

# Ermittlung von Festigkeitskennwerten an alten Holzkonstruktionen

Dr.-Ing. Wolfgang Rug und Dipl.-Ing. Axel Seemann, Bauakademie der DDR, Institut für Industriebau

## Einleitung

1985 begann die DDR-Holzbauforschung mit der Arbeit an den Grundlagen für eine neue Generation von Holzbaustandards, die auf dem teilprobabilistischen Sicherheitskonzept basieren sollen. Damit wird der Forderung des entsprechenden Standards [19] entsprochen. Es wurde vereinbart, daß das neue Sicherheitskonzept in den 90er Jahren über eine bestimmte Zeit gleichberechtigt neben dem bisherigen Sicherheitskonzept [17, 18], das mit einem globalen Sicherheitsfaktor arbeitet, Gültigkeit hat. Damit kann eine schrittweise Einführung garantiert werden. Parallel dazu sollen Teile des Standardwerkes durch Vorschriften der Staatlichen Bauaufsicht in die Praxis eingeführt werden, um eine schnelle Wirksamkeit zu erreichen.

Das Standardprojekt umfaßt im wesentlichen drei Teile. Eine Übersicht, einschließlich der Ziele für eine Integration der Grund-

lagen in die gegenwärtige internationale Entwicklung, zeigt Tabelle 1.

Der erste Teil beinhaltet im wesentlichen die Grundlagen für die Berechnung, den Entwurf und die Montage neuer Konstruktionen. Der dritte Standardteil ist eine Ergänzung zum Teil 1 und soll die Bestimmungen für die Verwendung von Holzwerkstoffen und Konstruktionen aus diesen Materialien enthalten. Im gegenwärtigen Holzbaustandard [17, 18] ist der Einsatz von Holzwerkstoffen als Konstruktionsmaterial nicht vorgesehen.

Der Teil 2 beinhaltet die Regeln bzw. die methodischen Grundlagen für die Untersuchung des Bauzustandes und die Bestimmung der Tragfähigkeit und Stabilität von bestehenden Holzkonstruktionen.

Die Sicherheit und Zuverlässigkeit von vorhandenen Holzkonstruktionen ist u. a. abhängig von der Prüfung (Bestimmung) der Materialfestigkeit, der tatsächlichen Tragfähigkeit des Holzes und der Verbindungen, den historischen Prinzipien für die konstruktive Durchbildung der Konstruktion und der Verbindungen, dem Bauzustand und dem Grad der Zerstörung. Eine sorgfältige Analyse des Bauzustandes ist deshalb unerlässlich, um die die Sicherheit der vorhandenen Konstruktion beeinflussenden Faktoren zu erkennen.

