

Festigkeit von Bauholz bei hohen Temperaturen

T 2219

T 2219

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

INSTITUT FÜR HOLZFORSCHUNG

DER UNIVERSITÄT MÜNCHEN

8 MÜNCHEN 40. WINZERERSTRASSE 45

Festigkeit von
Bauholz
bei
hohen Temperaturen

P. Glos und D. Henrici

1990

Festigkeit von Bauholz bei hohen Temperaturen

Abschlußbericht 87505

Die Untersuchung wurde durchgeführt im Auftrag der
Deutschen Gesellschaft für Holzforschung, München
Projekt Nr. E- 88/33
und gefördert mit Mitteln des
Instituts für Bautechnik, Berlin

**P.Glos und D. Henrici
Institut für Holzforschung
Universität München**

1990

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Ausgangssituation	
1.1 Allgemeines	4
1.2 Bisheriger Kenntnisstand	5
2. Ziel der Untersuchung	7
3. Versuchsprogramm	8
4. Untersuchungsmaterial und Prüfkörperherstellung	9
5. Untersuchungsmethoden	9
5.1 Bestimmung der allgemeinen Holzeigenschaften	9
5.2 Temperaturmessung und Wärmebehandlung	10
5.3 Feuchtebehandlung der Prüfkörper	11
5.3.1 Prüfkörper mit ungleichmäßiger Feuchteverteilung	11
5.3.2 Prüfkörper mit "gleichmäßiger" Feuchteverteilung	12
5.4 Durchführung der Festigkeitsprüfungen	13
5.4.1 Allgemeines	13
5.4.2 Biegeprüfung	13
5.4.3 Zug- und Druckprüfung	14
6. Versuchsergebnisse I: Holzeigenschaften, Temperatur- und Feuchteverhalten	15
6.1 Holzeigenschaften	15
6.2 Temperaturverhalten	15
6.2.1 Aufheizverhalten	16
6.2.2 Abkühlverhalten	17
6.2.3 Aufheizung während des Versuchs	17
6.3 Feuchteverhalten	18

7. Versuchsergebnisse II: Festigkeiten und E-Moduli	Seite
7.1 Allgemeines	19
7.1.1 Übersicht über die Ergebnisse	19
7.1.2 Gruppierung in Feuchtebereiche	20
7.2 Biegeprüfung	21
7.2.1 Biegefestigkeit	21
7.2.2 Biege-E-Modul	21
7.3 Zugprüfung	22
7.3.1 Zugfestigkeit	22
7.3.2 Zug-E-Modul	22
7.4 Druckprüfung	23
7.4.1 Druckfestigkeit	23
7.4.2 Druck-E-Modul	23
7.5 Darstellung der Versuchsergebnisse in relativer Form	24
7.5.1 Biegeversuche	25
7.5.2 Zugversuche	26
7.5.3 Druckversuche	27
8. Zusammenfassung	29
9. Schrifttum	31

Anlagen

Anlage 1	Tabelle Versuchsprogramm	34
Anlagen 2 bis 9	Tabellen Versuchsergebnisse, Auswertungen	35
Anlagen 10 bis 14	Versuchseinrichtung	43
Anlagen 15 bis 23	Bilder Temperatur- und Feuchte- verhalten	48
Anlagen 24 bis 40	Bilder Festigkeiten und E-Moduli	57

Festigkeit von Bauholz bei hohen Temperaturen

P. Glos und D. Henrici

1. Ausgangssituation

1.1 Allgemeines

Aus sicherheitstechnischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten müssen Baustoffe und Bauteile in vielen Bereichen des Bauwesens eine hinreichende Brandsicherheit aufweisen. Um diese nachweisen zu können, muß das Brandverhalten des Baustoffs bzw. des Bauteils bekannt sein.

Das jeweilige Brandverhalten kann entweder experimentell durch eine gezielte Brandprüfung unter Last bestimmt werden (Dorn u. Egner, 1967) oder es kann rechnerisch ermittelt werden, wenn hinreichend wirklichkeitsnahe Aussagen über das Abbrand- und elastomechanische Verhalten des jeweiligen Baustoffs unter Temperatureinwirkung vorhanden sind. Auch wenn Brandprüfungen in gewissem Umfang immer erforderlich sein werden, besteht an der Möglichkeit eines rechnerischen Nachweises, allein wegen des dadurch gegebenen größeren Entwurfsfreiraums, ein großes wirtschaftliches Interesse.

Bei einer rechnerischen Modellierung des Brandverhaltens von Holz muß dem Einfluß der Holzfeuchte besonderes Augenmerk geschenkt werden. Diese beeinflusst einerseits die Abbrandgeschwindigkeit und darüber hinaus überlagert sich dem temperaturbedingten Festigkeitsabfall ein austrocknungsbedingter Festigkeitsanstieg.

Anlaß für das vorliegende Forschungsvorhaben gab eine Diskussion über die undifferenzierte Darstellung des temperaturbedingten Festigkeitsabfalls von Nadelholz in Bild 11.E des Holzbrandschutz-Handbuchs (1983), wo grundlegende Einflußgrößen des Holzes wie Holzqualität, Holzfeuchte oder Probenabmessungen nicht in die Betrachtung miteinbezogen wurden.

1.2 Bisheriger Kenntnisstand

Die Verwendung von Holz im Flugzeugbau führte bereits vor dem zweiten Weltkrieg zu einer eingehenden Untersuchung der temperaturabhängigen Eigenschaftswerte des Holzes. Insbesondere wurden dabei an fehlerfreien Kleinproben die elasto-mechanischen Eigenschaften des Holzes untersucht.

Im Mittelpunkt standen zunächst die Druckfestigkeit, dann die Zug- und Biegefestigkeit sowie der Biege-E-Modul von Nadelholz im Temperaturbereich von 20°C bis 100°C (Kollmann, 1940; Kollmann u. Schulz, 1944; Kollmann, 1951). Die Querkzugfestigkeit interessierte vor allem im Zusammenhang mit der Holz Trocknung (Goulet, 1959).

In späteren Untersuchungen wurde der Temperaturbereich bis auf nahezu 300°C ausgedehnt (Schaffer, 1973; Knudson u. Schniewind, 1975; Östmann, 1985), wobei insbesondere Schaffer und Östmann bis rund 200°C einen wesentlich schwächeren Abfall der Zugfestigkeit feststellten als im Temperaturbereich darüber.

Eine umfassende Übersicht über alle wesentlichen bis 1980 zum Thema erschienenen Arbeiten gab Gerhards (1982) mit graphisch und tabellarisch entsprechend aufbereiteten Versuchsergebnissen verschiedener Autoren, auf die auch im Wood Handbook (1987) zurückgegriffen wird. Gerhards stellte zusammenfassend fest, daß bei Kleinproben die Zugfestigkeit und der Zug-E-Modul parallel zur Faser des Holzes am wenigsten, die Druckfestigkeit dagegen am stärksten von der Temperatur beeinflußt wird. Ferner zeigte sich allgemein, daß der Einfluß der Temperatur auf die elastomechanischen Eigenschaftswerte des Holzes bei höheren Holzfeuchten stärker in Erscheinung tritt als bei geringen Holzfeuchten.

Im Holz-Brandschutz-Handbuch (1983) wird im Hinblick auf die praktische Anwendung von Holz in Baukonstruktionen der temperaturbedingte Abfall der elastomechanischen Eigenschaftswerte des Holzes dargestellt. Dabei wurden als Bezugsgrößen für die relative Abnahme der Eigenschaftswerte die Werte bei jeweils 10°C gewählt.

Abgesehen von der Tatsache, daß die Wahl dieser ungewöhnlichen Bezugsgröße das Temperaturverhalten des Holzes in einem besonders ungünstigen Licht erscheinen läßt, entsteht bei der

Darstellung im Holz-Brandschutz-Handbuch der Eindruck, als handele es sich um Werte von Bauholz, während tatsächlich nur die Ergebnisse von fehlerfreien Kleinproben ohne Angabe von Holzart, Rohdichte oder Holzfeuchte aus dem Schrifttum (Kollmann, 1951; Ödeen, 1967) wiedergegeben werden, wobei die zitierten Literaturstellen sich ihrerseits auf die Versuche von Kollmann u. Schulz (1944) stützten.

Elasto-mechanische Eigenschaftswerte des Holzes bei 100°C bezogen auf die entsprechenden Werte bei 20°C (20°C $\hat{=}$ 100 %). Nach Literaturangaben

Quelle	Festigkeit				E-Modul			Holzart (ρ) Feuchte
	σ_B	$\sigma_{Z\parallel}$	$\sigma_{Z\perp}$	$\sigma_{D\parallel}$	E_B	$E_{Z\parallel}$	$E_{D\parallel}$	
Kollmann (1940)	-	-	-	86	-	-	-	Fichte ($\rho_0 = 0,43$) darrtrocken
Kollmann u. Schulz (1944)	46	85	-	47	72	-	67	Kiefer ($\rho_{12} = 0,62$) 10%
Goulet (1959)	-	-	1) 84 43	-	-	-	-	Fichte ($\rho_0 = 0,48$) trocken 2) wassersatt
Schaffer 3) (1973)	-	91	-	78	-	-	-	Douglas-fir ($\rho_0 = 0,46$) trocken 2)
Holz-Brand- schutz-Hand- buch (1983) 4)	45	89	-	49	73	-	65	?
Östmann 3) (1985)	-	88	-	-	-	86	-	Fichte ($\rho = 0,42$) trocken 2)

- 1) Mittelwert aus radial und tangential
- 2) Bei etwa 100°C sich einstellende Holzfeuchte ($\approx 1\%$ bis $\approx 2\%$);
Feuchte vor Aufheizung i.a. 12%
- 3) Temperaturbereich 25°C bis 105°C (25°C $\hat{=}$ 100 %)
- 4) Umgerechnet auf Bezugstemperatur bei 20°C

In der vorstehenden Zusammenstellung sind die relativen Werte einiger elastomechanischer Größen des Holzes (fehlerfreie Kleinproben) bei 100°C bezogen auf die Werte bei 20°C

nach Versuchen verschiedener Autoren zusammengestellt. In dem angegebenen Temperaturbereich wurde im allgemeinen ein näherungsweise linearer Abfall der Eigenschaftswerte beobachtet. Auffallend ist der vergleichsweise geringe Abfall bei der Zugfestigkeit sowie allgemein der starke Abfall der Eigenschaftswerte bei höheren Holzfeuchten. So fällt im angegebenen Temperaturbereich z.B. die Querkzugfestigkeit von Fichtenholz im trockenen Zustand auf 84%, im wassersatten Zustand aber auf 43% der Ausgangsfestigkeit ab. Die Werte aus dem Holz-Brandschutz-Handbuch (1983) sind wie erwähnt der Arbeit von Kollmann u. Schulz (1944) entnommen, aber hier einheitlich auf 20°C bezogen.

Die Übersicht über das Schrifttum zeigt, daß der Einfluß der Temperatur auf die elasto-mechanischen Kenngrößen des Holzes bislang fast ausschließlich an fehlerfreien Kleinproben und nicht an Prüfkörpern in Gebrauchsabmessungen und Bauholzqualität untersucht wurde.

2. Ziel der Untersuchung

Da das Festigkeitsverhalten von Holz unter Temperaturbeanspruchung im Hinblick auf die praktische Anwendung noch nicht hinreichend differenziert beurteilt werden kann, wurden weitere Untersuchungen für erforderlich gehalten. Im vorliegenden Forschungsvorhaben sollten daher an Prüfkörpern in Bauholzabmessungen üblicher Qualität die Biege-, Zug- und Druckfestigkeit parallel zur Faser des Holzes sowie die jeweiligen E-Moduli in Abhängigkeit von der Temperatur ermittelt werden, wobei auch der Einfluß der Holzfeuchte zu beachten war. Als Temperaturstufen wurden 100°C und 150°C gewählt. Die Temperatur 100°C hat eine herausgehobene Bedeutung, weil hier das Wasser zu verdampfen beginnt. Wegen des dafür erforderlichen Energieaufwandes wird im Brandfall das weitere Ansteigen der Temperatur über 100°C hinaus verhindert, solange das Holz Feuchtigkeit abgeben kann.

Die Temperatur 150°C wurde zur Absteckung des Trends sowie wegen der Tatsache gewählt, daß hier die thermische Zersetzung des Holzes von noch untergeordneter Bedeutung ist.

Im Gegensatz zum konkreten Brandversuch, bei dem ein komplexes Wechselspiel der Einflußgrößen sowie deren nicht-konstante Verteilung über den Holzquerschnitt beobachtet werden, wurde die vorliegende Untersuchung bei definierten Einflußgrößen und einer näherungsweise konstanten Temperaturverteilung über den Probenquerschnitt durchgeführt.

3. Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm geht aus Anlage 1 (Tabelle 1) hervor. Angegeben sind Art der Festigkeitsprüfung, Probenquerschnitte, die gewählten Temperaturstufen und Ausgangsfeuchten u_A (8%, 12%) sowie die Anzahl der Prüfkörper je Kollektiv. Insgesamt wurden 525 Prüfkörper in die Auswertung einbezogen, davon 128 Biegeproben, 130 Zugproben und 267 Druckproben. An diesen Prüfkörpern, die aus Fichtenbauholz hergestellt wurden, sollten bei Temperaturen von 20°C, 100°C und 150°C die Biege-, Längszug- und Längsdruckfestigkeit sowie die entsprechenden E-Moduli ermittelt werden.

Die in der Anlage 1 in den Spalten Ausgangsfeuchte angegebenen Kollektive waren während des Versuchs unterschiedlichen Feuchtebedingungen ausgesetzt. Beim Aufheizen der Prüfkörper trocknen die Randbereiche, sofern keine zusätzlichen Maßnahmen ergriffen werden, stärker aus als die Innenbereiche, so daß die Proben bei der Festigkeitsprüfung ein Feuchtegefälle von innen nach außen und damit eine ungleichmäßige Feuchteverteilung aufweisen.

Um einen Anhaltspunkt über den Einfluß der Feuchteverteilung im Probenquerschnitt zu erhalten, wurde daher bei den in Anlage 1 mit einem ' gekennzeichneten Kollektiven durch geeignete zusätzliche Maßnahmen bei der Aufheizung der Proben versucht, eine näherungsweise gleichmäßige Feuchteverteilung über den Probenquerschnitt einzustellen. Entsprechend werden auch die bei 20°C geprüften Kollektive mit einem ' gekennzeichnet.

Bei der Druckfestigkeit wurden über den ursprünglich vorgesehenen Umfang hinaus weitere Kollektive (D6' bis D10) geprüft, um den hier zu erwartenden stärkeren Einfluß der Prüftemperatur und der Holzfeuchte besser erfassen zu können.

4. Untersuchungsmaterial und Prüfkörperherstellung

Für die Prüfkörper wurde Fichtenschnittholz der Sortierklassen S13 bis S7 nach DIN 4074 (früher Gkl. I bis III) aus zwei verschiedenen oberbayerischen Sägewerken beschafft. Das Holz für die Biege- und Zugprüfkörper stammte aus dem selben Sägewerk.

Die Biegeprüfkörper wurden in einer Länge von etwa 3000 mm, die Zugprüfkörper in einer Länge von 1700 mm (freie Prüflänge 500 mm) und die Druckprüfkörper in einer Länge von 180 mm hergestellt. Die Querschnittsabmessungen betragen nach Abrichten und Hobeln bei den Biegeproben 70/150 mm², bei den Zug- bzw. Druckproben jeweils 50/120 mm².

Die Prüfkörper wurden bis zum Beginn der Wärmebehandlung im Klima 20°C/65% rLf ($u_A \approx 12\%$) bzw. 20°C/43% rLf ($u_A \approx 8\%$), in einigen Ausnahmefällen (Druckproben) auch im Klima 40°C/47% rLf ($u_A \approx 8\%$) gelagert.

Bei der Zusammenstellung der Probenkollektive wurde darauf geachtet, daß in jedem Kollektiv die Rohdichte und die Ästigkeit der Proben etwa gleich verteilt waren (Anlagen 2 bis 4).

5. Untersuchungsmethoden

5.1 Bestimmung der allgemeinen Holzeigenschaften

Die Rohdichte der Prüfkörper wurde nach DIN 52 182 als Darr-Rohdichte einer astfreien, den ganzen Querschnitt umfassenden Probenscheibe bestimmt, die aus der Umgebung der Bruchstelle herausgeschnitten wurde.

Die Ästigkeit wurde nach DIN 4074 (1989) nach dem Kriterium "Äste in Kanthölzern" ermittelt.

Die Holzfeuchte der Prüfkörper wurde gravimetrisch nach DIN 52 183 bestimmt. Unmittelbar nach der Festigkeitsprüfung wurden jedem Prüfkörper aus der Umgebung der Bruchstelle in der Regel zwei, jeweils den ganzen Querschnitt umfassende Probenscheiben entnommen. An einer Probenscheibe wurde die mittlere Holzfeuchte bestimmt; an der zweiten Probenscheibe wurde bei etwa jedem zweiten Prüfkörper die Feuchteverteilung

ermittelt. Die Scheiben wurden dazu in 7 bis 9 Streifen aufgespalten (Anlage 19, 23), deren jeweilige Holzfeuchte dann ebenfalls gravimetrisch bestimmt wurde. Die Gesamtscheibe wurde jeweils zuerst entnommen und gewogen, die Scheibe für die Einzelstreifen etwa eine Minute später.

5.2 Temperaturmessung und Wärmebehandlung

Die Temperaturmessung erfolgte mit Thermoelementen (NiCr-Ni) gegen Eiswasser (0°C). Die Thermodrähte vom Durchmesser 0,2 mm wurden in etwa 1,5 mm weiten Bohrlöchern, die am Eingang abgedichtet waren, in den Prüfkörpern in unterschiedlicher Tiefe angeordnet. Damit konnte der Temperaturverlauf in den Prüfkörpern bestimmt und die für die Versuchsdurchführung geeigneten Aufheiz- und Prüfbedingungen festgelegt werden (Abschnitt 6.2). Die Oberflächentemperatur der Proben wurde demgegenüber mit einem Infrarotstrahlungsthermometer der Fa. Ahlborn¹ bestimmt.

Die Wärmebehandlung der Biege- und Zugprüfkörper erfolgte in einem Trockenschrank der Fa. Kiefer², für die Druckprüfkörper wurden neben zwei Autoklaven Trockenschränke der Fa. Heraeus³ verwendet. Aufgrund der in Abschnitt 6.2 beschriebenen Ergebnisse der Untersuchungen wurden die Prüflinge im allgemeinen etwa 3 1/2 h lang auf die gewünschte Prüfkörpertemperatur aufgeheizt. Die als erste geprüften Druckproben waren bei einer Temperatur von 150°C etwa 4 1/2 h lang aufgeheizt worden, um das Aufheizverhalten und die Temperaturverteilung näher zu untersuchen.

Die Wiederaufheizung der durch den Transport vom Trockenschrank zum Prüfstand und den Einbau in den Prüfstand oberflächlich abgekühlten Prüfkörper erfolgte im Prüfstand bei den Druck- und Zugversuchen mit Infrarot-Dunkelstrahlern vom Typ Elstein (400 W, 220 Volt), bei den Biegeversuchen mit In-

¹ Typ 2288-2 mit Sensor und -optik Z-50 der Fa. Heimann

² Typ 65, Fassungsvermögen 80x75x310 cm³

³ Typ KTFU 400, Fassungsvermögen 42x41x39 cm³ bzw. Typ TU-S Fassungsvermögen 100x75x50 cm³

frarot-Hellstrahlern (420 W, 220 Volt). Durch vierseitige Bestrahlung der eingebauten Prüfkörper wurde die vorgesehene Temperatur während der gesamten Festigkeitsprüfung näherungsweise aufrechterhalten (Abschnitt 6.2).

Die Anlagen 10 bis 12 zeigen die Anordnung der Infrarotstrahler. Die Strahler wurden um die eingebauten Prüfkörper herumgruppiert und im allgemeinen mit ihrer Längsachse nach den Prüfkörperlängskanten orientiert. Nur bei der Druckprüfung wurden zwei Strahler aus Platzgründen quer zur Prüfkörperlängsachse angeordnet.

Bei der Biegeprüfung wurden jeweils 3 Strahler in Probenlängsachse nebeneinander, insgesamt also 12 Strahler angeordnet. Damit konnte der gesamte querkraftfreie Bereich der Biegeprobe ausreichend bestrahlt werden. Bei der Zugprüfung waren $2 \times 4 = 8$ Strahler, bei der Druckprüfung insgesamt 4 Strahler ausreichend. Die Höhe der Oberflächentemperatur wurde teils durch Veränderung der Strahlerabstände, teils durch Verwendung stufenlos regelbarer Transformatoren eingestellt.

Während der Wärmebehandlung in den Trockenschränken wurden einige Prüfkörperkollektive zur Schaffung einer näherungsweise "gleichmäßigen" Feuchteverteilung einer speziellen Feuchtebehandlung unterworfen (Abschnitt 5.3.2).

5.3 Feuchtebehandlung der Prüfkörper

5.3.1 Prüfkörper mit ungleichmäßiger Feuchteverteilung

Die Prüfkörper für die Biege-, Zug- und Druckversuche, die für die Prüfung bei ungleichmäßiger Feuchteverteilung vorgesehen waren, wurden nach der in Abschnitt 4 beschriebenen Klimatisierung ohne weitere Behandlung aufgeheizt und geprüft. Dadurch stellte sich im Holzquerschnitt eine ungleichmäßige Feuchteverteilung ein.

In Folie verpackte sowie allseitig mit einem Anstrich aus Silikonkautschuk versehene Vergleichsproben brachten keine Vergleichmäßigung der Feuchteverteilung, wie in Vorversuchen an einigen Druckprüfkörpern festgestellt wurde (Tratzmiller, 1988). Diese Maßnahmen konnten die Feuchteabgabe kaum verhindern und waren daher nicht geeignet, eine "gleichmäßige" Ver-

teilung der Holzfeuchte über den Holzquerschnitt zu gewährleisten.

5.3.2 Prüfkörper mit "gleichmäßiger" Feuchteverteilung

Die für die Biege- und Zugprüfung vorgesehenen Prüfkörper-Kollektive B5' und Z5' mit "gleichmäßiger" Feuchteverteilung wurden im Trockenschrank unter Verwendung der eingebauten Sprühvorrichtung über wassergefüllten Wannen liegend gelagert und etwa 20 h lang aufgeheizt. Die verdampfende Wasseroberfläche betrug dabei stets etwa 1,9 m². Auf diese Weise wurde in Vorversuchen bei einer Temperatur von 100°C eine Holzfeuchte von etwa 5% bis 8% erreicht (Abschnitt 6.3).

Die für die Druckprüfung vorgesehenen Prüfkörper wurden über unterschiedlichen Salzlösungen zum Teil unter Druck gelagert. Die Prüflinge wurden in den Trockenschrank jeweils stehend und einlagig eingestellt, um trotz evtl. unterschiedlicher Schichtung des Wasserdampfes im Schrank für alle Prüfkörper eine vergleichbare Klimabeanspruchung zu erhalten. Für die Lagerung unter Druck wurden zwei Autoklaven bis zu einem Druck von 3 bar (Überdruck) verwendet. Bei höheren Drücken wurde die Gleichgewichtsfeuchte im allgemeinen schneller erreicht.

Die Salzlösungen wurden für eine Temperatur von 100°C (Atmosphärendruck) in Anlehnung an die Diagramme von Schneider (1960), für 150°C und bei Drücken über 1 Atmosphäre nach entsprechenden Vorversuchen gewählt. Eine Übersicht über die Behandlungsarten und die Lagerdauer gibt Anlage 9. Wie ersichtlich, konnten die angestrebten Prüffeuchten insbesondere auf höherem Niveau nicht immer eingestellt werden. Dessen ungeachtet wurde bei den Druckproben ein relativ breites Feuchtespektrum zwischen 0,4% und 9,1% erreicht. Über den Zusammenhang von Druck und Holzfeuchte ist im Schrifttum bisher wenig bekannt geworden. Die Versuchstechnik mit höheren Dampfdrücken, unter denen auch bei höheren Temperaturen noch von Null wesentlich verschiedene Holzfeuchten eingestellt werden können, ist bei Tratzmiller (1988) ausführlich beschrieben.

5.4 Durchführung der Festigkeitsprüfungen

5.4.1 Allgemeines

Zur Festigkeitsprüfung wurden die Prüflinge dem Trockenschrank entnommen, in wärmegeprägten Behältern zur Prüfmaschine gebracht und eingebaut. Anlage 13 zeigt die gedämmte Transportmanschette für die heißen Biege- und Zugproben. Vor dem Einbau wurden die heißen Prüfkörper gewogen und vermessen.

Die Zeit zwischen der Entnahme des Prüfkörpers aus dem Trockenschrank und dem erfolgten Einbau in die Prüfmaschine betrug bei den Biege- und Zugprüfkörpern wegen der größeren Entfernung des Trockenschanks zur Prüfmaschine etwa 10 Minuten, bei den Druckprüfkörpern etwa 4 Minuten. Während dieser Zeit fiel die Oberflächentemperatur trotz Dämmung beim 100°-Prüfkörper um bis zu etwa 40°C, beim 150°-Prüfkörper um bis zu etwa 60°C ab. Die eingebauten Prüfkörper wurden daher mit dem in Abschnitt 5.2 beschriebenen Verfahren wieder auf die erforderliche Prüftemperatur aufgeheizt.

5.4.2 Biegeprüfung

Die Biegeproben mit über den Probenquerschnitt ungleichmäßiger Feuchteverteilung wurden zur Aufheizung in Abständen von etwa 30 Minuten in den Trockenschrank eingelegt und nach etwa 3 1/2 h (100°- und 150°-Prüfkörper) zur Biegeprüfung entnommen. Durch die für jeden Prüfkörper gleiche Aufheizzeit war eine vergleichbare Feuchteverteilung gewährleistet.

Die Biegeproben mit "gleichmäßiger" Feuchteverteilung wurden etwa 20 h bis 24 h lang über Wasser aufgeheizt. Die Prüflinge trockneten dabei bis zur entsprechenden Gleichgewichtsfeuchte aus.

Die Biegeprüfung, deren Prinzip in Anlage 14 dargestellt ist, wurde in Anlehnung an DIN 52 186 durchgeführt. Die Kantenhölzer wurden jeweils so geprüft, daß die Seite mit der maximalen Ästigkeit in der Zugzone lag. Die Stützweite zwischen den Auflagern betrug das 18-fache der Probenhöhe, der Abstand

der Kraftangriffspunkte ein Drittel der Stützweite. Bei den Biegeproben erfolgte der Bruch bei konstanter Verformungsgeschwindigkeit nach etwa 130 Sekunden. Die Durchbiegung der Kanthölzer in Feldmitte wurde mit 2 Induktivaufnehmern gemessen.

5.4.3 Zug- und Druckprüfung

Bei den Versuchen mit ungleichmäßiger Feuchteverteilung wurden die Zugprüfkörper in Abständen von etwa 30 Minuten, die Druckprüfkörper in Abständen von etwa 15 Minuten in den Trockenschrank eingelegt (100°- und 150°-Prüfkörper) und nach 3 1/2 h bzw. 4 1/2 h zur Prüfung entnommen.

