Schneelast mit $0,5 (S_0 - 0,75) S/S_0$ der ständigen Last zuzurechnen; S und S_0 sind Schneelasten nach DIN 1055 Teil 5 in kN/m^2 .

Kriechverformungen sind erst ab einem Dauerlastanteil von $g/q = 0,3$ rechnerisch zu berücksichtigen.

Beim Formänderungsnachweis von Bauteilen, bei denen Schub- oder Torsionsbeanspruchungen berücksichtigt werden müssen, sind für die Abminderung der Schub- bzw. Torsionsmoduln die η -Werte nach Gleichung (1) zu halbieren.

Bei durch Normalspannungen beanspruchten Bauteilen sind Kriechverformungen in der Regel nur bei erhöhten Anforderungen an die Verformungsbeständigkeit des Bauteiles zu berücksichtigen; die Abminderung der Elastizitätsmoduln erfolgt gegebenenfalls mit dem Faktor η nach Gleichung (1).

Bei erhöhter Feuchtebeanspruchung müssen die E - und G -Werte gegebenenfalls zusätzlich nach Abschnitt (...) abgemindert werden. "(In dem hier zitierten Abschnitt der Norm (4.1.2 in Vorlage 4/1983) wären die feuchtebedingten, materialabhängigen Abminderungen wie in Abschnitt 9.2.1 vorgeschlagen zu übernehmen).

"Liegt die Einbaufeuchte wesentlich höher als die Gebrauchsfeuchte, und wird das Bauteil während des Austrocknens beansprucht, muß mit größeren Kriechverformungen gerechnet werden."

Um die Auswirkungen auf den Formänderungsnachweis aufzuzeigen, werden in Tabelle 25 die mit dem hier zur Diskussion gestellten neuen Vorschlag ermittelten, rechnerischen Gesamtverformungen f_t am Beispiel von biegebeanspruchtem Vollholz, Furniersperrholz und Flachpreßplatten dargestellt und mit den entsprechenden Werten verglichen, die nach DIN 1052 Teil 1 (Ausgabe 1969 sowie Vorlage April 1983), nach der Schweizer Norm SIA 164 (1981), sowie nach den französischen Règles C.B.71 (1972) bestimmt wurden. Der Vergleich wurde für drei Feuchtebeanspruchungen und für zwei Dauerlastanteile durchgerechnet, wobei

Tabelle 25: Vergleich der nach verschiedenen Normen und Vorschlägen rechnerisch ermittelten Gesamtdurchbiegung f_t (ohne Schubanteil) von Vollholz (VH), Furniersperrholz (BFU) und Flachpreßplatten (FP) bei verschiedener Feuchtebeanspruchung (u_a = Einbaufeuchte, u_{gl} = mittlere Gebrauchsfeuchte, u = Feuchteamplitude; φ = Kriechbeiwert entsprechend Gleichung (15), E_R = in Abhängigkeit von der Feuchte abgeminderter Normwert E_0 ; f_0 = mit E_0 , d.h. ohne Berücksichtigung der Feuchte ermittelte Anfangsverformung)

Feuchtebeanspruchung	Material	Rechengröße	DIN 1052 (1969) 3)	DIN 1052 Vorlage 4/83	DIN 1052 Vorschlag	SIA 164 (1981)	Règles C.3.71
$u_a = 15 \%$ $u_{gl} = 15 \%$ $\Delta u = 6 \%$ (z.B. offen, überdeckt)	VH	$\varphi_{0,5}/\varphi_{1,0}$ E_R $f_t 0,5$ $f_t 1,0$	0/0,33 $1,0 \times E_0$ $1,0 \times f_0$ $1,33x f_0$	0/1,0 $1,0 \times E_0$ $1,0 \times f_0$ $2,0 \times f_0$	1,0 $1,0 \times E_0$ $1,33x f_0$ $2,00x f_0$	0,5 $1,0 \times E_0$ $1,25x f_0$ $1,50x f_0$	0,55 $1,0 \times E_0$ $1,55x f_0$ $2,47x f_0$
	BFU	$\varphi_{0,5}/\varphi_{1,0}$ E_R $f_t 0,5$ $f_t 1,0$	0/0,33 $1,0 \times E_0$ $1,0 \times f_0$ $1,33x f_0$	0/1,0 $1,0 \times E_0$ $1,0 \times f_0$ $2,0 \times f_0$	1,0 $1,0 \times E_0$ $1,33x f_0$ $2,00x f_0$	- - - -	- - - -
	FP	$\varphi_{0,5}/\varphi_{1,0}$ E_R $f_t 0,5$ $f_t 1,0$	- 2) - - -	0/1,0 $1,0 \times E_0$ $1,0 \times f_0$ $2,0 \times f_0$	1,0 $1,0 \times E_0$ $1,33x f_0$ $2,00x f_0$	- - - -	- - - -
$u_a = 17 \%$ $u_{gl} = 17 \%$ $\Delta u = 6 \%$ (z.B. teilweise bewittert)	VH	$\varphi_{0,5}/\varphi_{1,0}$ E_R $f_t 0,5$ $f_t 1,0$	0/0,33 $1,0 \times E_0$ $1,0 \times f_0$ $1,33x f_0$	0/1,0 $1,0 \times E_0$ $1,0 \times f_0$ $2,0 \times f_0$	2,0 $1,0 \times E_0$ $1,50x f_0$ $3,00x f_0$	2,0 $0,80x E_0$ $2,50x f_0$ $3,75x f_0$	0,60 $1,0 \times E_0$ $1,6 \times f_0$ $2,6 \times f_0$
	BFU	$\varphi_{0,5}/\varphi_{1,0}$ E_R $f_t 0,5$ $f_t 1,0$	0/0,33 $1,0 \times E_0$ $1,0 \times f_0$ $1,33x f_0$	0/1,0 $1,0 \times E_0$ $1,0 \times f_0$ $2,0 \times f_0$	2,0 $0,75x E_0$ $2,00x f_0$ $4,00x f_0$	- - - -	- - - -
	FP	$\varphi_{0,5}/\varphi_{1,0}$ E_R $f_t 0,5$ $f_t 1,0$	- - - -	0/1,0 $1,0 \times E_0$ $1,0 \times f_0$ $2,0 \times f_0$	2,0 $0,67x E_0$ $2,23x f_0$ $4,50x f_0$	- - - -	- - - -
$u_a = 30 \%$ $u_{gl} = 18 \%$ $\Delta u = 12 \%$ (z.B. allseitig bewittert)	VH	$\varphi_{0,5}/\varphi_{1,0}$ E_R $f_t 0,5$ $f_t 1,0$	0/0,33 $0,83x E_0$ $1,20x f_0$ $1,60x f_0$	0/1,0 $0,83x E_0$ $1,20x f_0$ $2,40x f_0$	2,0 $0,83x E_0$ $1,80x f_0$ $3,60x f_0$	2,0 $0,80x E_0$ $2,50x f_0$ $3,75x f_0$	1,42 $1,0 \times E_0(?)$ $2,42x f_0$ $4,79x f_0$
	BFU	$\varphi_{0,5}/\varphi_{1,0}$ E_R $f_t 0,5$ $f_t 1,0$	0/0,33 $0,83x E_0$ $1,20x f_0$ $1,60x f_0$	0/1,0 $0,75x E_0$ $1,33x f_0$ $2,67x f_0$	2,0 $0,75x E_0$ $2,00x f_0$ $4,00x f_0$	- - - -	- - - -
	FP	$\varphi_{0,5}/\varphi_{1,0}$ E_R $f_t 0,5$ $f_t 1,0$	- - - -	0/1,0 $0,67x E_0$ $1,50x f_0$ $3,00x f_0$	2,0 $0,67x E_0$ $2,23x f_0$ $4,50x f_0$	- - - -	- - - -

1) Index 0,5 $\hat{=}$ $g/q = 0,5$, Index 1,0 $\hat{=}$ $g/q = 1,0$

2) nicht in Norm erfaßt

3) Abminderungen nur in Erläuterungen empfohlen (φ)

sowohl ein baupraktisch häufiger vorkommender Wert ($g/q = 0,5$) als auch die sehr seltene, ungünstigste Möglichkeit ($g/q = 1,0$) eingesetzt wurden.

Neben den feuchtekorrigierten Rechenwerten E_R der Normwerte E_0 sind die - gegebenenfalls zuvor umgerechneten - Kriechbeiwerte φ entsprechend Gleichung (14) bzw. (15) sowie die sich damit ergebenden "Vervielfältiger" der Anfangsverformung f_0 angegeben.

Tabelle 25 zeigt, daß die rechnerischen Durchbiegungsvielfachen unter baupraktisch üblicher Beanspruchung ($g/q = 0,5$) nach dem neuen Vorschlag nicht über $1,8 \cdot f_0$ (Vollholz) bzw. $2,0 \cdot f_0$ (Sperrholz) bzw. $2,23 \cdot f_0$ (Flachpreßplatten) hinausgehen und damit in der Regel immer noch unter den tatsächlich zu erwartenden Langzeitverformungen bleiben. Selbst im ungünstigsten Fall ($g/q = 1,0$) gehen die rechnerischen Kriechfaktoren f_t/f_0 nicht über 3,6 bzw. 4,0 bzw. 4,5 hinaus und liegen damit im unteren Bereich der unter entsprechenden Beanspruchungen gemessenen Werte.

Im Vergleich mit zwei neueren ausländischen Holzbaunormen erhält man mit dem Vorschlag zu DIN 1052 i.a. etwas niedrigere rechnerische Gesamtverformungen.

Gegenüber der bisher gültigen DIN 1052 (1969) ergeben sich jedoch wirklichkeitsnähere und damit höhere rechnerische Langzeitverformungen. Auch im Vergleich zur Vorlage 4/83 werden, vor allem bei erhöhter Feuchtebeanspruchung, meist höhere Verformungswerte errechnet.

Aufgrund dieser realistischeren Erfassung der langfristig in einem Holzbauteil zu erwartenden Verformungen müssen aber auch die zulässigen Verformungswerte (z.B. Durchbiegungen) dieser verbesserten Betrachtungsweise angepaßt werden.

Nach DIN 1052 (1969) sind bei der Berechnung der Durchbiegungen und eventuellen Überhöhung i.a. nur die elastischen Verformungsanteile zu berücksichtigen. Lediglich in den Erläuterungen

wird empfohlen, die E- und G-Werte um mindestens 25 % abzumindern, wenn die Spannung aus ständiger Last größer als die Hälfte der zulässigen Spannung ist.

Nach der Vorlage April 1983 zur Neufassung von DIN 1052 Teil 1 sollen die Durchbiegungen ebenfalls nur mit den elastischen Verformungen ermittelt und mit den entsprechenden zulässigen Durchbiegungswerten verglichen werden. Bei der Berechnung der Überhöhung (bei Fachwerkträgern und zusammengesetzten Vollwandträgern "in der Regel" erforderlich) soll diese "mindestens der rechnerischen Durchbiegung aus ständiger Last einschließlich der Kriechverformungen und ruhenden Verkehrslast entsprechen". Bei Ausführungen ohne Überhöhung sowie mit Überhöhung aber ohne Berechnung würden demnach keinerlei Kriechverformungen berücksichtigt. Das sollte unter Beachtung der Ergebnisse dieser Arbeit und des daraus abgeleiteten Neu-Vorschlages zur Berücksichtigung von Kriechverformungen noch überprüft werden. Zumindest bei verformungsempfindlichen Bauteilen bzw. bei erhöhten Anforderungen an die zulässige Durchbiegung sollte das Kriechen entweder bei der Berechnung der Überhöhung oder - falls diese nicht erfolgt - bei der Bestimmung der rechnerischen Durchbiegung mit berücksichtigt werden.

10 Vorschlag einheitlicher Prüfgrundsätze zur Durchführung und Auswertung von Kriechversuchen

In Abschnitt 3.5 wurde gezeigt, wie und in welchem Ausmaß die bei einem Versuch gemessenen Kriechverformungen von den verschiedenen prüftechnischen Parametern beeinflusst werden können. Als wesentliche Einflußgrößen wurden neben der Prüfmethode selbst die Art der Verformungsmessung, die Probengröße, die Probenahme, der Stichprobenumfang, sowie der Prüfablauf hinsichtlich der mechanischen und klimatischen Beanspruchung erkannt.

Da bisher einheitliche und allgemein anerkannte Prüfverfahren für Dauerstandversuche fehlen, sind die zahlreichen in der Literatur beschriebenen Kriechversuche i.a. mit unterschiedlicher Prüftechnik durchgeführt worden und hinsichtlich der Ergebnisse nur bedingt, oft überhaupt nicht miteinander vergleichbar. Das ist auch der Grund für das bisherige Fehlen allgemeingültiger Kriechkennzahlen für Holz und Holzwerkstoffe unter bestimmter mechanischer und klimatischer Beanspruchung.

Um diesen unbefriedigenden Zustand zu beenden und künftige Kriechversuche vergleichbar und damit wesentlich aussagefähiger zu machen, wird im folgenden ein Vorschlag für einen einheitlichen "Standard-Kriechversuch" zur Diskussion gestellt. Er beschränkt sich zunächst auf reine Biegebeanspruchung, da hierüber die meisten Erfahrungen vorliegen.

Vorrichtungen für Kriechversuche unter Zugbeanspruchung werden zwar wiederholt beschrieben, z.B. in [112, 186]. Bisher nicht geklärt ist jedoch die Frage, wie sich bei Kriechversuchen unter Normalspannungen und gleichzeitiger Feuchtigkeitsänderung die Gesamtverformungen zusammensetzen (Überlagerung der mechanisch bedingten Dehnungen bzw. Stauchungen durch sorptionsbedingte Quell- bzw. Schwindverformungen); damit wird eine korrekte Beurteilung derartiger Kriechversuche außerordentlich erschwert (vergleiche Abschnitt 3.5.1). Bei Biegebeanspruchung sind diese Sorptionseinflüsse weniger störend und können - bei geeigneter Wahl der Meßtechnik - sogar vernachlässigt werden [116].

10.1 Standard-Kriechversuch an kleinen, fehlerfreien Proben unter Biegebeanspruchung (4-Schneiden-Versuch)

Unter Berücksichtigung der aufgezeigten prüftechnischen Einflüsse wird für künftige Kriechversuche an Holz und Holzwerkstoffen unter Biegebeanspruchung ein einheitlicher Standard-Kriechversuch vorgeschlagen. Der Versuch soll einerseits möglichst einfach und ohne allzu großen Aufwand durchführbar sein, andererseits aber ausreichend genaue, reproduzierbare und eindeutig auswertbare Ergebnisse liefern.

Um diese - z.T. gegenläufigen - Ziele zumindest annähernd zu erreichen, werden hierfür Kriechversuche an relativ kleinen, fehlerfreien Prüfkörpern vorgeschlagen. Diese haben gegenüber großen Proben in Bauteilabmessungen folgende Vorteile: einfachere prüftechnische Handhabung, Ausschaltung störender Struktureinflüsse (z.B. Äste) und damit größerer Streuungen der Meßwerte, zeitraffende Wirkung zumindest bei erhöhter oder wechselnder Klimabeanspruchung. Nachteilig an verkleinerten Probenquerschnitten ist allerdings ihre größere Sorptionsempfindlichkeit, die sich nicht nur in einer höheren Kriechgeschwindigkeit, sondern auch in absolut stärkeren Kriechverformungen, d.h. in einer Erhöhung des Wirkungsgrades, niederschlägt. Das muß bei der Bewertung der Ergebnisse derartiger Kriechversuche unter wechselnder Feuchtigkeitsbeanspruchung berücksichtigt werden (siehe Abschnitt 10.2).

