

Bestimmung von  
Dimensionierungskennwerten der im  
Normenentwurf DIN 18820 festgelegten  
Typenlamine im Hinblick auf eine  
Anwendung nach der neuen  
Sicherheitstheorie und Ableitung von  
baulichen Sicherheitsbeiwerten

**T 1117**

T 1117

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](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

T 1117: Bestimmung von Dimensionierungskennwerten der im Normenentwurf DIN 18820 festgelegten Typenlamine im Hinblick auf eine Anwendung nach der neuen Sicherheitstheorie und Ableitung von baulichen Sicherheitsbeiwerten

INSTITUT FÜR WERKSTOFFTECHNIK  
Universität - Gesamthochschule Kassel -

Prof. Dr.-Ing. G. W. Ehrenstein

D 3500 KASSEL, 18.11.1982/Sp  
Wilhelmshöher Allee 73  
Tel. 0561/804-6 384  
telex 99572

Sachbearbeiter:  
Dipl.-Ing. R. Spaude  
Tel. 0561/804-6 307

Bestimmung von Dimensionierungskennwerten  
der im Normenentwurf DIN 18820 festgelegten  
Typenlamine im Hinblick auf eine Anwendung  
nach der neuen Sicherheitstheorie und Ableitung  
von baulichen Sicherheitsbeiwerten

Schlußbericht zum Forschungsvorhaben 1/5 - 246/82  
Auftraggeber: Institut für Bautechnik - Berlin



Prof. Dr.-Ing. G.W.Ehrenstein



Dipl.-Ing. R.Spaude

November 1982

## Inhaltsübersicht

- 0    Verwendete Formelzeichen
- 1    Einleitung
- 2    Allgemeine Betrachtungen zur Dimensionierung
  - 2.1    Konventionelle Versagensbetrachtungen
  - 2.2    Wahrscheinlichkeitstheoretische Versagensbetrachtungen
- 3    Untersuchte Werkstoffe
  - 3.1    Laminataufbau
    - 3.1.1    Verwendete Komponenten
  - 3.2    Laminatherstellung
    - 3.2.1    Herstellungsverfahren
  - 3.3    Laminatplan
  - 3.4    Probenvorbereitung
    - 3.4.1    Glasgehaltbestimmung
    - 3.4.2    Konditionierung
    - 3.4.3    Verwendete Probekörpergeometrien
- 4    Experimentelle Untersuchungen
  - 4.1    Verwendete Prüfeinrichtungen zur Kennwertermittlung
  - 4.2    Versuchsdurchführung
    - 4.2.1    Wahl des Prüfverfahrens
      - 4.2.1.1    Zugprüfung nach DIN 53455
      - 4.2.1.2    Biegeprüfung nach DIN 53452
      - 4.2.1.3    Kurzzeitkriechversuch
- 5    Versuchsauswertungen und Diskussion
  - 5.1    Statistische Betrachtungen
    - 5.1.1    Häufigkeitsverteilungen
      - 5.1.1.1    Gaußsche Normalverteilung
      - 5.1.1.2    Logarithmische Normalverteilung
      - 5.1.1.3    Weitere statistische Verteilungen