Bei den Versuchen mit "gleichmäßiger" Feuchteverteilung wurden die Zugprüfkörper wie die Biegeprüfkörper behandelt. Die Druckprüfkörper wurden dagegen wie erwähnt über Salzlösungen und je nach Temperatur bei entsprechend hohen Drücken in Autoklaven 16 h bis 30 h lang aufgeheizt (Anlage 9).

Während der Zug- und Druckprüfung, deren Prinzip in Anlage 14 dargestellt ist, wurde den Prüfkörpern ein ebener Verformungszustand so aufgeprägt, daß bei konstanter Verformungsgeschwindigkeit der Bruch bei den Zugproben im Mittel nach etwa 80 Sekunden, bei den Druckproben im Mittel nach etwa 50 Sekunden erfolgte. Bei letzteren wurde mit steigender Temperatur ein Ansteigen der Bruchdehnung und damit der mittleren Bruchzeit beobachtet.

Die Wegmessung zur Bestimmung des E-Moduls erfolgte mit zwei an diagonal gegenüberliegenden Prüfkörperkanten angebrachten Induktivaufnehmern (Anlage 14), die gegen übermäßige Erwärmung durch die Infrarotstrahler abgeschirmt waren. Hierzu wurden keramikbesetzte Kupferrohrstücke mit Luftkühlung verwendet.

6. Versuchsergebnisse I: Holzeigenschaften, Temperatur- und Feuchteverhalten

6.1 Holzeigenschaften

Die ermittelten Rohdichten und Ästigkeiten für die Biege-, Zug- und Druckprüfkörper sind in den Anlagen 2 bis 4 zusammengestellt. Wie erkennbar, sind bei den einzelnen Versuchsarten die Probenkollektive untereinander hinsichtlich der Rohdichte weitgehend vergleichbar. Lediglich bei den Druckkollektiven sind mit Rohdichtemittelwerten zwischen 0,37 und 0,41 g/cm³ etwas größere Schwankungen zu erkennen.

Hinsichtlich der Ästigkeit ist eine stärkere Differenzierung festzustellen. Die Biegeprüfkörper wiesen im Durchschnitt eine Ästigkeit von 0,30 auf und entsprachen somit im Mittel der Sortierklasse S 10 nach DIN 4074 (1989). Die Zugprüfkörper konnten mit mittleren Ästigkeiten zwischen 0,34 und 0,41 ebenfalls in die Sortierklasse S 10 eingeordnet werden. Demgegenüber wiesen die Druckprüfkörper mittlere Ästigkeiten von 0,14 bis 0,21 auf und entsprachen somit der Sortierklasse S 13.

6.2 Temperaturverhalten

Für die Zeitplanung war die erforderliche Aufheizzeit der Prüfkörper von Bedeutung. Hierunter wird die zur näherungsweise gleichmäßigen Durchwärmung der Probe auf die festgelegte Prüftemperatur benötigte Zeit verstanden.

Darüber hinaus wurde das Abkühlverhalten des Prüfkörpers untersucht, da die Holzoberfläche während der Zeitspanne zwischen Herausnahme des Prüfkörpers aus dem Trockenschrank und Beginn der Prüfung rasch abkühlte und die Prüfkörper um diese Temperaturdifferenz wieder aufgeheizt werden mußten.

6.2.1 Aufheizverhalten

Das Aufheizverhalten wurde bei Normaldruck (Atmosphärendruck) an Prüfkörpern mit den Abmessungen 50/120/180 mm³ und einer Ausgangsfeuchte von $u_A \approx 12 \%$ mit im Zentrum der Prüflinge angeordneten Thermoelementen untersucht. Zunächst werden Prüfkörper mit ungleichmäßiger Feuchteverteilung betrachtet.

Der 100°-Prüfkörper erreichte im Trockenschrank bei Umluftbetrieb nach etwa 3 1/2 h im Inneren einen stationären Temperaturzustand von etwa 95°C, während die Oberflächentemperatur auf etwa 105°C anstieg.

Ein längeres Verweilen des Prüfkörpers im Trockenschrank führte zu keiner weiteren Temperaturangleichung mehr, da der Temperaturgradient eine Folge des sich einstellenden Feuchtegefälles war. Zudem mußte die Verweilzeit der Prüfkörper im Trockenschrank zur Verhinderung des völligen Austrocknens auf das notwendige Maß beschränkt werden.

Nach einer Aufheizzeit von 3 1/2 h ergab sich bei einer mittleren Holztemperatur von 100°C im Vorversuch eine durchschnittliche Restfeuchte des Prüfkörpers von etwa 8 %. Im Hauptversuch wurde dementsprechend bei den Druckprüfkörpern eine mittlere Holzfeuchte von 7,6% erreicht (Anlage 4, Kollektiv D2).

Der 150°-Prüfkörper mit ungleichmäßiger Feuchteverteilung erreichte nach einer Aufheizzeit von etwa 3 1/2 bis 4 1/2 h im Innern eine stationäre Temperatur von etwa 142°C, während die Oberflächentemperatur auf etwa 157°C anstieg. Die durchschnittliche Restfeuchte ergab sich nach dieser Zeit im Vorversuch zu etwa 1,5%. Im Hauptversuch wurden bei den Druckprüfkörpern im Mittel 1% erreicht (Anlage 4, Kollektiv D10).

Bei Prüfkörpern mit "gleichmäßiger" Feuchteverteilung wurde im Gegensatz zu solchen mit ungleichmäßiger Feuchteverteilung wegen des weitgehend fehlenden Feuchtegradienten generell eine annähernd über den Holzquerschnitt konstante Temperaturverteilung von 100° C bzw. 150°C erreicht.

6.2.2 Abkühlverhalten

Das Abkühlverhalten wurde exemplarisch an einem Prüfkörper mit den Abmessungen 80/180/500 mm³ und einer Ausgangsfeuchte von $u_A \approx 12\%$ untersucht, wobei insbesondere der oberflächennahe Bereich interessierte.

In Anlage 15 Bild 6 ist der Abfall der Oberflächentemperatur über der Zeit, in Bild 7 derselben Anlage die Anordnung der Thermoelemente dargestellt. Anlage 16 zeigt die Temperaturverteilung im Querschnittsinneren zu unterschiedlichen Zeiten nach Beginn der Abkühlung. Man erkennt eine außerordentlich rasche Abkühlung der Holzoberfläche in den ersten vier bis fünf Minuten, die sich jedoch auf die ersten fünf Millimeter Holztiefe (Anlage 16) beschränkt. Dieser Bereich des Prüfkörpers wurde wie erwähnt während der Festigkeitsprüfung wieder auf die vorgesehene Prüftemperatur aufgeheizt. Bei der Druckprobe betrug der Temperaturabfall zu den Hirnseiten etwa 0,3°C/cm je Minute.

6.2.3 Aufheizung während des Versuchs

Da beim Biegeprüfkörper relativ große Aufheizflächen zu bewältigen waren und auf jeder Prüfkörperseite mehrere Strahler zusammengeschaltet werden mußten, wurde exemplarisch beim Biegeversuch die Verteilung der Oberflächentemperaturen während der Bestrahlung untersucht. Die Oberflächentemperaturen schwankten nach Erreichen des stationären Zustands, der sich nach etwa 6 bis 10 Minuten einstellte, beim 100°-Prüfkörper in den Grenzen von 94°C bis 103°C (Mittelwert etwa 98°C, $V = 2\%$), beim 150°-Prüfkörper im Bereich von 130°C bis 170°C (Mittelwert etwa 152°C, $V = 6\%$). Die größte Abweichung nach unten trat hier im Übergangsbereich zu den nicht bestrahlten Holzteilen auf der Vorderseite, die größte Abweichung nach oben auf der Rückseite des Prüfkörpers auf. Im Gegensatz zu den stehend geprüften Zug- und Druckproben war das Temperaturfeld bei den Biegeproben in stärkerem Umfang durch die Konvektionsströmung gestört.

6.3 Feuchteverhalten

Die zum Zeitpunkt der Prüfung vorhandenen mittleren Holzfeuchten aller Prüfkörper sind in den Anlagen 2 bis 4 angegeben. Die gemessenen Feuchteverteilungen über den Holzquerschnitt sind in den Anlagen 17 bis 23 graphisch dargestellt.

Die Biegeprüfkörper, die bei ungleichmäßiger Feuchteverteilung geprüft wurden (100°C , 150°C), wiesen die in den Anlagen 17 und 18 dargestellten Feuchteprofile auf. Aufgetragen ist jeweils die zum Zeitpunkt der Prüfung vorhandene Feuchteverteilung über die Querschnittshöhe der Prüfkörper. Ferner ist noch die jeweilige Standardabweichung als Maß für die Streuung der Feuchtemittelwerte eingezeichnet. Wie aus dem Feuchteverlauf zu erkennen, ist das mittlere Feuchteniveau im Querschnitt sowohl von der Ausgangsfeuchte u_A als auch von der Temperatur des Prüfkörpers abhängig. Zu den Querschnittsrändern hin ist wie erwartet ein stärkerer Feuchteabfall zu beobachten.

Anlage 19 gibt ein Beispiel für die Feuchteverteilung in Biegeproben, die bei "gleichmäßiger" Feuchteverteilung geprüft wurden (Kollektiv B5', 100°C). Man erkennt eine deutliche Vergleichmäßigung im Feuchteverlauf, was auf die Maßnahmen zur Feuchtekonstanthaltung zurückgeführt werden kann. Die der Feuchtebestimmung zugrundeliegende Scheibenaufteilung ist ebenfalls in Anlage 19 wiedergegeben.

Die Druckprüfkörper wiesen die in den Anlagen 20 bis 23 dargestellten Feuchteprofile auf. In den Anlagen 20 und 21 ist bei unterschiedlichen Ausgangsfeuchten u_A die Feuchteverteilung über die kleinere Querschnittsseite der Druckproben aufgetragen, die zum Zeitpunkt der Prüfung eine ungleichmäßige Feuchteverteilung besaßen. Wie zu erkennen ist, nähert sich die Feuchteverteilung mit sinkender Ausgangsfeuchte und steigender Temperatur einer "gleichmäßigen" Verteilung an.

In den Anlagen 22 und 23 sind in Abhängigkeit von der angestrebten Sollfeuchte u_{soll} die Feuchteverteilungen über die kleinere Querschnittsseite jener Prüfkörper dargestellt, bei denen durch die genannten Maßnahmen eine möglichst "gleich-

mäßige" Feuchteverteilung über den Holzquerschnitt zu erreichen versucht wurde. Wie ersichtlich, wurde die "gleichmäßige" Feuchteverteilung näherungsweise erreicht. Abweichungen zu den Rändern hin sind teilweise auf Feuchteverluste während der Bestrahlung der Prüfkörper sowie auf die Klimabedingungen im Prüfraum zurückzuführen. Die der Feuchtebestimmung zugrundeliegende Querschnittsaufteilung zeigt Anlage 23.

Bei den meisten der dargestellten Feuchteprofile sind die aus den Einzelwerten der Feuchteverteilung bestimmten mittleren Feuchten um etwa 1% kleiner als die aus der Gesamtscheibe bestimmten mittleren Feuchten. Dies kann mit Fehlern erklärt werden, die bei der Wägung der kleinen, im Mittel nur etwa 2 g schweren Probenstreifen sowie durch die zeitlich verzögerte Entnahme und Aufteilung der zweiten Holzscheibe entstehen. Denn die heißen Probenstreifen geben gerade in den ersten Sekunden nach der Aufteilung verstärkt Wasserdampf an die umgebende Luft ab.

7. Versuchsergebnisse II: Festigkeiten und E-Moduli

7.1 Allgemeines

7.1.1 Übersicht über die Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der Festigkeitsprüfung und der E-Modul-Ermittlung sind in den Anlagen 2 bis 8 sowie in den Anlagen 24 bis 37 zusammengestellt. In den Tabellen der Anlagen 2 bis 4 sind die Extrem- und Mittelwerte der Festigkeiten und E-Moduli sowie die jeweiligen Variationskoeffizienten als Maß für die Streuung der Versuchsergebnisse angegeben. In den Anlagen 24 bis 37 sind die Versuchsergebnisse graphisch dargestellt.

Wie die Tabellen der Anlagen 2 bis 4 zeigen, schwankten die mittleren Festigkeiten temperatur- und feuchteabhängig in den Bereichen

Biegung:	26	≤	σ_B	≤	45	N/mm ²
Zug:	21	≤	σ_Z	≤	31	N/mm ²
Druck:	21	≤	σ_D	≤	41	N/mm ²

Die E-Moduli wurden in den folgenden Belastungsgrenzen aus den aufgenommenen Kraft-Verformungskurven mittels linearer Regression ermittelt (\bar{F}_B ist der Mittelwert der Bruchkraft je Kollektiv):

	untere Grenze	obere Grenze
Biege-E-Modul	2 kN	
Zug-E-Modul	20 kN	$\bar{F}_B/3$
Druck-E-Modul	$\bar{F}_B / 10$	

Die mit den getroffenen Annahmen berechneten mittleren E-Moduli lagen, wie die Tabellen der Anlagen 2 bis 4 ausweisen, in den Bereichen

Biegung:	9300	\leq	E_B	\leq	11500	N/mm ²
Zug:	8200	\leq	E_Z	\leq	10700	N/mm ²
Druck:	6300	\leq	E_D	\leq	10300	N/mm ²

Der Mittelwertvergleich der Festigkeiten und E-Moduli der Kollektive mit annähernd vergleichbarer mittlerer Holzfeuchte ergab auf dem 5%-Niveau im allgemeinen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Festigkeiten bzw. den E-Moduli der Kollektive mit "gleichmäßiger" und ungleichmäßiger Feuchteverteilung.

7.1.2 Gruppierung in Feuchtebereiche

Für eine detaillierte Darstellung der Versuchsergebnisse in Abhängigkeit von der Temperatur und von der Holzfeuchte war der hier geprüfte Probenumfang zu gering. Die Probenkollektive, und hier insbesondere die Druckprobenkollektive, wurden deshalb in Gruppen zu jeweils sinnvoll erscheinenden Feuchtebereichen wie folgt zusammengefaßt:

0-2%, 3-6% und 7-10%.

7.2 Biegeprüfung

7.2.1 Biegefestigkeit

In Anlage 24 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Biegefestigkeit der Kollektive B1' bis B5' in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragen. In Anlage 25 wurden bei 100°C Prüftemperatur die Kollektive B2, B3 und B5' (Feuchtebereich 7-10%) zusammengefaßt. Zusätzlich sind die aus den Versuchswerten parameterfrei bestimmten 10%- und 20%-Fraktile der Versuchswerte dargestellt. Man erkennt, daß die 20%-Fraktile in etwa mit der "unteren" Standardabweichung zusammenfällt.

Wie aus den Anlagen 24 und 25 ersichtlich, fallen die Festigkeitsmittelwerte nahezu linear mit der Temperatur ab. Im Vergleich zum Mittelwert ist bei der 10%-Fraktile im Temperaturbereich bis 100°C ein geringerer Abfall zu erkennen. Bauholz mit niedrigerer Festigkeit scheint demnach gegenüber Temperaturbeanspruchung relativ unempfindlicher zu sein als Holz höherer Festigkeit. Dies ist im Hinblick auf die Festlegung von Bemessungswerten, wo im allgemeinen von der 5%-Fraktile der Versuchswerte ausgegangen wird, von besonderer Bedeutung.

Aus Anlage 24 ist in Verbindung mit den Anlagen 2 bis 4 noch zu erkennen, daß bei 100°C Prüftemperatur die Prüfkörper mit niedrigerer mittlerer Feuchte (Kollektive B5', B3) tendenziell eine höhere Biegefestigkeit aufweisen als solche mit höherer Feuchte (Kollektiv B2).

7.2.2 Biege-E-Modul

Anlage 33 zeigt den Verlauf des Biege-E-Moduls über der Temperatur einschließlich der jeweiligen Streuungen. Faßt man die Mittelwerte der Kollektive B2, B3 und B5' mit näherungsweise vergleichbarer mittlerer Holzfeuchte (Feuchtebereich 7-10%) zusammen, so ergibt sich zwischen Temperatur und Biege-E-Modul ein ähnlich guter linearer Zusammenhang wie bei der Biegefestigkeit. Auch bei den Biege-E-Moduli wird ähnlich wie bei der Biegefestigkeit bei Prüfkörpern mit niedrigerer mittlerer Holzfeuchte tendenziell ein höherer Biege-E-Modul

beobachtet.

7.3 Zugprüfung

7.3.1 Zugfestigkeit

Anlage 26 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen der Zugfestigkeit der Kollektive Z1' bis Z5' in Abhängigkeit von der Temperatur.

Der Darstellung ist zu entnehmen, daß im Temperaturbereich von 20°C bis 100°C im Gegensatz zur Biegefestigkeit ein geringerer Temperatureinfluß auftritt als im Temperaturbereich von 100°C bis 150°C. Dies geht auch aus Anlage 27 hervor, wo die Kollektive Z2, Z3 und Z5' wie beim Biegeversuch zusammengefaßt wurden (Feuchtebereich 7-10%). Neben den Mittelwerten sind auch die 10%- und 20%-Fraktilen über der Temperatur aufgetragen. Es zeigt sich hier ein ähnliches Bild wie bei der Biegefestigkeit.

Die vorliegenden Ergebnisse an Bauholz bestätigen im wesentlichen die Ergebnisse an Kleinproben, wonach die Zugfestigkeit durch die Temperatur weniger beeinflußt wird als die Biegefestigkeit.

7.3.2 Zug-E-Modul

In Anlage 34 ist der Zug-E-Modul mit Mittelwerten und Streuungen in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Obwohl die mittleren Holzfeuchten bei den Kollektiven mit 100°C nur zwischen 6,6% und 9,3% schwankten (Feuchtebereich 7-10%), waren die Unterschiede in den E_z -Werten überraschend groß. Bei Kollektiv Z5' fällt bei vergleichsweise geringer Feuchte in diesem Zusammenhang eine überdurchschnittlich niedrige Ästigkeit auf (Anlage 3). Faßt man für 100°C die Mittelwerte der Kollektive Z2, Z3 und Z5' wieder zu einem Gesamtmittelwert zusammen, so erkennt man im dargestellten Temperaturbereich auch zwischen Temperatur und Zug-E-Modul einen linearen Zusammenhang.

7.4 Druckprüfung

7.4.1 Druckfestigkeit

Anlage 28 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen der Druckfestigkeit der Kollektive D1' bis D10 in Abhängigkeit von der Temperatur. Für die Darstellung der Trendkurven wurden die Ergebnisse nach den in Abschnitt 7.1 definierten Feuchtebereichen zusammengefaßt. Dabei wurden die Kollektive D4,7',9',10 dem Feuchtebereich 0-2%, die Kollektive D3,5',8' dem Feuchtebereich 3-6% und die Kollektive D2,6' dem Feuchtebereich 7-10% zugeordnet. Diese Zuordnung geht ebenso wie die der Biege- und Zugkollektive aus den Anlagen 5 bis 8 hervor.

Durch diese Gruppierung der Ergebnisse tritt der Einfluß der Feuchte auf die Druckfestigkeit von Bauholz anschaulich in Erscheinung. Insbesondere ist für die Kollektive mit einer Prüftemperatur von 100°C in Verbindung mit Tabelle 4 (Anlage 4) zu erkennen, daß die Druckfestigkeit mit abnehmender Holzfeuchte im allgemeinen ansteigt.

In Anlage 29 sind neben den Mittelwerten und Standardabweichungen wieder die 10%- bzw. 20%-Fraktilen der Versuchswerte eingezeichnet. Die Darstellung zeigt im Temperaturbereich über 100°C einen etwas geringeren Festigkeitsabfall als im Temperaturbereich unter 100°C. Dies ist auf den verhältnismäßig niedrigen Feuchtegehalt des Kollektivs D8' bei 150°C zurückzuführen. Die 20%-Fraktile fällt wieder in etwa mit der unteren Standardabweichung zusammen.

7.4.2 Druck-E-Modul

Der Druck-E-Modul wurde im Gegensatz zu den Biege- und Zug-E-Moduli nicht ausschließlich aus dem auf der Probe gemessenen Verformungsweg, sondern indirekt über den Verschiebungsweg des Druckkolbens ermittelt. Dies war notwendig, um trotz der bei höheren Temperaturen unruhigen Kraft-Verformungsbeziehung einen einheitlichen Kraftbereich je Kollektiv festlegen zu können. Nur so war es möglich, bei teilweise

stark gekrümmten Arbeitslinien vergleichbare Ergebnisse zu erhalten.

Zunächst wurde an 60 Druckprüfkörpern mit erkennbar "normalem" Verformungsverhalten die Korrelation zwischen dem "Proben"-E-Modul $E_{D,P}$ und dem "Maschinen"-E-Modul $E_{D,M}$ bestimmt. Eine lineare Regression $E_{D,P} - E_{D,M}$ ergab einen Korrelationskoeffizienten zwischen den beiden E-Modulwerten von 0,964 und einen Regressionskoeffizienten von 1,25. Damit konnte der "tatsächliche" Druck-E-Modul E_D für alle Prüfkörper aus dem "Maschinen"-E-Modul $E_{D,M}$ nach der Beziehung

$$E_D \approx 1,25 * E_{D,M} \quad (1)$$

bestimmt werden. Anlage 35 zeigt das Ergebnis der Berechnung für alle geprüften Kollektive. Aufgetragen sind Mittelwerte und Standardabweichungen des Druck-E-Moduls. Die Ergebnisse wurden zur weiteren Differenzierung wieder zu Gruppen mit den im Bild angegebenen Feuchtebereichen zusammengefaßt. Man erkennt wie bei der Druckfestigkeit einen deutlichen Einfluß der Holzfeuchte.

7.5 Darstellung der Versuchsergebnisse in relativer Form

Die Darstellung der Versuchsergebnisse erfolgt in diesem Abschnitt in relativer Form sowie auf der Grundlage der gewählten Einteilung in Feuchtebereiche. Als Bezugsgröße wurde der Versuchswert bei 20°C verwendet, wobei im Hinblick auf die definierten Feuchtebereiche die Feuchteabhängigkeit dieses Wertes berücksichtigt wurde. Wo hierfür keine eigenen Versuchswerte verfügbar waren, wurden diese für vergleichbare Probenabmessungen und Holzqualität dem Schrifttum entnommen (Anlagen 38 bis 40).

7.5.1 Biegeversuche

Biegefestigkeit

Zur Festlegung der feuchteabhängigen Bezugsgröße für die Biegefestigkeit wurde in Anlage 38 nach Angaben aus dem Schrifttum die Biegefestigkeit von Bauholz in Abhängigkeit von der Holzfeuchte aufgetragen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, daß bei der Biegefestigkeit von Bauholz der Feuchteeinfluß im Bereich $u < 15\%$ weitgehend abgeschwächt ist. Es scheint daher gerechtfertigt, als Bezugsgröße bei 20°C für alle Feuchtebereiche unverändert das Kollektiv B1' mit einer mittleren Holzfeuchte von $12,5\%$ zu verwenden.

In Anlage 5 wurde der prozentuale Abfall der Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur ermittelt und in Anlage 30 zusammen mit der Zug- und Druckfestigkeit graphisch dargestellt. Wie zu erkennen ist, fällt die Biegefestigkeit temperaturbedingt bis 100°C auf etwa 72% , bis 150°C auf insgesamt etwa 58% der Ausgangsfestigkeit ab.

Im Vergleich dazu ist im Holz-Brandschutz-Handbuch (1983, Bild 11.E) bezogen auf 20°C bis 100°C ein Abfall auf etwa 45% angegeben. Anlage 31 zeigt den relativen Abfall der 10% -Fraktile, der bis 100°C etwas flacher ausfällt als beim Mittelwert.

Biege-E-Modul

Der prozentuale Abfall des Biege-E-Moduls wurde in Anlage 7 ermittelt und in Anlage 36 über der Temperatur aufgetragen. Im Hinblick auf den Feuchteeinfluß bei 20°C wurden die gleichen Annahmen getroffen wie bei der Biegefestigkeit. Wie ersichtlich, fällt der Biege-E-Modul nahezu linear bis 100°C auf 88% , bis 150°C insgesamt auf etwa 81% des Ausgangswertes ab. Demgegenüber weist das Holz-Brandschutz-Handbuch (1983), bezogen auf 20°C , bis 100°C einen Abfall auf 73% aus.

7.5.2 Zugversuche

Zugfestigkeit

In Anlage 39 ist die Feuchteabhängigkeit der Zugfestigkeit von Bauholz bei 20°C nach Angaben aus dem Schrifttum wiedergegeben. Der Graphik kann entnommen werden, daß im Bereich $u < 15\%$ der Einfluß der Holzfeuchte auf die Zugfestigkeit von Bauholz näherungsweise vernachlässigt werden kann. Als Bezugsfestigkeit wurde daher der Wert von Kollektiv Z1' mit $u = 12,2\%$ herangezogen.

Der relative Abfall der Zugfestigkeit wurde in Anlage 5 ermittelt und in Anlage 30 über der Temperatur dargestellt. Es zeigt sich, daß die Zugfestigkeit bis 100°C nur auf etwa 92%, bis 150°C dagegen stärker auf insgesamt etwa 68% der Ausgangsfestigkeit abfällt.

Die 10%-Fraktile der Zugfestigkeit, die in Anlage 31 dargestellt ist, zeigt einen etwas geringeren, aber sonst ähnlichen Abfall wie der Mittelwert.

Zug-E-Modul

Über die Feuchteabhängigkeit des Zug-E-Moduls von Bauholz bei 20°C liegen keine verwertbaren Ergebnisse vor. Deshalb wird auf die Ergebnisse von fehlerfreien Kleinproben von Kufner (1978) zurückgegriffen. Danach steigt der Zug-E-Modul in den hier infragekommenden Feuchtebereichen gegenüber normalklimatisierten Proben nur um etwa 2 bis 6 % an. Der Einfluß der Holzfeuchte bei 20°C im Bereich $u < 12\%$ wird daher hier vernachlässigt. Als Bezugswert wird der Wert von Kollektiv Z1' mit einer Holzfeuchte von 12,2 % verwendet. Die auf den Mittelwert dieses Kollektivs bezogene temperaturbedingte Abnahme des Zug-E-Moduls wurde in Anlage 7 ermittelt und in Anlage 36 aufgetragen. Danach nimmt bis 150°C der Zug-E-Modul ähnlich wie der Biege-E-Modul nahezu linear auf etwa 84% des Ausgangswertes ab.

7.5.3 Druckversuche

Druckfestigkeit

Für die Darstellung der Versuchsergebnisse in relativer Form ist die Abhängigkeit der Druckfestigkeit bei 20°C von der Holzfeuchte zu beachten. Die entsprechenden Ergebnisse für Bauholz aus dem Schrifttum sind in Anlage 40 dargestellt. Eine Abschwächung der Feuchteinflusses mit abnehmender Holzfeuchte ist hier nicht zu erkennen, deshalb muß auch im Bereich $u < 12\%$ noch ein Einfluß der Holzfeuchte unterstellt werden. Da gesicherte Werte jedoch nicht abzuleiten sind, wurden die Druckfestigkeiten bei 20°C auf der sicheren Seite liegend aus der für fehlerfreie Kleinproben geltenden Beziehung

$$\sigma_u = \sigma_{12} \cdot \frac{32 - u (\%)}{20} \quad (2)$$

nach Kollmann (1951) berechnet.