Der 4-Schneiden-Versuch wird gewählt, da hierbei zwischen den beiden Lasteinleitungspunkten ein konstantes Biegemoment auf die Proben einwirkt, während bei zentrischer Belastung das maximale Biegemoment nur an einer Stelle wirkt und eventuelle Schwachstellen in der Werkstoffstruktur außerhalb des Krafteinleitungsbereiches nicht ausreichend erfaßt werden.

Dagegen eignen sich Biege-Kriechversuche unter zentrischer Einzellast zumindest bei Vollholz auch zur indirekten Bestimmung der Kriechverformungen unter Schubbeanspruchung (aus Querkraft),

indem der Anteil der Schubverformung an der Gesamtdurchbiegung durch schrittweise Verringerung des Stützweitenverhältnisses L_s/h erhöht wird (z.B. $L_s/h = 20 - 10 - 5$; siehe Abschnitt 3.5.1). Hierauf kann an dieser Stelle allerdings noch nicht näher eingegangen werden, da vor allem bei Holzwerkstoffen noch keine ausreichenden Erfahrungen mit dieser Prüftechnik vorliegen.

10.1.1 Versuchsaufbau

a) Probengeometrie:

Probenlänge $L = L_s + 80 \text{ mm}$

Stützweite $L_s = 15 \times h + 200 \text{ mm}$

Kragarm $a = \text{je } 7,5 \times h$

Querkraftfreier Bereich $(L_s - 2a) = 200 \text{ mm}$

Probenhöhe $h = 20 \text{ mm}$ bei Vollholz bzw. Plattendicke
bei Holzwerkstoffen

Probenbreite $b = 20 \text{ mm}$ (Vollholz) bzw. 50 mm (Holzwerkstoffe bis $h \leq 40 \text{ mm}$)

Lehrstuhl für Ingenieurholzbau
und Baukonstruktionen
Universität Karlsruhe
o. Prof. Dr.-Ing. J. Ehlebeck

Der quadratische Querschnitt bei fehlerfreien Vollholzproben wurde entsprechend DIN 52186 gewählt; die Kantenlänge von 20 mm soll mindestens 5 Zuwachszonen (Jahrringe) enthalten und muß daher bei durchschnittlicher Jahrringbreite über 4 mm entsprechend erhöht werden; die Zeitstandbiegeproben sind mit stehenden Jahrringen zu belasten (Kraftrichtung tangential).

b) Belastung:

4-Schneiden-Biegeversuch; Auflager und Lasteinleitungen mit Durchmesser 30 mm , jeweils kugelgelagert (um Sprünge in den Kriechkurven durch ruckweises Einziehen der Proben bei zunehmender Durchbiegung zu vermeiden).

Die Belastung erfolgt zweckmäßigerweise mit einer (horizontal nachjustierbaren) Hebelübersetzung o.ä. (Gewichtersparnis).

Zunächst Aufbringen der Vorkraft aus der Belastungsvorrichtung; anschließend kontinuierliche und stoßfreie Laststeigerung bis zur vollen Prüfkraft (einschließlich Vorkraft) innerhalb von 5 bis 10 Sekunden.

c) Durchbiegungsmessung:

Diskontinuierlich über Meßbügel (Meßbasis = Stützweite) mit 3 Meßuhren (Meßweg \geq 50 mm, Meßgenauigkeit 1/100 mm, Radius der halbkugelförmigen Tastspitzen 5 mm).

Durchbiegungsmessung in Probenmitte ($L_s/2$) sowie unmittelbar neben den Lasteinleitungspunkten (Meßuhrabstand 150 mm), jeweils direkt auf der Probenoberfläche. Damit kann wahlweise die Durchbiegung im querkraftfreien Bereich der Biegeprobe, über den Kragarmen a (mit Schubeinfluß) oder über der gesamten Stützweite L_s bestimmt werden.

Alternativ können auch beliebige andere, diskontinuierliche oder kontinuierliche, manuelle oder automatisch messende und registrierende Meßeinrichtungen mit mindestens der gleichen Meßgenauigkeit verwendet werden (siehe z.B. [116]).

d) Klimaführung:

Aufgrund des ausgeprägten Klimaeinflusses auf die Kriechverformungen müssen Zeitstandversuche an Holz und Holzwerkstoffen unter exakt definierten und möglichst wenig um die Sollwerte schwankenden Temperatur- und Luftfeuchte-Bedingungen durchgeführt werden, um vergleichbare und reproduzierbare Versuchsergebnisse zu erhalten. Die Temperaturschwankungen sollten \pm 1 K, die Schwankungen der relativen Luftfeuchte \pm 3 % auf keinen Fall überschreiten. Der tatsächliche Klimaverlauf während des Versuches ist mit geeichten Meßgeräten aufzuzeichnen.

10.1.2 Probenahme

a) normale Stichprobe:

Sollen aus den Kriechversuchen Angaben über die Größenordnung der zwischen den Einzelproben in etwa zu erwartenden Schwankungen gewonnen werden, so sind bei jedem Versuch mindestens 5 (besser 10) Einzelproben je Grundgesamtheit zu prüfen. Die Kriechproben sind bei Vollholz aus 5 verschiedenen Stämmen einer Holzart, möglichst von unterschiedlichen Standorten, über Stammhöhe und -querschnitt verteilt, zu entnehmen; bei Holzwerkstoffen erfolgt die Entnahme aus 5 verschiedenen Platten eines Normtyps einer Anlage und Dicke mit möglichst großem zeitlichem Produktionsabstand. Rohdichte und Biege-E-Modul der 5 (bzw. 10) Proben sollten möglichst über die gesamte Spannweite dieser Eigenschaften bei der betreffenden Grundgesamtheit verteilt sein.

b) reduzierte Stichprobe:

Ist man z.B. aus versuchstechnischen Gründen gezwungen, den Stichprobenumfang weiter zu verkleinern, so müssen die Schwankungen zwischen den Einzelproben minimiert und die Proben so ausgewählt werden, daß Rohdichte und E-Modul der ausgesuchten Proben den durchschnittlichen Werten der betreffenden Grundgesamtheit möglichst nahe kommen. Damit kann der Stichprobenumfang auf 3 Kriechproben je Versuch verringert werden, ohne die Aussagefähigkeit der Ergebnisse einzuschränken; lediglich die Schwankungsbreite der Einzelproben ist nicht mehr erfaßbar.

c) Zusätzliche Vergleichsproben:

Der zu prüfenden Grundgesamtheit ist mindestens die zehnfache Probenanzahl mit den gleichen Abmessungen zu entnehmen wie für die eigentlichen Kriechversuche. Nach Klimatisierung 20/65 werden zunächst Rohdichte und Biege-Elastizitätsmodul aller Proben bestimmt und daraus die Kriechproben nach a) oder b) ausgewählt.

Um den tatsächlichen Belastungsgrad der einzelnen Kriechproben wenigstens annähernd genau im Voraus festlegen zu können, wird die Biegefestigkeit der beiden Nachbarproben jeder Kriechprobe im statischen Kurzzeitversuch nach der einschlägigen Prüfnorm ermittelt; der Mittelwert der beiden Proben dient als Bezugsgröße für den geschätzten Belastungsgrad der jeweiligen Kriechprobe.

In alle Kriechversuche mit erhöhter Klimabeanspruchung ist jeweils die gleiche Anzahl unbelasteter Vergleichsproben gleicher Abmessungen mit einzubeziehen, deren Rohdichte und E-Modul denen der Kriechproben möglichst nahe kommen sollten. An diesen Vergleichsproben wird das Sorptionsverhalten (als wichtigste Einflußgröße auf das Kriechverhalten) während der Zeitstandversuche verfolgt; außerdem läßt sich durch Vergleich der Eigenschaftsänderungen (E-Modul, Festigkeiten) der Kriech- und der Vergleichsproben der Einfluß der reinen Klimabeanspruchung von dem der kombinierten mechanischen und klimatischen Langzeitbeanspruchung trennen.

10.1.3 Versuchsdurchführung

a) Vorbehandlung:

Klimatisieren aller Kriech- (K) und Vergleichsproben (V) im Klima 20/65-1 DIN 50014 bis zur Gewichtskonstanz. Markieren der Meßstellen für Dicke und Durchbiegungen.

b) Ermittlung von Sorptionsverhalten und Eigenschafts-
Änderungen:

Bestimmung von Gewicht (auf 0,1 g), Dicke (auf 1/100 mm in Probenmitte) und Biege-Elastizitätsmodul (gleiche Lastanordnung wie Kriechproben, Belastung bis maximal 1/4 der mittleren Bruchlast) aller Proben (K+V)

1. Vor Belastung (nach Klimatisieren 20/65)
2. 10 Minuten nach Entlastung
3. Nach 6 Wochen Rückklimatisierung 20/65 R.

An den Vergleichsproben (V) werden Gewicht und Dicke zusätzlich in regelmäßigen Abständen während ihrer Lagerung neben den Kriechproben im Prüfklima gemessen, und zwar mindestens einmal wöchentlich bei Konstantklima, bzw. unmittelbar vor jedem Klimawechsel bei definierter Wechselklimabeanspruchung.

Nach Entlastung und Rückklimatisierung werden an allen K- und V-Proben als letztes die Biegefestigkeit, bei Span- und Faserplatten zusätzlich die Querkzugfestigkeit, bei Furniersperrholz die Zugscherfestigkeit bestimmt und mit den entsprechenden Materialeigenschaften vor Beginn der Kriechversuche verglichen.

c) Durchbiegungsmessungen:

Die Durchbiegung f der Kriechproben im querkraftfreien Bereich wird gemessen vor Belastungsbeginn, 1 Minute nach Einbau der Belastungsvorrichtung, 1 Minute nach Aufbringen der gesamten Prüfkraft, sowie 10 Minuten, 2 Stunden, 6 Stunden und 24 Stunden nach Belastungsbeginn (= Erreichen der vollen Prüfkraft), danach alle 24 Stunden bzw. vor jedem Klimawechsel und vor Entlastung; anschließend 1 Minute, 2 Stunden, 6 Stunden, 24 Stunden nach Entlastung sowie wöchentlich während der Rückklimatisierung 20/65 R.

Bei Wechsellastversuchen werden die Durchbiegungen zusätzlich unmittelbar vor und 1 Minute nach jedem Lastwechsel bestimmt.

Die Meßvorrichtung wird nur zur Messung auf die Proben aufgesetzt und nach Ablesen der Meßuhren sofort wieder abgenommen (die Nullwerteinstellung ist vor jeder Meßreihe zu kontrollieren).

d) Wahl des Belastungsgrades:

Höhe und Dauer der Belastung der Kriechproben hängen stark vom angestrebten Ziel der Versuche ab und können daher nicht einheitlich und allgemeingültig festgelegt werden.

1. Umfassende Ermittlung des Kriechverhaltens

Bei neuen oder stark veränderten Produkten (z.B. unbekannte Holzarten, neuartige Verleimung bei Holzwerkstoffen etc.), über deren Kriechverhalten noch keine oder nur ungenügende Kenntnisse vorliegen, sind mehrere Versuche mit verschiedener konstanter und wechselnder Belastungshöhe durchzuführen. Die Höhe der Laststufen ist so zu wählen, daß sowohl Spannungen unterhalb als auch oberhalb der für den Spannungsnachweis vorgesehenen zulässigen Spannung des betreffenden Materials mit erfaßt werden.

Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus Abschnitt 3.3 werden für grundlegende Kriechversuche an Vollholz und an Holzwerkstoffen folgende Stufen des - jeweils konstanten - Belastungsgrades vorgeschlagen:

BG = 10 % - 20 % - 30 % - 40 % - 50 %

der mittleren Bruchspannung (im normalklimatisierten Zustand 20/65 bestimmt).

Damit erhält man zumindest orientierende Angaben über die Grenze des lastproportionalen Kriechens (Linearitätsgrenze) und damit über die maximal zulässige Dauerbelastung unter den jeweiligen Klima- und sonstigen Randbedingungen. Bei erhöhter Klimabeanspruchung führen die hohen Belastungsgrade nach einer bestimmten, vom Material und von der Höhe der Klimabeanspruchung abhängigen Zeit zum Bruch; diese Prüfmethodik erlaubt somit gleichzeitig Aussagen über das jeweilige Bruchverhalten. Neben der Kriechgeschwindigkeit und der absoluten Kriechformänderung ist die Bruchverformung ein drittes, wichtiges Beurteilungskriterium des Dauerstandverhaltens, um beim Formänderungsnachweis auch mit ausreichender Sicherheit gegen Bruch bemessen zu können.

Zur Beurteilung der Rückbildung der Kriechverformungen unter zeitweise verringerter Belastung sind gleichzeitig mit den Konstantlastversuchen zwei Serien unter Wechsellast durchzuführen; dabei sollte der Belastungsgrad alle 4 Wochen zwischen 20 % und 10 % bzw. zwischen 30 % und 10 % wechseln (mindestens 5 Lastwechsel = 40 Wochen; die Vergleichsversuche unter Konstantlast sind gleichzeitig und ebenso lange zu fahren).

2. Vereinfachte Kriechversuche

Liegen bereits Grundkenntnisse über das Kriechverhalten des zu untersuchenden Materials vor, und werden nur geringe Änderungen z.B. in der Materialstruktur oder anderen Kriechparametern vorgenommen, die keine grundlegenden Veränderungen des Kriechverhaltens erwarten lassen, so kann der Umfang der Laststufen wesentlich verringert werden. In solchen Fällen genügen normalerweise zwei Serien mit jeweils konstantem Belastungsgrad von 20 % bzw. 30 %.

Entsprechend vereinfacht werden können jedoch auch Versuche an Werkstoffen mit größeren Strukturänderungen (z.B. Spanplatten mit geänderter V100-Verleimung oder mit stark veränderter Spanstruktur oder Holzartenzusammensetzung), wenn in

diese Versuche gleichzeitig entsprechende Vergleichsmaterialien mit ausreichend bekanntem und bewährtem Dauerstandverhalten einbezogen werden (im obigen Beispiel eine genau definierte Standardspanplatte mit Phenolharzverleimung geringer Alkalität). Aufgrund der vielfältigen Struktureinflüsse auf das Kriechverhalten dürfen jedoch nur solche Vergleichsmaterialien verwendet werden, deren Struktur und Herstelltechnik - mit Ausnahme des zu untersuchenden, geänderten Parameters - völlig identisch ist mit der des eigentlichen Untersuchungsmaterials.

e) Wahl der Klimabeanspruchung:

Auch hinsichtlich Ausmaß und Verlauf der klimatischen Beanspruchung der Kriechproben lassen sich keine einheitlichen, für alle Anwendungen gleichermaßen sinnvollen Prüfparameter festlegen. Je nach Art der Versuche - möglichst praxisnahe Versuchsbedingungen zur Bestimmung der Abminderungsfaktoren für die Rechenwerte des E-Moduls, oder vergleichende Relativversuche zur möglichst kurzfristigen Differenzierung zwischen verschiedenen Produkt-Varianten (z.B. Verleimungen) - und je nach der zu erwartenden Klimabeanspruchung im vorgesehenen Anwendungsbereich (z.B. entsprechend der Holzwerkstoffklasse 20, 100 oder 100G), müssen die Klimaparameter der jeweiligen Aufgabenstellung angepaßt werden.