## 5.1.2 Berechnung von Fraktilwerten

5.1.2.1 Einfluß des Stichprobenumfangs

5.1.2.2 Einfluß der Aussagewahrscheinlichkeit  
und der unteren Grenze

## 5.2 Mechanische Versuche

5.2.1 Zugversuche

5.2.2 Biegeversuche

5.2.3 Elastizitätsmodul

5.2.3.1 Elastizitätsmodul aus Zugversuch

5.2.3.2 Elastizitätsmodul aus Biegeversuch

5.2.4 Kriechneigung und Kriechmodul

5.2.5 Einfluß der Probengeometrie

5.2.6 Einfluß des Glasgehaltes

5.2.7 Einfluß des Aushärtegrades und der Temperatur

5.2.8 Verhalten gegenüber Umgebungsmedien

5.2.8.1 Einfluß der Wasserlagerung

5.2.8.2 Einfluß korrosiver Medien

5.2.9 Fertigungseinflüsse

## 6 Zusammenfassung

## 7 Literaturverzeichnis

## 8 Anhang

8.1 Rechnerprogramme zur Auswertung technischer Meßreihen

8.2 Bilder, Meßwerte und Tabellen

8.2.1 Häufigkeitsverteilungen von Meßwerten

8.2.1.1 Häufigkeitsverteilungen für unterschiedliche  
Fertigungseinflüsse

8.2.1.2 Häufigkeitsverteilungen für sehr große  
Stichprobenumfänge

8.2.1.3 Mittelwert und Fraktilwert in Abhängigkeit  
vom Probenumfang

8.2.2 Fraktilwerte für verschiedene Aussagewahrscheinlichkeiten

8.2.3 Faktoren zur Berechnung von Fraktilwerten bei logarithmischer Normalverteilung

## 0 Verwendete Formelzeichen

Im folgenden werden die in der Arbeit verwendeten Formelzeichen angegeben. Einzelne hier nicht aufgeführte Formelzeichen werden durch den dazugehörigen Text erklärt.

$A_i$	[ - ]	Abminderungsfaktoren für unterschiedliche Einflußgrößen
$A_0$	[mm <sup>2</sup> ]	Querschnittfläche einer GFK-Probe
$A_s$	[%]	Aushärtegrad eines ungesättigten Polyesterharzes
$b$	[mm]	Probenbreite
$E$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul aus Kurzzeitversuch
$E_{bo,1}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul aus 3-Punkt Biegung bei 0,1% Randfaserdehnung
$E_{bo,5}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul aus 3-Punkt Biegung bei 0,5% Randfaserdehnung
$E_{b4Pkt}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul aus 4-Punkt Biegung
$E_c$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Kriechmodul
$E_s$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Sekantenmodul
$E_t$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Tangentenmodul
$E_{zo,1}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul aus Zugversuch bei 0,1%-Dehnung
$E_{zo,5}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul aus Zugversuch bei 0,5%-Dehnung
$E_{zo,05}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul aus Zugversuch bei 0,05%-Dehnung
$E_G$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul für Glasfaser
$E_H$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul für Harz
$e$	[mm]	Randfaserabstand
$F$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Fraktilwert

$F_1$	$[N/mm^2]$	allgemeiner Kennwert für die Beanspruchung
$F_2$	$[N/mm^2]$	allgemeiner Kennwert für den Werkstoffwiderstand
$F_1^*$	$[N/mm^2]$	Einwirkungsfraktilwert
$F_2^*$	$[N/mm^2]$	Widerstandsfraktilwert
$F_{max}$	$[N]$	Maximalkraft
$F_{sx}$	$[N]$	Kraft, die der x% Dehnspannung entspricht
$\Delta F$	$[N]$	Änderung der Kraft zur Bestimmung des E-Moduls
$F_B$	$[N]$	Kraft beim Bruch (Biegeversuch)
$f_B$	$[mm]$	Durchbiegung der Probe beim Bruch (Biegeversuch)
$f_x$	$[mm]$	Durchbiegung der Probe beim Kurzzeitkriechversuch nach x Std.
$\Delta f$	$[mm]$	Durchbiegung der Probe beim 3-Punkt Biegeversuch
$G_0$	$[g]$	Gewicht einer Veraschungsprobe
$\Delta G$	$[g]$	Gewicht des verbrannten Harzes
$h$	$[mm]$	Probenhöhe
$K$	$[N/mm^2]$	Werkstoffkennwert (allg. Betrachtung)
$K_i$	$[-]$	Kriechneigungsfaktor zu einer bestimmten Zeit
$k$	$[-]$	Faktor zur Berechnung von Fraktilwerten
$L_0$	$[mm]$	Ausgangsmeßlänge
$\Delta L_R$	$[mm]$	Längenänderung bei Reißkraft
$\Delta L_{F_{max}}$	$[mm]$	Längenänderung bei Maximalkraft $\cong \Delta L_R$
$l_v$	$[mm]$	Auflagerabstand (3-Punkt-Biegung)
$L_A$	$[mm]$	Auflagerabstand (4-Punkt-Biegung außen)
$L_B$	$[mm]$	Auflagerabstand (4-Punkt-Biegung innen)
$M_b$	$[Nm]$	Biegemoment beim Bruch
$n$	$[-]$	Meßwertumfang
$S$	$[-]$	Sicherheitsfaktor (allgemein)
$S^*$	$[-]$	Sicherheitsfaktor als Quotient der Fraktilwerte
$S_1$	$[-]$	Teilsicherheitsfaktor (Beanspruchung)