Hierzu wurden die Druckproben-Kollektive wieder zu Gruppen in den definierten Feuchtebereichen zusammengefaßt und die Druckfestigkeit für die Mittelwerte (1%, 4,5%, 8,5%) dieser Feuchtebereiche nach Gl.(3) berechnet und in Anlage 6 eingetragen. Die auf diese Ausgangswerte bezogenen Druckfestigkeiten für 100°C und 150°C sind ebenfalls in dieser Anlage zusammengestellt.

In Anlage 30 wurde der relative Abfall der Druckfestigkeit im Vergleich zur Biege- und Zugfestigkeit dargestellt. Bei 100°C wurden die Kollektive D2 und D6' zusammengefaßt (Feuchtebereich 7-10%), bei 150°C nur das Kollektiv D8' (Feuchtebereich 3-6%) berücksichtigt. Der Graphik sowie der Anlage 6 entnimmt man, daß sich bis 100°C im Feuchtebereich 7-10 % ein temperaturbedingter Festigkeitsabfall auf 56%, bis 150°C im Feuchtebereich 3-6% ein solcher auf insgesamt 44% der Ausgangsfestigkeit einstellt. Im Vergleich dazu nimmt die Druckfestigkeit nach dem Holz-Brandschutz-Handbuch (1983) bis 100°C auf (umgerechnet) 49% ab (Anlage 30).

Anlage 31 zeigt den Verlauf der 10%-Fraktile der Druckfestigkeit. Es ist ein näherungsweise linearer, im Vergleich zum Mittelwert etwas geringerer Festigkeitsabfall erkennbar.

In Anlage 32 ist die relative Druckfestigkeit über der Temperatur nach Feuchtebereichen differenziert dargestellt. Aus der Darstellung geht der Einfluß der Holzfeuchte und der Temperatur auf die Druckfestigkeit von Bauholz anschaulich hervor: Bis 100°C fällt die Druckfestigkeit im Feuchtebereich 0-2% auf 82%, im Feuchtebereich 3-6% auf 67% und im Feuchtebereich 7-10% auf 56% der Ausgangsfestigkeit ab. Bis 150°C fällt die Festigkeit in den beiden erstgenannten Feuchtebereichen insgesamt auf etwa 62% bzw. 44% ab.

Beim weiteren Vergleich mit den im Schrifttum angegebenen Ergebnissen über die Temperaturabhängigkeit der Druckfestigkeit sind die z.T. unterschiedlichen Prüfungs- und Randbedingungen zu beachten.

Kollmann u. Schulz (1944) untersuchten fehlerfreie Kleinproben (Kiefernholz, $\rho_{12} = 0,62 \text{ g/cm}^3$) bei einer "gleichmäßig" verteilten Feuchte von etwa 10 %. Schaffer (1973) untersuchte fehlerfreie Kleinproben (Douglasie, $\rho_0 = 0,46 \text{ g/cm}^3$) bei ungleichmäßiger Feuchteverteilung mit einer Ausgangsfeuchte von 12 %. Bei höheren Temperaturen stellten sich entsprechend niedrigere durchschnittliche Holzfeuchten ein. Dieser günstige Einfluß geringerer Holzfeuchte wird in Anlage 32 ab etwa 70°C deutlich. Knudson u. Schniewind (1975) berichten über weitere Untersuchungen an fehlerfreien Kleinproben, die in der Versuchsdurchführung und in den Ergebnissen weitgehend mit Schaffers Versuchen übereinstimmen.

Druck-E-Modul

Die Feuchteabhängigkeit des Druck-E-Moduls bei 20°C wurde den Diagrammen von Kühne u.a. (1955) entnommen (zitiert bei Glos, 1978, S. 108). Danach wurden die E-Modulwerte des Kollektivs D1' auf die anderen Feuchtebereiche entsprechend umgerechnet. Die so berechneten feuchteabhängigen Druck-E-Moduli für 20°C sind als Bezugsgrößen für die weitere Auswertung in Anlage 8 zusammengestellt. Der daraus abgeleitete relative Abfall der Druck-E-Moduli mit der Temperatur ist

zusammen mit dem Biege- und Zug-E-Modul graphisch dargestellt. Wie zu erkennen ist, ergibt sich im gesamten Temperaturbereich ein nahezu linearer Abfall des Druck-E-Moduls.

Anlage 37 zeigt den Abfall des Druck-E-Moduls in Abhängigkeit von den eingeführten Feuchtebereichen und von der Temperatur. Aus dieser Darstellung geht der beachtliche Einfluß der Holzfeuchte auf den Druck-E-Modul von Bauholz anschaulich hervor. Bis 100°C nimmt danach der Druck-E-Modul im Feuchtebereich 7-10% auf 75% des Ausgangswertes ab, während das Holz-Brandschutz-Handbuch einen Abfall auf etwa 65% angibt (umgerechnet); im Feuchtebereich 3-6% fällt der Druck-E-Modul auf 85%, im Feuchtebereich 0-2% nur mehr auf 90% der Ausgangsfestigkeit ab.

8. Zusammenfassung

Für die brand- und sicherheitstechnische Beurteilung von Holzkonstruktionen spielt das Festigkeitsverhalten des Holzes unter Temperaturbeanspruchung eine entscheidende Rolle. Weil bisher im wesentlichen nur an fehlerfreien Kleinproben gewonnene Erkenntnisse vorlagen, die nicht ohne weiteres auf das Verhalten von Bauholz übertragbar sind, wurde in einem Forschungsvorhaben an praxisnahen Prüfkörpern das elasto-mechanische Verhalten von Bauholz unter Temperaturbeanspruchung untersucht.

An insgesamt 525 Prüfkörpern aus Fichtenkantholz mittlerer Qualität wurden bei Temperaturen von 20°C, 100°C und 150°C und unterschiedlichen Holzfeuchten die Biege-, Druck- und Zugfestigkeit in Faserrichtung des Holzes sowie die entsprechenden E-Moduli experimentell ermittelt.

Da im Brandfall die Holztemperatur unter der verkohlenden Schicht infolge der für die Verdampfung des Wassers benötigten Energie nicht wesentlich über 100°C ansteigt, wurden die Versuche vorwiegend bei dieser Temperatur durchgeführt. Die Temperatur 150°C wurde zur Absteckung des weiteren Trends gewählt. Die Ausgangsfeuchten der Prüfkörper betragen 8 und 12%.

Im einzelnen wurden 128 Biegeproben (Abmessungen 70/150 mm²), 130 Zugproben (50/120 mm²) und 267 Druckproben (50/120 mm²) geprüft. Der Umfang der Probenkollektive betrug i.a. jeweils 25 bis 30 Prüfkörper.

Die mittleren Rohdichten der Probenkollektive lagen zwischen 370 kg/m³ und 410 kg/m³, die mittleren Ästigkeiten (DIN 4074, T.1, Kantholzsortierung) entsprachen bei den Biege- und Zugproben der Sortierklasse S 10, bei den Druckproben der Sortierklasse S 13.

Die Prüfkörper wurden in Trockenschränken auf die vorgesehene Prüftemperatur aufgeheizt und während der Festigkeitsprüfung zur Aufrechterhaltung der Temperatur mit Infrarotstrahlern bestrahlt.

Bei einem Teil der Probenkollektive wurde durch besondere Maßnahmen während der Aufheizung eine näherungsweise "gleichmäßige" Verteilung der Holzfeuchte über den Probenquerschnitt eingestellt. Die mittlere Holzfeuchte während der Festigkeitsprüfung lag je nach Vorbehandlung der Prüfkörper im Bereich 0-2%, 3-6% und 7-10%. Im allgemeinen ergaben sich bei Probenkollektiven vergleichbarer mittlerer Holzfeuchte zwischen Kollektiven mit "gleichmäßiger" und solchen mit über den Probenquerschnitt ungleichmäßiger Feuchteverteilung keine signifikanten Unterschiede der untersuchten elasto-mechanischen Eigenschaftswerte.

Die Versuche zeigten jedoch im allgemeinen einen feuchteabhängigen Einfluß der Temperatur auf die Festigkeit und den E-Modul von Bauholz. Bei einer Prüftemperatur von 100°C fielen im Feuchtebereich 7-10% die Festigkeits- und E-Modulwerte von Fichtenbauholz mittlerer Qualität bezogen auf den jeweiligen Versuchswert bei 20°C (100%) temperaturbedingt auf folgende Werte ab (In Klammern der Vergleichswert nach Holz-Brandschutz-Handbuch, 1983, umgerechnet auf 20°C):

Biegefestigkeit	72% (45%)
Zugfestigkeit	92% (89%)
Druckfestigkeit	56% (49%)
Biege-E-Modul	88% (73%)
Zug-E-Modul	88% (-)
Druck-E-Modul	75% (65%)

Der Temperatureinfluß ist wie ersichtlich in allen Fällen geringer als bisher angenommen. Bei den Druckversuchen zeigte sich in den anderen Feuchtebereichen im Vergleich zu den Literaturangaben ein noch etwas günstigeres Temperaturverhalten. So fiel im angegebenen Temperaturbereich die Druckfestigkeit von Fichtenbauholz im Feuchtebereich 3-6% auf 67%, im Feuchtebereich 0-2% nur noch auf 82% der Ausgangsfestigkeit ab. Beim Druck-E-Modul ergab sich jeweils eine Reduzierung auf 85% bzw. 90% des Ausgangswertes bei 20°C.

Die Ergebnisse vorliegender Untersuchung bestätigen, daß die aus Versuchen an Kleinproben gewonnene Erkenntnis, wonach die Zugfestigkeit am wenigsten, die Druckfestigkeit dagegen am stärksten von der Temperatur beeinflußt wird, auch für Bauholz gilt. Es wurde aber gezeigt, daß der im Schrifttum und insbesondere im Holz-Brandschutz-Handbuch angegebene temperaturbedingte Abfall der elasto-mechanischen Eigenschaftswerte des Holzes auf Bauholz üblicher Abmessungen und Qualität in diesem Umfang nicht zutrifft.

10. Schrifttum

- Aplin, E. N.; Green, D. W.; Evans, J. W.; Barrett, J. D. (1968)
The influence of moisture content on the flexural properties of Douglas-fir dimension lumber.
Research Paper Forest Products Laboratory 475, Madison, WI. U.S.-Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 32 S.
- Barrett, J. D.; Lau, W. (1989)
Moisture content adjustments for in-grade data.
International Council for Building Research Studies and Documentation, Working Commission W 18A-Timber Structures: S. 1-46
- Dorn, H.; Egner, K. (1967)
Brandveruche an brettschichtverleimten Holzträgern unter Biegebeanspruchung.
Holz Roh-Werkstoff 25: 308-320
- Gerhards, C.C. (1982)
Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: An analysis of immediate effects.
Wood and Fiber 14: S.4-36

- Glos, P. (1978)
Zur Bestimmung des Festigkeitsverhaltens von Brett-
schichtholz bei Druckbeanspruchung aus Werkstoff- und
Einwirkungskenngrößen.
Laboratorium für den konstruktiven Ingenieurbau (LKI) TU
München, Sonderforschungsbereich 96, Heft 35
- Goulet, M. (1959)
Die Abhängigkeit der Querkzugfestigkeit von Eichen-, Bu-
chen- und Fichtenholz von der Feuchtigkeit und der Tempe-
ratur im Temperaturbereich von 0° bis 100°C.
Dissertation LMU München, 1959 (vgl. auch Holz Roh-
Werkstoff 1960, 18: 325-331)
- Green, D. W.; Evans, J. W. (1988)
Moisture content-property relationship for dimension lum-
ber.
Meeting of International Union of Forestry Research Orga-
nisations, Timber Engineering Group. Proceedings JUFRO S
5.02, Turku, Finnland: 124-146
- Hoffmeyer, P. (1980)
The moisture-mechanical property relationship as depen-
dent on wood quality.
Meeting of International Union of Forestry Research
Organisations, Timber Engineering Group. Proceedings
JUFRO S 5.02, Oxford, U.K.: 345-359
- Holz-Brandschutz-Handbuch (1983)
Hrsg. v. K. Kordina und C. Meyer-Ottens, DGfH München
- Kollmann, F. (1940)
Die mechanischen Eigenschaften verschieden feuchter Höl-
zer im Temperaturbereich von -200 bis +200°C.
VDI-Forschungsheft 403, VDI-Verlag Berlin
- Kollmann, F.; Schulz, F. (1944)
Versuche über den Einfluß der Temperatur auf die Festig-
keitswerte von Flugzeugholzbaustoffen.
Teilbericht 1 und 2, Eberswalde, 23 bzw. 25 S.
- Kollmann, F. (1951)
Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe Bd. I, 2.
Aufl., Springer-Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg,
1050 S.
- Knudson, R.M.; Schniewind, A.P. (1975)
Performance of structural wood members exposed to fire.
For. Prod. J. 25 (2): 22-23
- Kühne, H. u.a. (1955)
Über den Einfluß von Wassergehalt, Raumgewicht, Faser-
stellung und Jahrringstellung auf die Festigkeit und
Verformbarkeit schweizerischen Fichten-, Tannen-, Lär-
chen-, Rotbuchen- und Eichenholzes.
Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt
Zürich, Bericht Nr. 183, 120 S.

- Kufner, M. (1978)
Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit von Holz verschiedener Rohdichte in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt.
Holz Roh-Werkstoff 36: 435-439
- McLain, T.E.; DeBonis, A.L.; Green, D. W.; Wilson, F. J.; Link, C. L. (1984)
The influence of moisture content on the flexural properties of Southern Pine dimension lumber.
Research Paper Forest Products Laboratory 447, Madison, WI.U.S.- Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 40 S.
- Ödeen, K. (1967)
Fire resistance of glued, laminated timber structures. Proceedings of the symposium held at the Fire Research Station Boreham Wood, Herts., 25.10.1967, HMSO London, 1970
- Östmann, B.A.-L. (1985)
Wood tensile strength at temperatures and moisture contents simulating fire conditions.
Wood Sci. Technology 19: 103-116
- Schaffer, E.L. (1973)
Effect of pyrolytic Temperatures on the Longitudinal Strength of Dry Douglas-fir.
J. Test. Eval. 1: 319-329, ASTM
- Schneider, A. (1960)
Neue Diagramme zur Bestimmung der relativen Luftfeuchtigkeit über gesättigten wässrigen Salzlösungen und wässrigen Schwefelsäurelösungen bei verschiedenen Temperaturen.
Holz Roh-Werkstoff 18: 269-272
- Tratzmiller, M. (1988)
Die Druckfestigkeit von Fichtenbauholz unter im Brandfall zu erwartenden Bedingungen.
Diplomarbeit am Fachbereich Forstwissenschaft der LMU München, Inst.f.Holzforschung
- Wood Handbook (1987)
United States Department of Agriculture, Washington, DC.

Anlagen 1 bis 40

Tabelle 1: Versuchsprogramm: Probenkollektive und Prüfkörperanzahl je Kollektiv für den Biege-, Zug- und Druckversuch

Festigkeit	Probenquerschnitt [mm ²]	Temperatur				Summe der Prüfkörper	
		20°C	100°C		150°C		
		Ausgangsfeuchte u _A					
		12%	12%	8%	8%		
Biegefestigkeit	70x150	B 1' 25	B 2 26	B 3 26	B 4 26	103	
				B 5' 25		25	128
Zugfestigkeit	50x120	Z 1' 26	Z 2 26	Z 3 26	Z 4 26	104	
				Z 5' 26		26	130
Druckfestigkeit	50x120	D 1' 30	D 2 24	D 3 25	D 4 24	103	
				D 5' 26		26	
			D 6' 31	D 7' 27	D 8' 34	92	
					D 9' 22	22	
					D10 ¹⁾ 24	24	267
							525

1) u_A ≈ 12%

Die mit ' gekennzeichneten Kollektive wurden bei näherungsweise "gleichmäßiger" Feuchteverteilung geprüft

Tabelle 2: Ergebnisse der Biegeversuche bei unterschiedlichen Temperaturen (ϑ):
 Biegefestigkeit (σ_B), Biege-E-Modul (E_B), Rohdichte (ρ_0)
 Ästigkeit (a) und Feuchte (u) der untersuchten Probenkollektive, (...) Variationskoeffizient

Bezeichnung	Probenkollektiv				
	B 1'	B 2	B 3	B 4	B 5'
ϑ [°C]	20	100	100	150	100
Probenanzahl	25	26	26	26	25
σ_B [N/mm ²]					
min.	21,1	17,1	20,1	12,5	23,9
mittel	45,0	28,8	34,7	26,2	34,4
(%)	(23%)	(19%)	(22%)	(28%)	(18%)
max.	62,6	44,4	48,7	39,4	44,3
E_B [N/mm ²]					
min.	6690	6460	7760	5500	7720
mittel	11530	9520	10590	9300	10490
(%)	(16%)	(16%)	(17%)	(20%)	(14%)
max.	14310	13340	14170	12410	14410
ρ_0 [g/cm ³]					
min.	0,35	0,36	0,37	0,36	0,36
mittel	0,42	0,42	0,42	0,41	0,41
(%)	(10%)	(10%)	(8%)	(10%)	(7%)
max.	0,51	0,52	0,50	0,48	0,48
a [1]					
min.	0,17	0,12	0,07	0,12	0,14
mittel	0,30	0,30	0,31	0,30	0,30
(%)	(37%)	(33%)	(39%)	(43%)	(37%)
max.	0,62	0,44	0,57	0,62	0,45
u [%]					
min.	11,5	8,9	6,1	3,4	6,2
mittel	12,5	10,3	7,4	4,7	7,0
(%)	(5%)	(8%)	(8%)	(17%)	(9%)
max.	14,2	12,0	8,3	6,9	8,4
Feuchteverteilung über den Probenquerschnitt	"gleichmäßig" ¹⁾	un- gleich- mäßig ¹⁾	un- gleich- mäßig ²⁾	un- gleich- mäßig ²⁾	"gleichmäßig" ²⁾

- 1) Probenkollektiv vor Wärmebehandlung bei 20°C/65% rLf. klimatisiert ($u_A \approx 12\%$)
- 2) Probenkollektiv vor Wärmebehandlung bei 20°C/43% rLf. klimatisiert ($u_A \approx 8\%$)

Tabelle 3: Ergebnisse der Zugversuche bei unterschiedlichen Temperaturen (ϑ): Zugfestigkeit (σ_Z), Zug-E-Modul (E_Z), Rohdichte (ρ_0), Ästigkeit (a) und Feuchte (u) der untersuchten Probenkollektive, (...) Variationskoeffizient

Bezeichnung	Probenkollektiv				
	Z 1'	Z 2	Z 3	Z 4	Z 5'
ϑ [°C]	20	100	100	150	100
Probenanzahl	26	26	26	26	26
σ_Z min.	20,2	11,8	17,8	14,9	14,0
σ_Z mittel [N/mm ²]	31,2 (23%)	26,9 (27%)	28,7 (26%)	21,3 (23%)	30,8 (29%)
σ_Z max.	49,9	43,0	45,0	35,6	53,4
E_Z min.	7970	3960	5340	6120	5890
E_Z mittel [N/mm ²]	10740 (16%)	8210 (19%)	9690 (20%)	8990 (14%)	10470 (18%)
E_Z max.	14500	10880	14800	11400	14330
ρ_0 min.	0,37	0,37	0,37	0,37	0,38
ρ_0 mittel [g/cm ³]	0,43 (8,9%)	0,43 (7,3%)	0,42 (8,7%)	0,43 (8,2%)	0,43 (8%)
ρ_0 max.	0,53	0,49	0,52	0,52	0,51
a min.	0,13	0,24	0,16	0,19	0,14
a mittel [1]	0,40 (36%)	0,41 (28%)	0,41 (31%)	0,34 (34%)	0,34 (40%)
a max.	0,64	0,61	0,64	0,60	0,60
u min.	11,2	8,0	5,3	2,3	5,4
u mittel [%]	12,2 (4%)	9,3 (7%)	7,0 (8%)	3,5 (22%)	6,6 (9%)
u max.	13,3	10,6	7,9	5,0	7,5
Feuchteverteilung über den Probenquerschnitt	"gleichmäßig" ¹⁾	ungleichmäßig ¹⁾	ungleichmäßig ²⁾	ungleichmäßig ²⁾	"gleichmäßig" ²⁾

1) Probenkollektiv vor Wärmebehandlung bei 20°C/65% rLf. klimatisiert ($u_A \approx 12\%$)

2) Probenkollektiv vor Wärmebehandlung bei 20°C/43% rLf. klimatisiert ($u_A \approx 8\%$)

Tabelle 4: Ergebnisse der Druckversuche bei unterschiedlichen Temperaturen (ϑ):
 Druckfestigkeit (σ_D), Druck-E-Modul (E_D), Rohdichte (ρ_0)
 Ästigkeit (a) und Feuchte (u) der untersuchten Probenkollektive, (...) Variationskoeffizient

Bezeichnung	Probenkollektiv									
	D 1'	D 2	D 3	D 4	D 5'	D 6'	D 7'	D 8'	D 9'	D 10
ϑ [°C]	20	100	100	150	100	100	100	150	150	150
Probenanzahl	30	24	25	24	26	31	27	34	22	24
σ_D [N/mm ²]										
min.	22,4	15,7	16,8	24,7	16,0	14,9	26,6	12,6	19,9	15,0
mittel	32,8 (17%)	21,5 (20%)	29,7 (19%)	34,0 (19%)	28,8 (28%)	22,0 (18%)	40,9 (25%)	19,4 (28%)	28,8 (17%)	30,3 (24%)
max.	41,7	31,5	42,8	45,0	46,0	31,6	57,9	31,0	37,5	43,4
E_D [N/mm ²]										
min.	6200	5110	4700	5770	5100	5210	6590	3450	6030	3380
mittel	10300 (20%)	8060 (23%)	9400 (19%)	9680 (19%)	9430 (24%)	7970 (16%)	10060 (21%)	6330 (26%)	8210 (14%)	8400 (25%)
max.	13880	13260	12590	13630	14490	10240	14070	9760	10350	12300
ρ_0 [g/cm ³]										
min.	0,32	0,32	0,32	0,32	0,33	0,33	0,34	0,31	0,32	0,32
mittel	0,38 (9%)	0,40 (11%)	0,40 (9%)	0,41 (12%)	0,39 (9%)	0,39 (9%)	0,39 (9%)	0,37 (9%)	0,38 (11%)	0,39 (10%)
max.	0,45	0,51	0,48	0,52	0,49	0,46	0,47	0,44	0,50	0,48
a [1]										
min.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
mittel	0,19 (105%)	0,18 (99%)	0,17 (96%)	0,21 (90%)	0,21 (86%)	0,14 (99%)	0,18 (101%)	0,14 (129%)	0,17 (100%)	0,14 (100%)
max.	0,80	0,64	0,56	0,70	0,70	0,49	0,72	0,64	0,49	0,44
u [%]										
min.	11,1	5,3	3,3	0,2	4,3	6,7	0,03	2,2	1,3	0,3
mittel	11,7 (3%)	7,6 (16%)	4,6 (14%)	0,9 (55%)	5,8 (12%)	9,1 (12%)	0,4 (91%)	4,3 (39%)	1,9 (20%)	1,0 (55%)
max.	12,3	9,6	5,8	2,0	8,0	11,0	1,2	8,8	2,5	2,3
Feuchteverteilung über den Probenquerschnitt	"gleichmäßig"1)	un- gleich- mäßig1)	un- gleich- mäßig2)	un- gleich- mäßig2)	"gleich- mäßig"2)	"gleich- mäßig"1)	"gleich- mäßig"2)	"gleich- mäßig"2)	"gleich- mäßig"2)	un- gleich- mäßig1)

1) Probenkollektiv vor Wärmebehandlung bei 20°C/65% rLf. klimatisiert ($u_A \approx 12\%$)
 2) Probenkollektiv vor Wärmebehandlung bei 40°C/47% rLf. klimatisiert ($u_A \approx 8\%$)

Tabelle 5: Absoluter und prozentualer Abfall der Biege- und Zugfestigkeit (σ_B, σ_Z) in den einzelnen Feuchtebereichen im Temperaturbereich 20°C-150°C

Temperatur [°C]	Beanspruchung	Prüfkollektiv	Feuchte			Festigkeit		$\frac{\sigma(\vartheta)}{\sigma(20^\circ\text{C})} \cdot 100$ [%]
			Mittelwert Einzelkollektiv	Mittelwert	Bereich	Mittelwert Einzelkollektiv	Mittelwert	
ϑ [°C]			u [%]			$\sigma_{B,Z}$ [N/mm ²]		
20°C	Biegung	B1'	12,5	-	≈ 12	45,0	-	100
	Zug	Z1'	12,2	-	≈ 12	31,2	-	100
100°C	Biegung	B2 B3 B5'	10,3 7,4 7,0	8,2	7-10	28,8 34,7 34,4	32,6	72
	Zug	Z2 Z3 Z5'	9,3 7,0 6,6	7,6	7-10	26,9 28,7 30,8	28,8	92
150°C	Biegung	B4	4,7	-	3-6	26,2	-	58
	Zug	Z4	3,5	-	3-6	21,3	-	68

Tabelle 6: Absoluter und prozentualer Abfall der Druckfestigkeit (σ_D) in den einzelnen Feuchtebereichen im Temperaturbereich 20°C-150°C

Temperatur [°C]	Prüfkollektiv	Feuchte			Festigkeit		$\frac{\sigma_D(\vartheta)}{\sigma_D(20^\circ\text{C})} \cdot 100$ [%]
		Mittelwert Einzelkollektiv	Mittelwert	Bereich	Mittelwert Einzelkollektiv	Mittelwert	
ϑ [°C]			u [%]		σ_D [N/mm ²]		
20°C	D1'	11,7	-	≈ 12	32,8	-	
		-	-	0-2	50,1	1)	100
			-	3-6	43,6	1)	100
				7-6	38,5	1)	100
100°C	D7'	0,4	-	0-2	40,9	-	82
	D3	4,6	5,2	3-6	29,7	29,2	67
	D5'	5,8			28,8		
	D2	7,6	8,4	7-10	21,5	21,8	56
	D6'	9,1			22,0		
150°C	D4	0,9			34,0		
	D10	1,0	1,3	0-2	30,3	31,0	62
	D9'	1,9			28,8		
	D8'	4,3	-	3-6	19,4	-	44

1) Berechnet nach Kollmann (1951) für Mittelwerte der definierten Feuchtebereiche

Tabelle 7: Absoluter und prozentualer Abfall der Biege- und Zug-
E-Moduli (E_B , E_Z) in den einzelnen Feuchtebereichen
im Temperaturbereich 20°C-150°C

Temperatur [°C]	Beanspruchung	Prüfkollektiv	Feuchte			E-Modul		$\frac{E(\vartheta)}{E(20^\circ\text{C})} \cdot 100$ [%]
			Mittelwert Einzelkollektiv	Mittelwert	Bereich	Mittelwert Einzelkollektiv	Mittelwert	
ϑ [°C]			u [%]			$E_{B,Z}$ [N/mm ²]		
20°C	Biegung	B1'	12,5	-	≈ 12	11,53	-	100
	Zug	Z1'	12,2	-	≈ 12	10,74	-	100
100°C	Biegung	B2 B3 B5'	10,3 7,4 7,0	8,2	7-10	9,52 10,59 10,49	10,2	88
	Zug	Z2 Z3 Z5'	9,3 7,0 6,6	7,6	7-10	8,21 9,69 10,47	9,46	88
150°C	Biegung	B4	4,7	-	3-6	9,30	-	81
	Zug	Z4	3,5	-	3-6	8,99	-	84