Einsatz in geschlossenen, belüfteten Räumen/Holzwerkstoffklasse 20:

Im trockenen Innenbereich kann der Feuchtigkeitsgehalt von Holz und Holzwerkstoffen bis auf maximal 15 % ansteigen (z.B. Holzwerkstoffklasse 20), in stark beheizten Räumen im Winter aber auch bis auf ca. 6 % oder noch darunter absinken. Durch diese Feuchteschwankungen werden die Kriechverformungen von Holzbauteilen im Vergleich zu konstanter Normalklimabeanspruchung 20/65 bereits deutlich verstärkt.

Während im Konstantklima 20/65 noch keine ausreichende Differenzierung zwischen verschiedenen Holz- und Holzwerkstoff-Strukturen möglich ist, können sich diese Strukturunterschiede unter baupraktischen, d.h. in der Regel mehr oder weniger stark schwankenden Feuchtebedingungen, jedoch schon in einem unterschiedlichen Kriechverhalten niederschlagen.

Es wird daher empfohlen, das Kriechverhalten von Holz und Holzwerkstoffen, die für den Einsatz in geschlossenen und ausreichend belüfteten Räumen, d.h. für den Anwendungsbereich der Holzwerkstoffklasse 20 vorgesehen sind, nicht - wie bisher meist üblich - im Konstantklima 20/65, sondern im definierten Wechselklima 20/80 - 20/40 und damit unter baupraktisch realistischeren Bedingungen zu bestimmen. Die Versuche sollten über mindestens 20 Klimazyklen mit einer Zyklendauer von je 2 x 48h laufen (bei größeren Prüfkörper-Querschnitten ist die Zyklendauer auf 2 x 7 Tage zu erhöhen).

Einsatz im Außenklima/Holzwerkstoffklassen 100 bzw. 100G :

In Anwendungsbereichen mit erhöhter Feuchtigkeitsbeanspruchung, z.B. im natürlichen Außenklima unter Dach oder in sogenannten Feuchträumen, d.h. in Bereichen der Holzwerkstoffklasse 100 bzw. 100G, kann die relative Luftfeuchte erheblich stärker schwanken. Mehrjährige Messungen im überdachten Außenklima - dem praktisch ungünstigsten klimatischen Beanspruchungsfall bei konstruktiv richtigem Einsatz - ergaben Schwankungen der Luftfeuchte zwischen ca. 95 - 99 % einerseits und ca. 20 - 35 % andererseits [95]. Diese Klimarandbedingungen müssen daher bei aussagefähigen Kriechversuchen zur Beurteilung des Formänderungsverhaltens von Holz und Holzwerkstoffen unter erhöhter Klimabeanspruchung berücksichtigt werden. Da entsprechende Kriechversuche im natürlichen Außenklima jedoch weder exakt reproduzierbar sind noch eine ausreichende Differenzierung verschiedener Struktureinflüsse (z.B. Verleimung)

in vertretbaren Zeiträumen erlauben, sollten derartige Kriechversuche besser in einem definierten, reproduzierbaren Laborklima durchgeführt werden, ohne dabei jedoch die natürlichen Klimarandbedingungen zu überschreiten. Hierfür wird das Wechselklima 20/95 - 20/30 (je 48h) mit einer Versuchsdauer von mindestens 20 Zyklen vorgeschlagen.

Die Erhöhung des Wirkungsgrades definierter Wechselklima- versuche (Zeitraffereffekt, schmale Prüfkörper) muß bei der Bewertung der Versuchsergebnisse unbedingt berücksichtigt werden (siehe Abschnitt 10.2).

10.1.4 Auswertungen

a) Kriechkurven:

Graphische Darstellung der relativen Verformungszunahme, z.B. $(f_t - f_0)/f_0$, über der gesamten Be- und Entlastungszeit t . Dabei werden zunächst die Einzelproben für jeden Belastungsgrad jeweils in einem gesonderten Diagramm über linearem Maßstab dargestellt (siehe z.B. Bild 34, Anhang); in einem weiteren Bild werden die jeweiligen Mittelwertskurven der verschiedenen Belastungsgrade einer Versuchsreihe über logarithmischem Verformungs- und Zeitmaßstab vergleichend zusammengefaßt (nur Belastungsperiode) und - nach Anpassung der Meßwerte mit Funktion (4) - auf eine Versuchsdauer von 10^4 h extrapoliert (siehe z.B. Bild 66c).

Die so ermittelte relative Durchbiegungszunahme zur Zeit $t = 10^4$ h wird als Kriechkennzahl $\varphi_{t=10^4}$ bezeichnet und für entsprechende Relativ-Vergleiche verschiedener Materialien und/oder Kriechparameter herangezogen (Bewertung siehe Abschnitt 10.2).

Bei Wechsellastversuchen werden nur die beiden Hüllkurven (maximale bzw. minimale Gesamtverformung f_t am Ende der jeweiligen Hoch- bzw. Niederlaststufe) graphisch ausgewertet

und mit den entsprechenden Gesamlastkurven verglichen (wie z.B. in Bild 15, Anhang).

b) Sorptionsverhalten:

Die Feuchte sowie die Dickenänderungen der unbelasteten Vergleichsproben am Ende jeder Klimaperiode und nach Rückklimatisierung 20/65 R werden für jede Einzelprobe berechnet (in %) und die Mittelwerte linear über der Prüfzeit t aufgetragen (z.B. analog Bild 55b und 55d, Anhang).

Außerdem werden die durchschnittlichen Feuchte- und Dickenamplituden (Spannweite zwischen Feucht- und Trockenperiode) ermittelt.

c) Eigenschaftsänderungen:

Die durchschnittlichen prozentualen Änderungen des Biege-Elastizitätsmoduls, der Biegefestigkeit sowie gegebenenfalls weiterer Festigkeitseigenschaften der Kriech- und der Vergleichsproben nach Rückklimatisierung 20/65 R, bezogen auf den normalklimatisierten Anfangszustand vor Versuchsbeginn, werden bestimmt.

Bei Wechsellastversuchen werden außerdem die elastischen Formänderungen bei jedem Lastwechsel ermittelt und über der Lastzyklenfolge aufgetragen (siehe z.B. Bild 19c, Anhang).

10.2 Bewertung der Versuchsergebnisse

Neben einer einheitlichen Prüftechnik und Auswertung muß auch die Bewertung der damit gewonnenen Ergebnisse nach einheitlichen und eindeutigen Kriterien erfolgen.

a) Kriechverhalten:

Durch die - versuchstechnisch notwendige - Verlagerung der Kriechversuche in ein definiertes, reproduzierbares Wechselklima (ohne Überschreitung der jeweiligen natürlichen Klimarandbedingungen, aber mit Erhöhung der Frequenz der Klimawechsel), sowie durch die Verringerung der Probenquerschnitte gegenüber den i.a. wesentlich größeren Bauteilabmessungen wird eine erhebliche Beschleunigung (Zeitraffer-Effekt) und Verstärkung der Kriechverformungen gegenüber baupraktischen Langzeitbeanspruchungen bewirkt. Die Ergebnisse derartiger Kriechversuche dürfen daher auf keinen Fall direkt, d.h. ohne entsprechende Korrektur, auf praktische Anwendungen übertragen werden.

Wie in Abschnitt 3.4.1 gezeigt, werden die Kriechfaktoren (f_t/f_0) beim Übergang von breiten Kriechproben im natürlichen Außenklima auf schmale Biegestäbe im definierten Wechselklima 20/95-20/30 je nach Werkstoff und Beanspruchungsdauer etwa verdoppelt bis verdreifacht. Zur überschlägigen Umrechnung auf den in der Regel ungünstigsten Praxisfall (Außenklima unter Dach) sind die mit der vorgeschlagenen Prüftechnik erhaltenen Kriechfaktoren daher bei Vollholz etwa durch 2,0, bei Furniersperrholz durch 3,0 und bei Flachpreßplatten durch 2,5 zu dividieren. Es muß allerdings betont werden, daß diese "Korrekturwerte" zunächst nur grob orientierend sein können, da vor allem bei Vollholz und Furniersperrholz bisher nur vereinzelte, aber auch bei Spanplatten noch zu wenige auswertbare Vergleichsversuche hierzu vorliegen (siehe Tabellen 3 und 4). Bei Prüfung anderer Holzarten, Materialstrukturen, Verleimungen und Prüfquerschnitte bzw. Plattendicken können sich diese Umrechnungszahlen durchaus noch ändern.

Bei Durchführung der Kriechversuche im konstanten Normal-
klima 20/65 verringern sich die Kriechfaktoren gegenüber
denjenigen im natürlichen Außenklima (breite Proben) noch-
mals erheblich auf etwa die Hälfte bis ein Drittel (siehe
z.B. Bild 21). Auch diese Zusammenhänge wurden bisher nur
in wenigen Einzelversuchen systematisch ermittelt und be-
dürfen noch der Untermauerung und Ergänzung durch weitere,
umfassende Vergleichsversuche.

Allein schon durch die Verringerung der Probenbreite können
sich bei Holzwerkstoffen die Kriechfaktoren je nach Material
und Klimabeanspruchung u.U. erheblich erhöhen. Während z.B.
im Konstantklima 20/65 noch kein Einfluß der Probenbreite
festzustellen ist, muß im natürlich wechselnden Außenklima
zwischen den verschiedenen Holzwerkstoffen unterschieden
werden: bei Furniersperrholz war zwischen 50 mm und 400 mm
breiten Proben noch kein Unterschied vorhanden; bei Span-
platten FP-V100 und FP-V20 waren die Kriechfaktoren im
Außenklima bei schmalen Proben etwa 1,4 mal so groß wie bei
den breiten Plattenabschnitten. Der gleiche Verstärkungs-
faktor wurde bei V20-Spanplatten auch im definierten Wechsel-
klima 20/85-20/35 (je 7 Tage) festgestellt.

Bei Vollholz überlagern sich dem reinen Einfluß des Proben-
querschnitts zwangsläufig verschiedene Einflüsse aus der
Plattenstruktur(unvermeidliche Äste, Faserabweichungen,
Risse etc. bei größeren Kantenlängen; fehlerfreies Material
bei kleinem Prüf-Querschnitt), so daß keine allgemein gül-
tigen Umrechnungsfaktoren für die Kriechverformungen unter-
schiedlicher Vollholzquerschnitte angegeben werden können.
Mit wachsendem Querschnitt verringert sich jedoch der Ein-
fluß wechselnder Feuchtigkeitsbeanspruchung auf das Kriech-
verhalten erheblich.

Sind derartige Umrechnungsfaktoren von den verschärften prüftechnischen auf baupraktisch übliche Beanspruchungen und Querschnitte für ein zu untersuchendes Material nicht bekannt oder noch zu unsicher (was beim heutigen Stand der Kenntnisse noch relativ häufig der Fall ist), so bieten sich hierfür zwei Lösungsmöglichkeiten an:

Entweder werden umfassende Vergleichsversuche mit dem in Abschnitt 10.1 vorgeschlagenen Standard-Kriechprogramm einerseits und entsprechenden Kriechversuchen an großen Prüfkörpern (möglichst in Bauteilgröße) im natürlichen Außenklima unter Dach andererseits zur Ermittlung der betreffenden Umrechnungsfaktoren durchgeführt; die Dauer der Beanspruchung im Außenklima muß dabei mindestens 2-3 Jahre betragen, um aussagefähige Ergebnisse zu erhalten.

Oder die Versuche werden unter Einbeziehung eines möglichst ähnlichen Vergleichsmaterial mit bekanntem und in der Praxis bewährtem Kriechverhalten ausschließlich nach dem vorgeschlagenen Standard-Kriechprogramm durchgeführt; die Ergebnisse werden nur vergleichend bewertet und nicht unmittelbar auf praktische Anwendungsfälle umgerechnet.

Inwieweit dieser zweite - weniger aufwendige - Weg für eine zuverlässige Beurteilung des zu erwartenden Kriechverhaltens bereits ausreicht, oder ob der - versuchstechnisch und zeitlich aufwendigere - grundlegende Vergleich Standard-Versuch/Außenklima erforderlich ist, muß jeweils im Einzelfall unter Berücksichtigung aller material- und prüftechnischen Randbedingungen und bereits vorhandener Kenntnisse entschieden werden.

Kriechversuche im Außenklima alleine sind für eine zuverlässige Vorhersage des langfristig zu erwartenden Formänderungsverhaltens von Holzwerkstoffen unter erhöhter Feuchtebeanspruchung nur wenig geeignet, da hiermit z.B. die Verleimungsbeständigkeit in vertretbaren Zeiträumen nicht ausreichend beurteilt werden kann.

b) Sorptionsverhalten:

Das Sorptionsverhalten hat sich zumindest bei Spanplatten als wichtigster Indikator für das zu erwartende Kriechverhalten gezeigt. Bei Vollholz und den anderen Holzwerkstoffen sind zumindest qualitativ ähnliche Zusammenhänge zu erwarten. Um diese Zusammenhänge zu quantifizieren, aber auch um die tatsächliche Feuchtigkeitsbelastung der Proben während der Kriechversuche direkt verfolgen zu können, sollten bei allen Kriechversuchen unter Feuchtebeanspruchung stets unbelastete Vergleichsproben mit geprüft und entsprechend ausgewertet werden (u.a. Amplituden der Gewichts- und Dickenänderungen). Wenn sich die bei Spanplatten festgestellte stramme Korrelation zwischen Feuchteamplitude und Kriechverhalten auch bei anderen Werkstoffen aus Holz bestätigt, kann künftig zumindest ein Teil der prüftechnisch und zeitlich sehr aufwendigen Kriechversuche reduziert und durch wesentlich einfachere Sorptionsversuche ersetzt werden.

c) Eigenschaftsänderungen:

Durch die Ermittlung möglicher Veränderungen der wesentlichsten elastomechanischen Eigenschaften sowie der bleibenden Dickenzunahme nach Kriechbeanspruchung und Rückklimatisierung 20/65 R erhält man aufschlußreiche Hinweise auf eventuelle Schädigungen des Materials während der mechanischen und klimatischen Langzeitbelastung.

Bei Wechsellastversuchen deutet eine Zunahme der elastischen Formänderungen bei Lastwechsel mit der Zyklenzahl ebenfalls auf eine beginnende, irreversible Materialschwächung durch die Kriechbeanspruchung hin (siehe Abschnitt 3.3.2).

Bei ausreichend beständigen Werkstoffen aus Holz darf zumindest unter baupraktisch üblichen bzw. zulässigen Beanspruchungen weder ein wesentlicher Abfall der elastomechanischen Eigenschaften noch eine wesentliche Zunahme der elastischen Formänderungen bei Lastwechsel auftreten..

Die Aussagefähigkeit von Kriechversuchen kann daher durch die Einbeziehung unbelasteter Vergleichsproben ohne allzu großen Mehraufwand erheblich verbessert werden.

Das hier vorgeschlagene Standard-Prüfprogramm in seinen verschiedenen Varianten mag zunächst relativ aufwendig erscheinen. Um jedoch die bisher häufig noch bestehenden Kenntnislücken bezüglich des Kriechverhaltens von Holz und insbesondere von Holzwerkstoffen in Abhängigkeit von den wesentlichsten Einflußgrößen (Struktur, mechanische und klimatische Beanspruchung) möglichst kurzfristig und umfassend schließen zu können, wird eine derartige systematische, einheitliche und damit erst vergleichbare Prüftechnik für künftige Kriechversuche dringend empfohlen. Bei Vorliegen ausreichender Grundlagen-Kenntnisse kann dieses Standard-Prüfprogramm zu gegebener Zeit vereinfacht und abgekürzt werden.