$S_2$	[-]	Teilsicherheitsfaktor (Werkstoffkenngröße)
$S_f$	[%]	Monostyrolgehalt im Harz vor der Vernetzung
$S_x$	[%]	Monostyrolgehalt im Formstoff nach der Vernetzung
$s$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Standardabweichung
$t$	[h]	Zeit
$T$	[°C]	Temperatur
$v$	[%]	Variationskoeffizient
$W$	[%]	Aussagewahrscheinlichkeit
$W_b$	[mm <sup>3</sup> ]	Widerstandsmoment
$\bar{x}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Mittelwert
$\delta_0$	[°C]	Temperatur, um Harz in einer Sekunde auszuhärten
$\delta$	[°C]	Temperatur zur Harzhärtung
$\epsilon$	[%]	Dehnung
$\epsilon_R$	[%]	Reißdehnung (Zugversuch)
$\epsilon_{bB}$	[%]	Randfaserdehnung beim Bruch (Biegeversuch)
$\mu$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Mittelwert der Grundgesamtheit
$\varphi$	[Vol.-%]	Glasvolumenanteil
$\rho_G$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Dichte von Glas
$\rho_H$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Dichte von Harz
$\psi$	[Gew.-%]	Glasgewichtsanteil
$\sigma$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Spannung
$\sigma_{bB}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Biegefestigkeit
$\sigma_{zB}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit
$\sigma_{zBG}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit Glasfaser
$\sigma_{zBH}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit Harz
$\sigma_{max.}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Maximalspannung
$\sigma_{sx}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	x%-Dehnspannung
$\sigma_{VORH}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	vorhandene Spannung
$\sigma_{zul.}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	zulässige Spannung

## 1 Einleitung

Glasfaserverstärkte duroplastische Polymerwerkstoffe unterliegen stärker als andere Werkstoffe den Variablen der Herstellung und Verarbeitung. Außerdem reagieren sie empfindlich gegenüber bestimmten physikalischen Einflußgrößen, was sich dann in einer mehr oder weniger großen Streuung einzelner Werkstoffeigenschaften ausdrückt. Um diese Streuungen bei der Sicherheitsbeurteilung eines GFK-Bauteils mitzuberücksichtigen, ist zur Kennwertfestlegung die Angabe eines unteren Grenzwertes sinnvoll. Es ist bei der Ermittlung solcher Grenzwerte unerlässlich, Überlegungen der Wahrscheinlichkeitstheorie und mathematischen Statistik in das Gebiet miteinzubeziehen. Daher sind die Materialeigenschaften als Funktion von verschiedenen Einflußfaktoren, wie z. B. Zeit, Temperatur, umgebendes Medium, Belastung oder Lastgeschichte statistisch zu erfassen.