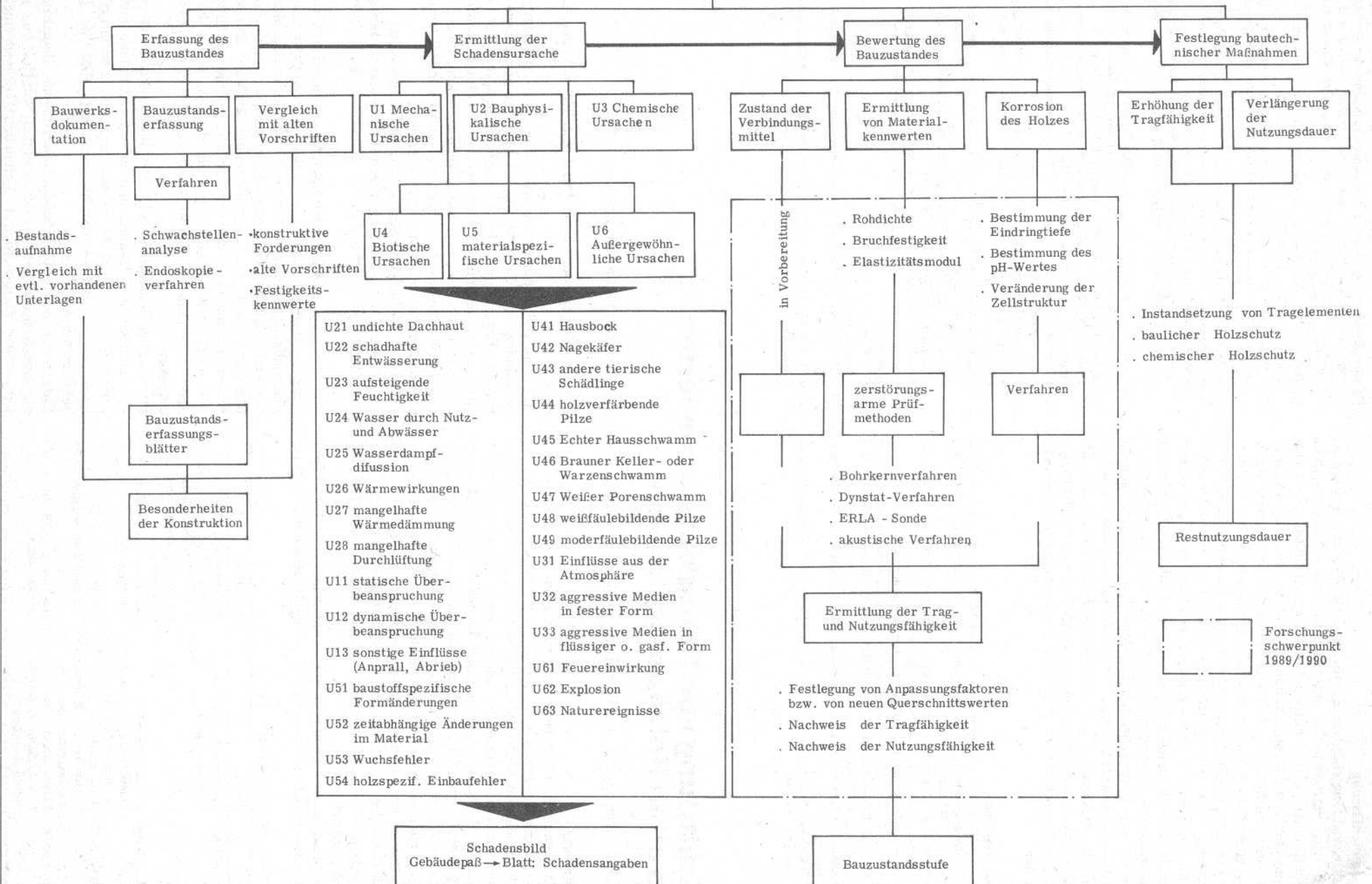
Der künftige Standard berücksichtigt die Spezifik der Beurteilung von historischen Holzbauten und verbessert damit die jetzt vorliegenden Grundlagen [2, 6]. Im Standard soll die bisherige Vorgehensweise bei der Bauzustandsbeurteilung (s. Bild 1 und [2]) beibehalten werden.

Ein wesentliches Problem bei der Bewertung des Bauzustandes ist die zuverlässige Ermittlung der Festigkeit von Holz im eingebauten Zustand. Dazu werden zur Zeit in der DDR nach einem abge-

Tabelle 1. Neue Holzbaunormen

Teil	Titel	Zielstellung
TGL 33 135/03	Bauholz, Sortierung nach Güteklassen	Überarbeitung der TGL 117-076711, Annäherung an ECE-Code und Einarbeitung der Kriterien für die maschinelle Sortierung
TGL 33 135/04	Holzkonstruktionen; Tragsysteme; Berechnung und konstruktiver Entwurf	Annäherung an CIB-Model-Code und Eurocode 5
TGL 33 135/05	Holzkonstruktionen; Untersuchung des Bauzustandes und Rekonstruktion	Verallgemeinerung der 20jährigen Erfahrung in der DDR
TGL 33 135/06	Holzkonstruktionen; Holzwerkstoffe; Holzwerkstoffkonstruktionen	Annäherung an CIB-Model-Code und Eurocode 5

Rekonstruktion von Holztragwerken



Forschungsschwerpunkt 1989/1990

stimmten Forschungsprogramm grundlegende Untersuchungen durchgeführt. Die von den Autoren durchgeführten Untersuchungen konzentrierten sich auf die Bestimmung der Festigkeit mit Hilfe von Bohrkernen und die Untersuchung der Festigkeit von Altholz in Bauholzabmessungen.