11 Literatur

- |1| ANDREAE, G.: Über das Verhalten von Dehnungsmeßstreifen bei großen Dehnungen. Materialprüfung 13 (1971) 4, 117-123
- |2| AOKI, T., YAMADA, T.: Creep of Wood during Decrystallization and of Decrystallized Wood. Journal of the Japan Wood Research Society 23 (1977) 10-16
- |3| AOKI, T., YAMADA, T.: Chemorheology of Wood.I. Stress Relaxation of Wood during Acid Hydrolysis. Journal of the Japan Wood Research Society 23 (1977) 107-113
- |4| AOKI, T., YAMADA, T.: Chemorheology of Wood.II. Torsion of Wood during Acid Hydrolysis. Journal of the Japan Wood Research Society 23 (1977) 125-130
- |5| AOKI, T., NORIMOTO, M., YAMADA, T.: Some Physical Properties of Wood and Cellulose Irradiated with Gamma Rays. Wood Research 59 (1977) 19-28
- |6| APLIN, E.N., KEENAN, F.J.: Limit States Design in Wood: A Canadian Perspective. Forest Products Journal 27 (1977) 14-18
- |7| ARIMA, T.: Studies Rheological Behavior of Wood under Hot Pressing. I. Effects of Temperature of Platen and Pressing Load on Deformation under Hot Pressing. Journal of the Japan Wood Research Society 15 (1969) 4, 160-164
- |8| ARIMA, T.: Creep in Process of Temperature Changes. I. Creep in Process of Constant, Elevated and Decreased Temperature. Journal of the Japan Wood Research Society 18 (1972) 349-353
- |9| ARIMA, T.: Creep in Process of Temperature Changes. II. History Effects on Creep of Wood in Process of Temperature Changes. Journal of the Japan Wood Research Society 18 (1972) 377-380
- |10| ARIMA, T.: Creep in Process of Temperature Changes. III. Prediction of Creep Curves in Process of Elevated Temperature. Journal of the Japan Wood Research Society 19 (1973) 75-79
- |11| ARIMA, T.: Studies on Rheological Behavior of Wood under Hot Pressing. II. Effects of Temperature and Moisture Contents in Wood on Deformation under Hot Pressing. Journal of the Japan Wood Research Society 20 (1974) 355-361
- |12| ARMSTRONG, L.D., GROSSMAN, P.U.A.: The behaviour of particle board and hardboard beams during moisture cycling. Wood Science Technology 6 (1972) 128-137

- | 13 | ARMSTRONG, L.D.: Deformation of Wood in Compression During Moisture Movement. Wood Science 5 (1972) 81-86
- | 14 | ASWATHANARAYANA, B.S., VICTOR, V.J.: Stress Relaxation in Wood. J. Ind. Acad. Wood Science 4 (1973) 1-12
- | 15 | ASWATHANARAYANA, B.S., VICTOR, V.J.: Rheological constants of wood and wood-based panel materials by simplified short term loading tests. J. Ind. Acad. Wood Science 5 (1974) 61-67
- | 16 | AVALE, M.: Kriechversuche an Bücherregalen. 13. Sitzung der Techn. Kommission der FESYP, Stockholm (1964)
- | 17 | AVALE, M.: Calcul des Tablettes de Rayonnage. Centre Technique du Bois (1968) 1-24
- | 18 | BACH, L., PENTONEY, R.E.: Nonlinear Mechanical Behavior of Wood. Forest Products Journal 18 (1968) 3, 60-66
- | 19 | BACH, L.: Rheological Properties of Beech Wood in the Ammonia - Plasticized State. Materials Science and Engineering 15 (1974) 211-220
- | 20 | BACH, L.: Failure Perpendicular to the Grain in Wood Subjected to Sustained Bending Loads. Wood Science 7 (1975) 323-327
- | 21 | BACHMANN, G., HÄSSLER, W.: Das Verhalten von waagrechten tragenden Möbelbaugruppen bei Dauerstandbelastung. Holztechnologie 19 (1978) 44-48
- | 22 | BARRETT, J.D., FOSCHI, R.O.: On the Application of Brittle Fracture Theory, Fracture Mechanics and Creep-Rupture Models for the Prediction of the Reliability of Wood Structural Elements. Proceedings of the 1st International Conference on Wood Fracture in Banff/Alberta, August 1978. Forintek Can. Corp., Vancouver, B.C., Canada 1979
- | 23 | BARRETT, J.D., FOSCHI, R.O.: Duration of load and probability of failure in wood. Part I. Modelling creep rupture. Part II. Constant, ramp and cyclic loadings. Canadian Journal of Civil Engineering 5 (1978) 505-532
- | 24 | BARRETT, J.D., FOSCHI, R.O.: Reliability and the Implementation of Duration of Load Data. IUFRO Wood Engineering Group, Oxford/GB (1980).

- | 25 | BAUD, R.V.: Spannungs- und Sicherheitsverhältnisse beim Quellen bzw. Schrumpfen von Belägen. Schweizer Archiv 20 (1954) 313-319
- | 26 | BECKER, H.F., REITER, L.: Über den Einfluß von Temperatur und Holzfeuchtigkeit auf die Relaxation der Biegespannungen in Rotbuchenholz. Holz Roh-Werkstoff 28 (1970) 264-270
- | 27 | BECKER, H.F.: Messung der Schubmoduln von Vollholz mit akustischen Torsionsschwingungen. Holz Roh-Werkstoff 31 (1973) 207-210
- | 28 | BECKER, H.F.: Viskoelastische Eigenschaften von Buchenholz bei periodischer Biegebeanspruchung. Holz Roh-Werkstoff 38 (1980) 301-306
- | 29 | BETHE, E.: Untersuchung der Festigkeitseigenschaften von Bauholz bei Lagerung im Wechselklima unter gleichzeitiger mechanischer Beanspruchung. Dissertation TH München 1969
- | 30 | BHATNAGAR, N.S.: Kriechen von Holz bei Zugbeanspruchung in Faserrichtung. Holz Roh-Werkstoff 22 (1964) 296-299
- | 31 | BHATNAGAR, N.S., GUPTA, R.P.: On the Constitutive Equations of the Orthotropic Theory of Creep. Wood Science and Technology 1 (1967) 142-148
- | 32 | BHATNAGAR, N.S., GUPTA, S.K., GUPTA, R.P.: The Torsion of an Orthotropic Rod in the Theory of Creep. Wood Science and Technology 3 (1969) 167-174
- | 33 | BINDER, K., LIHL, F.: Langzeitiges Kriech- und Erholungsverhalten von Thermoplasten bei konstanter und intermittierender Zugbeanspruchung. Kunststoffe 65 (1975) 889-896
- | 34 | BLANKENHORN, P.R., KLINE, D.E., BEALL, F.C.: Dynamic Mechanical Behavior of Black Cherry. Wood and Fiber 4 (1973) 298-308
- | 35 | BLUMBERG, H., KRUMMHEUER, W., NEBE, J.: Zeitstandverhalten von PVC-beschichteten Polyamid 66- und Polyester-Geweben in Praxis- und Laborprüfungen. Kunststoffe 66 (1976) 97-103
- | 36 | BOEHME, C.: Verbesserung des Kriechverhaltens von Holzwerkstoffen durch GFK-Beplankung. Holz Roh-Werkstoff 34 (1976) 453-458
- | 37 | BOHANNAN, B.: Time-Dependent Characteristics of Prestressed Wood Beams. U.S.D.A. Forest Service Research Paper FPL 226 (1974)
- | 38 | BOOTH, L.G., REECE, P.O.: The Structural Use of Timber. A Commentary on the British Standard CP 112. E. & F.N. SPON LTD, LONDON, 1967

- [39] BRODEAU, A.: Contribution a l'Etude des Proprietes Rheologiques du Bois. Centre Technique du Bois (1962) 1-11
- [40] BRYAN, E.L.: Bending strength of Particle Board under Long-term Load. Forest Products Journal 10 (1960) 200-204
- [41] BRYAN, E.L., SCHNIEWIND, A.P.: Strength and Rheological Properties of Particleboard as affected by moisture content and sorption. Forest Products Journal 15 (1965) 143-148
- [42] BRYANT, P.A.V.: Some Notes on the Behaviour of Three Types of Timber Trusses under Rapidly Applied Loads. Paper presented at a meeting of the IUFRO Working Group on the Structural Utilization of Timber, 8-12 March 1971, Madison, Wisconsin, USA
- [43] BRYANT, P.A.V.: The structural analysis and behaviour of 16 nailed plywood gussed trusses with calibrated members. CSIRO Special Report Hout 69 (1973)
- [44] BRYNILDSEN, O.A.: Nordic Proposals for Safety Code for Structures and Loading Code for Design of Structures. CIB-Working Commission W 18, Paper 16 Paris, February 1975
- [45] BURGESS, H.J.: The Design of Simple Beams. CIB-Working Commission W 18, Paper 6, Paris (1975)
- [46] BYRD, L.: Effect of Relative Humidity Changes on Compressive Creep Response of Paper. TAPPI 55 (1972) No. 11
- [47] CARRÉ, J.: Contribution à l'étude du fluage des panneaux de particules en atmosphère sèche et humide. Laboratoire Forestier de l'Etat, Gembloux/Belgien, Rapport d'activité 1967, 108-149
- [48] CAVE, I.D.: Modelling Moisture-Related Mechanical Properties of Wood.
Part I: Properties of the Wood Constituents. Wood Science and Technology 12 (1978) 75-86
Part II: Computation of Properties of a Model of Wood and Comparison with Experimental Data. Wood Science and Technology 12 (1978) 127-139
- [49] CHAN, W.W.L.: The Structural Use of Tempered Hardboard. CIB-Working Commission W 18, Perth/Scotland, June 1978
- [50] CHAN, W.W.L.: Strength Properties and Structural Use of Tempered Hardboard. Journal of the Institute of Wood Science 8 (1979) 4, 147-160
- [51] CHEN, M.M.: A Proposed Explanation for the Phenomenological Rheology of Prefrozen Redwood. Wood Science 7 (1974) 34-42

- | 52 | CHOW, P. : The Deflection of Composite Furniture Panels Under Constant Bending Stress. Forest Products Journal 20 (1970) 44-51
- | 53 | CHOW, S. : Molecular Rheology of Coniferous Wood Tissues. Transactions of the Society of Rheology 17 (1973) 109-128
- | 54 | CHOW, P., HANSON, R.C.: Effects of Load Level, Core Density and Shelling Ratio on Creep Behavior of Hard-board Composites. Wood and Fiber 11 (1979) 1, 57-65
- | 55 | CIB-W 18 : Structural Timber Design Code. Draft 5, August 1980
- | 56 | CIZEK, L.: Dauerfestigkeit und rheologische Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen. Holz Roh-Werkstoff 19 (1961) 83-85
- | 57 | CIZEK, L.: Zum rheologischen Verhalten von Biegebalken bei Dauerbelastung. Die Bautechnik 2 (1963) 56-59
- | 58 | CIZEK, L.: Einfluß der Feuchtigkeit auf das rheologische Verhalten des Holzes. Holz Roh-Werkstoff 26 (1968) 11, 416-417
- | 59 | CIZEK, L.: Über das rheologische Verhalten von Fachwerkträgern mit Nagelplatten-Verbindungen in den Knotenpunkten. Holztechnologie 10 (1969) 270-272
- | 60 | CLAD, W., SCHMIDT-HELLERAU, CH.: Zeitstandversuche mit Spanplatten. Holz Roh-Werkstoff 39 (1981), 217-222 und 241-248
- | 61 | CLOUSER, W.S.: Creep of small Wood Beams under constant Bending Load. U.S. Department of Agriculture, Forest Service Report No. 2150, Sept. 1959
- | 62 | CORDES, R.: Statistische Untersuchung von Meßfehlern zur Beurteilung der Verformungsansätze beim klassischen Standversuch. Bauingenieur 53 (1978) 139-146
- | 63 | COUSINS, W.J.: Effects of Strain-Rate on the Transverse Strength of Pinus Radiata Wood. Wood Science and Technology 8 (1974) 307-321
- | 64 | COUSINS, W.J.: Young's Modulus of Hemicellulose as Related to Moisture Content. Wood Science and Technology 12 (1978) 161-167
- | 65 | CURRY, W.T.: Draft for Revision of CP 112 "The Structural Use of Timber". CIB-Working Commission W 18, Paper 22, Paris (1975)
- | 66 | CURTU, I., PARASCHIV, N., FLEISCHER, H.: Die Verformung druckbeanspruchten Eschenholzes in Abhängigkeit von der Probengröße. Holz Roh-Werkstoff 27 (1969) 49-54

- [67] DAVIDSON, R.W.: The Influence of Temperature on Creep in Wood. Forest Products Journal 12 (1962) 8, 377-381
- [68] DINWOODIE, J.M.: Failure in Timber. Part 1. Microscopic Changes in Cell-Wall Structure associated with Compression Failure. Journal of the Institute of Wood Science 4 (1968) 3, 37-53
- [69] DINWOODIE, J.M., PAXTON, B.H., PIERCE, C.B.: Creep in Chipboard. Part 3: Initial Assessment of the Influence of Moisture Content and Level of Stressing on Rate of Creep and Time to Failure. Wood Science and Technology 15 (1981) 125-144
- [70] DOMKE, H.: Zur Bemessung tragender Konstruktionen aus Kunststoffen. Plasticsconstruction 5 (1975) 195-202
- [71] DOMKE, H., RÜBBEN, A.: Einfluß des tatsächlichen Lastablaufes auf Kriechverhalten und Festigkeit von Kunststoff-Konstruktionen. Plasticsconstruction 6 (1976) 173-180
- [72] DOMKE, H., RÜBBEN, A., FIX, W.: Einfluß des wirklichen Temperaturablaufes auf Kriechverhalten und Festigkeit von tragenden Kunststoffen. Plasticsconstruction 7 (1977) 52-57
- [73] DOMKE, H.: Struktur-rheologisches Modell zur Beschreibung des Festigkeits-, Verformungs- und Bruchverhaltens von Kunststoffen. Plasticsconstruction 7 (1977) 104-107
- [74] DOMKE, H., RÜBBEN, A.: Allgemeines Berechnungsverfahren für tragende Kunststoffkonstruktionen aus GF-UP-Mattenlaminaten. Bauingenieur 52 (1977) 205-210
- [75] DOMKE, H.: Quantitative Erfassung der Festigkeits- und Verformungsphänomene tragender Kunststoffe. Bauingenieur 55 (1980) 15-18
- [76] DOMKE, H., RÜBBEN, A.: Kunststoffbau/Bemessung, Konstruktion, Langzeitverhalten. Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin (1981)
- [77] DONG, C.C., HOYLE, J., Jr.: Elastomeric Adhesive Properties - Shear, Strength, Shear Modulus, Creep and Recovery. Wood and Fiber 8 (1976) 2, 98-106
- [78] ECHENIQUE-MANRIQUE, R.: Stress Relaxation of Wood at Several Levels of Strain. Wood Science and Technology 3 (1969) 49-73