Da aber die Statistik keine absolut sicheren Aussagen zuläßt, muß im Rahmen der Ermittlung von Dimensionierungskennwerten eine statistische Sicherheit oder Irrtumswahrscheinlichkeit vereinbart werden. Als Basisgröße für Werkstoffkennwerte dient ein unterer Grenzwert bzw. Fraktilwert, unterhalb dem nur noch ein geringer Prozentsatz aller Meßwerte liegen soll. Die Angabe eines solchen Fraktilwertes kann immer nur mit einer bestimmten Auswahrscheinlichkeit vorgenommen werden, da er nur aus einem begrenzten Stichprobenumfang und damit aus einem begrenzten Informationsumfang bestimmt wird /1,6,8,12/.

Obwohl seit vielen Jahren Meßwerte glasfaserverstärkter duroplastische Polymerwerkstoffe gesammelt werden, ist die Angabe eines arithmetischen Mittelwertes unzureichend. Es müssen mathematische Funktionen sowohl für die Mittelwerte als auch für die Standardabweichungen bzw. die daraus abgeleiteten Fraktilwerte der Dimensionierungskenngrößen gefunden werden, die die Abhängigkeiten von o. g. Einflußgrößen berechenbar machen. Dazu sind die Streuungen der Festigkeitswerte verschiedener Typenlamine einer näheren Betrachtung zu unterziehen. Dieses ist notwendig, weil nur auf Grund der statistischen Ermittlung der Werkstoffkennwerte unter den verschiedenen Einflüssen eine zutreffende Aussage über die zu wählenden Sicherheitsbeiwerte gemacht werden kann /1-4,8,10,12,22/.

Ziel der Arbeit im Rahmen dieses Forschungsauftrages ist es, Dimensionierungskennwerte für verschiedene Typenlamine auf statistischer Basis zu ermitteln. Um Mittelwerte, Standardabweichungen und Fraktilwerte genauer angeben zu können, darf bei deren Ermittlung kein zu kleiner Stichprobenumfang vorliegen.

Eine Loslösung von konventionellen Versagensbetrachtungen mit determinierten Dimensionierungskenngrößen führt zu wahrscheinlichkeitstheoretischen Überlegungen, wodurch Auswirkungen verschiedener Einflußgrößen auf Meßwertstreuungen besser erfaßt werden können.

## 2 Allgemeine Betrachtungen zur Dimensionierung

### 2.1 Konventionelle Versagensbetrachtungen

Prinzipiell soll eine Dimensionierung mit Polymerwerkstoffen nicht anders aussehen als mit anderen Werkstoffen. Es werden deshalb die für die Polymerwerkstoffe spezifischen Auswirkungen aus den Umgebungs-, Einsatz- und Fertigungsbedingungen auf das Eigenschaftsverhalten durch sogenannte Abminderungsfaktoren erfaßt. Sie sind werkstoffbezogene Größen, aber bauteilunabhängig.

Die Grundgleichung für konventionelle Versagensbetrachtungen läßt sich dann folgendermaßen formulieren /3-7,10,15,20/

$$\sigma_{\text{Vorh}} \leq \sigma_{\text{zul}} = \frac{K}{S \cdot A_i} \quad (\text{Gl. 1})$$

mit  $\sigma_{\text{Vorh}}$  : vorhandene Beanspruchung  
 $\sigma_{\text{zul}}$  : zulässige Beanspruchung  
K : Werkstoffkennwert  
S : Sicherheitsfaktor  
 $A_i$  : Abminderungsfaktor für unterschiedliche Einflußgrößen

Der Werkstoffkennwert ist meist der Mittelwert einer kleinen Meßwertreihe ( $3 \leq n \leq 5$ ). Unabhängig vom Versagenskriterium ist die Festlegung der Sicherheitsfaktoren mit einem großen Ermessensspielraum verbunden. Bild 1 veranschaulicht dieses /10/.