Ziel erster Untersuchungen war die Gegenüberstellung der Druckfestigkeit von Bohrkernen mit 15 mm Durchmesser einerseits und der Druckbruchfestigkeit an Normproben nach TGL 25 106 andererseits. Die Ergebnisse der im Rahmen einer Diplomarbeit [12] durchgeführten Versuche sind in [11] publiziert worden. Nachfolgend stellen die Autoren Ergebnisse weiterer Untersuchungen vor.

### Versuche an Altholz aus dem 18. und 19. Jahrhundert

Zur Durchführung von Versuchen wurden durch Mitarbeiter des Schlosses Schwerin eine Reihe von Althölzern zur Verfügung gestellt. Dabei handelt es sich um 150 bis 400 Jahre altes Kiefern-, Fichten- und Eichenholz.

An 6 von 9 Balken wurden Proben nach TGL 25 106 (20 × 20 × 30) und Bohrkern mit den Durchmessern 10 und 15 mm entnommen. Einem Kiefernholzbalken konnten außerdem 4 × 6 Biegeproben (20 × 20 × 30) entnommen werden. Die Ergebnisse der Versuche an diesem Schweriner Altholz lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

1. An Bohrkernen mit 10 mm Durchmesser lassen sich ebenfalls Druckversuche parallel zur Faserrichtung durchführen. Das Bruchverhalten ist analog dem der Bohrkern mit 15 mm Durchmesser.
2. Der Faktor für die Umrechnung von Druckbruchspannungen parallel zur Faser für

Bohrkern mit 15 mm Durchmesser – Quader TGL,  
Bohrkern mit 10 mm Durchmesser – Quader TGL,  
Bohrkern mit 15 mm Durchmesser – Bohrkern mit 10 mm Durchmesser

beträgt auf der Grundlage der durchgeführten 480 Druckversuche 1,0. Die in [11] und [12] dargestellten Erkenntnisse werden damit bestätigt.

Dieser Wert setzt sich aus 34 Gruppenwerten zusammen, wobei die Einzelwerte im Bereich von 0,897 und 1,167 schwanken. Der Variationskoeffizient der Quotienten beträgt rund 5,5 % (Tabelle 2).

Tabelle 2. Zusammenfassung der Werte  $\sigma_{\text{Bohrkern}}/\sigma_{\text{TGL}}$

$\sigma_{15}$ in N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{10}$ in N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{\text{TGL}}$ in N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{15}/\sigma_{\text{TGL}}$	$\sigma_{10}/\sigma_{\text{TGL}}$	$\sigma_{15}/\sigma_{10}$
60,89	60,54	60,59	1,005	0,999	1,006
51,11	49,43	50,87	1,005	0,972	1,005
42,71	42,94	42,00	1,017	1,022	0,995
41,98		44,55	0,942	0,964	0,978
				0,959	
				0,999	
46,79	40,74	40,88	1,144	0,997	1,148
		40,09	1,167	1,016	
55,30	48,26	53,80	1,028	0,897	1,146
53,94	50,45	55,13	0,978	0,915	1,069
55,33	50,24	53,67	1,031	0,936	1,101
			1,005	0,940	1,074
			1,004	0,911	1,097
Anzahl der Serien			13	11	10
Mittelwert			1,0218	0,961	1,062
Standardabweichung			0,0646	0,044	0,0626
Variationskoeffizient			6,16 %	4,5 %	5,9 %

3. 23 der 29 errechneten Korrelationskoeffizienten Rohdichte – Spannung sind größer als 0,5.

Damit wurde die bei Neuholz bekannte hohe Abhängigkeit der Druckbruchspannung von der Rohdichte auch für Altholz bestätigt. Dieser Zusammenhang ist für die Entwicklung von Verfahren für die Festigkeitsermittlung, die auf der Grundlage der Ermittlung der Rohdichte basieren, bedeutungsvoll.