- [79] EHLBECK, J.: Nailed Joints in Wood Structures. Virginia Polytechnic Institute and State University/Wood Research and Wood Construction Laboratory, Blacksburg/Virginia/USA, Nr. 166 (1979)
- [80] EHRENSTEIN, G.W.: Elastisches, Viskoelastisches und Viskoses Verformungsverhalten. VDI-Handbuch "Belastungsgrenze von Kunststoffbauteilen". (1975) 59-79
- [81] EHRENSTEIN, G.W.: Kriechen, Rest- und Zeitstandfestigkeit bei GF-UP. Kunststoffe 66 (1976) 5, 289-293
- [82] EHRENSTEIN, G.W.: Festigkeits- und Verformungsverhalten von Kunststoffen. KEM (1976) 50-57
- [83] EHRENSTEIN, G.W.: Das Kriechen von Thermoplasten. KEM (1977) 69-70, 75-78
- [84] EHRENSTEIN, G.W., SARABI, B.: Sammeln und Auswerten von langzeitigen Kriechkurven, Band 1+2; Forschungsbericht Nr. 0280, Institut für Werkstofftechnik/Univ. Kassel (1980)
- [85] EINSFELD, U.: Beurteilung von Kunststoffen vom Standpunkt der Bauaufsicht. Plasticsconstruction 3 (1973) 17-19
- [86] EINSFELD, U.: Bauteile aus Kunststoffen und ihre Beurteilung. Mitteilungen Institut für Bautechnik 5 (1974) 1, 10-13
- [87] ERICKSON, R.W., SAUER, D.J.: Flexural Creep Behavior of Redwood Heartwood during Drying from the Green State. Forest Products Journal 19 (1969) 45-51
- [88] ERICKSON, R., CHEN, M.M., LEHTINEN, T.: The Effect of Unidirectional Diffusion and Prefreezing upon Flexural Creep in Redwood. Forest Products Journal 22 (1972) 10, 56-60
- [89] ERIKSSON, L., NOREN, B.: Der Einfluß von Feuchtigkeitsänderungen auf die Verformung von Holz bei Zug in Faserrichtung. Holz Roh-Werkstoff 23 (1965) 5, 201-209
- [90] ERIKSSON, L.: Versuchsbericht "Kriechen". 17. Sitzung der Techn. Kommission der FESYP, Brüssel (1967)
- [91] ERIKSSON, L.: Kriechen; Bericht über fortlaufende Versuche am Schwedischen Holzforschungsinstitut. 20. Sitzung der Techn. Kommission der FESYP, Frankfurt (1968)
- [92] ETHINGTON, R.L., YOUNGS, R.L.: Das Rheologische Verhalten von Roteiche bei Beanspruchung quer zur Faserrichtung. Holz Roh-Werkstoff 23 (1965) 5, 196-201

- [93] ETH Zürich: Einführung in die Norm SIA 164 (1981) Holzbau. Fortbildungskurs für Bauingenieure 7.-9.10.1981, Publikation Nr. 81-1
- [94] FELDBORG, TH., JOHANSEN, M.: Wood Trussed Rafter Design; Strength and Stiffness Tests on Joints; Long-term deflection of W-trussed Rafters. SBI-Rapport 118, Statens Byggeforskningsinstitut, Hørsholm, Dänemark, (1981)
- [95] FESYP- Untersuchung über das Kriechverhalten von Spanplatten. Giessen, Mai 1980
- [96] FINDLEY, W.N., PETERSON, D.B.: Prediction of Long-Time Creep with Ten-Year Creep Data on four Plastic Laminates. Proceedings, Am. Soc. Testing Mats., 58 (1958), 841-861
- [97] FOREST PRODUCTS RESEARCH LABORATORY: The Structural Properties of Hardboard. I. Plan of Experiments and Methods of Test. II. Shear Strength. III. Bending Strength. IV. The Effect of Duration of Load. V. Derivation of Basic Stresses. (1969) Princes Risborough, Aylesbury, Buckinghamshire, GB
- [98] FOSCHI, R.O., BARRETT, J.D.: Duration of Load Test Data Analysis. Paper prepared for the 1980 Meetings of the IUFRO Wood Engineering Group, Oxford, England
- [99] FOSCHI, R.O., BARRETT, J.D.: Duration of Load Experiments in Hemlock Lumber; A Progress Report. Paper prepared for the 1982 Meetings of the IUFRO Wood Engineering Group, Boras, Schweden
- [100] FOSCHI, R.O.: Reliability of Wood Structural Systems. Paper prepared for the 1982 Meetings of the IUFRO Wood Engineering Group, Boras, Schweden
- [101] FUJITA, S., TAKAHASHI, A.: Rheological Properties of Tropical Wood. II. On the Histological Effects in Mechanical Properties of Tropical Wood applied to Stress and Temperature during Drying. Journal of the Japan Wood Research Society 15 (1969) 7, 271-277
- [102] FUSHITANI, M.: Effect of Delignifying Treatment on Static Viscoelasticity of Wood. III. Temperature Dependence of Stress Relaxation in the Absolutely Dried Condition. IV. Strain Dependence of Stress Relaxation and Stress Dependence of Creep. J. Jap. Wood Res. Society 14 (1968) 160-171
- [103] FUSHITANI, M.: Effect of Heat-Treatment on Static Viscoelasticity of Wood. J. Jap. Wood Res. Society 14 (1968) 208-213

- | 104| GANOWICZ, R., KWIATKOWSKI, K.: Die Untersuchung des Kriechens mehrschichtiger Platten. Holztechnologie 15 (1974) 95-99
- | 105| GARDNER, R., GIBSON, E.J., LAIDLAW, R.A.: Effects of Organic Vapors on the Swelling of Wood and on its Deformation under Load. Forest Products Journal 17 (1967) 4, 50-51
- | 106| GERHARDS, C.C., BARRETT, J.D., MADSEN, B., STRICKLER, M.D., PELLERIN, R.: Proposed Studies of Time-Related Load Effects on Wood Materials. Forest Products Journal 26 (1976) 39-40
- | 107| GERHARDS, C.C.: Effect of Duration and Rate of Loading on Strength of Wood and Wood-Based Materials. USDA Forest Service Research Paper FPL 283, 1977
- | 108| GERHARDS, C.C.: Time-Related Effects of Loading on Wood Strength: A Linear Cumulative Damage Theory. Wood Science 11 (1979) 3, 139-143
- | 109| GIBSON : Creep of Wood: Role of Water and Effect of a Changing Moisture Content. Nature 206 (1965) 213-215
- | 110| GILLWALD, W., LUTHARDT, H.: Beitrag zur Dauerstandfestigkeit von Vollholz und Holzspanplatten. Holztechnologie 7 (1966) 25-29
- | 111| GILLWALD, W.: Untersuchungen über die Dauerfestigkeit von mehrschichtigen Spanplatten. Holz Roh-Werkstoff 24 (1966) 10, 445-449
- | 112| GLOS, P.: Duration of Load in Tension. Paper presented at the meeting of Subject Group 55.02 of IUFRO Division 5 held in Oxford, UK, April 1980
- | 113| GNANAHARAN, R., HAYGREEN, J.: Comparison of the creep Behavior of a Basswood Waferboard to that of Solid Wood. Wood and Fiber 11 (1979) 3, 155-170
- | 114| GOLDSMITH, V., GROSSMAN, P.U.A.: The Effect of Frequency of Vibration on the viscoelastic Properties of Wood. J. Inst. Wood Sci. No. 18 (1967) 44-53
- | 115| GORING, D.A.I.: Treating Wood Components as Polymers. Trend (1966) 8, 3-22
- | 116| GRESSEL, P.: Untersuchungen über das Zeitstandbiegeverhalten von Holzwerkstoffen in Abhängigkeit von Klima und Belastung. Dissertation Universität Hamburg 1971
- | 117| GRESSEL, P.: Prüfung und Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Spanplatten-Verleimungen. Ein Beitrag zur Aufstellung klebstoffunabhängiger Prüfrichtlinien. Holz Roh-Werkstoff 37 (1979) 17-35, 61-71 und 38 (1980) 109-113

- [118] GRESSEL, P.: Kriechverhalten von Holz und Holzwerkstoffen - Auswirkungen auf den Formänderungsnachweis. Ingenieurholzbau in Forschung und Praxis. Bruder-Verlag Karlsruhe 1982, 55-66
- [119] GROSSMAN, P.U.A., ARMSTRONG, L.D., KINGSTON, R.S.T.: An Assesment of Research in Wood Rheology. Wood Science and Technology 3 (1969) 324-328
- [120] GROSSMAN, P.U.A.: Use of Leicester's "Rheological Model for Mechano-Sorptive Deflections of Beams". Wood Science and Technology 5 (1971) 232-235
- [121] GROSSMAN, P.U.A.: Requirements for a Model that Exhibits Mechano-Sorptive Behaviour. Wood Science and Technology 10 (1976) 163-168
- [122] HALL, H., HAYGREEN, J., NEISSE, B.: Creep of Particleboard and Plywood Floor Deck under Concentrated Loading. Forest Products Journal 27 (1977) 5, 23-32
- [123] HALL, H., HAYGREEN, J.: Flexural Creep of 5/8-Inch Particleboard and Plywood during 2 Years of Concentrated Loading. Forest Products Journal 28 (1978) 6, 19-22
- [124] HALLIGAN, A.F., SCHNIEWIND, A.P.: Effect of moisture on physical and creep properties of particleboard. Forest Products Journal 22 (1972) 4, 41-48
- [125] HAYGREEN, J., SAUER, D.: Prediction of Flexural Creep and Stress Rupture in Hardboard by Use of a Time-Temperature Relationship. Wood Science 1 (1969) 4, 241-249
- [126] HAYGREEN, J., HALL, H., YANG, K.N., SAWICKI, R.: Studies of Flexural Creep Behavior in Particleboard under changing humidity conditions. Wood and Fiber 7 (1974) 74-91
- [127] HEARMON, R.F.S., PATON, J.M.: Moisture Content Changes and Creep of Wood. Forest Products Journal 14 (1964) 357-359
- [128] HELINSKA-RACZKOWSKA, L., RACZKOWSKI, J.: Die mechanischen Eigenschaften von Holz, das unter Zugspannung längs zu den Fasern getrocknet wurde. Holztechnologie 18 (1977) 4, 201-204
- [129] HELINSKA-RACZKOWSKA, L., RACZKOWSKI, J.: Creep in Pine Wood subjected previously to atmospheric Corrosion in Contact with Rusting Iron. Holzforschung und Holzverwertung 30 (1978) 3, 51-54
- [130] HESHAN, R.A., VITELMO, V.B., KASPAR, J.W.: Einflüsse der Feuchte auf Schwinden und Kriechen von Beton. Beton und Stahlbeton 1 (1978) 18-23

- [131] HOYLE, R.J., Jr., ADAMS, R.D.: Load Duration Factors for Strand Wood, Plywood and Clear Wood. Proceedings of the ninth Particleboard Symposium, Washington State University, Pullman (1975) 83-107
- [132] HOYLE, R.J., Jr.: Designing Wood Structures Bonded with Elastomeric Adhesives. Forest Products Journal 26 (1976) 3, 28-34
- [133] HOYLE, R.J., Jr., HSU, J.K.: Shear Strength and Shear Modulus of an Elastomeric Adhesive Subject to Repeated Stress. Wood Science 11 (1978) 2, 65-68
- [134] HUNT, D.G.: Rupture Tests of Wood Chipboard under Long-Term Loading. Journal of the Institute of Wood Science 7 (1976) 3, 13-21
- [135] HUNT, D.G.: Data on the Elastic Properties of Formica Wood Chipboard. Report No. A.R.056 (1967) (vergl. Wood Science 2 (1970) 4, 212-220)
- [136] IVANOV, M.J.: Evaluation of Long-term Bearing Capacity of Wood Structures by their Performance under Short-term Loading. Proceedings of the 1st International Conference on Wood Fracture in Banff, Alberta, August 1978
- [137] IWASHITA, M.: Studies on Particleboard (XII), On the Evaluation of Adaptable Qualities for Furniture or Building Materials (1), The influence of overlay on creep properties of particleboard. Bulletin of the Government Forest Experiment Station, Tokyo, Nr. 263 (1974) 65-72
- [138] JENKINS, J.L., POLENSEK, A., BASTENDORFF, K.M.: Stiffness of Nailed Wall Joints under Short and Long Term Lateral Loads. Wood Science 11 (1979) 3, 145-154
- [139] JENTZEN, C.A.: The Effect of Stress Applied during Drying on some of the Properties of Individual Pulp Fibers. Tappi 47 (1964) 7, 412-418
- [140] JOHANNESSEN, S.: Langzeitbiegeversuche (hochkant) mit 13 mm feuchtebeständigen Spanplatten. 36. Sitzung der Techn. Kommission der FESYP, Frankfurt (1977)
- [141] KALINA, M.: Zerstörungsfreie Bestimmung der Dauerfestigkeit von Trägern aus dem rheologischen Verhalten unter Dauerlast. Holztechnologie 12 (1971) 4, 239-243
- [142] KALINA, M.: Rheologisches Verhalten und Dauerfestigkeit von Sperrholz, Spanplatten und harten Faserplatten. Holztechnologie 13 (1972) 3, 172-175
- [143] KALINA, M.: Rheologie von mit Stahl und glasfaserverstärktem, Plast armierten Trägern. Holztechnologie 14 (1973) 1, 29-33

- | 144| KALLSNER, B., NOREN, B.: Creep buckling of wood columns. STFI-meddelande serie A nr 518, Stockholm, September 1977
- | 145| KAUMANN, W.G.: On the Deformation and Setting of the Wood Cell Wall. Holz Roh-Werkstoff 24 (1966), 551-556
- | 146| KEITH, C.T.: The Anatomy of Compression Failure in Relation to Creep-Inducing Stresses. Wood Science 4 (1971) 2, 71-82
- | 147| KEITH, C.T.: The Mechanical Behavior of Wood in Longitudinal Compression. Wood Science 4 (1972) 4, 234-244
- | 148| KEITH, C.T.: Longitudinal Compressive Creep and Failure Development in White Spruce Compression Wood. Wood Science 7 (1974) 1, 1-12
- | 149| KELLOGG, R.M.: Effect of Repeated Loading on Tensile Properties of Wood. Forest Products Journal 10 (1960) 586-594
- | 150| KING, E.G., Jr.: Time-Dependent Strain Behavior of Wood. Forest Products Journal 11 (1961) 156-165
- | 151| KINGSTON, R.S.T., ARMSTRONG, L.D.: Creep in Initially Green Wooden Beams. Austr. J. appl. Sci. 2 (1951) 2, 306-325
- | 152| KINGSTON, R.S.T., BEVERLY, B.: Some Aspects of the Rheological Behaviour of Wood. Part IV: Non-Linear Behaviour at High Stresses in Bending and Compression. Wood Science and Technology 6 (1972) 230-238
- | 153| KIRBACH, E., BACH, L., WELLWOOD, R.W., WILSON, J.W.: On the Fractional Stress Relaxation of Coniferous Wood Tissues. Wood and Fiber 8 (1976) 2, 74-84
- | 154| KITAHARA, K., YUKAWA, K.: The Influence of the Change of Temperature on Creep in Bending. Journal of the Japan Wood Research Society 10 (1964) 169-175
- | 155| KITAHARA, K., PERNG, W.T.: On the Viscoelastic Property of Hardboard. Journal of the Japan Wood Research Society 15 (1969) 4, 154-159
- | 156| KOLLMANN, F.: Rheologie und Strukturfestigkeit von Holz. Holz Roh-Werkstoff 19 (1961) 3, 74-80
- | 157| KOLLMANN, F.: Über das rheologische Verhalten von Buchenholz verschiedener Feuchtigkeit bei Druckbeanspruchung längs der Faser. Materialprüfung 4 (1962) 9, 313-319
- | 158| KORZENIOWSKI, A.: Untersuchungen über die Vermessungsmöglichkeit der Dehnungen von Holz-Leimanordnungen mittels der in die Leimfuge eingeleimten Widerstands-Dehnungsmeßstreifen. Folia Forestalia Polonica, Serie B, 1965
- | 159| KOUSHOLT, K.: Design of a Duration-of-Load Experiment for Spruce Lumber Subjected to Bending. IUFRO Wood Engineering Group Meeting, Vancouver, Canada (1978) Paper 19