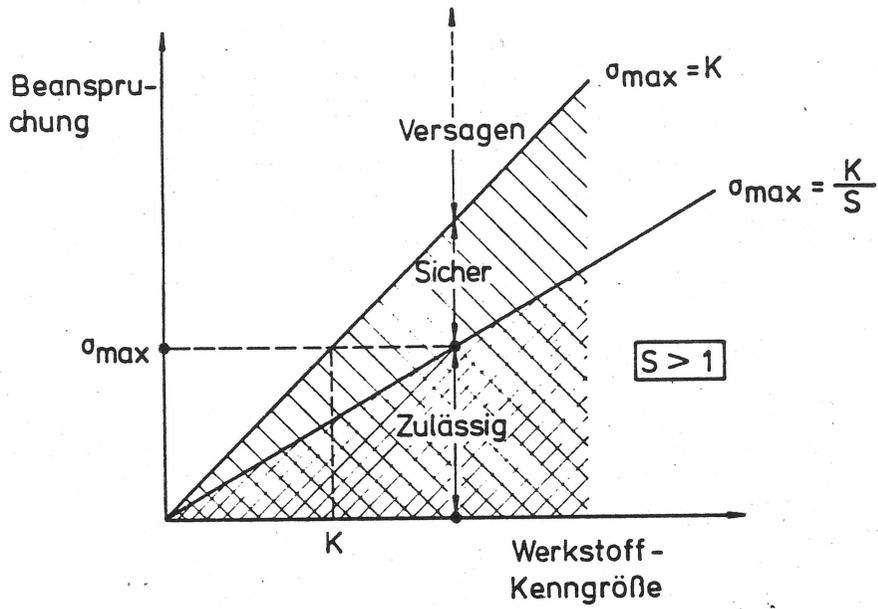


Bild 1: Veranschaulichung zulässiger, sicherer und zum Versagen führender Beanspruchungen

Trägt man die Beanspruchung über der Werkstoffkenngröße auf, dann wird bei determinierter Werkstoffkenngröße  $K$  jede vorhandene Beanspruchung sicher ertragen, wenn sie unterhalb des Kennwertes liegt. Die Gerade mit der Gleichung  $\sigma_{\max} = K$  begrenzt die sicheren Beanspruchungszustände. Wird der Kennwert mit einem Sicherheitsfaktor  $S > 1$  beaufschlagt, erhält man zulässige Beanspruchungen.

Bei der Festlegung eines Abminderungsfaktors ist es vorteilhaft, diesen Faktor in Einzelfaktoren zu zerlegen.

$$A = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot \dots \cdot A_n$$

Hierbei bedeuten:

- $A_1$  : Zeitabhängigkeit
- $A_2$  : Medienbeständigkeit
- $A_3$  : Temperaturbeständigkeit
- $A_4$  : Herstellungsbedingungen
- $A_n$  : weitere mögliche Einflußgrößen

Tabelle 1 gibt einen Überblick über Abminderungsfaktoren für die Festigkeit von GF-UP Mattenlaminaten in Abhängigkeit vom Glasfasergehalt /18/.

Abminderungsfaktor	Glasgehalt in Gew.-%				
	20	25	30	35	40
gegenüber Kurzzeitfestigkeit bei Langzeitbeanspruchung	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6
Betriebstemperaturen 25 <sup>0</sup> C bis 40 <sup>0</sup> C, Abminderung gegenüber Kennwert bei RT	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1
Betriebstemperatur 40 <sup>0</sup> C bis 60 <sup>0</sup> C, Abminderung gegenüber Kennwert bei RT	1,5	1,5	1,4	1,4	1,3

Tabelle 1: Abminderungsfaktoren für die Festigkeit von GF-UP Mattenlaminaten

Die konventionellen Versagensbetrachtungen, die durch Gleichung 1 beschrieben werden, gehen von determinierten Beanspruchungen aus, denen eine determinierte Werkstoffkenngröße gegenübergestellt wird. In der Praxis treten jedoch Schwankungen sowohl auf der Seite der Beanspruchung als auch auf der Seite der Werkstoffkenngröße auf, die bei dieser Betrachtungsweise nicht mitberücksichtigt werden.