4. Für das untersuchte Nadelschnittholz (Kiefer, Fichte) zeigt eine Auswertung von 22 Versuchsserien, daß sich bei einer Holzfeuchte

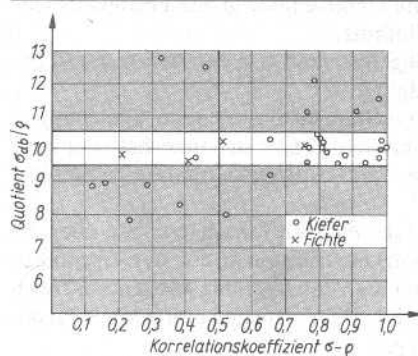


Bild 2. Zusammenhang zwischen dem Korrelationskoeffizient  $\sigma - \rho$  und dem Quotienten  $\sigma_{\text{DB}}/\rho$  für Nadelschnittholz alt und neu

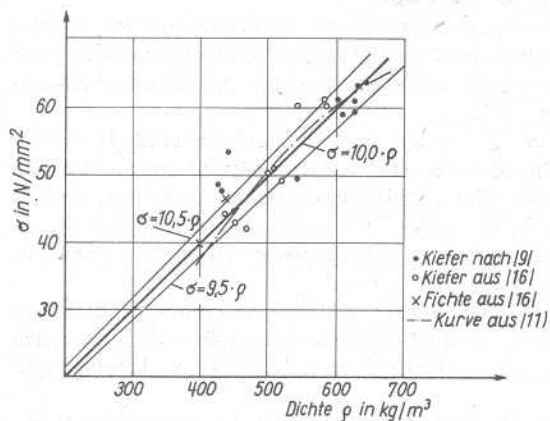


Bild 3. Beziehung zwischen  $\sigma_{\text{DB}}$  und  $\rho$  für Nadelschnittholz

von rund 12 % die Druckfestigkeit näherungsweise aus der Rohdichte mit der einfachen Gleichung

$$\sigma_{\text{DB}}(\text{N/mm}^2) = 10 \cdot \rho(10^2 \text{ kg/m}^3) \quad (1)$$

bestimmen läßt (Bilder 2 und 3).

Dabei wurden nur Versuchsserien berücksichtigt, deren Korrelationskoeffizient zwischen Spannung und Rohdichte größer als 0,5 war. Gleichzeitig wurden jene Ergebnisse aus [12] berücksichtigt, die die genannten Bedingungen erfüllten (s. Tabelle 3).

Auch ein Vergleich mit Werten aus der Literatur zeigt eine gute Übereinstimmung mit der ermittelten Gleichung (1) (s. auch [8]).

5. Die Biegeversuche ergaben folgende Ergebnisse:

Tabelle 3. Zusammenfassung der Versuchsergebnisse mit  $r > 0,5$

Serie	Anzahl	$\sigma_{\text{DB}}$ in N/mm <sup>2</sup>	$\rho$ in 10 <sup>2</sup> kg/m <sup>3</sup>	$\sigma_{\text{DB}}/\rho$	r
1.1	25	60,59	5,42	11,17	0,91
1.2	16	60,89	5,82	10,46	0,80
1.3	22	60,54	5,86	10,33	0,80
2.1	25	50,87	5,01	10,15	0,65
2.2	25	51,11	5,06	10,10	0,81
2.3	25	49,43	5,19	9,52	0,87
3.2	25	44,55	4,36	10,22	0,81
3.4	18	41,98	4,69	8,95	0,52
3.5	16	42,94	4,49	9,56	0,75
4.2	18	40,09	3,99	10,04	0,77
4.3	25	46,79	4,57	10,23	0,51
4	17	44,32	4,49	9,87	0,82
10	25	48,02	4,30	11,18	0,76
10a	23	53,31	4,42	12,06	0,79
11	25	49,84	5,42	9,19	0,65
13a	35	61,49	6,00	10,25	0,99
13b	32	63,58	6,32	10,05	0,99
14b	32	64,37	6,39	10,07	0,99
14a	35	59,15	6,06	9,76	0,98
15a	29	49,03	4,24	11,55	0,98
16	27	61,11	6,26	9,77	0,88
16a	27	60,01	6,27	9,58	0,94
Mittelwert					10,18
Standardabweichung					0,7455
Variationskoeffizient					7,3 %

– Es zeigten sich signifikante Unterschiede in den Festigkeitswerten zwischen Kern- und Splintholz.  
 – Die Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Rohdichte ist geringer als bei der Druckfestigkeit.  
 Die auf statistischen Untersuchungen basierenden Gleichungen stellen ein Hilfsmittel dar, mit deren Hilfe sich innerhalb der definierten Grenzen, Aussagen zum Festigkeitsverhalten treffen lassen.