Tabelle 8: Absoluter und prozentualer Abfall des Druck-E-Moduls (E_D) in den einzelnen Feuchtebereichen im Temperaturbereich 20°C-150°C

Temperatur [°C]	Prüfkollektiv	Feuchte			E _D -Modul		$\frac{E_D(\vartheta)}{E_D(20^\circ\text{C})} \cdot 100$ [%]
		Mittelwert Einzelkollektiv	Mittelwert	Bereich	Mittelwert Einzelkollektiv	Mittelwert	
ϑ		u			E _D		
		[%]			[kN/mm ²]		
20°C	D1'	11,7	-	≈ 12	10,3	-	
		-		0-2	11,2	1)	100
				3-6	11,0	1)	100
				7-10	10,7	1)	100
100°C	D7'	0,4	-	0-2	10,6	-	90
	D3	4,6	5,2	3-6	9,40	9,41	85
	D5'	5,8			9,43		
	D2	7,6	8,4	7-10	8,06	8,01	75
	D6'	9,1			7,97		
150°C	D4	0,9	1,3	0-2	9,68	8,76	78
	D10	1,0			8,40		
	D9'	1,9			8,21		
	D8'	4,3	-	3-6	6,33	-	57

1) Umgerechnet nach Angaben von Kühne u.a. (1955) zitiert nach Glos (1978, S.108)

Tabelle 9: Feuchtebehandlung der Druckproben-Kollektive D5' bis D9' während der Aufheizung bei unterschiedlichen Temperaturen zur Erzielung einer "gleichmäßigen" Feuchteverteilung

	Soll-Holzfeuchten [%]				
	bei				
	100 °C			150 °C	
	2	8	12	2	8
Kollektiv	D7'	D5'	D6'	D9'	D8'
Salzlösung	LiCl	NaCl	K ₂ SO ₄	-	K ₂ SO ₄
Lagerdauer im Trockenschrank [h]	30	20	16	20	20
Druck [bar]	≈ 1	≈ 1	≈ 1,5	≈ 1,5	≈ 3
erzielte mittlere Feuchte [%]	0,4	5,8	9,1	1,9	4,3

Ansicht Strahler

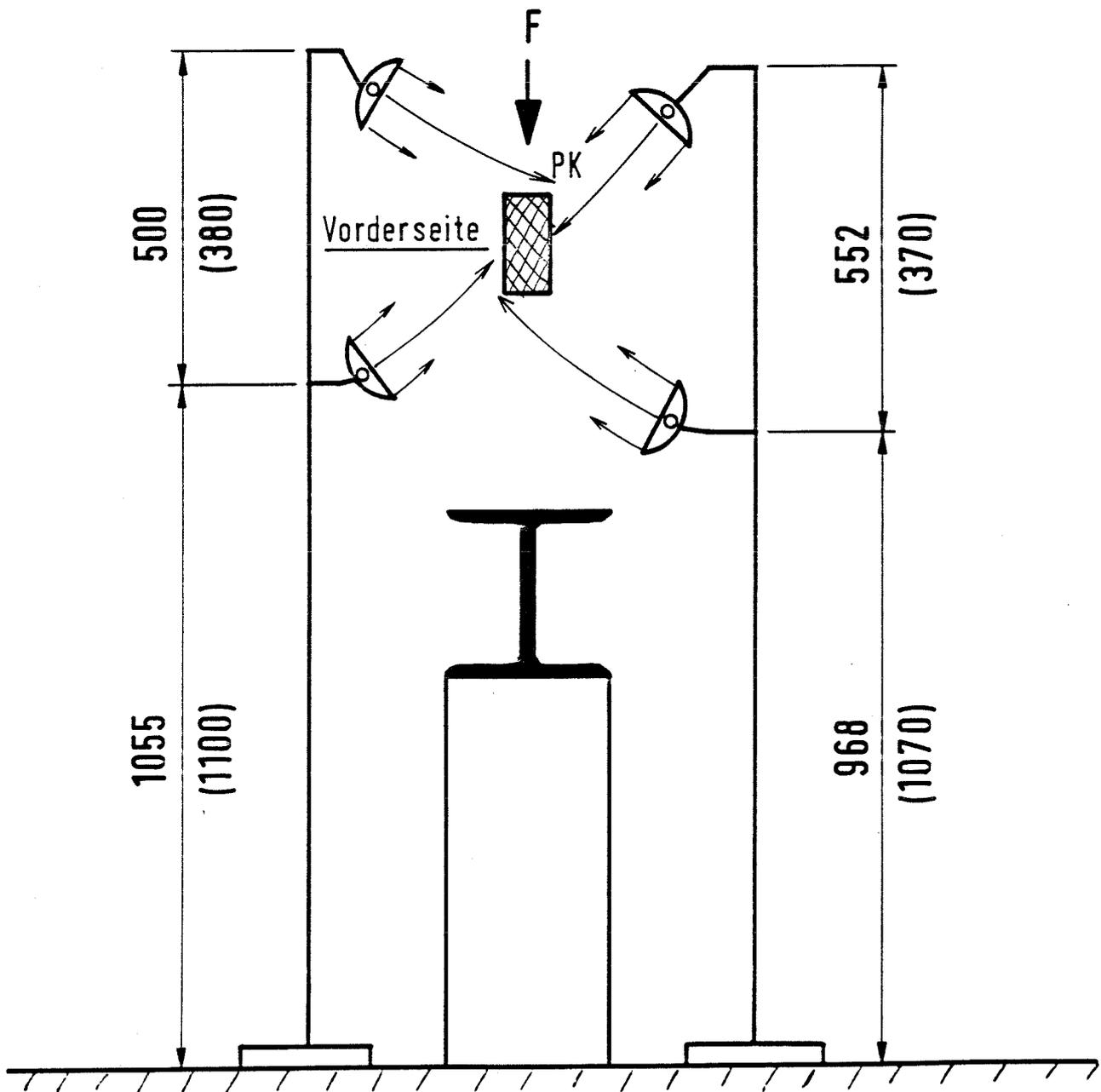


Bild 1: Gesamtanordnung der Infrarot-Hellstrahler beim Biegeversuch für $\sigma = 100^\circ\text{C}$ (150°C). Maße in [mm]

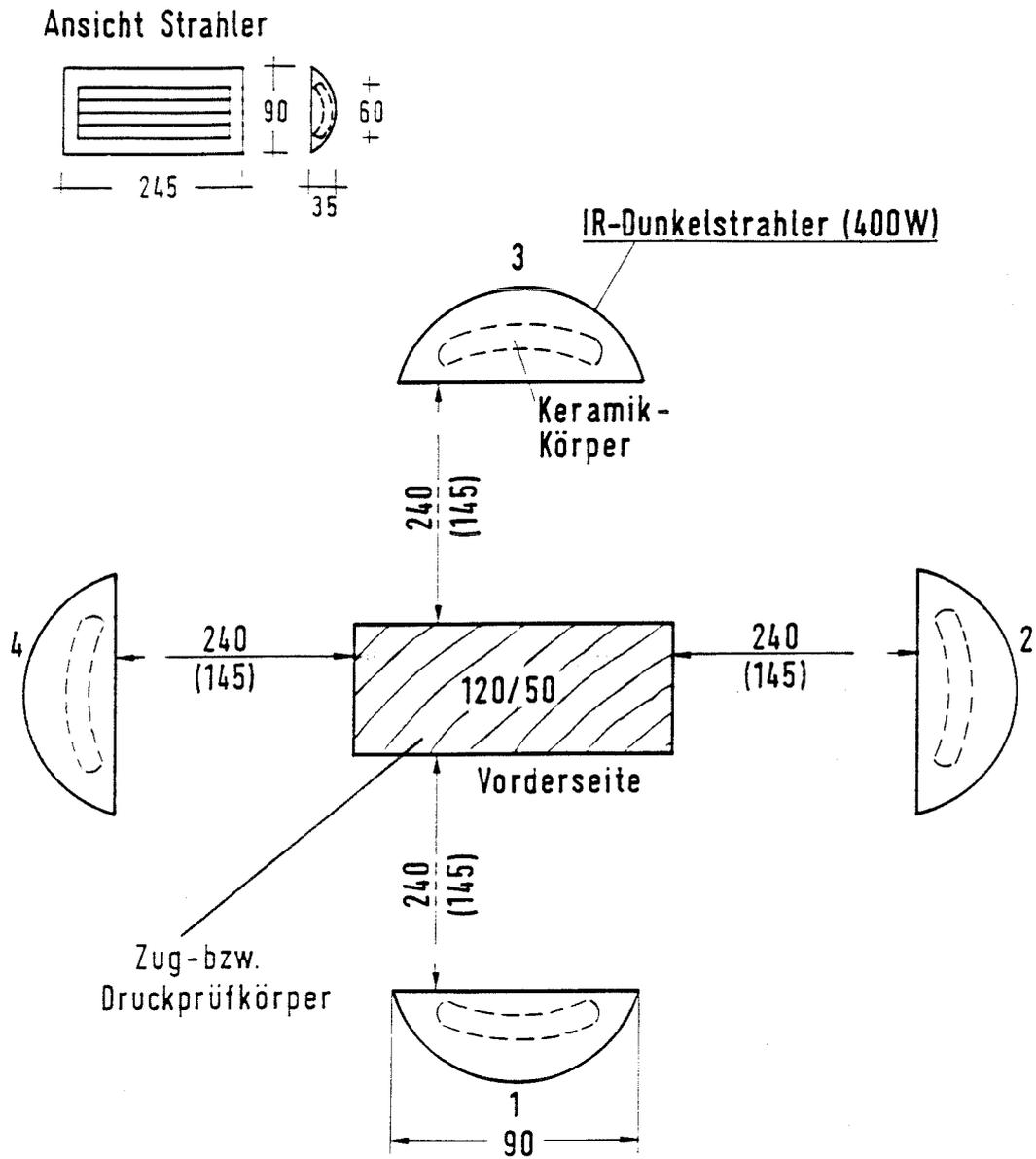
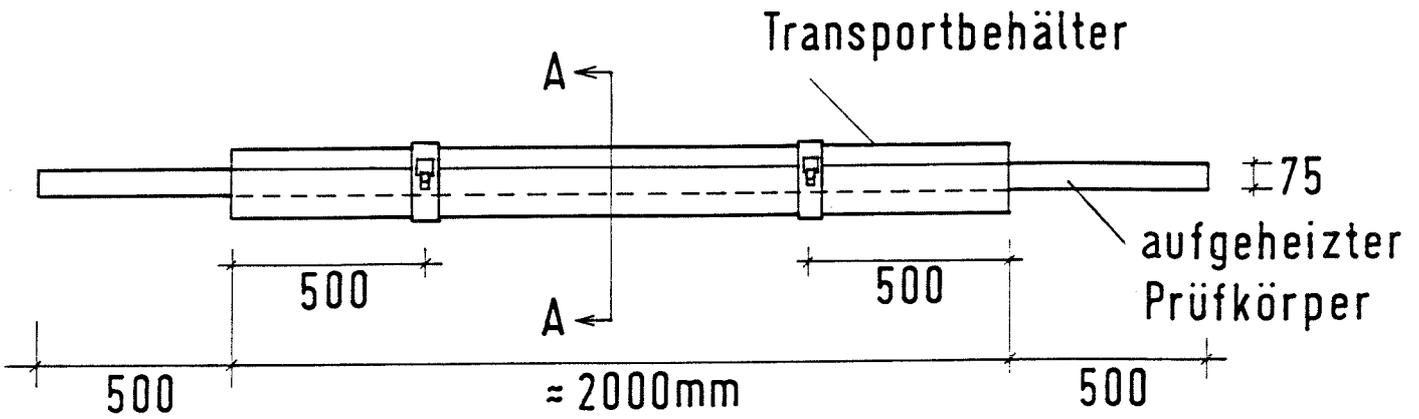


Bild 3: Anordnung der Infrarot-Dunkelstrahler beim Zug- und Druckversuch für $\vartheta = 100^\circ\text{C}$ (150°C). Beim Druckversuch Strahler 1 und 3 aus Platzgründen quer angeordnet. Maße in [mm]

Ansicht



Querschnitt A-A

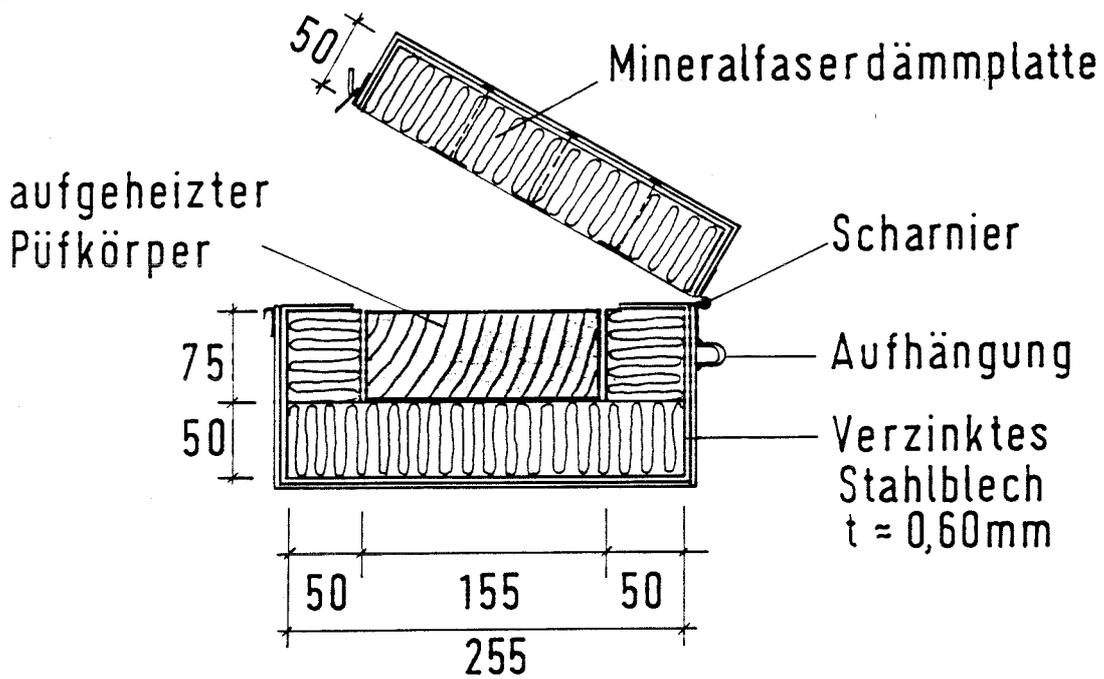
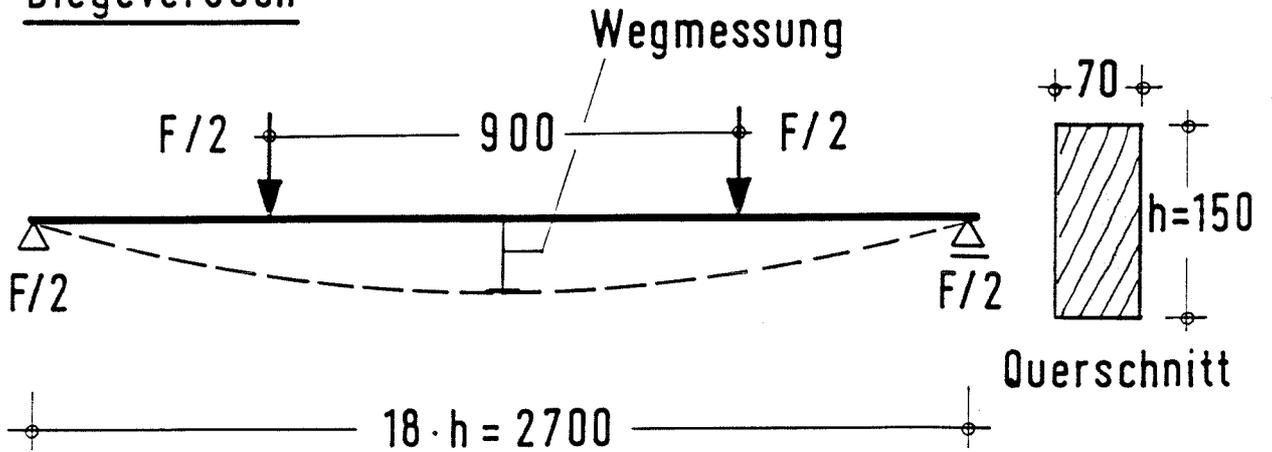
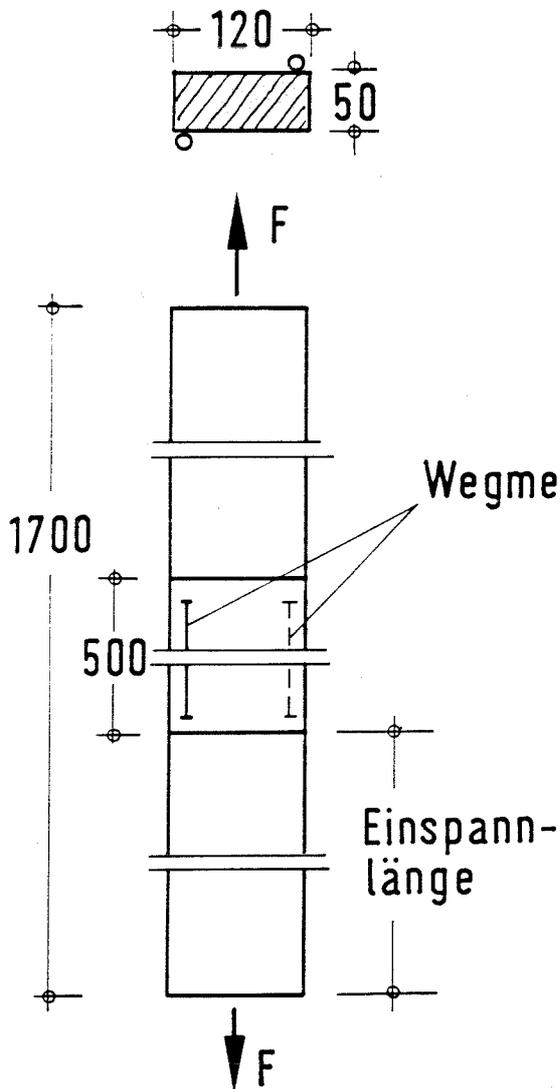


Bild 4: Transportbehälter für aufgeheizten Prüfkörper

Biegeversuch



Zugversuch



Druckversuch

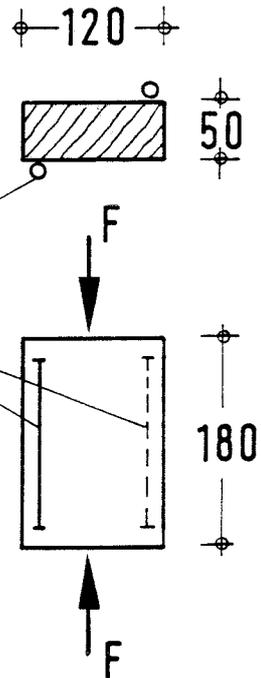


Bild 5: Prinzip der Biege-, Zug- und Druckprüfung. Maße in [mm]

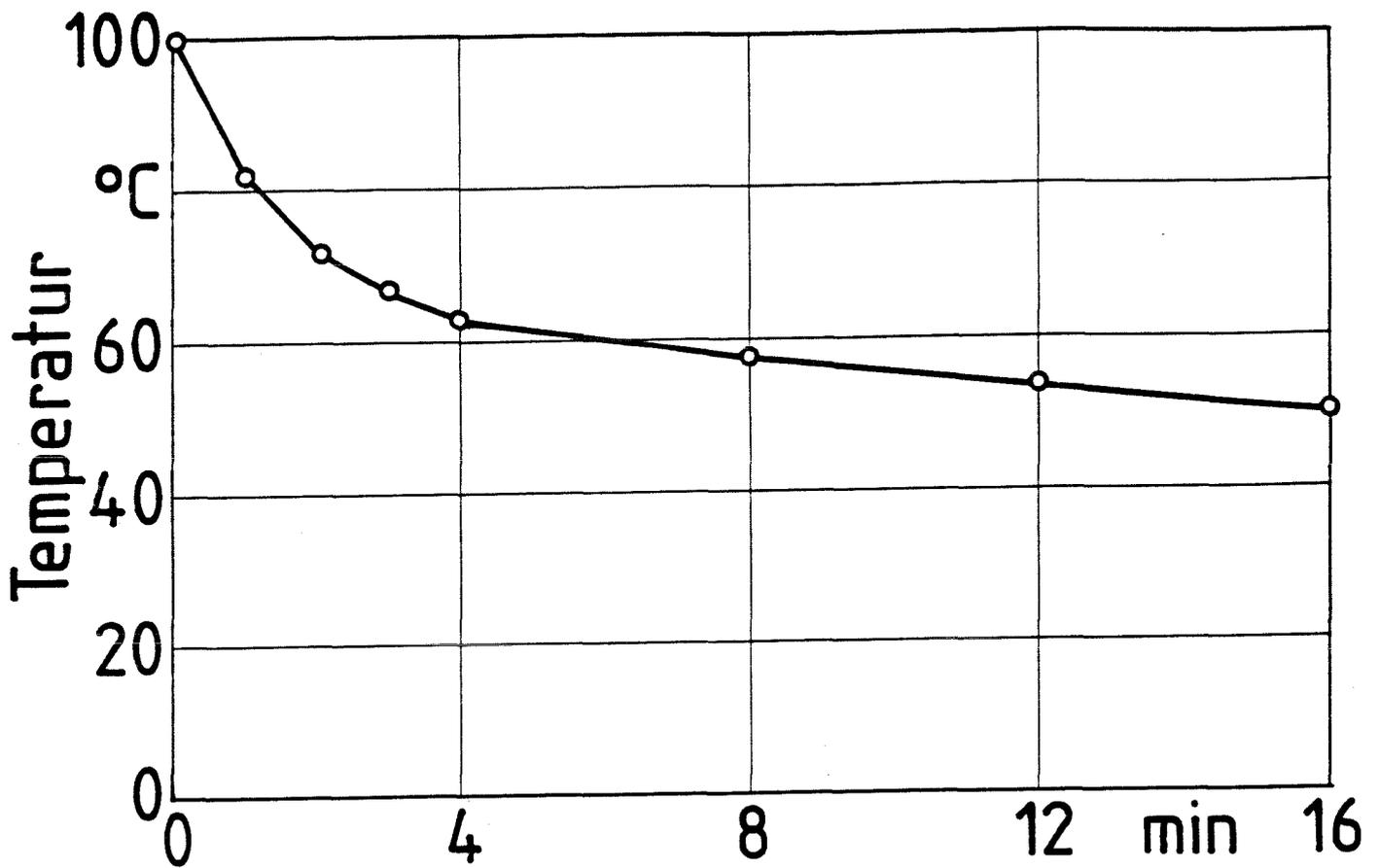


Bild 6: Zeitlicher Verlauf der Abkühlung der Holzoberfläche beim 100°-Prüfkörper im Rauklima (20°C)

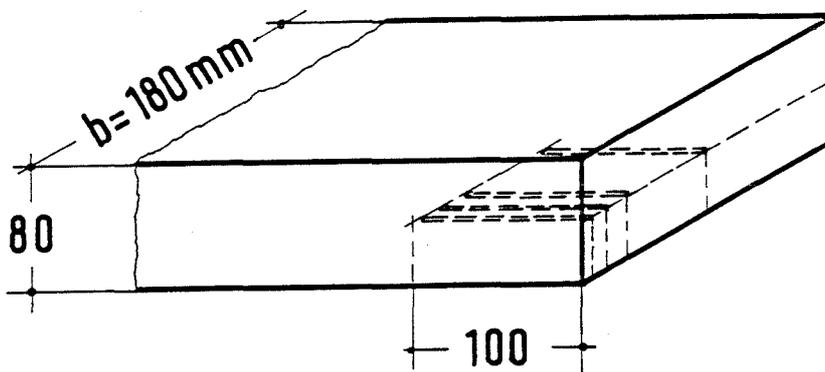


Bild 7: Anordnung der Thermoelemente in 100 mm Tiefe zur Messung der in der Anlage 16 dargestellten Temperaturverteilung im Inneren

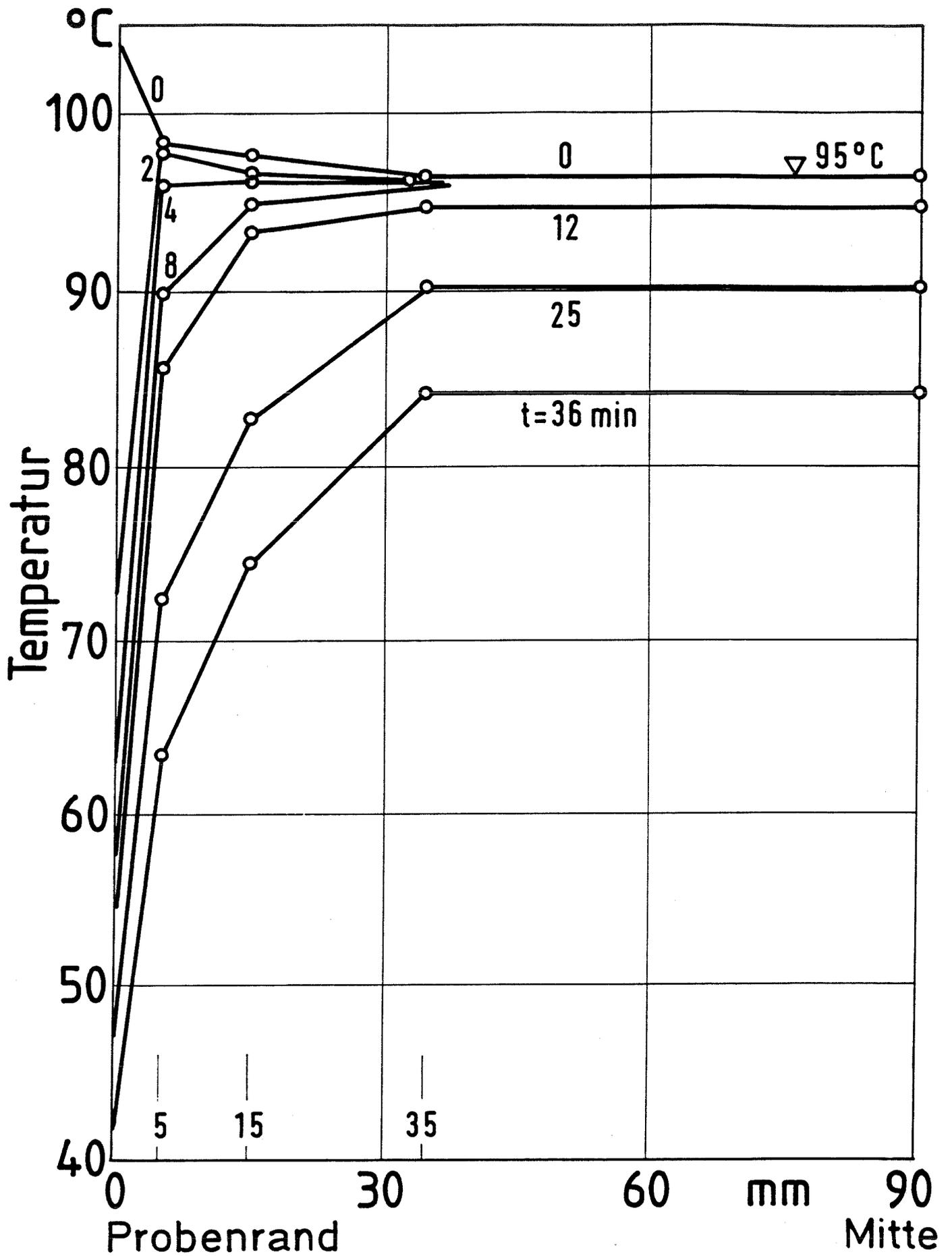


Bild 8: Zeitlicher Verlauf der Temperaturverteilung im Querschnitt des 100°-Prüfkörpers bei Abkühlung im Raumklima (20°C)