- [160] | KRATZ, W.: Untersuchungen über das Dauerbiegeverhalten von Holzspanplatten. Holz Roh-Werkstoff 27 (1969) 380-387
- [161] | KREIBICH, R.E., FREEMAN, H.G.: Testing adhesives for creep can provide data on adhesive systems which will help improve structural bondants. Adhesives Age, August 1965
- [162] | KUCERA, B.: Der Einfluß der Feuchtigkeit auf die rheologischen Eigenschaften des Holzes. Meldinger fra Norges Landbrukshogskole 49 (1969) 1-40
- [163] | KÜHNE, H.: Beitrag zur Theorie des mechanischen Formänderungsverhaltens von Holz. Holz Roh-Werkstoff 19 (1961) 81-82
- [164] | KÜHNE, G., NIEMZ, P.: Untersuchungen zum Einfluß der Plattenschichten auf das Kriechverhalten von Spanplatten. Holztechnologie 22 (1981) 1, 9-15
- [165] | KUFNER, M.: Änderung der Festigkeit und des Elastizitätsmoduls von Kiefernholz infolge Dauerbeanspruchung. Holz Roh-Werkstoff 27 (1969) 7, 261-270
- [166] | KUFNER, M.: Das Kriechen von Holzspanplatten bei lanzeitiger Biegebeanspruchung. Holz Roh-Werkstoff 28 (1970) 429-446
- [167] | KUIPERS, J.: Long Duration Tests on Timber Joints. Rapport 4-77-3, Onderzoek HD-16, Technische Hogeschool, Deift/Holland, März 1977
- [168] | KUTTIKRISHNAN, P., JAGADEESH, H.N., VICTOR, V.J., GEORGE, J.: Coefficient of Sustained Loading of Plywood for Structural Applications. Journal of Indian Academy Wood Science 4 (1973) 1, 38-46
- [169] | LANGENDORF, G.: Zu aktuellen Problemen der Möbelstatik. Holztechnologie 11 (1970) 4, 237-241
- [170] | LANGENDORF, G.: Beiträge zur Statik von Möbelkonstruktionen. Holztechnologie 18 (1977) 2, 94-99
- [171] | LARSEN, H.J., THEILGAARD, E.: Code Rules Concerning Strength and Loading Time. CIB-Working Commission W18/7-9-1 Stockholm, SWEDEN-February/March 1977
- [172] | LAWNICZAK, M.: Einfluß der Erwärmung von Rotbuche in Wasser auf das rheologische Verhalten bei zyklischer Belastung quer zur Faser. Holz Roh-Werkstoff 25 (1967) 1, 5-10
- [173] | LAWNICZAK, M.: Einfluß der Trocknungsbedingungen auf die Formänderungen wiederbefeuchteten Holzes bei Dauer-Biegebelastung. Holz Roh-Werkstoff 25 (1967) 8, 304-308
- [174] | LAWNICZAK, M.: Effect of Pine Wood Drying Condition on its Deformation under the Influence of Unilateral Variable Bending Stresses. Holzforschung und Holzverwertung 21 (1969) 3, 65-70

- [175] LAWNICZAK, M.: Der Temperatureinfluß auf einige rheologische Eigenschaften von modifiziertem Buchenholz. *Holzforschung und Holzverwertung* 23 (1971) 6, 107-110
- [176] LEHMANN, W.F., RAMAKER, T.J., HEFTY, F.V.: Creep Characteristics of Structural Panels. Proc. of the Ninth Washington State Univ. Symposium on Particleboard. (1975) 151-172
- [177] LEICESTER, R.H.: A Rheological Model for Mechano-sorptive Deflections of Beams. *Wood Science and Technology* 5 (1971) 211-220
- [178] LEICESTER, R.H.: Lateral Deflections of Timber Beam-columns during Drying. *Wood Science and Technology* 5 (1971) 221-231
- [179] LEICESTER, R.H., REARDON, G.F., SCHUSTER, K.B.: Toothed-Plate Connector Joints subjected to long Duration Loads. Proceedings of 19th Forest Products Research Conference, Melbourne, Australia, 12-16 November, 1979
- [180] LENGEL, R.: Dauerfestigkeit und rheologische Eigenschaften von Holzspanplatten für das Bauwesen (V100/V100G). Abschlußarbeit Fachhochschule Rosenheim WS 1970/71
- [181] LIPOVSZKY, G., RACZKOWSKI, J.: Creep and Stress Relaxation in Wood Modified with Polymethyl Methacrylate. *Holzforschung und Holzverwertung* 23 (1971) 27-32
- [182] LIPOVSZKY, G., RACZKOWSKI, J.: Stress Relaxation in Wood Periodically Reloaded to Attain Initial Stress. *Holzforschung* 25 (1971) 47-49
- [183] LOFTY, M., EL-OSTA, M., WELLWOOD, R.W.: Short-Term creep as related to Microfibril Angle. *Wood and Fiber* 4 (1972) 1, 26-32
- [184] LOFTY, M., EL-OSTA, M., WELLWOOD, R.W.: Short-Term creep as related to Cell-Wall Crystallinity. *Wood and Fiber* 4 (1972) 3, 204-211
- [185] LUNDGREN, A.: Holzfaserhartplatten als Konstruktionsmaterial - ein viskoelastischer Körper. *Holz Roh-Werkstoff* 15 (1957) 1, 19-23
- [186] LUNDGREN, S.A.: Wood-based sheet as a structural material. Part 1. Swedish Fibreboard Information 2.11, Stockholm, November 1969
- [187] LUNDGREN, A.: Zur Bestimmung des Kriechens durch langfristige Belastungen. 36. Sitzung der Techn. Kommission der FESYP, Frankfurt (1977)
- [188] LYON, D.E., SCHNIEWIND, A.P.: Prediction of Creep in Plywood. Part 1. Prediction Models for Creep in Plywood. *Wood and Fiber* 10 (1978) 28-38

- [189] LYON, D.E., BARNES, H.M.: Time-Dependent Properties of Particleboard Decking in Flexure. Forest Products Journal 28 (1978) 12, 28-32
- [190] MADSEN, B.: An Engineering Approach to Estimating the 5th Percentile Levels for Structural Properties of Wood. Univers. British Columbia, Departm. Civ. Eng., Vancouver B.C., Struct. Res. Series, Report No. 8, November 1972
- [191] MADSEN, B.: Duration of Load Tests for Dry Lumber in Bending. Forest Products Journal 23 (1973) 2, 21-28
- [192] MADSEN, B.: Time-Strength Relationship for constantly loaded 2 x 6 Douglas Fir Joists. Univers. British Columbia, Departm. Civ. Eng., Report 12, February 1974
- [193] MADSEN, B.: Structural Wood and "Limit States Design". Univers. British Columbia, Departm. Civ. Eng., Report 10, January 1975
- [194] MADSEN, B.: Moisture Content-Strength Relationship for Lumber Subjected to Bending. Univers. British Columbia Departm. Civ. Eng., Report No. 11, January 1975.
- [195] MADSEN, B., BARRETT, J.D.: Duration of Load. Forest Products Journal 26 (1975) 2, 57
- [196] MADSEN, B.: Duration of Load Test for Wet Lumber in Bending. Forest Products Journal 25 (1975) 5, 33-40
- [197] MADSEN, B.: Duration of Load Tests for Wood in Tension Perpendicular to Grain. Forest Products Journal 25 (1975) 8, 48-53
- [198] MADSEN, B.: Duration of Load Tests for Dry Lumber Subjected to Shear. Forest Products Journal 25 (1975) 10, 44-52
- [199] MADSEN, B., BARRETT, J.D.: Time-Strength Relationship for Lumber. Univers. British Columbia, Departm. Civ. Eng., Report 13, April 1976
- [200] MADSEN, B.: In-Grade Testing - Problem Analysis. Forest Products Journal 28 (1978) 4, 42-50
- [201] MAIER, G.: In "Neuere Karlsruher Forschungsarbeiten und Versuche im Ingenieurholzbau". Bauen mit Holz, Heft 6, 1972
- [202] MARIN, J., PAO, Y., CUFF, G.: Creep properties of Lucite and Plexiglas for Tension, Compression, Bending and Torsion. Transactions of the ASME, 1951, 705-719
- [203] MARTIN, J.W.: The Analysis of Life Data for Wood in the Bending Mode. Wood Science and Technology 14 (1980) 187-206

- |204| MARUSCIAC, D.: Experimental Studies for Determining the actual Distribution of normal Unit Stresses in the case of lamellated glued wooden Elements subjected to Bending. IUFRO 1976 Paper 26
- |205| MAYO, A.P.: Long-term performance tests on trussed rafters. Building Research Establishment Current Paper CP 1/80, February 1980
- |206| MC NATT, J.D.: Design Stresses for Hardboard - Effect of Rate, Duration, and Repeated Loading. Forest Products Journal 20 (1970) 1, 53-60
- |207| MC NATT, J.D.: Effect of Rate of Loading and Duration of Load on Properties of Particleboard. U.S.D.A. Forest Service Research Paper FPL 270, 1975
- |208| MC NATT, J.D., WERREN, F.: Fatigue Properties of Three Particleboards in Tension and Interlaminar Shear. Forest Products Journal 26 (1976) 5, 45-48
- |209| MC NATT, J.D.: Stress-Rupture of Particleboard in Interlaminar Shear. Forest Products Journal 28 (1978) 9, 34-36
- |210| MC NATT, J.D., KANVIK, K.J., SUPERFESKY, M.J.: Stacking Method for Long-Term Concentrated Load Testing of Floor Panels. Forest Products Journal 30 (1980) 9, 47-48
- |211| MC NATT, J.D.: Hardboard-Webbed Beams: Research and Application. Forest Products Journal 30 (1980) 10, 57-63
- |212| MEIERHOFER, U.A.: Zeitabhängige Verformungen von Holzbauteilen unter mechanischer und klimatischer Beanspruchung. Schweizerische Bauzeitung 94 (1976) 25, 348-351
- |213| MELDT, R.: Thermoplastische Kunststoffe bei intermittierender Zugbeanspruchung. VDI-Z 115 (1973) 1, 33-38
- |214| MENGES, G., TAPROGGE, R.: Denken in Verformungen erleichtert das Dimensionieren von Kunststoffteilen, Teil 1 + 2. VDI-Z 112 (1970) 6, 341-412, 627-629
- |215| MENGES, G.: Erleichtertes Verständnis des Werkstoffverhaltens bei verformungsbezogener Betrachtungsweise. Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften Reihe 5, Nr. 12 (1971)
- |216| MENGES, G., TAPROGGE, R.: Kunststoff-Konstruktionen, Rechenbeispiele. VDI Taschenbücher T 38, März 1974
- |217| MENGES, G., RIESS, R.: Verarbeitungs- und Umgebungseinflüsse auf die kritische Dehnung von Kunststoffen. Kunststoffe 64 (1974) 2, 87-92

- | 218| MENGES, G., MEFFERT, B.: Einfluß der Deformationsgeschwindigkeit auf das mechanische Verhalten von glas-seidenmattenverstärkten Kunststoffen. Materialprüfung 18 (1976) 2, 46-51
- | 219| MENGES, G., OPFERMANN, J.: Restfestigkeiten mattenverstärkter UP-Harze. Kunststoffe 66 (1976) 12, 766-768
- | 220| MENGES, G., PÜTZ, D.: Der Einfluß korrosiver Flüssigkeiten auf das Verhalten glasfaserverstärkter ungesättigter Polyesterharze. Kunststoffe 66 (1976) 12, 798-801
- | 221| MENGES, G.: Mechanische Eigenschaften von unidirektional verstärktem GFK bei zyklischer und dynamischer Beanspruchung. Kurzbericht aus der Bauforschung Nr. 12/78-174; Juni 1978
- | 222| MILLER, D.G., BENICAK, J.: Relation of Creep to the Vibrational Properties of Wood. Forest Products Journal 17 (1967) 12, 36-39
- | 223| MILLER, D.G., GEORGE, P.: Effect of Stress Level on the creep of Eastern White Spruce in Bending. Wood Science 7 (1974) 1, 21-24
- | 224| MILLER, D.G., GEORGE, P.: A Method of Measuring Creep and Recovery Due to Flexural Loads of Short Duration. Wood Science 7 (1974) 2, 153-159
- | 225| MILLS, J.A.: P.V.A. wood glues and the creep phenomenon. Wood, July 1967, 46
- | 226| MIWA, Y., PRIMA, T., KITAHARA, K.: Creep of compound material using particle board as core. Wood Industrie 25 (1970) 7, 19-21
- | 227| MITSCHKE, H.: Beitrag zur Schnittkraftumlagerung am abschnittsweise hergestellten Durchlaufträger aus Spannbeton. Der Bauingenieur 42 (1967) 3, 98-100
- | 228| MÖHLER, K.: Beobachtungen bei Dauerversuchen mit Nagelverbindungen und Trägern mit Stegen aus Faserhartplatten. Holz Roh-Werkstoff 19 (1961), 118-121
- | 229| MÖHLER, K.: Versuche über das Dauerstandverhalten von Nagelverbindungen. Berichte aus der Bauforschung, Heft 47 (Holzbauversuche, III. Teil), Berlin 1966, 57-74
- | 230| MÖHLER, K., EHLBECK, J.: Versuche über das Dauerstandverhalten von Spanplatten und Furnierplatten bei Biegebeanspruchung. Holz Roh-Werkstoff 26 (1968), 118 - 124
- | 231| MÖHLER, K., MAIER, G.: Kriech- und Relaxations-Verhalten von lufttrockenem und nassem Fichtenholz bei Querdruckbeanspruchung. Holz Roh-Werkstoff 28 (1970) 14-20

- [232] MÖHLER, K., EHLBECK, J.: Einfluß der Schubverformung auf die Durchbiegung von zusammengesetzten Vollholzträgern und Trägern mit Sperrholzstegen. Berichte aus der Bauforschung, Heft 91 (Holzbau-Versuche, IV. Teil), Berlin 1973, 1-23
- [233] MÖHLER, K., EHLBECK, J.: Kurzzeit- und Dauerstandversuche zur Ermittlung der statischen und Dauerstandfestigkeit von Bau-Furnierplatten. Berichte aus der Bauforschung, Heft 92 (Holzbau-Versuche, V. Teil), Berlin 1974, 1-33
- [234] MORI, M., NORIMOTO, M., YAMADA, T.: A Consideration on Stress Relaxation of Wood Cell Wall. Wood Research 56 (1974) 33-48
- [235] MORI, M., FUSHITANI, M., KABURAGI, J.: Relation between Scattering of Time to Fracture and Loading Face in Bending Creep Fracture of Wood. Journal of the Japan Wood Research Society 21 (1975) 2, 51-61
- [236] MORIIZUMI, S., OKANO, T.: Viscoelasticity and Structure of Wood. IV. Behavior of crystal Lattice strain dependent on moisture content and Time. Journal of the Japan Wood Research Society 24 (1978) 1, 1-6
- [237] MUKUDAI, J., SAKAMOTO, S., KADITA, H., YATA, S.: Evaluating of Linear Viscoelastic Behavior of Wood. I. On Deflection of Plate Shear Test Specimen Being Subjected to Load Changing with Lapse of Time. Journal of the Japan Wood Research Society 24 (1978) 7, 447-454
- [238] MUKUDAI, J., SAKAMOTO, S.: Evaluating of Linear Viscoelastic Behavior of Wood. II. On Change of Load on Plate Shear Test Specimen Being Subjected to Deflection Changing with Lapse of Time. Journal of the Japan Wood Research Society 24 (1978) 9, 605-611
- [239] NARAYANAMURTI, D., ASWATHNARAYANA, B.S.: Über das Kriechverhalten von Werkstoffen aus Teakholz. Holztechnologie 11 (1970) 2, 116-119
- [240] NARAYANAMURTI, D.: Einfluß verschiedener Chemikalien auf das Kriechen und andere Eigenschaften des Holzes. Holztechnologie 11 (1970) 3, 161-167
- [241] NIELSEN, L.E.: Mechanical Properties of Polymers and Composites. Marcel Dekker, Inc. New York 1 (1974) 66-75 + 418-423 + 478-481
- [242] NIELSEN, L.F.: Kriechen und Relaxation des Betons. Beton- und Stahlbetonbau 11 (1970), 272-275
- [243] NIELSEN, L.F., KOUSHOLT, K.: Stress-Strength-Life Time Relationship for Wood. Wood Science 12 (1980) 3, 162-164