## 2.2 Wahrscheinlichkeitstheoretische Versagensbetrachtungen

Bei der Bemessung von Bauteilen stellt man den aus Versuchen ermittelten Kennwerten, die aus der statischen Berechnung gewonnenen Beanspruchungen gegenüber.

Um aber dem Zufälligkeitscharakter von Beanspruchung einerseits und Kennwert andererseits Rechnung zu tragen, ist es notwendig, Abweichungen von mittleren Werten auf beiden Seiten mitzubersichtigen. Bild 2 geht von der Betrachtung aus, daß sich die Werte auf der Beanspruchungsseite und auf der Seite der Kenngröße zufällig verteilen /1,12/.

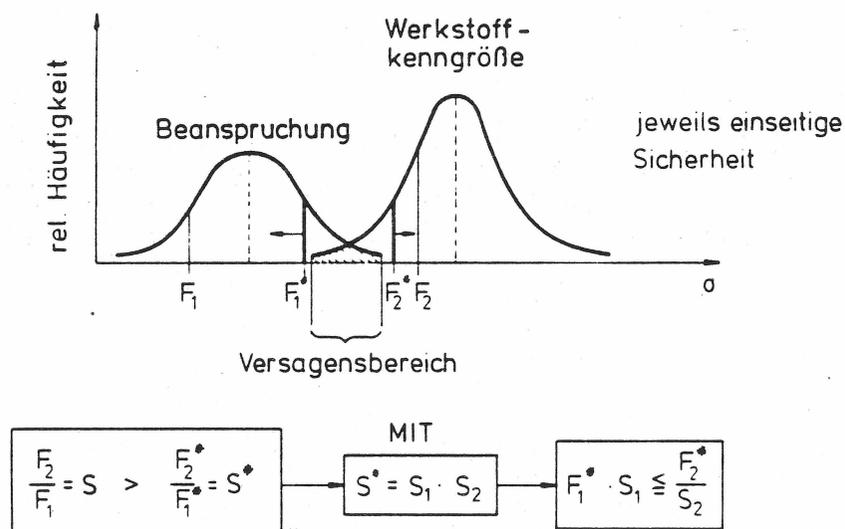


Bild 2: Überlappung der Verteilungsfunktionen mit eingetragenen Fraktilwerten für Beanspruchung und Werkstoffkennwert zur Festlegung eines Nennsicherheitsfaktors

Es besteht die Möglichkeit, daß sich die Streubereiche von Beanspruchung und Kenngröße überlappen können. Dann stellt der Grad der Überlappung ein Maß für eine bestimmte Versagenswahrscheinlichkeit dar. Im schraffierten

Bereich wäre bei einer festigkeitsbezogenen Betrachtung die Forderung  $\sigma_{Vorh} < \sigma_{zul}$  nicht mehr erfüllt. Dieser Fall kann durch Festlegung einseitiger Fraktilwerte vermieden werden, und zwar durch Bestimmung eines oberen Fraktilwertes auf der Seite der Beanspruchung und eines unteren Fraktilwertes auf der Seite der Werkstoffkenngröße. Durch einen Vergleich eines oberen Fraktilwertes  $F_1^*$  mit einem unteren Fraktilwert  $F_2^*$  werden sämtliche Abweichungen von mittleren Werten mitberücksichtigt.

Betrachtet man  $F_2^*$  als Widerstandsfraktile und  $F_1^*$  als Einwirkungsfraktile, dann läßt sich ein Nennsicherheitsfaktor als Quotient aus Widerstandsfraktile und Einwirkungsfraktile bilden. Durch Aufspaltung des Nennsicherheitsfaktors  $S^*$  in Teilsicherheiten  $S_1$  für den Bereich der Beanspruchung und  $S_2$  für den Bereich der Werkstoffkenngröße, läßt sich aufgrund von unterschiedlichen Einflußfaktoren eine Dimensionierungsvorschrift formulieren: Einwirkung  $F_1^*$  .  $S_1 < \text{Widerstand } F_2^*/S_2$ . Es findet also ein Vergleich einer hohen Einwirkungsfraktile mit einer niedrigen Widerstandsfraktile statt.