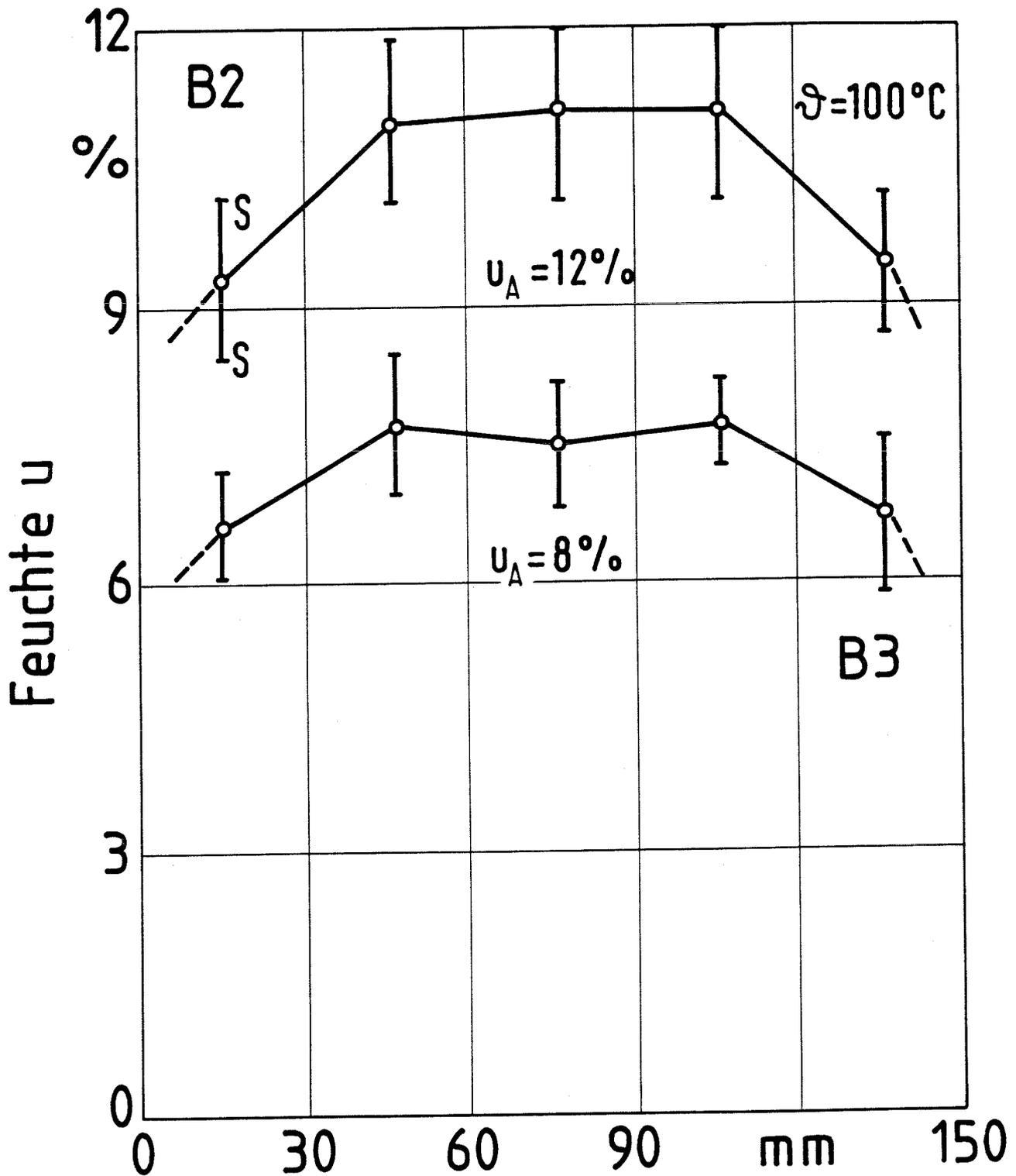


Bild 9: Biegeversuch. Ungleichmäßige Feuchteverteilung über die Prüfkörperhöhe (150 mm) bei $\vartheta = 100^\circ\text{C}$ und unterschiedlichen Ausgangsfeuchten u_A .
s: Standardabweichung

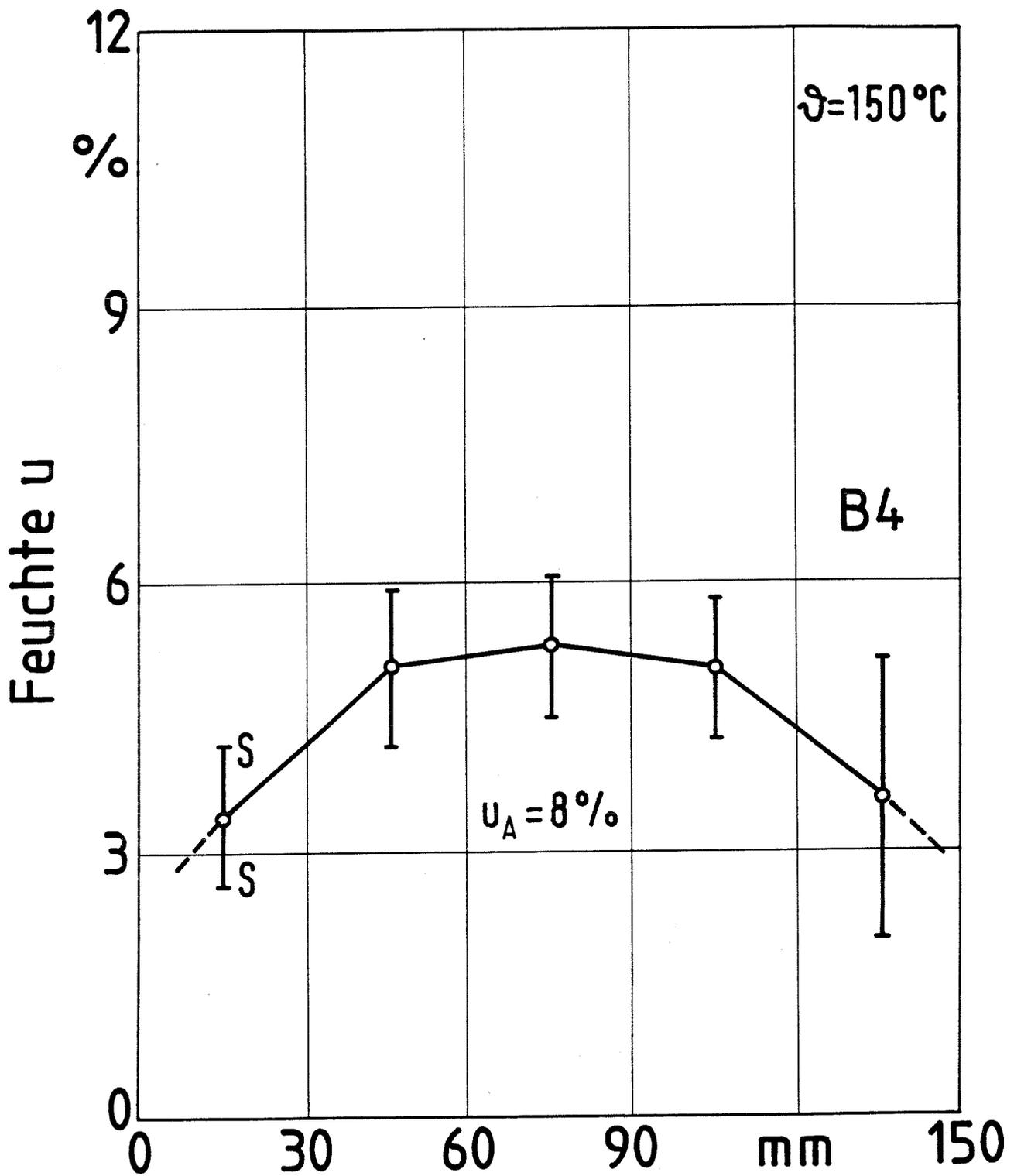


Bild 10: Biegeversuch. Ungleichmäßige Feuchteverteilung über die Prüfkörperhöhe (150 mm) bei $\vartheta = 150^{\circ}\text{C}$ und $u_A = 8\%$.
s: Standardabweichung

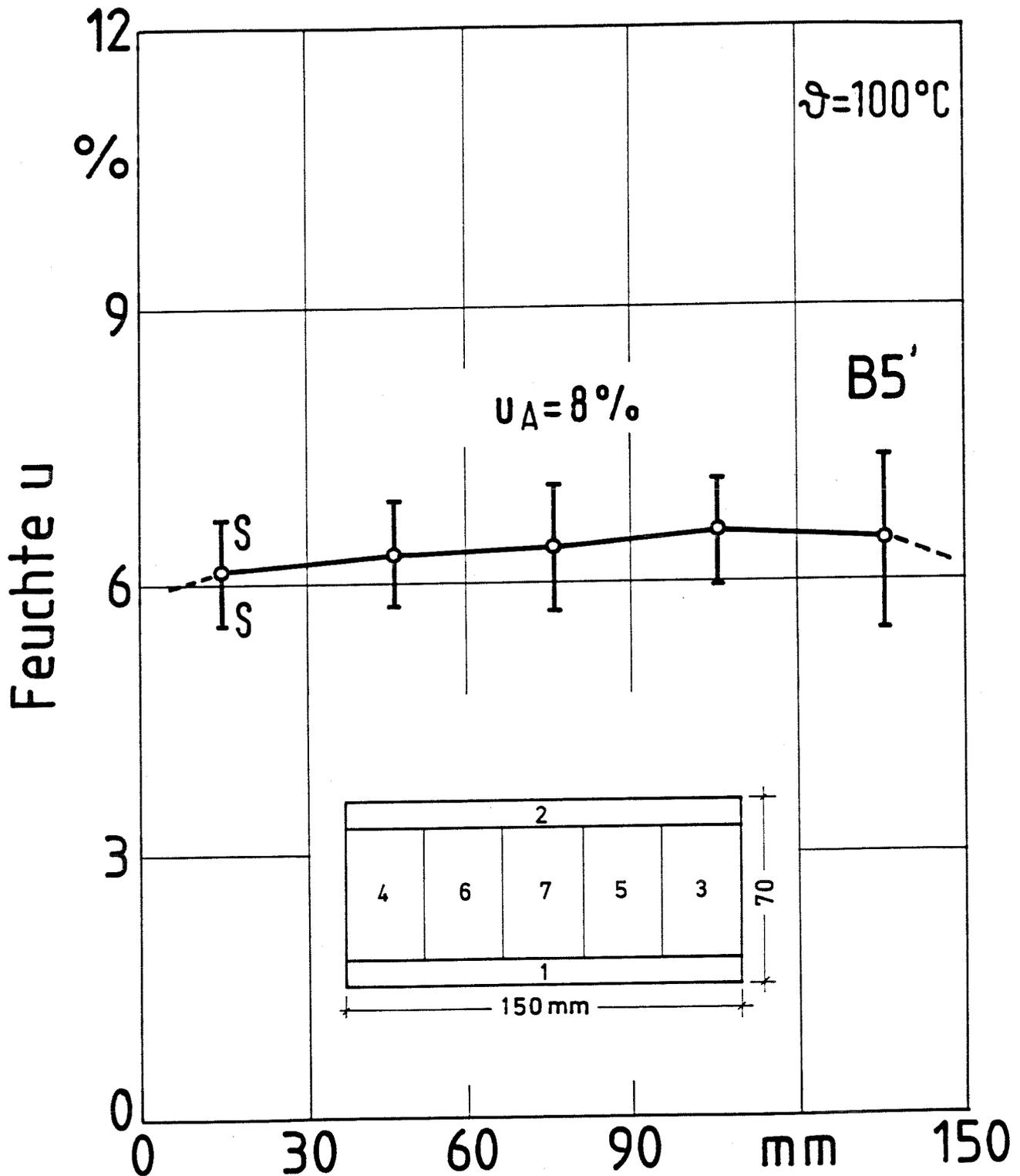


Bild 11: Biegeversuch. "Gleichmäßige" Feuchteverteilung über die Prüfkörperhöhe (150 mm) bei $t = 100^\circ\text{C}$ und $u_A = 8\%$.
s: Standardabweichung

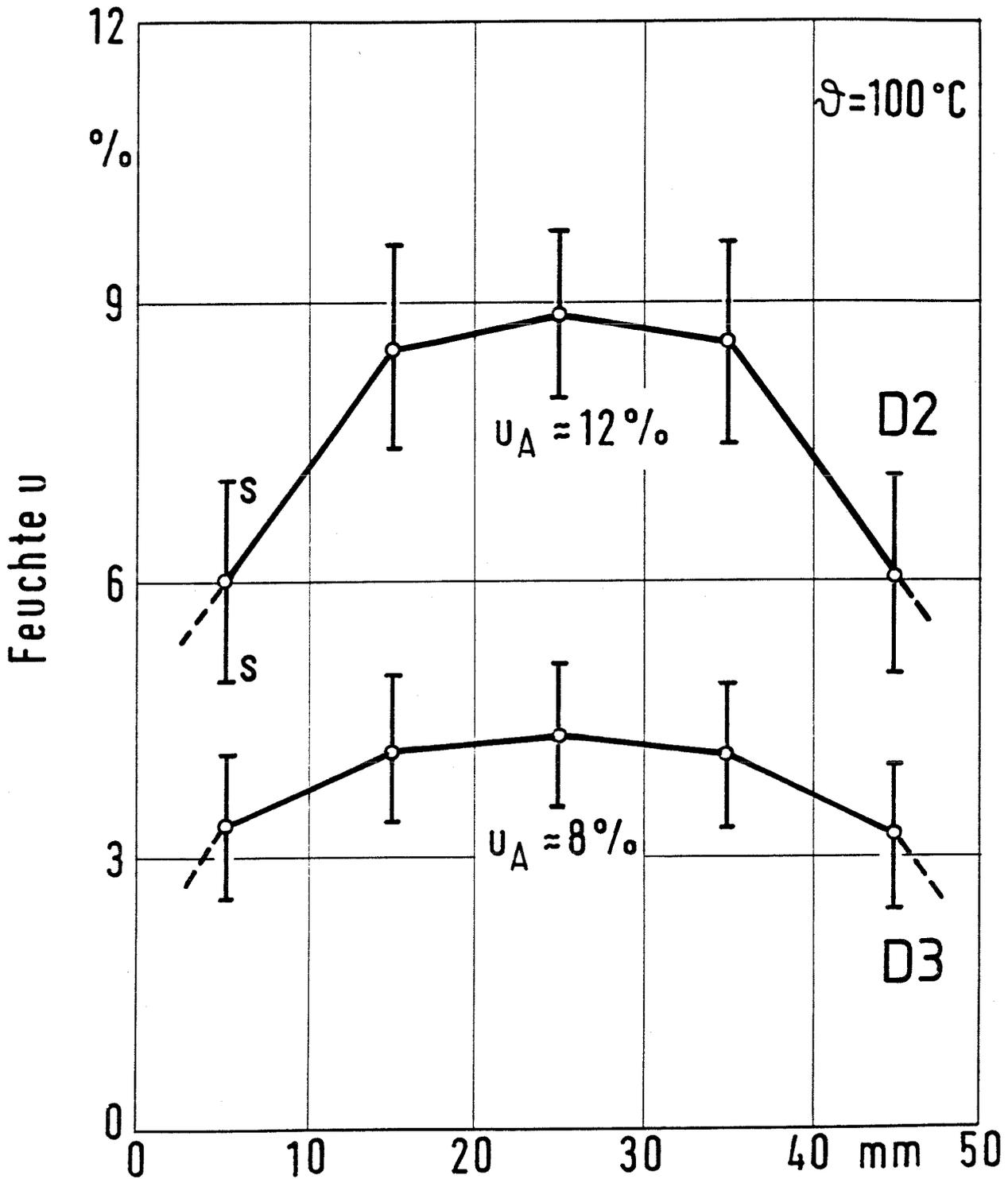


Bild 12: Druckversuch. Ungleichmäßige Feuchteverteilung in Querrichtung des Prüfkörpers bei $\vartheta = 100^\circ\text{C}$ und unterschiedlichen Ausgangsfeuchten u_A .
s: Standardabweichung

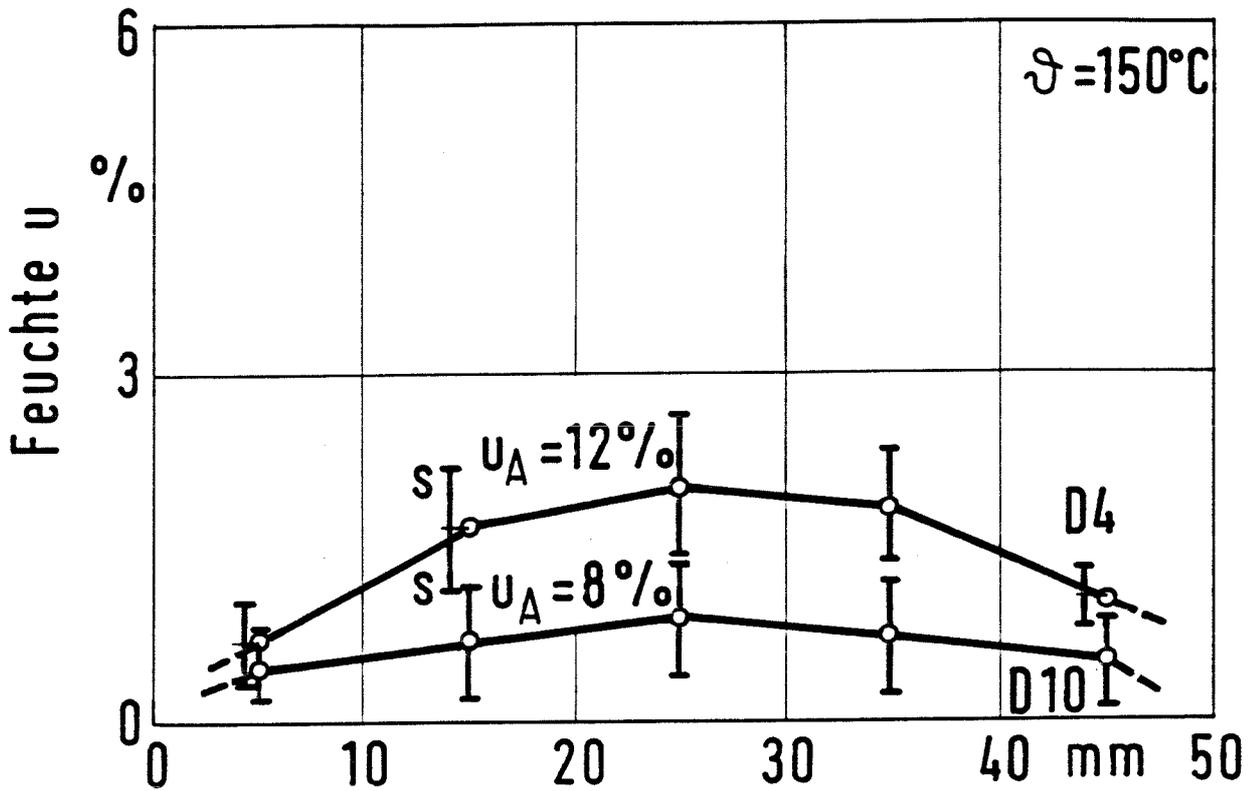


Bild 13: Druckversuch. Ungleichmäßige Feuchteverteilung in Querrichtung des Prüfkörpers bei $\vartheta = 150^\circ\text{C}$ und unterschiedlichen Ausgangsfeuchten u_A .
s: Standardabweichung

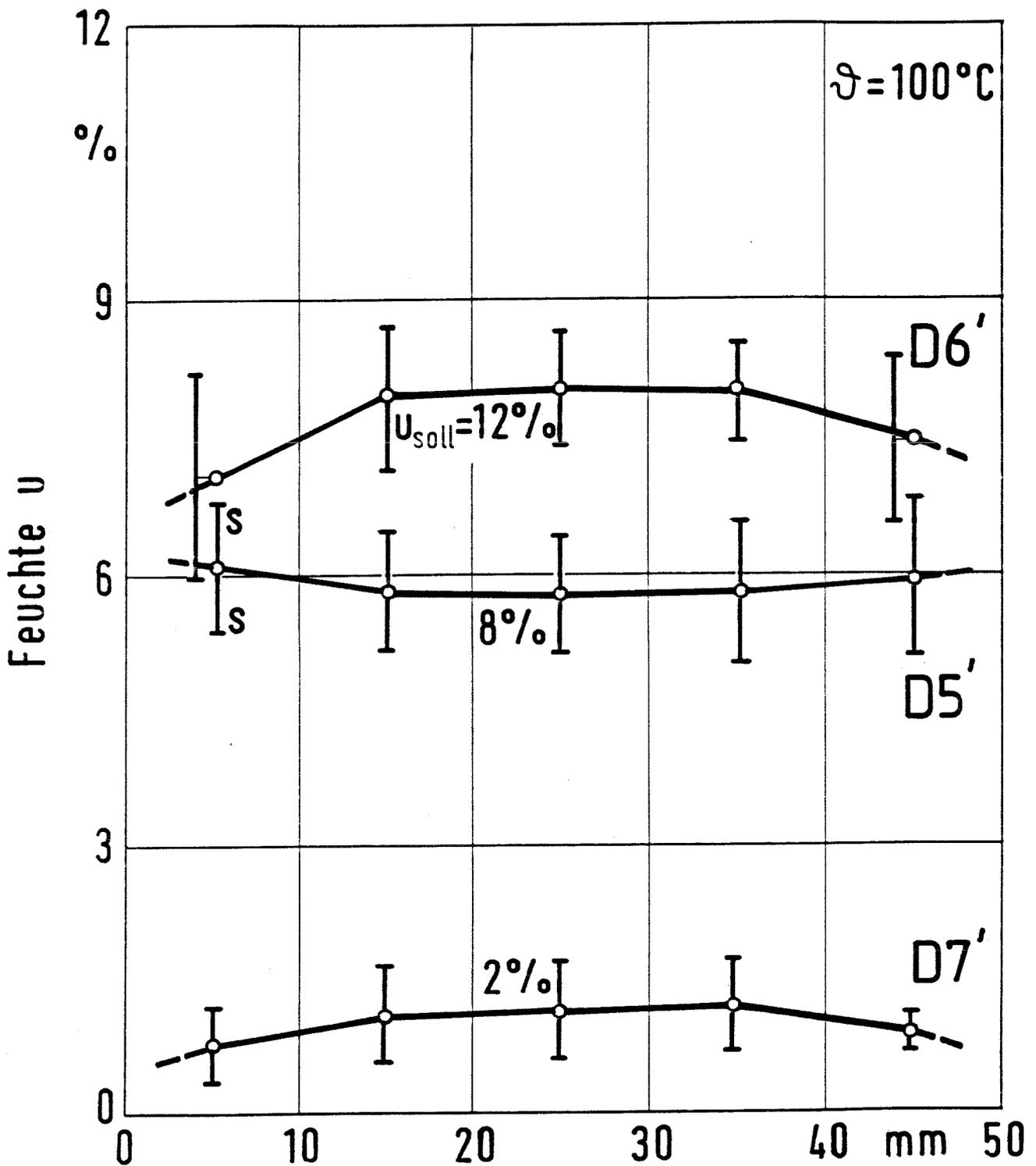


Bild 14: Druckversuch. "Gleichmäßige" Feuchteverteilung in Querrichtung des Prüfkörpers bei $\vartheta = 100^\circ\text{C}$ und unterschiedlichen angestrebten Sollfeuchten u_{soll} .
s: Standardabweichung

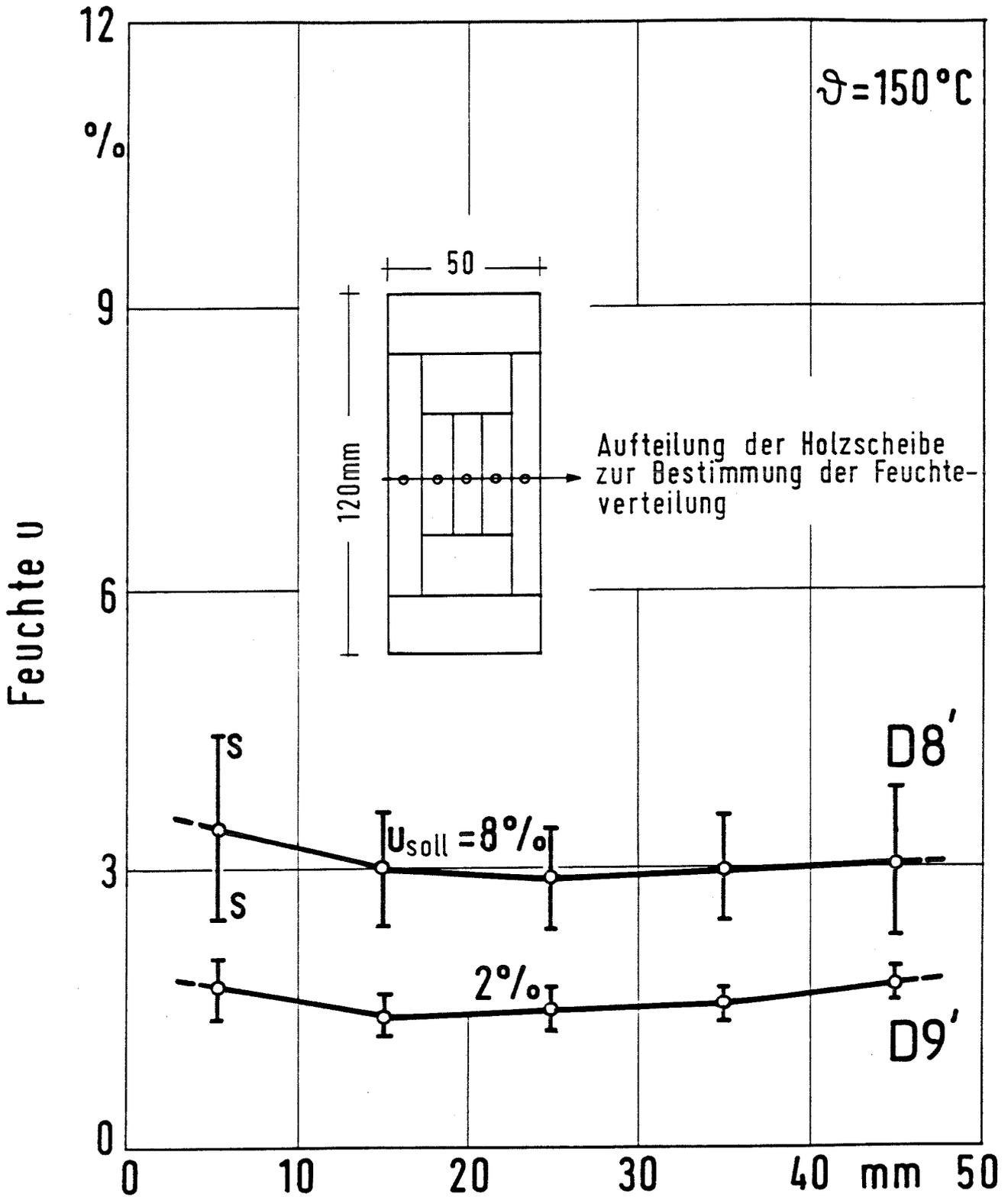


Bild 15: Druckversuch. "Gleichmäßige" Feuchteverteilung in Querrichtung des Prüfkörpers bei $\vartheta = 150^\circ\text{C}$ und unterschiedlichen angestrebten Sollfeuchten u_{soll} . s: Standardabweichung