Bedenkt man, daß zur Zeit die meisten Einschätzungen über die Tragfähigkeit von alten Holzkonstruktionen auf der Grundlage willkürlich getroffener Annahmen durchgeführt werden, sind nach Meinung der Verfasser, solche, auf Versuchen aufbauende Hypothesen, durchaus gerechtfertigt.

#### Altholz aus dem 20. Jahrhundert

Im Rahmen der Zusammenarbeit mit der TH Wismar wurde unter anderem vereinbart, prüfbares Holz und bereits vorhandene Prüfergebnisse gegenseitig auszutauschen, um die Aussagefähigkeit der Versuche zu erhöhen.

Bei dem von der TH Wismar zur Verfügung gestellten Holz handelte es sich zum einen um neues Kiefernholz und zum anderen um 40...80 Jahre altes Kiefernholz eines Lokschuppens. Aus den gelieferten Proben (40 × 40 × 750) wurden jeweils 10 Bohrkern mit 15 mm Durchmesser und 2 Biegeproben (18 × 18 × 300) entnommen (Bilder 4 und 5).

Hauptziel der Untersuchungen war eine Gegenüberstellung der Druckfestigkeiten, die unabhängig voneinander ermittelt werden sollten. Vergleicht man die Ergebnisse beider Untersuchungen, so zeigt sich, daß

- die ermittelten Druckfestigkeiten parallel zur Faser von Bohrkernen (ermittelt in Berlin) im Bereich der erzielten Festigkeit an Prismen (geprüft in Wismar) liegen,
- die Rohdichte eine noch genauere Übereinstimmung der gemessenen Werte ergibt.

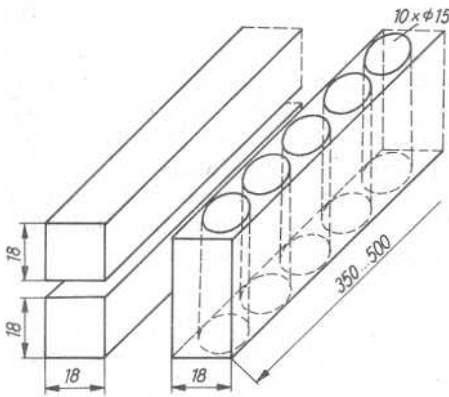


Bild 4. Schema der Probenentnahme bei dem Altholz von der TH Wismar

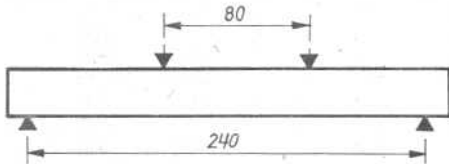


Bild 5. Versuchsaufbau zum Biegeversuch nach TGL 25106/08

Beispiel:

Proben aus Wismar

Charge I:  $\rho = 593 \cdot 10^2 \text{ kg/m}^3$   $\sigma_{dB} = 57,47 \text{ N/mm}^2$   
 Charge III:  $\rho = 559 \cdot 10^2 \text{ kg/m}^3$   $\sigma_{dB} = 54,64 \text{ N/mm}^2$

Biegeproben

Charge I:  $\rho = 557 \cdot 10^2 \text{ kg/m}^3$   
 Charge III:  $\rho = 543 \cdot 10^2 \text{ kg/m}^3$

Bohrkern mit 15 mm Durchmesser

Charge I:  $\rho = 586 \cdot 10^2 \text{ kg/m}^3$   $\sigma_{dB} = 50,0 \text{ N/mm}^2$   
 Charge III:  $\rho = 535 \cdot 10^2 \text{ kg/m}^3$   $\sigma_{dB} = 54,15 \text{ N/mm}^2$

#### Biegeversuche an Altholz in Bauholzabmessungen aus dem 20. Jahrhundert<sup>1)</sup>

Um die umfangreichen Versuche an fehlerfreien Altholzproben richtig interpretieren zu können, ist es notwendig, diese Werte dem Festigkeitsverhalten ganzer Tragwerke gegenüberzustellen. In einer ersten Versuchsserie wurden dazu 20 Altholzbalken geprüft. Bei dem Holz handelte es sich um etwa 70 Jahre alte Dachsparren aus Kiefernholz. Das Holz entstammt einem alten Wohngebäude, das im Rahmen einer Rekonstruktionsmaßnahme abgerissen wurde. Aus den 6,5 bis 7 m langen Sparren konnten 2 Prüfbalken mit einer Länge von 3 m herausgetrennt werden.