### 3. Untersuchte Werkstoffe

#### 3.1 Laminataufbau

Für die Ermittlung von Dimensionierungskennwerten wurden Lamine entsprechend Bild 3 geprüft.

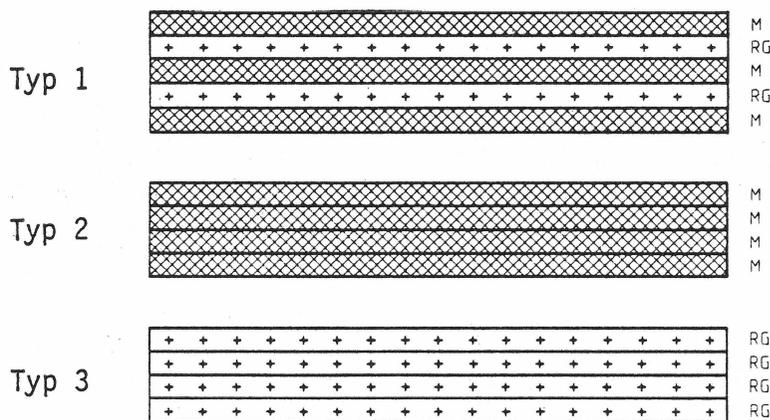


Bild 3: Aufbau verschiedener Prüflamine

Der Typ 1 ist ein Mischlaminat. Dieses Laminat setzt sich aus einzelnen Schichten Glasfasermatte und Rovinggewebe zusammen, die die DIN 61854 und die DIN 61855 erfüllen. Die verwendeten Reaktionsharze genügen den Anforderungen nach DIN 16946.

Um weitere Vergleiche anstellen zu können, werden noch Reinlamine aus Glasfasermatte und Reinlamine aus Rovinggewebe untersucht, wie sie die Typen 2 und 3 in Bild 3 zeigen. Auch sie erfüllen die DIN 61854, 61855 und die DIN 16946.

### 3.1.1 Verwendete Komponenten

Eine Übersicht über die verwendeten Laminatkomponenten gibt Tabelle 2.

	Material	Bezeichnung	Hersteller
Verstärkungsmaterial	1) Glasfasermatte (E-Glas)	a) M 113-10-450 b) M 113-40-450 c) M 312-10-450 d) M 123-10-450 e) MK 10B -EC 11-25 450	Gevetex-Textilglas GmbH Herzogenrath  Scandinavian Glasfibre
	2) Glasrovinggewebe (E-Glas)	a) 92 155 - 580 b) 92 185 - 905	Interglas GmbH, Ulm
	Glasfilamentgewebe (E-Glas)	c) 92 151 - 445	Interglas GmbH Ulm
	3) Glasroving (E-Glas)	KSG C11	Gevetex-Textilglas GmbH, Herzogenrath

Tabelle 2a: Zusammenstellung der verwendeten Verstärkungsmaterialien

	Material	Bezeichnung	Hersteller
Matrixmaterial	4.) ungesättigtes Polyesterharz	a) Palatal P4	BASF AG Ludwigshafen
		b) Palatal P57-52	
		c) Palatal A41o	
		d) Palatal P53	
		e) Leguval N 50 T	
		f) Standard UP 001	RAC AG
		g) Vestopal 145T	Chemische Werke Hüls AG, Marl
	Epoxidharz	h) Lekutherm X257	Bayer AG Leverkusen
	5) Härter	a) Interox AAP-NA-1	Peroxid-Chemie Höllriegelskreuth
		b) Interox MEKP-NA-1	
c) Interox MEKP-HA-1			
d) Interox CHP-NA-1			
e) Interox BP-50-P			
f) Interox CHP-50-P1			
	g) Lekutherm T3	Bayer AG Leverkusen	
6) Beschleuniger	Kobalt, COB1 Kobaltoctoatlösung 1%ig	Peroxid-Chemie Höllriegelskreuth	