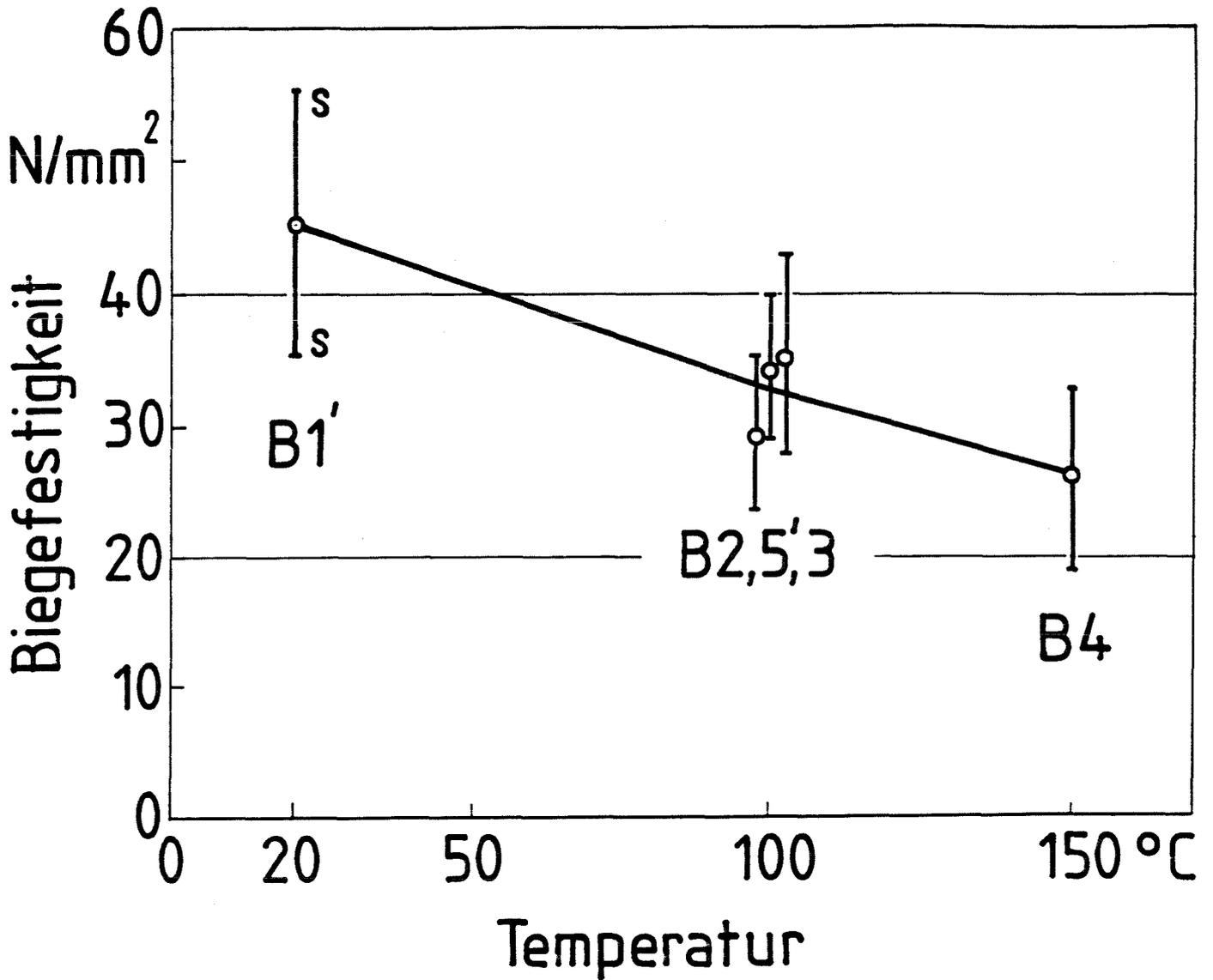


Bild 16: Biegefestigkeit der Kollektive B1' bis B5' in Abhängigkeit von der Temperatur.
s: Standardabweichung

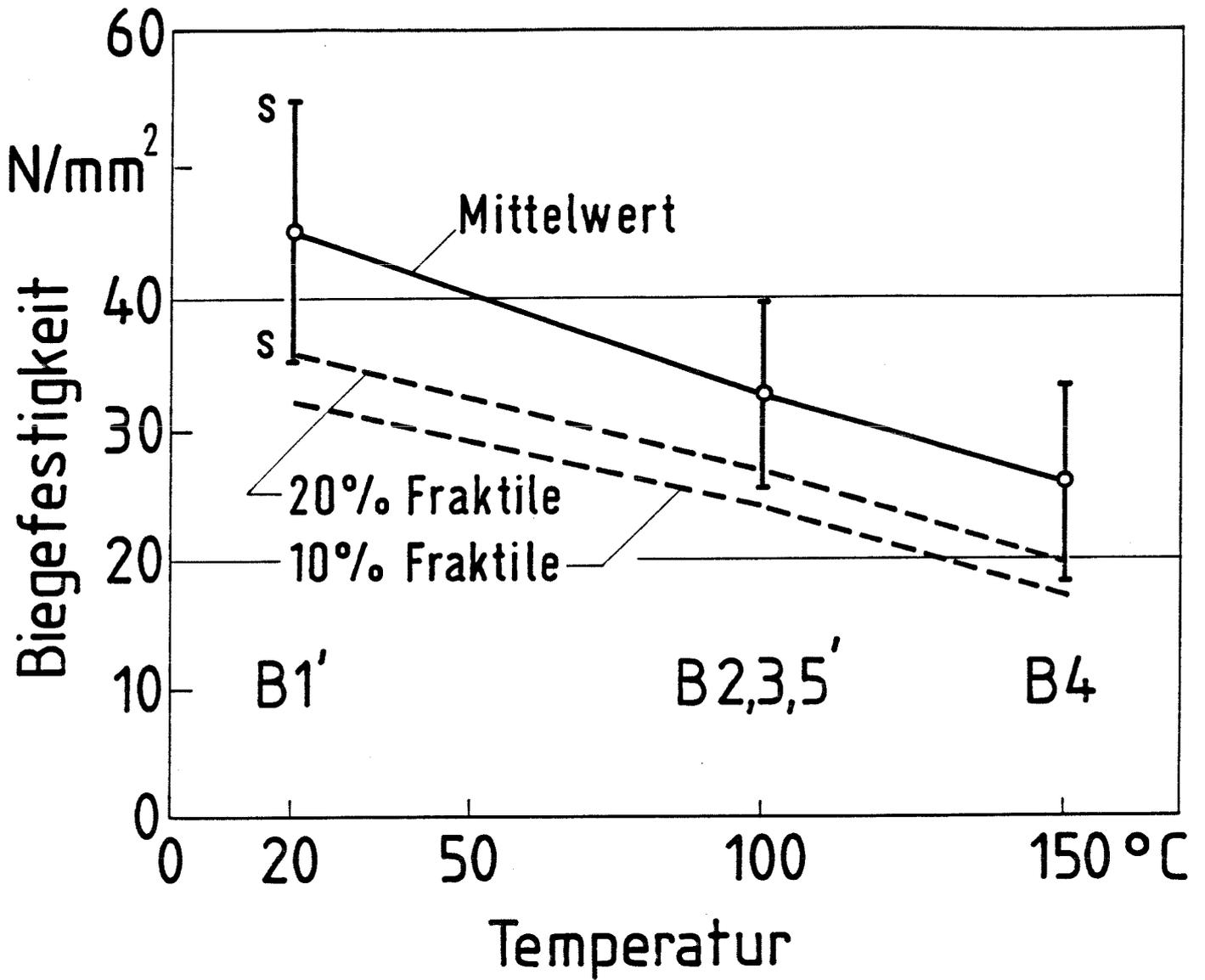


Bild 17: Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur. Mittelwerte, 10% - und 20% - Fraktile. s: Standardabweichung

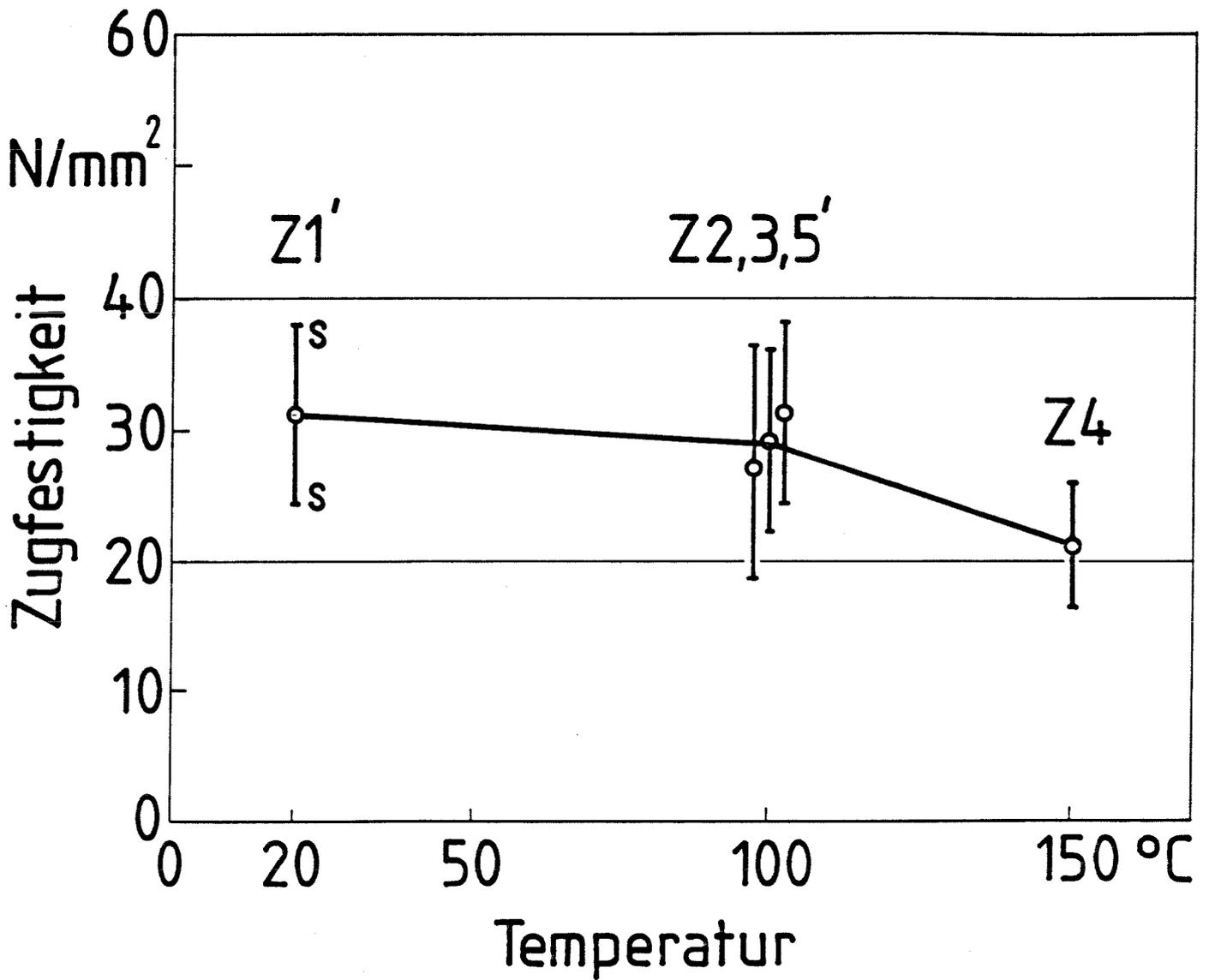


Bild 18: Zugfestigkeit der Kollektive Z1' bis Z5' in Abhängigkeit von der Temperatur.
s: Standardabweichung

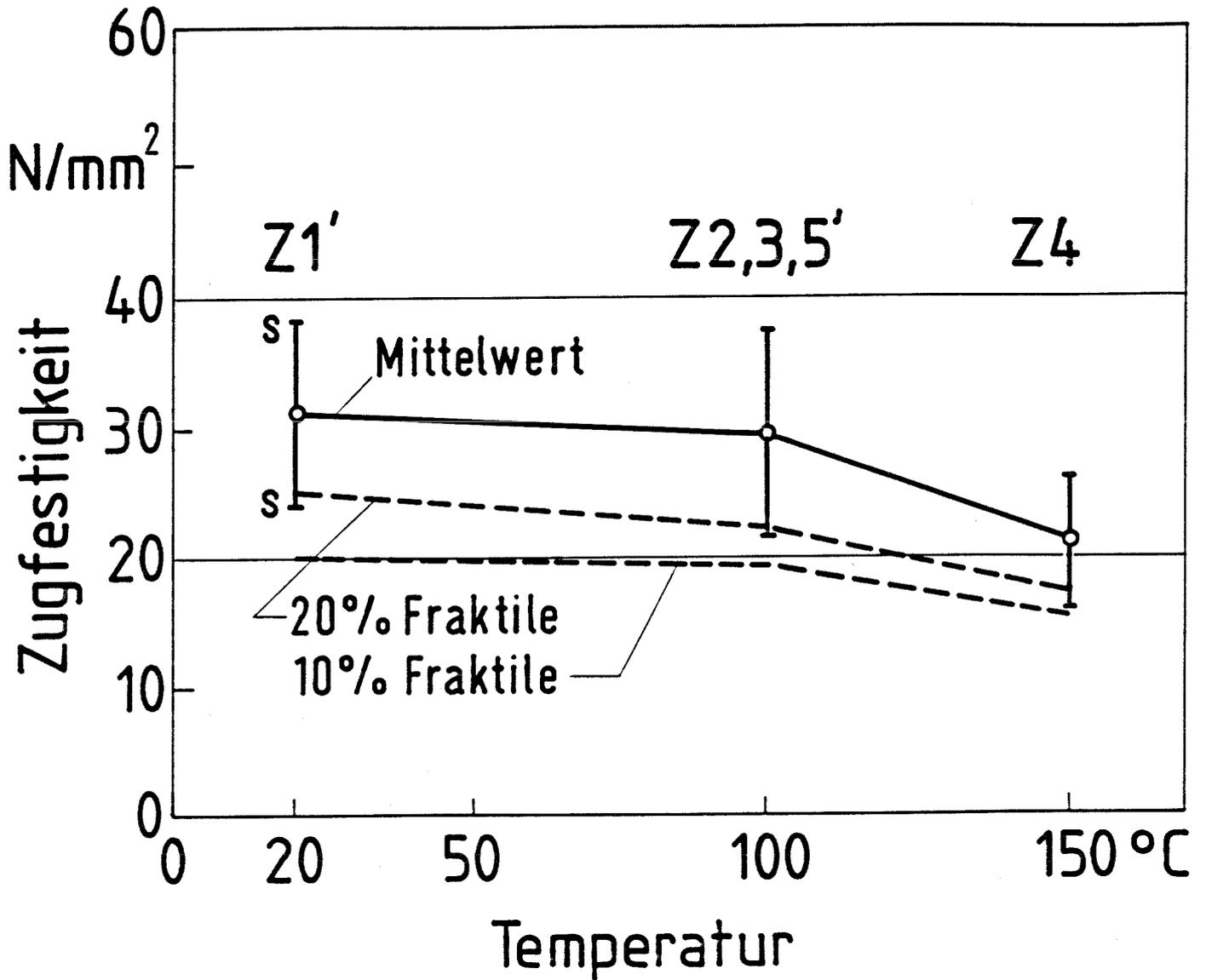


Bild 19: Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur. Mittelwerte, 10% - und 20% - Fraktile. s: Standardabweichung

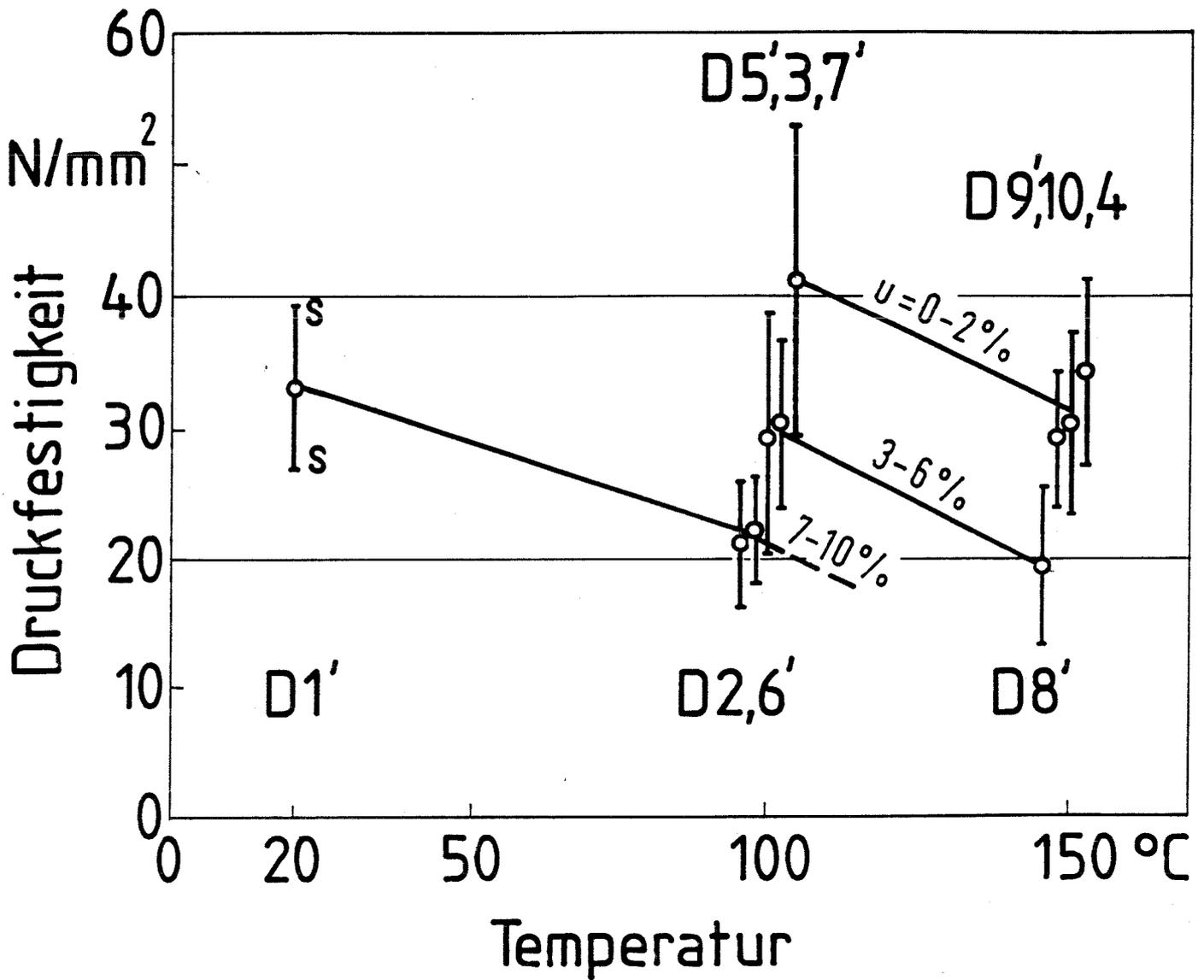


Bild 20: Druckfestigkeit der Kollektive D1' bis D10 für unterschiedliche Feuchtebereiche in Abhängigkeit von der Temperatur.
s: Standardabweichung

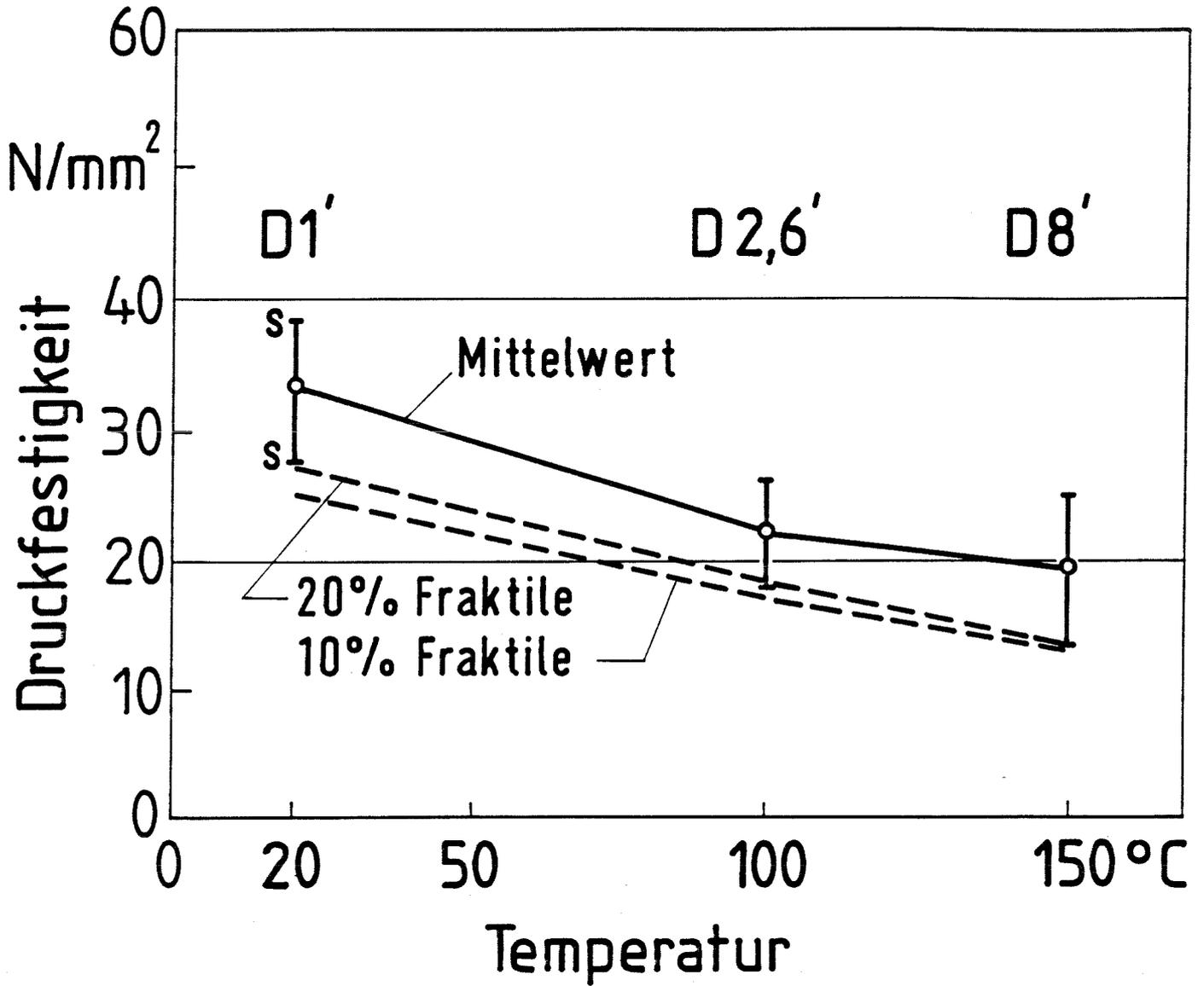


Bild 21: Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur. Mittelwerte, 10% - und 20% - Fraktile. s: Standardabweichung

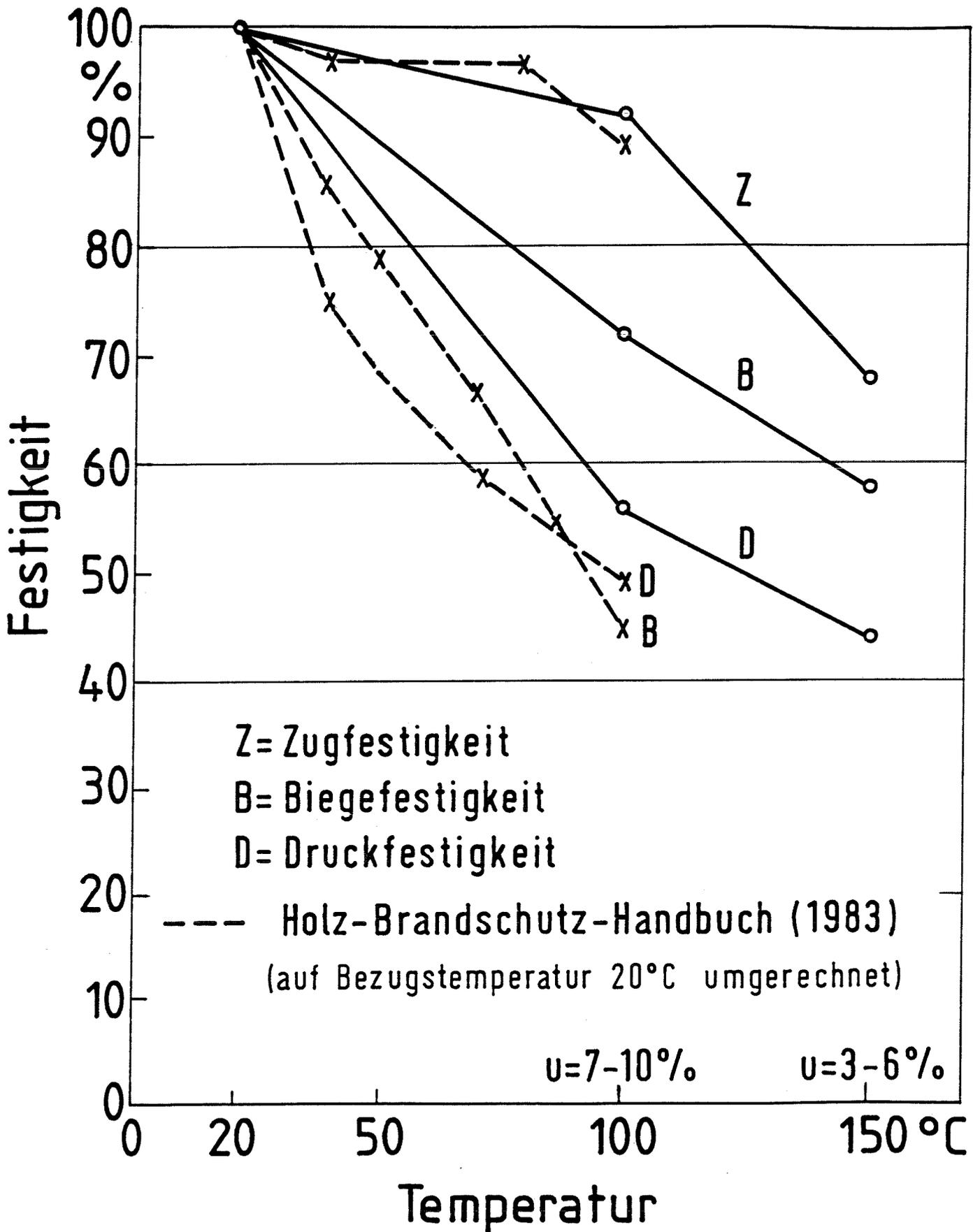


Bild 22: Relative Biege-, Zug- und Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur

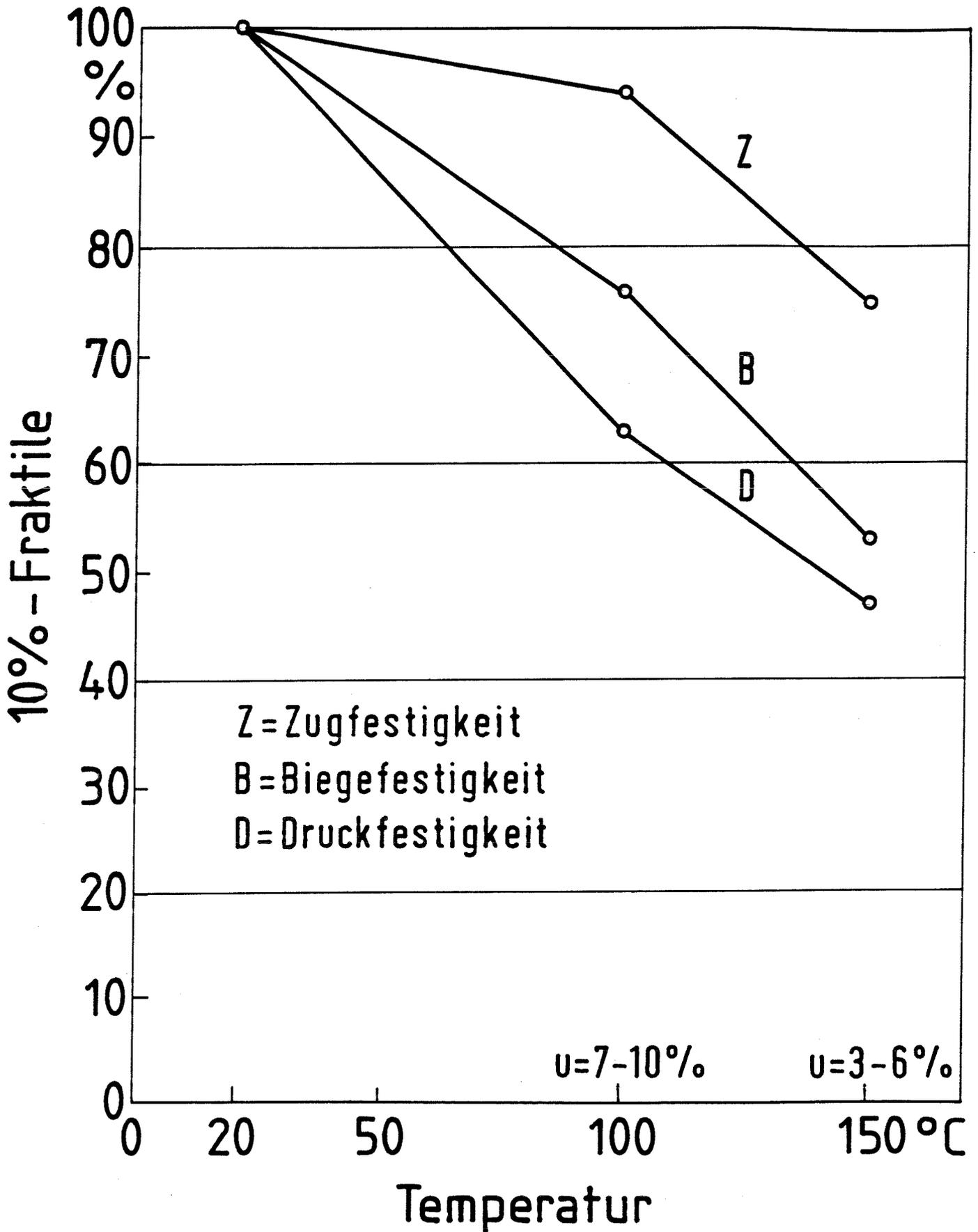


Bild 23: Relative 10% - Fraktile der Biege-, Zug- und Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur

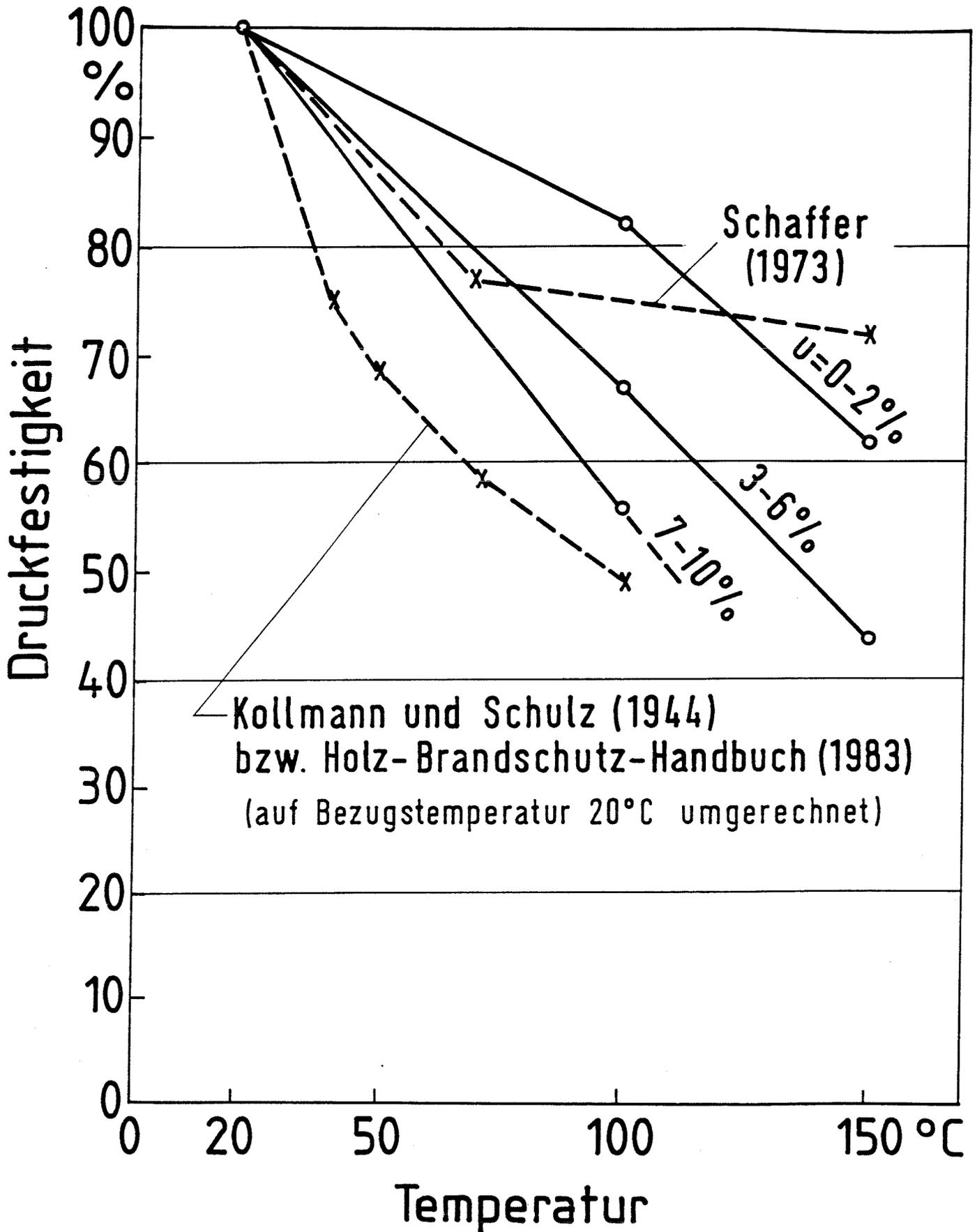


Bild 24: Relative Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur und der Holzfeuchte

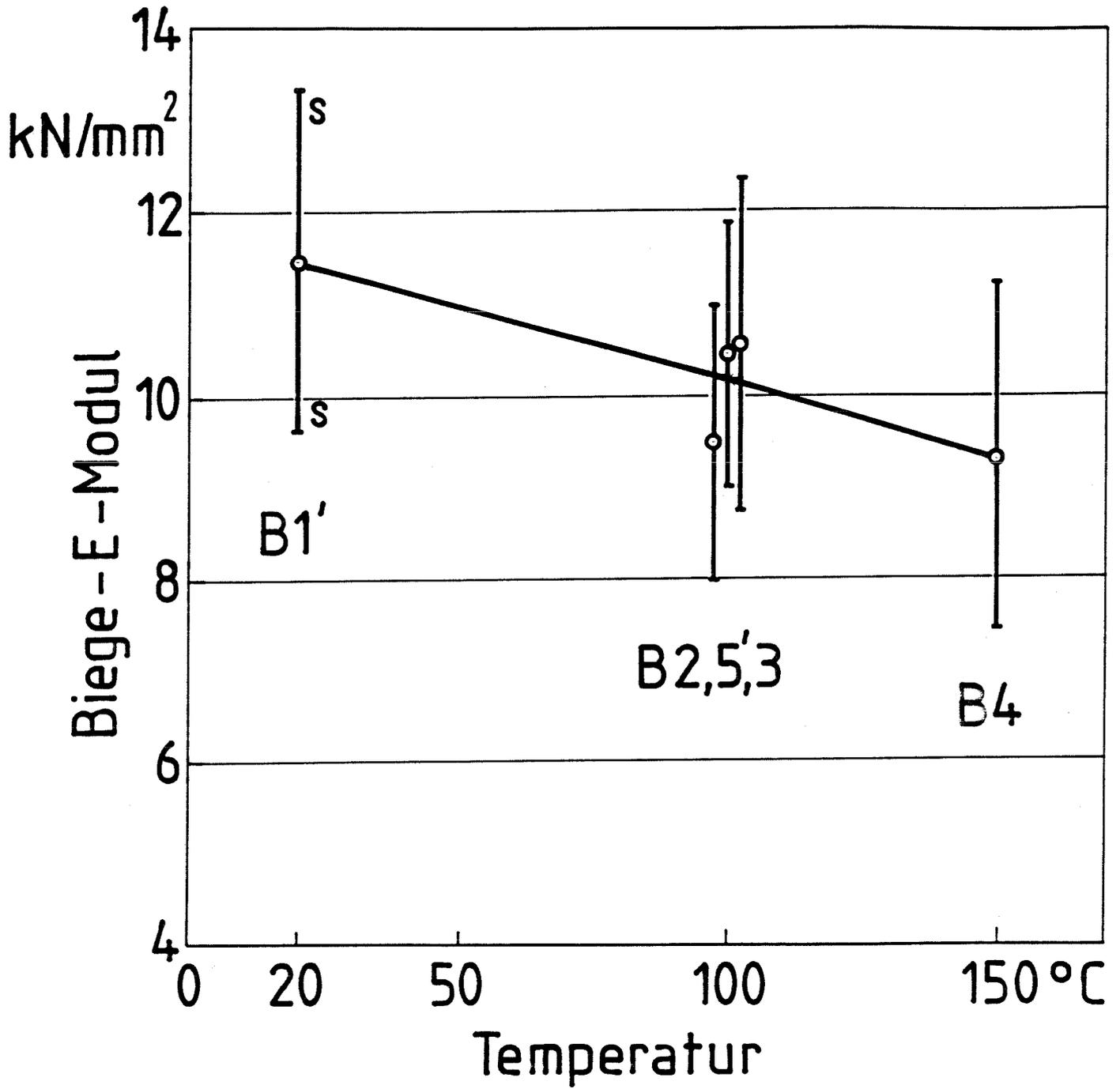


Bild 25: Biege-E-Moduli der Kollektive B1' bis B5' in Abhängigkeit von der Temperatur.
s: Standardabweichung

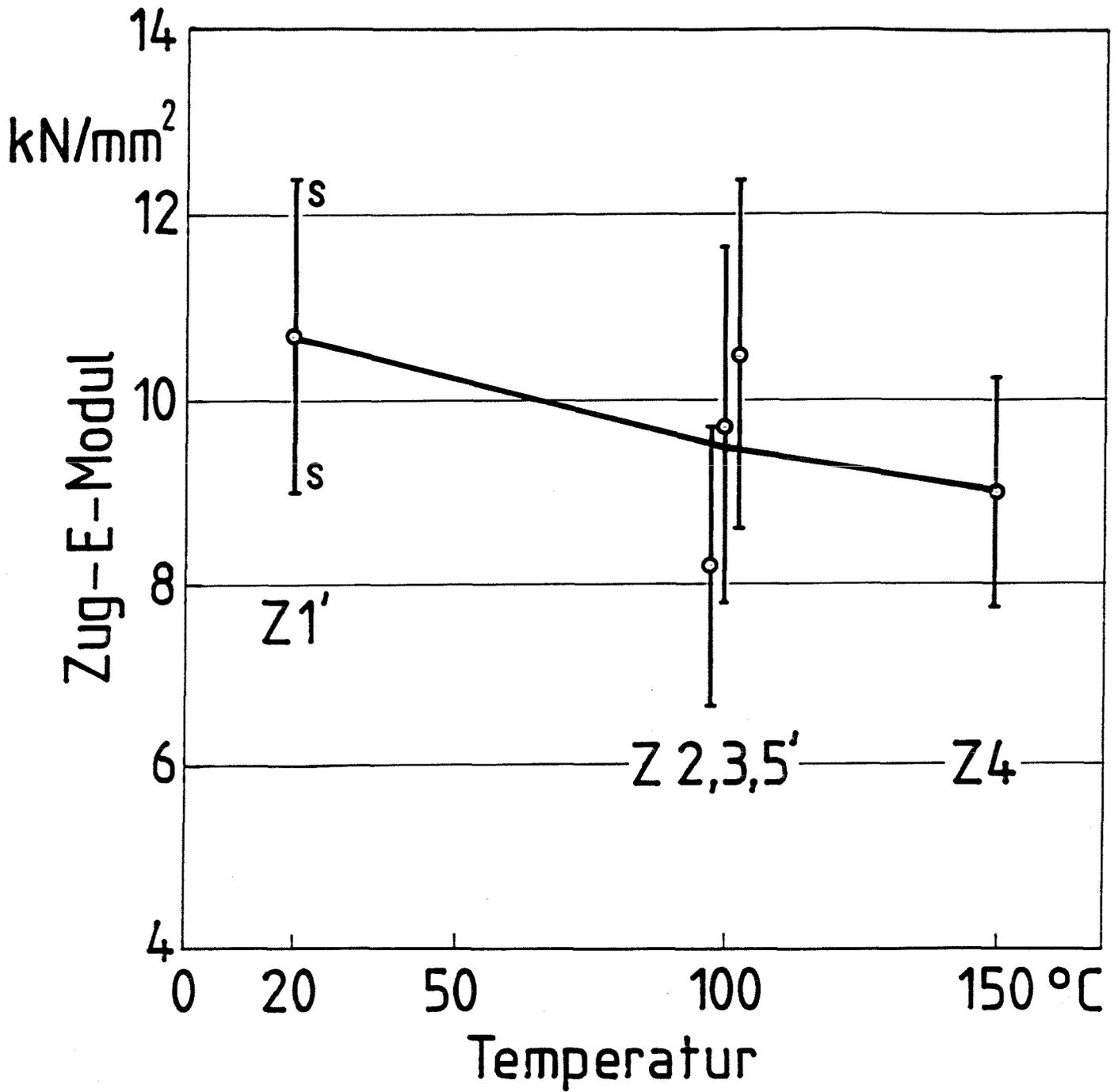


Bild 26: Zug-E-Moduli der Kollektive Z1' bis Z5' in Abhängigkeit von der Temperatur.
s: Standardabweichung

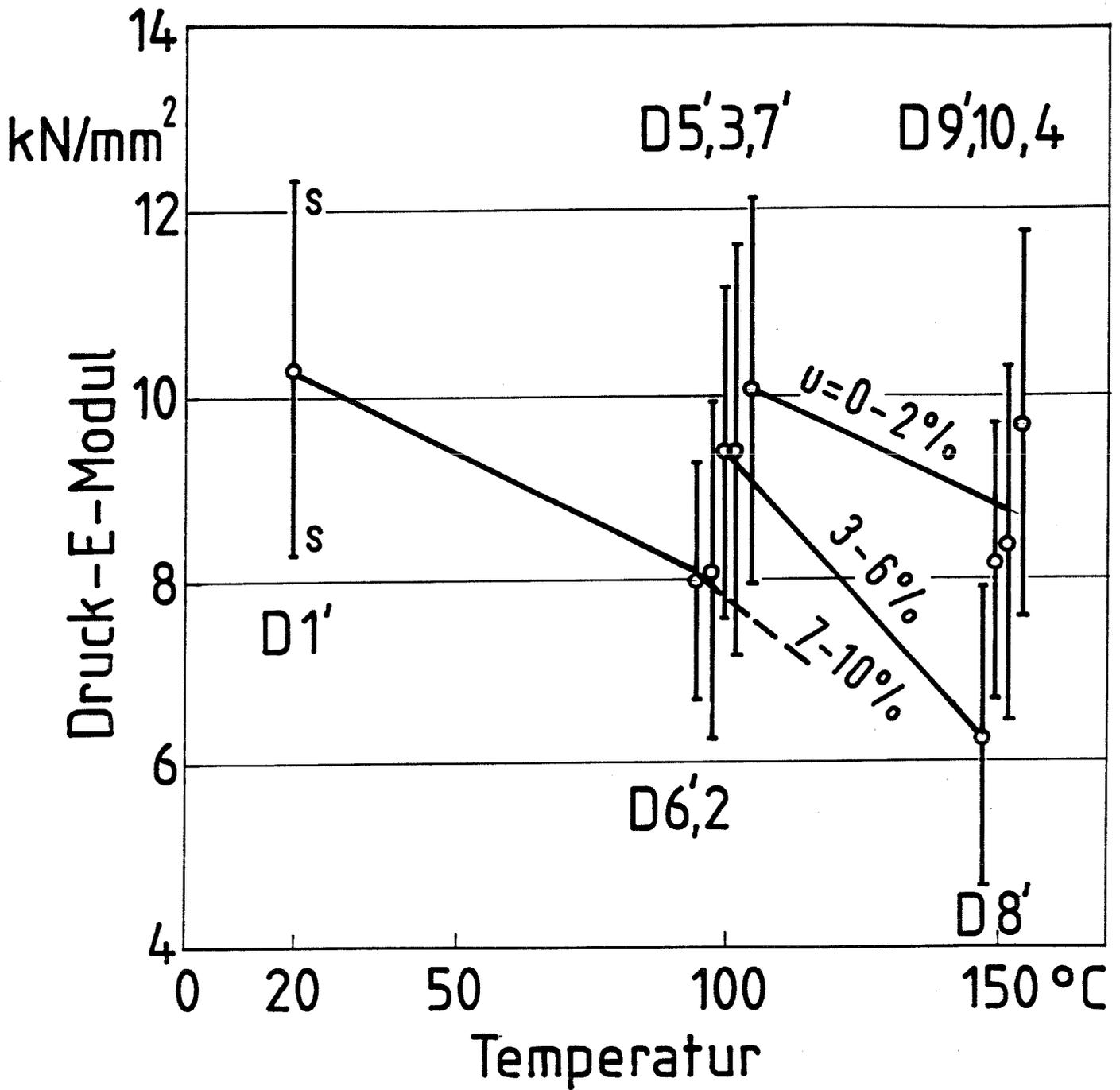


Bild 27: Druck-E-Moduli der Kollektive D1' bis D10 für unterschiedliche Feuchtebereiche in Abhängigkeit von der Temperatur.
s: Standardabweichung

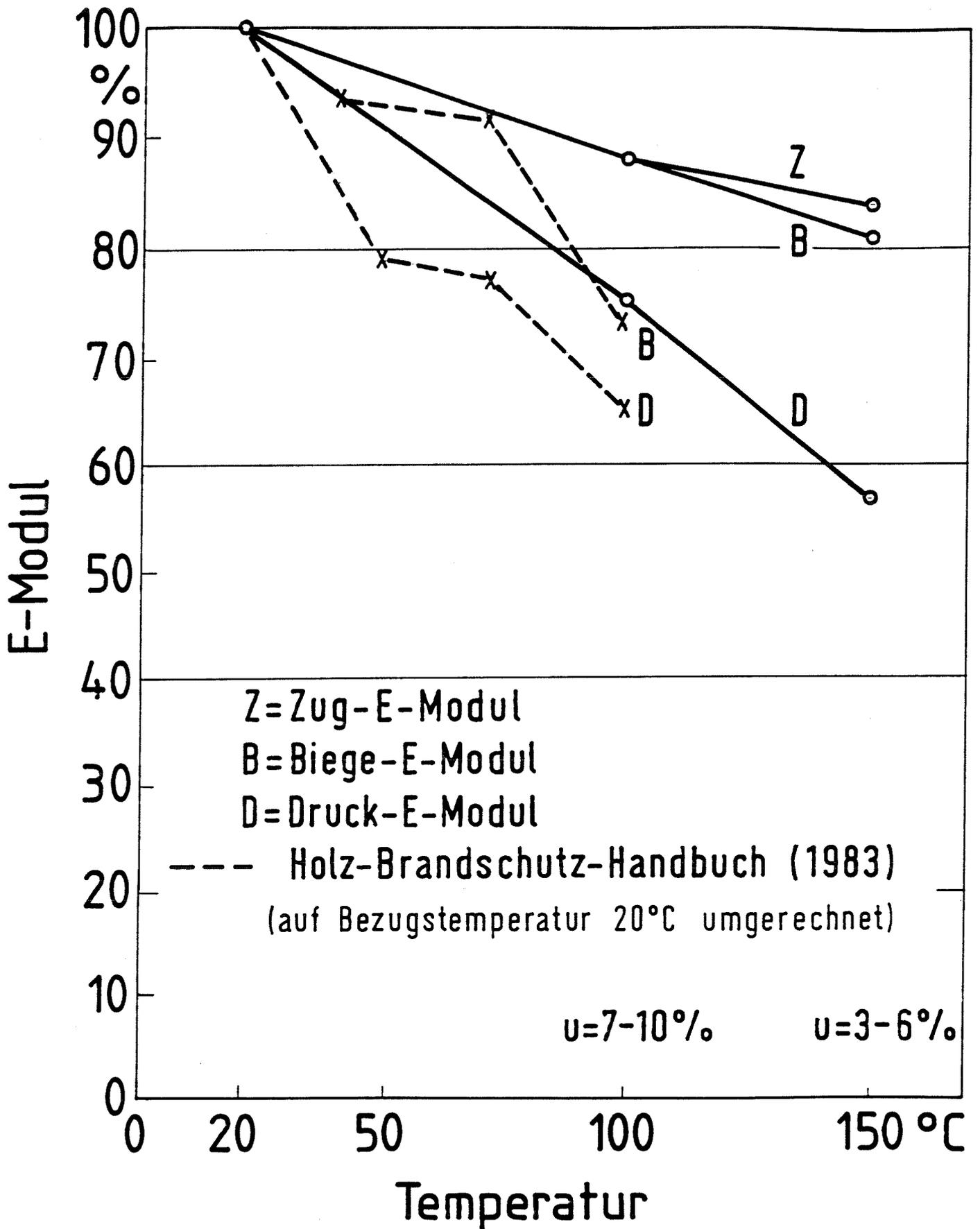


Bild 28: Relative Biege-, Zug- und Druck-E-Moduli in Abhängigkeit von der Temperatur

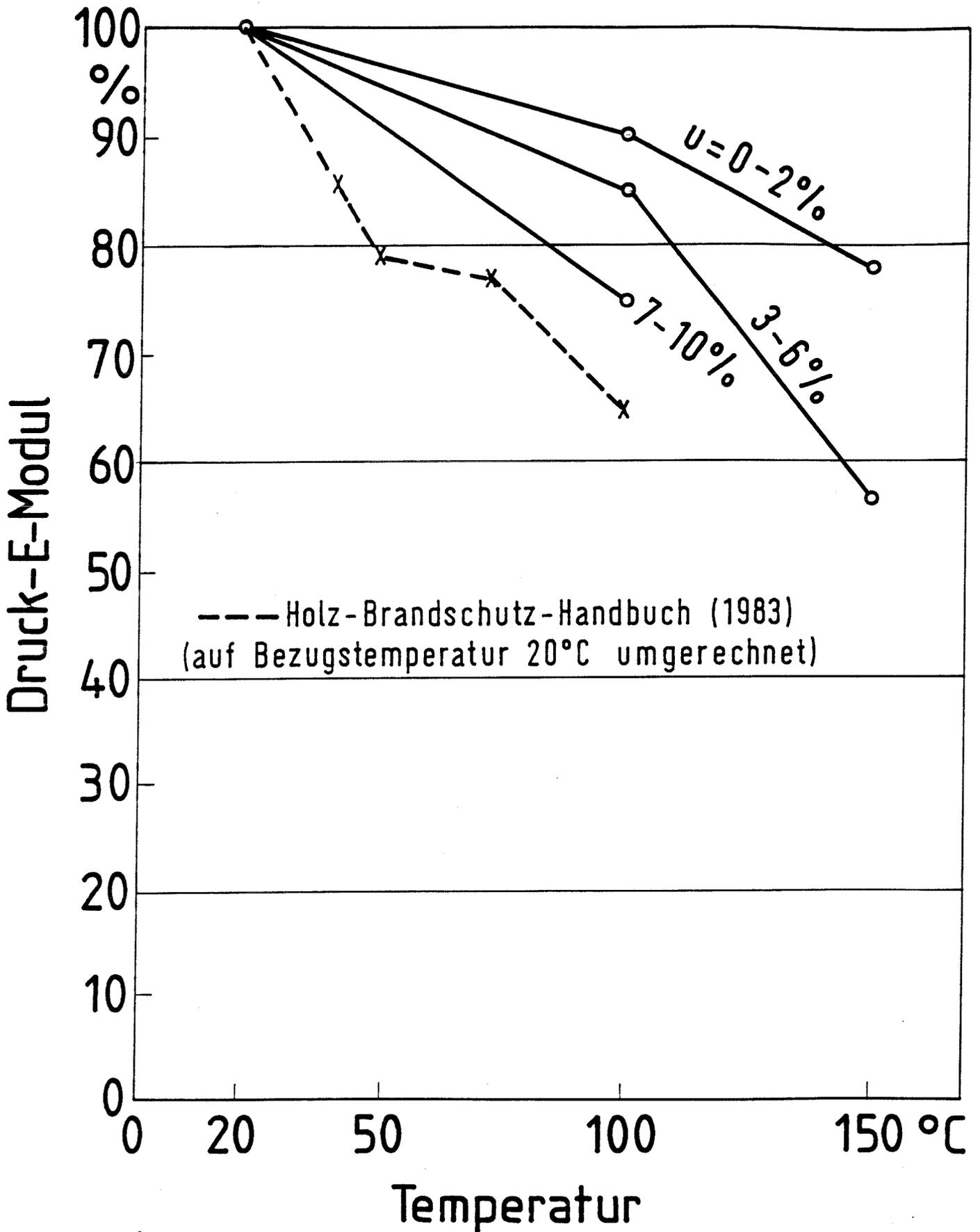


Bild 29: Relativer Druck-E-Modul in Abhängigkeit von der Temperatur und der Holzfeuchte