Bei den Prüfkörpern (130/155) lag in den meisten Fällen eine Schädigung der Splintzone durch tierische Schädlinge vor.

Die Lasteintragung erfolgte durch eine Hydraulikpresse mit einer maximalen Druckkraft von 50 kN. Die tatsächlich übertragenen Kräfte wurden mit einer Kraftmeßdose gemessen.

Die Proben erreichten eine mittlere Biegefestigkeit von 33,27 N/mm<sup>2</sup>. Der Variationskoeffizient beträgt 17 % und liegt damit deutlich unter dem durchschnittlichen Variations-Koeffizienten 1 Biegeproben mit Bauholzabmessungen von 20...40 %. Vergleich man die Biegebeanspruchung mit den in der Literatur für Bauholz angegebenen Werten (s. Tabelle 4), so liegt der Wert im Bereich des von Steck in [14] ermittelten Wertes für Bauholz der Güteklasse III. Der relativ niedrige Wert für die mittlere Biegefestigkeit ist auf die Zerstörung der Splintzone der Balken durch tierische Schädlinge zurückzuführen.

Vergleicht man die Werte für das 5 %-Quantil, so zeigt sich, daß der Wert für unsortiertes Neuholz unter dem ermittelten Wert liegt und ansonsten ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit den Werten für Güteklasse 3 (s. auch Bild 6) besteht. Der Elastizitätsmodul liegt mit 8219 N/mm<sup>2</sup> um 18 % unter dem in der TGL 33135 angegebenen Wert.

Einen Schwerpunkt der Versuchsauswertung bildete die Gegenüberstellung der Elastizitätsmoduli mit den Bruchspannung. Eine Regressionsanalyse ergab folgende Regressionsgleichung

$$\sigma_{dB} = 3,66 \cdot 10^{-3} \cdot E + 2,7$$

Der Korrelationskoeffizient beträgt 0,78 (Bild 7).

<sup>1)</sup> Die Autoren danken Herrn Dipl.-Ing. Pötke, IHLGB, für die Unterstützung der Durchführung der Versuche

Tabelle 4. Vergleich der Biegefestigkeit von Altholzbalken mit Balken aus Neuholz

Altholz			Neuholz n. Steck [14]			Neuholz n. Graf (Angaben n. [14] Neuholz <sup>1)</sup> ) Natterer n. [9]			Neuholz n. Apitz n. [1]								
Mittelwert	5%-Quantilwert <sup>2)</sup>	Variationskoeffizient	GKI	Mittelwert	5%-Quantilwert	Variationskoeffizient	n	Mittelwert	5%-Quantilwert	Variationskoeffizient	n	Mittelwert	5%-Quantilwert	Variationskoeffizient			
in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	in %		in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	in %		in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	in %		in N/mm <sup>2</sup>	in N/mm <sup>2</sup>	in %			
33,27	24,2	17	I	50,89	36,7	20	6	53,0	42,8	13		95	66,9	29,6	33		
			II	44,46	29,3	25	KA	44,4	28,75	26	200	54,5	22,3	142	54,33	26,4	39,7
			III	38,66	22,6	33						73	48,7	23,85	34,9		

<sup>1)</sup> unsortiert    <sup>2)</sup> Normalverteilung    n Probenanzahl    KA keine Angaben