- | 244| NIEMZ, P.: Über einige Erkenntnisse zum Kriechverhalten von Holzpartikelwerkstoffen. Holztechnologie 20 (1979) 3, 131-136
- | 245| NIEMZ, P.: Prüfvorrichtung zur Ermittlung des Kriechverhaltens von Vollholz und Werkstoffen aus Holz bei Dauerstand-Biegebelastung. Holztechnologie 21 (1980) 1, 57-58
- | 246| NIEMZ, P.: Über einige Erkenntnisse zum Kriechverhalten von Vollholz. Holztechnologie 21 (1980) 4, 195-199
- | 247| NIEMZ, P.: Untersuchungen zum Wesen der Kriechverformung von Spanplatten. Holztechnologie 22 (1981) 4, 215-221
- | 248| NOACK, D., STÖCKMANN, V.: Untersuchungen über das Dauerschwingverhalten von Holz bei Zugbeanspruchung; Teil 1+2. Holz Roh-Werkstoff 26 (1968) 447-453, 27 (1969) 464-472
- | 249| NORDIC COMMITTEE FOR BUILDING REGULATIONS: Comments on the Loading Regulations. CIB Working Commission W 18, Paper 19 und 20, Paris, February 1975
- | 250| NOREN, B.: Zur Rheologie der Holzverbände. Holz Roh-Werkstoff 19 (1961), 93-99
- | 251| NOREN, B.: Definitions of Long Term Loading for the code of Practice. CIB Working Commission W 18, Paper 7, Delft, June 1974
- | 252| NOREN, B.: Long-Term Loading for the Code of Practice (Part 2). CIB Working Commission W 18, Paper 6-9-1, Aalborg, Denmark, June 1976
- | 253| NORIMOTO, M., MIYANO, H., YAMADA, T.: On the Torsional Creep of Hinoki Wood. Wood Research, Kyoto, 34 (1965) 37-44
- | 254| NORIMOTO, M., YAMADA, T.: The effect of relative humidity on the stress relaxation of Hinoki wood. Wood Research, Kyoto, 35 (1965) 44-50
- | 255| NORIMOTO, M., YAMADA, T.: Dynamic Torsional Viscoelasticity of Wood. Wood Research, Kyoto, 38 (1966) 32-39
- | 256| NOZYNSKI, W.: Tests on Laminated Beams from Hardboard under Short and Long-Term Load. CIB Working Commission W 18, Wien, März 1979
- | 257| NWOKOYE, D.N.: An Investigation into an ultimate beam theory for rectangular timber beams-solid and laminated. Timber Research and Development Association, Buckinghamshire, Research Report E/RR/34, April 1972
- | 258| OERTEL, J.: Untersuchungen über Kriechverhalten, Spannungsrelaxation und Quellungsdruckspannung an Holzspanplatten. Holztechnologie 8 (1967) 2, 119-125

- |259| OERTEL, J.: Vergleichende Untersuchungen an Holzspan- und harten Faserplatten. Holztechnologie 9 (1968) 3, 153-159
- |260| OHGAMA, T., YAMADA, T.: Porous Structure of Wood and its Relaxation Modulus, II. Wood Research, Kyoto, 56 (1974) 28-32
- |261| OKUSA, K., HAYASHI, S.: Shrinking and Swelling of Wood under Stress. I. Compressive Stress. Journal of the Japan Wood Research Society 2 (1956) 1, 5-7
- |262| OKUYAMA, T.: Effect of Strain Rate on Mechanical Properties of Wood. IV. Journal of the Japan Wood Research Society 20 (1974) 5, 210-216
- |263| PEARSON, R.G.: The Effect of Duration of Load on the Bending Strength of Wood. Holzforschung 26 (1972) 4, 153-157
- |264| PENTONEY, R.E., DAVIDSON, R.W.: Rheology and the Study of Wood. Forest Products Journal 12 (1962) 243-248
- |265| PENTONEY, R.E.: Time-Dependent Mechanical Properties of Wood. Conference on the mechanical behavior of wood, Berkeley Proceedings 1963
- |266| PERKINS, R.W.: Concerning the Mechanics of Wood Deformation. Forest Products Journal 17 (1967) 3, 55-67
- |267| PERKINS, R.W.: Mechanics of Wood Deformation: Strength and Plastic Behavior of Wood. Forest Products Journal 17 (1967) 4, 57-68
- |268| PERKINS, R.W.: Concerning the Mechanics of Wood Deformation: Geometrical Models. Forest Products Journal 17 (1967) 5, 59-69
- |269| PERKITNY, T.: Über Wechselbeziehungen zwischen Sorption, Desorption und Rheologie von Holz. Holz Roh-Werkstoff 23 (1965) 5, 173-182
- |270| PERKITNY, T., PERKITNY, J.: Vergleichende Untersuchungen über die Verformungen von Holz, Span- und Faserplatten bei langdauernder konstanter Biegebelastung. Holztechnologie 7 (1966) 4, 265-270
- |271| PERKITNY, T., GARCZYNSKI, R.: Vergleichende Untersuchungen über die Verformungen von Holz, Span- und Faserplatten bei langdauernder Wechselbiegebelastung. Holztechnologie 10 (1969) 4, 236-240
- |272| PERKITNY, T., STELLER, S.: Vergleichende Untersuchungen über die Verformungen von Sperr- und Schichtholz bei konstanter und variabler Dauerbiegebelastung. Holztechnologie 13 (1972) 1, 43-49
- |273| PERKITNY, T., HOFFMANN, Z.: Zur Relaxation von Holz nach verschieden langer, konstanter Durchbiegung. Holz Roh-Werkstoff 34 (1976) 167-170

- [274] PFEFFERLE, R.: Das Kriechen des Betons, eine kritisch gedämpfte Schwingung. Beton- und Stahlbetonbau 74 (1979) 12, 296-301
- [275] PIERCE, C.B., DINWOODIE, J.M.: Creep in Chipboard. Part 1: Fitting 3- and 4-Element Response Curves to Creep Data. Journal of Materials Science 12 (1977) 1955-1960
- [276] PIERCE, C.B., DINWOODIE, J.M.: Creep in Chipboard. Part 2: The use of fitted response curves for comparative and predictive purposes. Wood Science and Technology 13 (1979) 4, 265-282
- [277] PINTUS, L.V., POTASEV, O.E., FISMAN, G.M.: Methode zur schnellen Bestimmung des Dauerstandverhaltens waagrechter tragender Möbelbauteile. Holztechnologie 21 (1980) 4, 243-244
- [278] PLÄHN, J.: Über die Spannungsumlagerungen des ausmittig gedrückten, kurzen, geraden Stabes infolge nicht-linearen Werkstoffkriechens. Mitt. aus dem Institut für Materialprüfung und Forschung des Bauwesens der TH Hannover, Heft 9, Eigenverlag 1967
- [279] PLATH, E.: Zur Mechanik von Biegeproben. Holz Roh-Werkstoff 24 (1966) 486-489
- [280] POTTER, R.T.: Repeated Loading and creep effects in shear property measurements on unidirectional cfrp. Composites. November 1974, 261-265
- [281] POZGAJ, A.: Verformung von Holz bei Dauerstand-Biegebelastung im Außenklima. Holztechnologie 23 (1982) 1, 36-40
- [282] RABIEJ, R.: Untersuchungen zur Verformung geklebter Rahmen-eckverbindungen bei Dauerbelastung. Holztechnologie 20 (1979) 2, 91-96
- [283] RACZKOWSKI, J.: Der Einfluß von Feuchtigkeitsänderungen auf das Kriechverhalten des Holzes. Holz Roh-Werkstoff 27 (1969) 6, 232-236
- [284a] RANTA-MAUNUS, A.: Viscoelasticity of Plywood under constant climatic Conditions. Technical Research Centre of Finland, Publication 3, Helsinki 1972
- [284b] RANTA-MAUNUS, A.: A theory for the creep of wood with application to birch and spruce plywood, Technical Research Centre of Finland, Publication 4, Helsinki 1973
- [285] RANTA-MAUNUS, A.: The Viscoelasticity of Wood and Varying Moisture Content. Wood Science and Technology 9 (1975) 189-205
- [286] RANTA-MAUNUS, A.: A study of the creep of plywood. Technical Research Centre of Finland, Structural mechanics laboratory, report 5, Espoo, August 1976

- [287] REGEL, V.R.: Mechanical Models of Polymers containing Break-down Elements. *Vysokomol. Soyed.* 6 (1964) 3, 395-399
- [288] REINHARDT, H.W.: Zur Beschreibung des rheologischen Verhaltens von Holz. *Holz Roh-Werkstoff* 31 (1973) 352-355
- [289] ROCENS, K.: Die rheologischen Eigenschaften von mit Ammoniak plastifiziertem Holz. *Holztechnologie* 17, (1976) 1, 40-45
- [290] RONAI, F.: Untersuchungen zum Deformationsverhalten von Holzkonstruktionen bei Dauerbelastung. *Holztechnologie* 20 (1979) 2, 96-98
- [291] ROSE, G.: Das mechanische Verhalten des Kiefernholzes bei dynamischer Dauerbeanspruchung in Abhängigkeit von Belastungsart, Belastungsgröße, Feuchtigkeit und Temperatur. *Holz Roh-Werkstoff* 23 (1965) 7, 271-284
- [292] ROSTÁSY, F.S., TEICHEN, K.Th., ENGELKE, H.: Beitrag zur Klärung des Zusammenhanges von Kriechen und Relaxation bei Normalbeton. Otto-Graf-Institut, Schriftenreihe Heft 57, Stuttgart 1973
- [293] ROBBEN, A.: Versuchsmäßige Überprüfung der Begriffe Kriechlast und Restfestigkeit von Kunststoff-Konstruktionen nach theoretischen Voraussagen. *Bauingenieur* 55 (1980) 69-72
- [294] RUSTEN, A., SACK, R.L., MOLNAU, M.: Snow Load Analysis for Structures. *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 106, ST 1 (1980), 11-21
- [295] RYBARCZYK, W., WOJCIECHOWSKI, Z.: Predicting the Effect of Face-Veneering on Mechanical Properties of Furniture Panels. *Prace Instytutu Technologii Drewna* 25 (1978) 49-77
- [296] SADOH, T., URAKAMI, H.: Rheological properties of wood treated with polyethylene glycol. I. Comparison between the rheological properties of PEG-treated wood and of water-sorbed wood. *Journal of the Japan Wood Research Society* 13 (1967) 323-330
- [297] SADOH, T., KATO, R., MURAOKA, S.: Viscoelastic Properties of Wood in Swelling Systems. I. Viscoelastic Properties of Wood Swollen with Formamide. *Journal of the Japan Wood Research Society* 19 (1973) 5, 233-239
- [298] SADOH, T., OHGOSHI, M.: Viscoelastic Properties of Wood in Swelling Systems. II. Viscoelastic Properties of Wood Swollen with Ethylene Glycol and Polyethylene Glycols. *Journal of the Japan Wood Research Society* 20 (1974) 2, 177-181

- [299] SADOH, T., KIMURA, Y.: Changes in Hygrostress of Wood under Torsional Deformation. Journal of the Japan Wood Research Society 21 (1975) 7, 430-433
- [300] SAUER, D.J., HAYGREEN, J.G.: Effects of Sorption on the Flexural Creep Behavior of Hardboard. Forest Products Journal 18 (1968) 10, 57-63
- [301] SAWABE, O.: Studies on the Thermal Softening of Wood. III. Effects of the Temperature on the Bending Creep of Dry Hinoki Wood. Journal of the Japan Wood Research Society 20 (1974) 11, 517-522
- [302] SCHAFFER, E.L.: Modeling the Creep of Wood in a Changing Moisture Environment. Wood and Fiber 3 (1972) 4, 232-235
- [303] SCHAFFER, E.L.: Temperature-Time Dependency of Longitudinal Mechanical Behavior of Dry Douglas-Fir. From "General Constitutive Relations for Wood and Wood-Based Materials", Report of a Workshop July 1978, Syracuse University (1980) 234-278
- [304] SCHNIEWIND, A.P.: Über den Einfluß von Feuchtigkeitsänderungen auf das Kriechen von Buchenholz quer zur Faser unter Berücksichtigung von Temperatur und Temperaturänderungen. Holz Roh-Werkstoff 24 (1966) 87-98
- [305] SCHNIEWIND, A.P.: Creep-Rupture Life of Douglas-Fir under Cyclic Environmental Conditions. Wood Science and Technology 1 (1967) 278-288
- [306] SCHNIEWIND, A.P.: Recent Progress in the Study of the Rheology of Wood. Wood Science and Technology 2 (1968) 188-206
- [307] SCHNIEWIND, A.P., BARRETT, J.D.: Wood as Linear Orthotropic Viscoelastic Material. Wood Science and Technology 6 (1972) 43-57
- [308] 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 Cracks Propagating Parallel to Grain. Wood and Fiber 5 (1973) 2, 152-159
- [309] SCHNIEWIND, A.P., LYON, D.E.: Further Experiments on Creep-Rupture Life under Cyclic Environmental Conditions. Wood and Fiber 5 (1973) 4, 334-341
- [310] SCHNIEWIND, A.P.: Fracture Toughness and Duration of Load Factor. II. Duration Factor for Cracks Propagating Perpendicular to Grain. Wood and Fiber 9 (1977) 3, 216-226