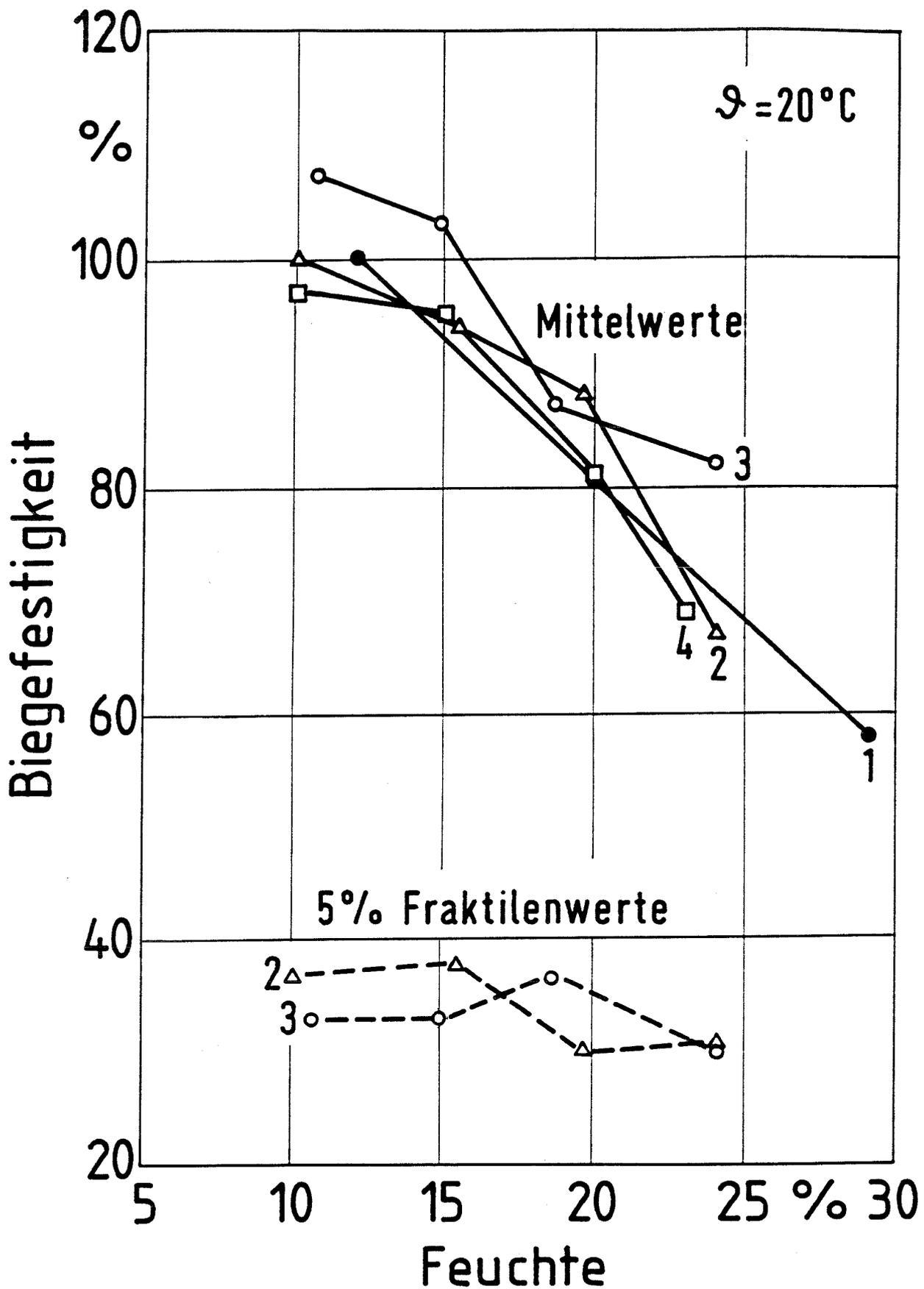


Bild 30: Einfluß der Holzfeuchte auf die Biegefestigkeit von Nadelschnittholz nach Literaturwerten ($100\% \hat{=} 50 \text{ N/mm}^2$).
1: nach HOFFMEYER (1980)
2: nach APLIN et al. (1986)
3: nach MC LAIN et al. (1984)
4: nach GREEN und EVANS (1988)

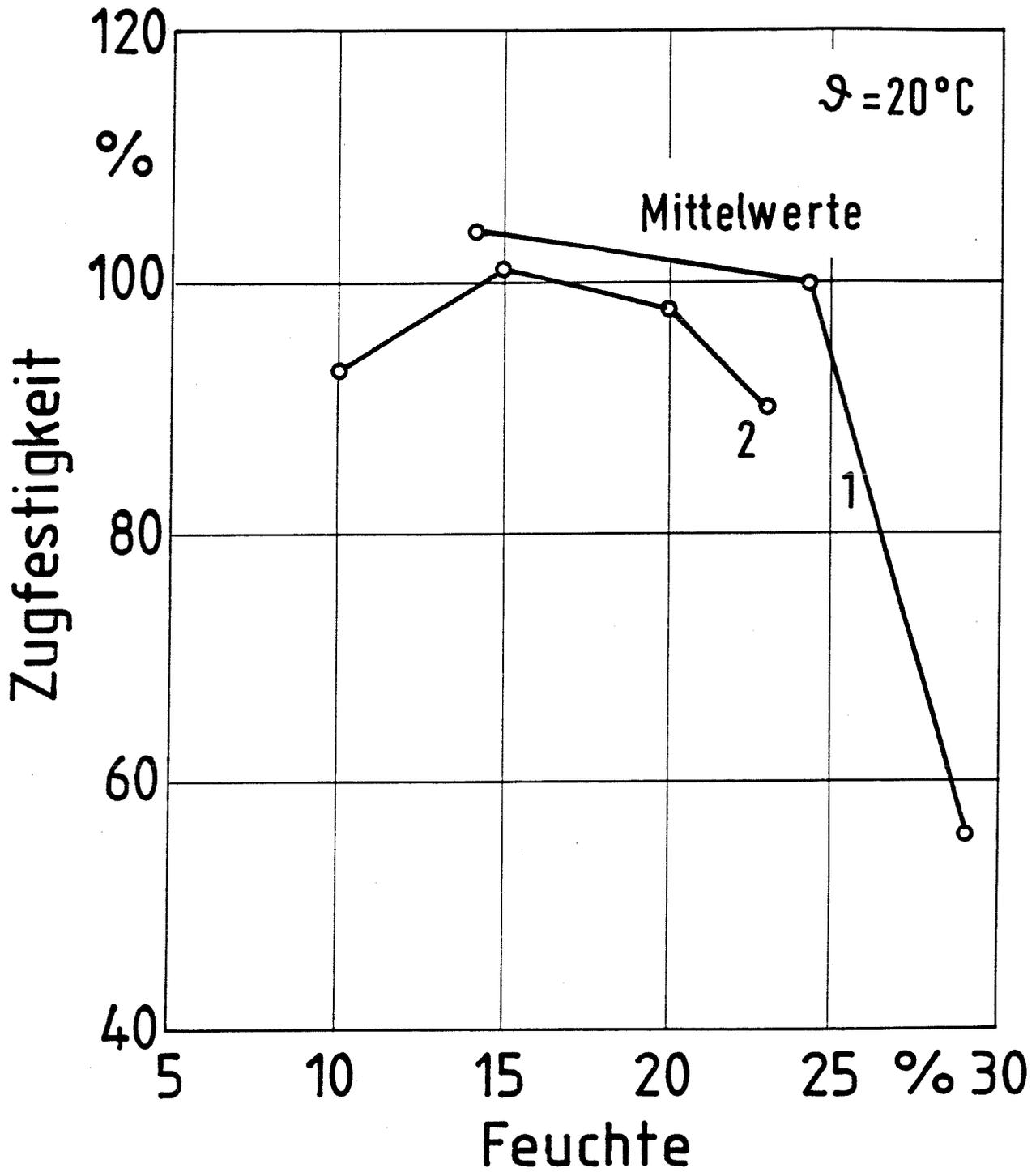


Bild 31: Einfluß der Holzfeuchte auf die Zugfestigkeit von Nadel-
schnittholz nach Literaturwerten ($100\% \hat{=} 30 \text{ N/mm}^2$).
1: nach HOFFMEYETR (1980)
2: nach GREEN und EVANS (1988)

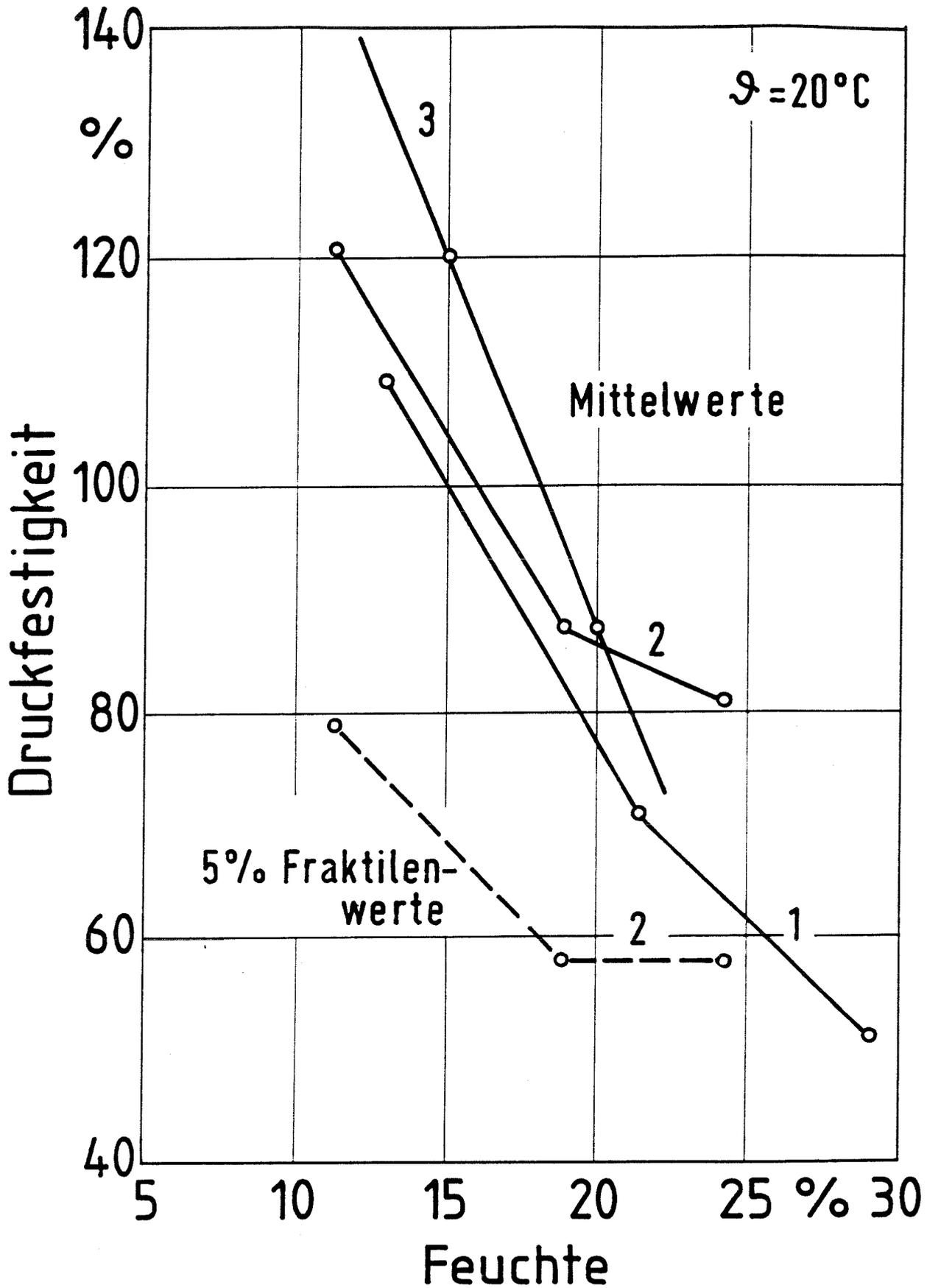


Bild 32: Einfluß der Holzfeuchte auf die Druckfestigkeit von Nadelschnittholz nach Literaturwerten ($100\% \hat{=} 30 \text{ N/mm}^2$).
1: nach HOFFMEYER (1980)
2: nach BARRETT und LAU (1989)
3: nach GLOS (1978)

INSTITUT FÜR HOLZFORSCHUNG

DER UNIVERSITÄT MÜNCHEN

8 MÜNCHEN 40, WINZERERSTRASSE 45

Festigkeit von Bauholz bei hohen Temperaturen

P. Glos und D. Henrici

Kurzfassung des Forschungsberichtes¹

Aus sicherheitstechnischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist für Baustoffe und Bauteile im Bauwesen i.a. eine hinreichende Brandsicherheit nachzuweisen, wozu das Brandverhalten des Baustoffs bzw. des Bauteils bekannt sein muß. Dieses kann entweder experimentell durch eine Brandprüfung bei praxisgerechten Randbedingungen unter Last oder aber rechnerisch bestimmt werden, wenn hierfür hinreichend wirklichkeitsnahe Aussagen über das Abbrand- und das elastomechanische Verhalten des jeweiligen Baustoffs unter Temperatureinwirkung vorliegen.

In einem Simulationsmodell für das Brandverhalten von Holz muß auch der Einfluß der Holzfeuchte berücksichtigt werden. Diese beeinflusst einerseits die Abbrandgeschwindigkeit des Holzes, andererseits überlagert sich dem temperaturbedingten Festigkeitsabfall ein austrocknungsbedingter Festigkeitsanstieg des Holzes, der sich im Brandfall günstig auf das Tragverhalten der Konstruktion auswirkt.

Auch wenn Brandprüfungen in gewissem Umfang immer erforderlich sein werden, besteht an der Möglichkeit eines rechnerischen Nachweises, allein wegen des dadurch gegebenen größeren Entwurfsfreiraums, ein großes Interesse.

Weil zu den aufgeworfenen Fragen nach der Festigkeit von Bauholz bei hohen Temperaturen bislang nur an fehlerfreien Kleinproben gewonnene Erkenntnisse vorlagen, die nicht ohne weiteres auf das Verhalten von Bauholz übertragbar sind, wurde im vorliegenden Forschungsvorhaben das elasto-mechanische Verhalten des Holzes unter Temperaturbeanspruchung erstmals an Prüfkörpern in praxisnahen Bauholzabmessungen untersucht. An insgesamt 525 Prüfkörpern aus Fichtenkantholz üblicher Qualität wurden die Biege-, Druck- und Zugfestigkeit in Faserrichtung des Holzes sowie die entsprechenden E-Moduli in Abhängigkeit von der Temperatur und der Holzfeuchte experimentell ermittelt.

Im einzelnen wurden bei Temperaturen von 20°C, 100°C und 150°C und bei Holzfeuchten in den Bereichen 0-2%, 3-6% und 7-10% 128 Biegeproben (Querschnittsabmessungen 70/150 mm²), 130 Zugproben (50/120 mm²) und 267 Druckproben (50/120 mm²) geprüft, wobei der Umfang der Probenkollektive jeweils 25 bis 30 Prüfkörper betrug. Der Großteil der Versuche wurde bei der Temperatur 100°C durchgeführt, da im Brandfall die Holztemperatur etwa bei diesem Wert verharret, bis das im Holz vorhandene Wasser verdampft ist.

Die Prüfkörper wurden in Trockenschränken auf die vorgesehene Prüftemperatur aufgeheizt, wobei bei einem Teil der Prüfkörper durch besondere Maßnahmen (z.B. Autoklav) eine näherungsweise "gleichmäßige" Verteilung der Holzfeuchte über den Probenquerschnitt eingestellt wurde. Während der Festigkeitsprüfung wurden die Prüfkörper zur Aufrechterhaltung der Temperatur mit Infrarotstrahlern bestrahlt.

Im allgemeinen ergaben sich bei Probenkollektiven vergleichbarer mittlerer Holzfeuchte und Temperatur zwischen Kollektiven mit "gleichmäßiger" und solchen mit über den Probenquerschnitt ungleichmäßiger Feuchteverteilung keine signifikanten Unterschiede in den untersuchten elasto-mechanischen Eigenschaftswerten des Holzes.

Die Ergebnisse der Untersuchung bestätigten auch für Prüfkörper in Bauholzabmessungen die für Kleinproben vorliegenden Erkenntnisse, wonach die Zugfestigkeit am wenigsten, die Druckfestigkeit dagegen am stärksten von der Temperatur beeinflusst wird. Ferner ergab sich, daß die Festigkeit und der E-Modul von Bauholz auch bei hohen Temperaturen noch von der Holzfeuchte abhängen.

Im Feuchtebereich 7-10% fielen beispielsweise bei der Prüftemperatur von 100°C die Festigkeits- und E-Modulwerte von Fichtenbauholz mittlerer Qualität bezogen auf den jeweiligen Versuchswert bei 20°C (100%) temperaturbedingt auf folgende Werte ab (In Klammern der Vergleichswert nach Holz-Brandschutz-Handbuch, 1983):

Biegefestigkeit	72% (45%)	Biege-E-Modul	88% (73%)
Zugfestigkeit	92% (89%)	Zug-E-Modul	88% (-)
Druckfestigkeit	56% (49%)	Druck-E-Modul	75% (65%)

In den Feuchtebereichen von 3-6% bzw. 0-2% fielen im angegebenen Temperaturbereich die Druckfestigkeit auf 67% bzw. 82% und der Druck-E-Modul auf 85% bzw. 90% des Ausgangswertes bei 20° ab.

Die Ergebnisse der Forschungsarbeit zeigten, daß der im Schrifttum (Holz-Brandschutz-Handbuch) angegebene temperaturbedingte Abfall der elasto-mechanischen Eigenschaftswerte des Holzes für Bauholz üblicher Qualität in dem bisher angenommenen Umfang nicht zutrifft.

Glos, P. und Henrici, D. (1990): Festigkeit von Bauholz bei hohen Temperaturen. Forschungsbericht 87505, Institut für Holzfor- schung der Universität München

La résistance du bois de construction à hautes températures

P. Glos et D. Henrici

Abrégé de rapport de recherche¹

D'un point de vue technique de sécurité et économique, une résistance au feu suffisante doit être généralement prouvée pour les matériaux et éléments de construction. Pour cela, le comportement au feu du matériau ou de l'élément de construction doit être connu. Celui-ci peut être déterminé ou bien de manière expérimentale, suite à des essais sous charge et sous des conditions de marges proches des conditions d'emploi, mais aussi par voie de calcul, s'il existe des données suffisamment proches de la réalité en ce qui concerne le comportement à la combustion et élasto-mécanique des matériaux de construction sous l'influence de la température.

Pour un modèle de simulation du comportement du bois au feu, l'influence du degré d'humidité du bois doit aussi être prise en considération. D'une part, ce dernier influence la vitesse de combustion du bois, d'autre part, l'augmentation de résistance du bois due à la perte d'humidité compense la baisse de résistance due à la température. Cette augmentation de résistance a un effet favorable sur le comportement en charge de la construction en cas d'incendie.

Bien que, dans une certaine mesure, les essais au feu restent nécessaires, un grand intérêt existe quant à la possibilité d'une appréciation par voie de calcul uniquement parce que celle-ci offre une plus grande marge d'esquisses.

En ce qui concerne les questions énoncées au sujet de la résistance du bois de construction à hautes températures, on ne possède jusqu'à présent que des données résultant d'essais effectués sur des éprouvettes de petites dimensions et sans défauts. Ces données ne peuvent pas s'appliquer sans façons au comportement du bois de construction.

C'est pourquoi on a étudié, au cours du présent projet de recherche, le comportement élasto-mécanique du bois sous l'influence de la température, pour la première fois, sur des échantillons de bois de construction à dimensions d'emploi. Sur un total de 525 échantillons de bois équarris d'épicéas de qualité normale, on a déterminé de manière expérimentale la résistance à la flexion, à la compression et à la traction dans le sens des fibres du bois, ainsi que les modules d'élasticité correspondants, en fonction de la température et du degré d'humidité du bois.

En détail, 128 échantillons ont été testés à la flexion (dimensions de section: 70/150 mm²), 130 à la traction (50/120 mm²) et 267 à la compression (50/120 mm²) aux températures de 20, 100 et 150 °C et pour les degrés d'humidité 0-2 %, 3-6 % et 7-10 %. Chaque collectif comportait de 25 à 30 échantillons. La plupart des essais furent effectués à une température de 100 °C, vu qu'en cas d'incendie la température du bois se stabilise plus au moins à ce niveau jusqu'à ce que l'eau contenue dans le bois se soit évaporée.

Les échantillons ont été échauffés aux températures d'essai requises en étuves. Pour une partie des échantillons, une répartition quasi uniforme de l'humidité du bois en section transversale fut établie à l'aide de mesures particulières (par exemple, en autoclave). Pendant les essais à la résistance, les échantillons ont été exposés à des rayons infrarouges afin de les maintenir à une température constante.

En général, on n'a pu noter, pour des collectifs à humidité moyenne et température comparables, aucune différences significatives entre une répartition "uniforme" et une répartition irrégulière de l'humidité en section transversale en ce qui concerne les propriétés élasto-mécaniques du bois examinées.

Les résultats obtenus ont montré que les règles suivantes, valables pour des échantillons de petites dimensions, sont aussi applicables aux échantillons de bois de construction à dimensions d'emploi: la température influence très peu la résistance à la traction, mais influence très fort la résistance à la compression. En outre, on a pu constater que, même pour des températures élevées, le degré d'humidité du bois influençait encore la résistance et le module d'élasticité du bois de construction.

Pour un degré d'humidité de 7-10 %, la résistance et le module d'élasticité du bois d'épicéas de construction de qualité moyenne atteignaient pour une température d'essai de 100 °C les valeurs suivantes, exprimées en pourcentages des valeurs d'essais à 20 °C (100 %) correspondantes (entre parenthèses: valeur de comparaison d'après "Holz-Brandschutz-Handbuch", 1983):

résist. flexion	72% (45%)	mod. él. flexion	88% (73%)
résist. traction	92% (89%)	mod. él. traction	88% (-)
résist. compression	56% (49%)	mod. él. compression	75% (65%)

A cette même température et pour les degrés d'humidité de 3-6 % ou 0-2 %, la résistance à la compression tombait respectivement à 67 ou 82 %, le module d'élasticité à la compression respectivement à 85 ou 90 % des valeurs obtenues pour une température de 20 °C.

Les résultats des travaux de recherche ont montré que la réduction des valeurs des propriétés élasto-mécaniques du bois en fonction de la température n'était pas valable dans cette mesure, telle qu'elle est décrite dans la littérature, pour le bois de construction de qualité normale.

¹⁾ Glos, P. et Henrici, D. (1990): La résistance du bois de construction à hautes températures Rapport de recherche no. 87505
Institut de recherche sur le bois, Université de Munich

Strength of Structural Timber at High Temperatures

P. Glos and D. Henrici

Summary of Research Report¹

For security and economy reasons adequate safety against fire must be provided for building materials and structural parts used in constructions. This requires the knowledge of the fire behavior of structural parts which can either be determined experimentally in fire tests with applied loads under realistic test conditions or by calculation, provided sufficient realistic data are available on the charring rate and the elastomechanic behavior of materials at high temperatures.

A simulation model for the fire behavior of wood should also take into account the effect of the wood moisture content. This has an effect, on the one hand, on the charring rate of wood, while on the other a temperature-related strength reduction is superimposed by a drying-related increase in timber strength with its favorable effect on the load-carrying behavior of constructions in the case of fire.

Even if the necessity to conduct fire tests will - to a certain extent - always exist, there is great interest in the possibility of calculatory proof not least because of the greater freedom in design this would provide.

The problem of structural timber strength at high temperatures has to date merely been studied under laboratory conditions using small clear samples. Since results from these investigations are not readily transferable to the behavior of structural timber the present study was undertaken to investigate the elastomechanic behavior of wood at high temperatures using, for the first time, timber specimens of structural sizes. A total of 525 specimens of conventional quality spruce square sawn timber were used to experimentally determine the bending, compression and tension strength parallel to grain as well as corresponding E-moduli in relation to temperature and moisture content.

This involved tests at 20°C, 100°C and 150°C and at moisture contents corresponding to the ranges 0-2 %, 3-6% and 7-10 % of 128 bending specimens (cross-sections 70/150 mm²), 130 tension specimens (50/120 mm²) and 267 compression specimens (50/120 mm²), with sub-samples ranging between 25 to 30 specimens each. Most tests were conducted at 100°C as in case of fire the wood temperature remains at or near this value until existing moisture has evaporated.

Specimens were pre-heated in drying ovens up to the required test temperature. For a portion of the specimens a special treatment (e.g. autoclave) was applied to achieve an approximately "uniform" distribution of the wood moisture content within specimen cross-sections. To maintain temperatures during

strength tests specimens were irradiated using infra-red light.

In general samples of comparable average moisture content and temperature showed no significant differences in elasto-mechanic wood properties for specimens with either "uniform" or non-uniform moisture distribution within cross-sections.

The results of this investigation using structural size timber confirmed results from tests with small clear samples which had shown tensile strength and compression strength to be affected least and strongest by temperature respectively. Moreover, it was found that strength and E-modulus of structural timber, even at high temperatures, are still related to wood moisture content.

Within e.g. the moisture range of 7 - 10 % and at a test temperature of 100°C strength and E-modulus values of spruce structural timber of medium quality showed a temperature-related reduction down to the following values as compared with those obtained at 20°C (100 %) (Comparisons with values from the Wood-Fire Protection Handbook 1983 are given in brackets):

bending strength	72% (45%)	E-modulus of bending	88% (73%)
tensile strength	92% (89%)	E-modulus of tension	88% (-)
compression strength	56% (49%)	E-modulus of compression	75% (65%)

Within moisture ranges of 3 - 6% and 0 - 2 % compression strength decreased to 67% and 82% respectively while E-modulus of compression was reduced to 85 % and 90 % respectively as compared with initial values at 20°C.

The results of this study showed that the temperature-related reduction in elasto-mechanic properties of wood stated in the literature (Wood Fire-Protection Handbook) does not apply to structural timber of conventional quality to the extent previously assumed.

¹Glos, P und Henrici, D (1990): Strength of Structural Timber at High temperatures Research Report 87505
Institute for Wood Research, Munich University