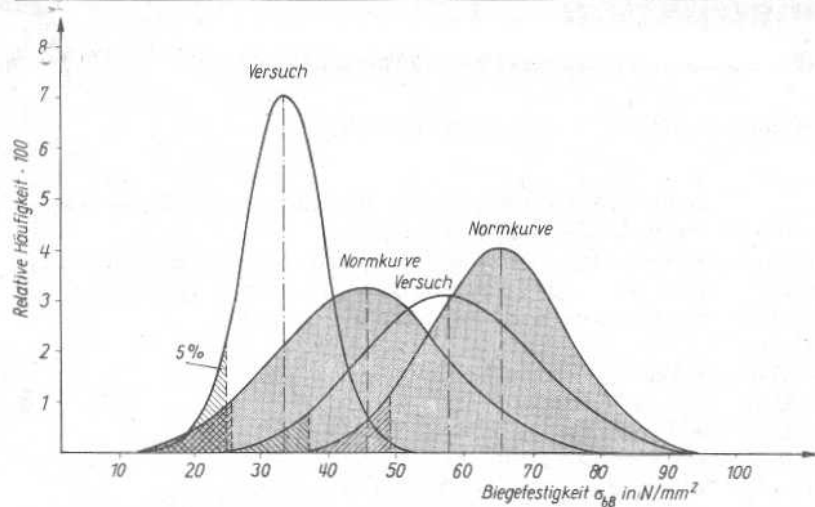


Bild 6. Gegenüberstellung von Normverteilungen und Verteilungen von Biegeversuchen an 60 Jahre altem Kiefernholz

Werte:	
Normkurve fehlerfrei:	$\sigma_b = 65 \text{ N/mm}^2$ [17]
	$\vartheta = 15 \%$ [18]
Bauholz	$f_m(0,05) = 49 \text{ N/mm}^2$
	$\sigma_b = 45 \text{ N/mm}^2$ [19]
	$\vartheta = 27 \%$ [20]
Versuch fehlerfrei:	$f_m(0,05) = 25 \text{ N/mm}^2$
	$\sigma_b = 57,8 \text{ N/mm}^2$
	$\vartheta = 22,15 \%$
Bauholz	$f_m(0,05) = 36,8 \text{ N/mm}^2$
	$\sigma_b = 33,3 \text{ N/mm}^2$
	$\vartheta = 16,7 \%$
	$f_m(0,05) = 24,2 \text{ N/mm}^2$

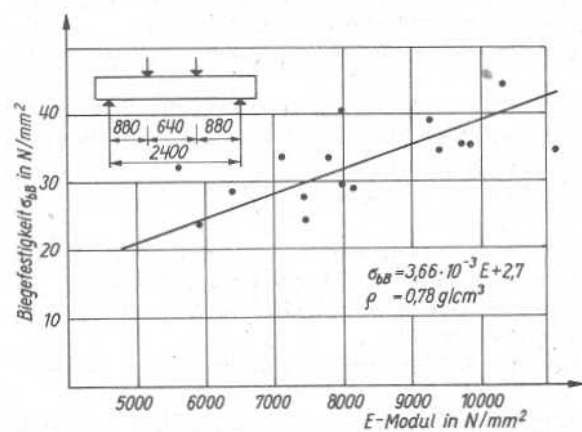


Bild 7. Abhängigkeit der Biegefestigkeit vom E-Modul für Balken mit Bauholzabmessungen mit einem Alter von 60 Jahren.

Berücksichtigt man die relativ große Streuung der Materialkennwerte des Holzes und daß es sich beim untersuchten Holz um teilweise beträchtlich geschädigte Balken handelte, so fällt diese Abhängigkeit erstaunlich hoch aus. Durch weitere Versuche soll die Gültigkeit der Gleichung überprüft werden.

Nach der Durchführung der Biegeversuche wurde von jedem Balken ein etwa 600 mm langes Stück abgesägt und in kleinformatische Prüfkörper zerlegt, die zu einem späteren Zeitpunkt geprüft werden.

### Zusammenfassung

Eine wichtige Erkenntnis aus den Versuchen ist, daß das Festigkeitsverhalten von Altholzproben dem von neuem Holz entspricht. Die hohe Korrelation zwischen der Rohdichte und dem Elastizitätsmodul zur Festigkeit gestattet eine quantitative Aussage der Festigkeit durch die Anwendung von zerstörungsarmen Verfahren zur Messung dieser Kennwerte.