- [311] SCHNIEWIND, A.P.: A Seven Year Tale: Or how Boards have Breakdowns from everyday Pressure. Univ. of California, Forest Products Laboratory. Proceedings of the 1st International Conference on Wood Fracture in Banff/Alberta, August 1978. Forintek Can. Corp., Vancouver, B.C., Canada 1979
- [312] SCHREYER, G.: Konstruieren mit Kunststoffen. Teil 1 und 2, Carl Hauser Verlag, München 1972
- [313] SCHUBERT, P., vom BERG, W.: Rückkriechversuche an Mauerwerk. Die Bautechnik 58 (1981) 9, 289-295
- [314] SEKHAR, A.C., SHUKLA, N.K.: Creep of Wood Beams under Central Load and its Effect on Basic Strength. Journal of the National Buildings Organisation, New Dehli, 11 (1966) 2, 14-18
- [315] SEKHAR, A.C.: A note on fundamental Mechanics relating to Wood and Wood-Laminates. Journal of the Indian Academy Wood Science 1 (1970) 1, 23-28
- [316] SELL, J., FOLPRECHT, J.: Raster-elektronenmikroskopische Untersuchungen von Bruchflächen organischer Werkstoffe. Material und Technik (1973) 4, 180-185
- [317] SENFT, J.F., SUDDARTH, S.K.: An Analysis of creep-inducing stress in sitka spruce. Wood and Fiber 2 (1971) 4, 321-327
- [318] SLIKER, A., RADCLIFFE, B.: Deflection and Creep Characteristics of Trussed Rafters with Metal Plate Fasteners. Forest Products Journal 15 (1965) 11, 473-479
- [319] SLIKER, A.: Resistance Strain Gages and Adhesives for Wood. Forest Products Journal 21 (1971) 12, 40-43
- [320] SLIKER, A.: Strain as a Function of Stress, Stress Rate, and Time at 90° to the Grain in Sugar Pine. Wood Science 10 (1978) 4, 208-219
- [321] SMITH, F.W., PENNEY, D.T.: Fracture Mechanics Analysis of Butt Joints in Laminated Wood Beams. Wood Science 12 (1980) 4, 227-235
- [322] SOLTIS, L.A.: Stress Distribution Due to Negative Moment over Block Supports in a Three-Span Continuous Wood Laminated Beam. U.S.D.A. Forest Service Research Note FPL-060 September 1964
- [323] SPÄTH, W.: Zum Zeitstandverhalten von Metallklebverbindungen. Adhäsion (1973) 10, 348-358
- [324] SPIEGELBERG, H.L.: The Effect of Hemicelluloses on the Mechanical Properties of Individual Pulp Fibers. Tappi 49 (1966) 9, 388-396
- [325] STAFF, C.E., QUACKENBOS, H.M., HILL, J.M.: Long-Time Tension and Creep Tests of Plastics. Modern Plastics (1950) 93-100, 144-145

- [326] STAMM, A.J., SMITH, W.E.: Laminar Sorption and Swelling Theory for Wood and Cellulose. Wood Science and Technology 3 (1969) 301-323
- [327] STELLER, S.: Einige rheologische Sperrholzeigenschaften, Teil I + II. Drevarsky Vyskum 18 (1973) 4, 235 - 250 und 19 (1974) 1, 29-38
- [328] STELLER, St.: Die Dauerfestigkeit von Sperrholz. Drevarsky Vyskum 22 (1977) 1, 107-116
- [329] STERR, R.: Untersuchungen zur Dauerfestigkeit von Schicht-holzbalken. Holz Roh-Werkstoff 21(1963) 2, 47-61
- [330] STÖCKMANN, V.: Dauerschwingbeanspruchung von Hochpolymeren im Zugbereich auf der Grundlage der Spannungs-relaxation am Beispiel Holz. Dissertation Univ. Hamburg (1968)
- [331] STRICKLER, M.D., PELLERIN, R.F., MARTIN, J.W.: Duration of Load Characteristics of Structural Members in Bending and Tension. IUFRO (1976) Nr. 13, 1-53 Pullman, Washington
- [332] STUPNICKI, J.: Strukturmodell der Holzzelle zur Unter-suchung von Bruchvorgängen. Holztechnologie 11 (1970) 3, 168-176
- [333] STURM, R.G., DUMONT, C., HOWELL, F.M.: A Method of Ana-lyzing Creep Data. Journal of Applied Mechanics 3/4 (1936/1937) A 62-66
- [334] SUGIYAMA, H.: On the Effect of the Loading Time on the Strength Properties of Wood. Wood Science and Technology 1 (1967) 289-303
- [335] SUGIYAMA, H.: Theoretical Analysis of the Behavior of Bending Creep in Wooden Beams. Proceedings of the 1st International Conference on Wood Frac-ture in Banff/Alberta, August 1978. Forintek Can. Corp., Vancouver, B.C., Canada 1979
- [336] SUPERFESKY, M.J., RAMAKER, T.J.: Hardboard-Webbed I-Beams: Effects of Long-Term Loading and Loading Environment. U.S.D.A., Research Paper FPL 306 Forest Products Laboratory 1978
- [337] SUTULA, P.R., MOSLEMI, A.A.: Effects of Three Cyclic Con-stant Levels of Moisture Content on Creep Deflec-tion in Hardboard. Forest Products Journal 23 (1973) 3, 50-55
- [338] SZABO, T., IFJU, G.: Influence of Stress on Creep and Moisture Distribution in Wooden Beams under Sorption Conditions. Wood Science 2 (1970) 3, 159-167

- [339] TAKAHASHI, A., SCHNIEWIND, A.P.: Deformation and Drying Set during Cyclic Drying and Wetting under Tensile Loads. Journal of the Japan Wood Research Society 20 (1974) 1, 9-14
- [340] TAKEMURA, T.: Plastic Properties of Wood in Relation to the Non-Equilibrium States of Moisture Content. Memoirs of the College of Agriculture No. 88 (1966), 31-48
- [341] TAKEMURA, T.: Plastic Properties of Wood in Relation to the Non-Equilibrium States of Moisture Content (continued). Journal of the Japan Wood Research Society 13 (1967) 77-81 und 14 (1968) 400-410
- [342] TAPROGGE, R.: Untersuchungen zur Ermittlung zulässiger mechanischer Beanspruchungen thermoplastischer Kunststoffe bei statischer und schwingender Zug- und Biegebelastung. Kunststoff-Rundschau 15 (1968) 214-217, 268-272, 386-392, 497-501, 613-619
- [343] TELLMAN, S.J., KUTSCHA, D., SOPER, V.R.: Measurement of uniaxial Creep of selected Adhesives in Free Film Form. U.S.D.A. Forest Service Research Note FPL-0157, March 1967
- [344] TOMIN, M.: Influence of Wood Orthotropy on Basic Equations of Linear Fracture Mechanics. Drevarsky Vyskum 16 (1971) 4, 219-230
- [345] T.R.A.D.A.: Comparison of Codes and Safety Requirements for Timber Structures in E.E.C. Countries. CIB-Working Commission W18, Paper 15, Paris, February 1975
- [346] TROST, H.: Spannungs-Dehnungs-Gesetz eines viskoelastischen Festkörpers wie Beton und Folgerungen für Stabtragwerke aus Stahlbeton und Spannbeton. Beton Herstellung Verwendung 16 (1966) 6, 233-248
- [347] TROST, H.: Auswirkungen des Superpositionsprinzips auf Kriech- und Relaxationsprobleme bei Beton und Spannbeton. Beton- und Stahlbetonbau (1967) 230-238, 261-269
- [348] TYNE, J.R.: The Effect of Humidity Changes on the Deflections of Ply Web Beams. School of the Environment, Occasional Paper No. 3, Polytechnic of Central London, December 1978
- [349] UGOLEV, B.N.: General Laws of Wood Deformation and Rheological Properties of Hardwood. Wood Science and Technology 10 (1976) 169-181
- [350] URAKAMI, H., NAKATO, K.: The Effect of Temperature on Torsional Stress Relaxation of Wet Hinoki Wood. Journal of the Japan Wood Research Society 12 (1966) 118-123
- [351] URAKAMI, H., FUKUYAMA, M.: Stress Relaxation of Wood in Bending and in Torsion during Adsorption of Water Vapor. Journal of the Japan Wood Research Society 15 (1969) 2, 71-75

- | 352| VERMAAS, H.F.: Creep in Laminated Wooden Members.
South African Forestry Journal No. 89, 21-25
- | 353| MC VETTY, P.G.: The Interpretation of Creep Tests.
Proc. Amer. Soc. Test. Mater. 34 (1934) 105-122
- | 354| VICTOR, V.J.: Application of the Molecular Place-
Exchange Theory to the Cell Wall Rheology of
Wood. J. Ind. Acad. Wood Sci. 3 (1972) 1, 1-12
- | 355| WALSER, B.: Der Einfluß von langsamen Temperaturwechseln
auf das Kriechen: Literaturübersicht.
Material und Technik (1973) 4, 195-201
- | 356| WARREN, W.G.: Duration of Load Tests for Dry Lumber
in Bending: A Comment. Forest Products
Journal 23 (1973) 12, 45-46
- | 357| WARREN, W.G., MADSON, B.: Computer-Assisted Experimental
Design in Forest Products Research:
A Case Study Based on Testing the Duration-
of-Load Effect. Forest Products Journal 27
(1977) 3, 45-49
- | 358| WIEDEMANN, J., GLAHN, M.: Schrittweise Berechnung des
viskoelastischen Verhaltens von Bauteilen am
Beispiel eines Knickstabes und einer Klebever-
bindung. VDI-Verlag GmbH- Belastungsgrenzen
von Kunststoff-Bauteilen - 1975
- | 359| WIENECKE, N.: Schnee- und Windlasten bei Holzkonstruk-
tionen. Bauen mit Holz 10 (1981) 636-640
- | 360| WILKINSON, T.L.: Longtime Performance of trussed Rafters
with different connection Systems:
5-Year Evaluation. USDA Forest Service Research
Paper FPL 204, 1973
- | 361| WILLIAMS, E.J., KLOOT, N.H.: Stress-Strain Relationship-
a Mathematical Model. Australian Journal of
Applied Science 3 (1952) 1-13
- | 362| WOOD, L.W.: Relation of Strength of Wood to Duration of
Load. U.S.D.A. Forest Service FPL No. R 1916,
December 1951
- | 363| WOODFORD, D.A.: A Graphical Optimization Procedure for
Time-Temperature Rupture Parameters. Materials
Science and Engineering 15 (1974) 169-175
- | 364| WOODFORD, D.A.: Graphical Solution of a Simple Creep
Equation for IN-718. Materials Science and
Engineering 16 (1974) 75-78
- | 365| YAMADA, T., SUMIYA, K., KANAYA, N.: Rheo-optics of wood.
I. Variations of infrared Spectra with Creep
in Hinoki. Wood Research 38 (1966) 21-31
- | 366| YANG, C-F., HAYGREEN, J.G.: Predicting Flexural Creep
in Particleboard. Wood and Fiber 3 (1971) 3,
146-152
- | 367| YLINEN, A.: Zur Theorie der Dauerstandfestigkeit des Holzes.
Holz Roh-Werkstoff 15 (1957) 5, 213-215

- [368] YLINEN, A.: Über den Einfluß der Verformungsgeschwindigkeit auf die Bruchfestigkeit des Holzes. Holz Roh-Werkstoff 17 (1959) 6, 231-234
- [369] YLINEN, A.: Über die Bestimmung der zeitbedingten und elastischen Festigkeitseigenschaften des Holzes mit Hilfe eines allgemeinen nichtlinearen viskoelastischen rheologischen Modells. Holz Roh-Werkstoff 23 (1965) 5, 193-196
- [370] YOUNG, O.A., SERVICE, M.J.: Slow Viscous Flow and the Organization of the Cell Wall in Conifer Tracheids. Wood Science and Technology 5 (1971) 1-5
- [371] YOUNGQUIST, W.G.: Performance of Bonded Wire Strain Gages on Wood. U.S.D.A. Forest Service Report No. 2087, Aug. 1957
- [372] YOUNGS, R.L.: An Understanding of the Physical and Mechanical Properties of Wood. Forest Products Journal 11 (1961) 214-225
- [373] YOUNGS, R.L., HILBRAND, H.C.: Time-Related Flexural Behavior of Small Douglas-Fir Beams under Prolonged Loading. Forest Products Journal 13 (1963) 227-232
- [374] ZAHN, J.J.: Non-Linear Constitutive Relations for Wood. From "General Constitutive Relations for Wood and Wood-Based Materials", Report of a Workshop July 1978; Syracuse University 1980, 212-224
- [375] ZAKIC, B.D.: Inelastic Behavior of Wood Beam-Columns. Journal of the Structural Division (1975) No. ST2, Paper 11145, 417-435
- [376] ZAKIC, B.D.: Das Spannungsdiagramm im plastischen Bereich bei hölzernen Trägern, welche einer reinen Biegung unterworfen sind. Holzforschung und Holzverwertung 28 (1976) 5, 114-120

Nachtrag zur Literatur

- [377] ARIMA, T.: Recovery of Wood After Mechano-sorptive Deformation. II. Effects of drying conditions while clamped. Journal Jap. Wood Research Soc. 25 (1979) 7, 469-475
- [378] DORR, F.: Zusammenfassung der bisherigen Erkenntnisse über das Kriechen von Holz und Holzverbindungen. Berichte aus der Bauforschung Nr. 24 (1962) 61-71
- [379] KEYLWERTH, R., HÖFER, W.: Rheologische Untersuchungen an Leimfugen bei Querkzugbelastung. Holz Roh-Werkstoff 20 (1962) 91-105
- [380] KÜHNE, G., NIEMZ, P., ZANGOLIES, P.: Einfluß der Art der Deckschichtpartikeln auf das Kriechverhalten von Spanplatten bei Dauerstandbiegebelastung. Holzindustrie 34 (1981) 1, 20-22

- | 381| KUIPERS, J.: Langzeitversuche mit Holzverbindungen.
Bauen mit Holz(1983) 5, 296-300
- | 382| MEIERHOFER, U., SELL, J.: Physikalische Vorgänge in
wetterbeanspruchten Holzbauteilen.
Holz Roh-Werkstoff 37 (1979) 227-234, 447-454
- | 383| MURPHEY, W.K.: Cell Wall Crystallinity as a function of
Tensile Strain. Forest Prod. Jour. 13(1963) 4,
151-155
- | 384| NIEMZ, P.: Untersuchungen zum Einfluß der Struktur auf die
Eigenschaften von Spanplatten. Teil 1: Einfluß
von Partikelformat, Rohdichte, Festharzanteil
und Festparaffinanteil. Holztechnologie 23
(1982) 206-213
- | 385| STELLER, St.: Beitrag zur Problematik der Dauerfestigkeit
von Sperrholz. Holzindustrie 34 (1981) 2,
39-40
- | 386| HEIMESHOFF, B., FRITZSCHE, K.P.: Untersuchung des Langzeit-
verhaltens von Biegeträgern aus Brettschicht-
holz unter besonderer Berücksichtigung von
Störungen im Randbereich der Biegezugzone.
Kurzbericht aus der Bauforschung Nr. 1/83-11
(1983), 67-70
- | 387| ALFREY, T.: Mechanical Behavior of High Polymers.
New York, London 1948. Interscience Publ. Inc.
- | 388| CHOONG, E.T., FOGG, P.J.: Moisture Movement in six Wood
Species. For. Prod. J. 18 (1968) 5, 66-70
- | 389| HALFAR, W.: Determination of Deformation of Hardboard
under Long-Term Load in Changing Climate.
CIB-W18 Timber Structures, Wien 1979,
Papers 11-13-2 und 11-13-3
- | 390| KOSSATZ, G., KRATZ, W.: Das feuchtigkeitstechnische Ver-
halten von hölzernen Außenbauteilen in Theorie
und Praxis.
Holz Roh-Werkstoff 41 (1983) 27-31, 95-100
- | 391| NAKAI, T.: Bending Creep Test in Wood Based Material.
IUFRO-Meeting Wood Engineering Group,
Vancouver, 1978, 353-377
- | 392| ODQVIST, F.K.G., HULT, J.: Kriechfestigkeit metallischer
Werkstoffe. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/
Heidelberg 1962
- | 393| ROFFAEL, E., SCHNEIDER, A.: Zum Sorptionsverhalten von
Holzspanplatten (Teil 3).
Holz Roh-Werkstoff 38 (1980) 151-155
- | 394| HARBS, C.: Prüfbedingungen und Bewertungskriterien bei
Dauerstandprüfungen von Bauspanplatten.
Symposium für die Spanplattenindustrie;
Veranstalter: Mobil Oil AG; 10. Juni 1983

- 12 Anhang: Kriechkurven (Bilder 2 bis 66), in getrenntem Heft gebunden.