Die künftigen Untersuchungen konzentrieren sich auf folgende Schwerpunkte:

- Aufbau einer Datenbank über alle Untersuchungen zur Festigkeit an Altholz und Fortführung der Untersuchungen zur Festigkeit von fehlerfreiem und fehlerbehaftetem Holz;

- Festlegung von Teilsicherheitsfaktoren für die Berechnung von Altholzkonstruktionen;
- Erprobung von zerstörungsarmen und zerstörungsfreien Verfahren zur Bestimmung der Festigkeit;
- Untersuchungen zur Tragfähigkeit historischer Verbindungen.

### Literaturverzeichnis

- [1] Apitz, R.: Beitrag zur Bestimmung der Festigkeitskennwerte von Bauholz bei Biegebeanspruchung für eine Bemessung nach der Methode der Grenzzustände. - 1985. - Wismar, Techn. Hochsch., Diss. A
- [2] Bauzustandsanalyse, Instandsetzung und Erhöhung der Tragfähigkeit von Holzkonstruktionen: KDT-Richtlinie (Entwurf). - In: Mitteilungen Nr. 1/85 des FA Ingenieurholzbau und Institut für Industriebau. - Berlin, 1985
- [3] CIB Model-Code: Structural Timber Design Code, Fassung vom Januar 1983. - In: CIB-Report, 1983 (Publication 66)
- [4] ECE-Code 1982: ECE recommended standard for stress grading of coniferous sawn timber. - In: Timber Bulletin for Europe, Voll XXXIV, Suppl. 16 1-17, Genf
- [5] Einführung in die Norm SIA 164 (1981) Holzbau. - Zürich, 1981
- [6] Erler, K.: Bauzustandsanalyse und Beurteilung der Tragfähigkeit von Holzkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Korrosion von Holz. - 1988. - Wismar, Techn. Hochsch., Diss. A
- [7] Eurocode 5: Timber Structures, October 1987
- [8] Gesteschi, T.: Der Holzbau - Grundlagen der Berechnung und Ausbildung von Holzkonstruktionen des Hoch- und Ingenieurbaus. - Berlin, 1926
- [9] Natterer, J.; Winter, W.: Entwurf von Holzkonstruktionen. - In: Holzbautaschenbuch, Band 1; 8. vollständig neubearbeitete Auflage. - Berlin, 1986
- [10] Rug, W.: Untersuchungen zum Materialfaktor für Bau- und Brettschichtholz, Forschungsbericht/Bauakademie der DDR. - Berlin, 1987
- [11] Rug, W.; Seemann, A.: Festigkeit von Altholz. - In: Holztechnologie. - Leipzig 29 (1988) 4. - S. 186-190
- [12] Seemann, A.: Durchführung von Versuchen zur Feststellung der Tragfähigkeit von eingebautem (alten) Bauholz und Auswertung der dazu vorhandenen Literatur. - 1988. - Weimar, Hochsch. f. Arch. u. Bauwesen, Dipl.-arb.
- [13] Spaethe, G.: Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen. - Berlin, 1987
- [14] Steck, G.: Die Zuverlässigkeit des Vollholzbalkens unter reiner Biegung: Bericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Fredericiana in Karlsruhe, 4. Folge, Heft 6. - Karlsruhe, 1982
- [15] ST-RGW 877-78 TGL 38791/03 Angewandte Statistik, Bestimmung der Schätzwerte und Konfidenzgrenzen für Parameter der Weibullverteilung. -
- [16] TGL 25 106/01 Probennahme und allgemeine Festlegungen für physikalisch-mechanische Prüfungen. -
- [17] TGL 33 135/01 u. 02 Holzbau, Tragwerke, Berechnung, Bauliche Durchbildung. - 1984
- [18] TGL 33 135/01 1. Änderung: Holzbau, Tragwerke, Berechnung, Bauliche Durchbildung. - 1984
- [19] TGL u. ST RGW 38792 Baukonstruktionen und Gründungen; Grundsätze für die Berechnung. - 1981
- [20] Untersuchungen zur Festigkeit, zu den Anpassungsfaktoren und zu den Grenzzuständen Tragfähigkeit und Nutzungsfähigkeit von alten Holzkonstruktionen: Forschungsbericht G 3/Bauakademie der DDR. - Berlin, 1988