Tabelle 2b: Zusammenstellung der verwendeten Matrixmaterialien

## 3.2 Laminatherstellung

### 3.2.1 Herstellungsverfahren

Die einfachste Herstellungsmethode von GF-UP ist das Handauflegeverfahren oder Kontaktverfahren. Hierbei werden zugeschnittene Matten- oder Gewebestücke Lage für Lage zwischen zwei Pressplatten aufgelegt und das Harz mit Hilfe einer Tränkwalze aufgebracht. Die gewünschten Laminatdicken liegen in der Praxis zwischen 2,5 mm und 6 mm oder stärker, wobei dünnere Wandstärken als 2 mm von der Haltbarkeit und Herstellung sehr problematisch sind. Bei diesem Arbeitsverfahren ist besonders darauf zu achten, daß die einzelnen Schichten mit Hilfe der Walzen genügend entlüftet werden, um ein möglichst blasenfreies Laminat herzustellen.

Das Faserspritzverfahren ist ein mechanisches Verfahren des Handlaminierens. Hierbei werden 16 - 50 mm lange Rovingstücke mit Hilfe einer Spritzpistole aufgetragen. Gleichzeitig wird mit derselben Spritzpistole ein reaktionsfähiges Harz-Härter-Beschleunigungs-Gemisch erzeugt und aufgesprüht. Die Gleichmäßigkeit der Laminatdicken und der Glasfaserverteilung hängen beim Faserspritzverfahren genauso von der handwerklichen Geschicklichkeit des Verarbeiters ab wie beim Handlaminieren.

Das Vakuumverfahren unterscheidet sich vom Handauflegeverfahren dadurch, daß die mit Harz getränkten Glasfaserschichten durch Überdecken mit einer geschlossenen Folie, die an den Rändern des Laminats luftdicht abgeschlossen wird, durch ein Vakuum luftblasenfrei und harzärmer gemacht werden.

Das Naßpressen ist ein rein mechanisches Herstellungsverfahren. Beim Warm-Naßpressen werden Matten- oder Gewebezuschnitte in eine Stahlform, die auf 100°C bis 150°C gleichmäßig erwärmt worden ist, gelegt und mit einem Harz-Härter-Beschleuniger System übergossen. Der Pressvorgang geschieht unter Druck bis zu 5 bar. Die Schließzeit der Presse richtet sich nach der Temperatur und dem Harz-Härter-Gemisch.

Die o. g. Herstellungsverfahren werden sowohl für GF-UP Mattenlamine als auch für GF-UP Mischlamine bzw. GF-UP Gewebelamine angewendet. Glasfaserverstärkte Epoxidharze sind im Handlaminierverfahren hergestellt.

Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens untersuchten Lamine sind im Laminatplan in Tabelle 3 zusammengestellt.

### 3.3 Laminatplan

Der Aufbau der einzelnen Prüflamine ist aus Tabelle 3 ersichtlich.

Aus der Tabelle sind neben dem Laminataufbau auch die Lagenanzahl, die verwendeten Laminatkomponenten, der Glasgehalt, die Nenndicken und das Herstellungsverfahren zu entnehmen.

	Lf. Nr.	Laminat- aufbau	Lagen- anzahl	Laminatkomponenten		Glasgehalt [Gew.-%]	Mittlere Laminat- dicke [mm]	Herstellungsverfahren	
				Matrix	Glasfaser				
Typ 1	Mischlaminat	1	M-RG-M ...	7	4b, 5a, 6	1a, 2a	34,1 - 36,5	7,0	Handlaminat(lab)*
		2	M-RG-M ...	7	4b, 5b, 6	1e, 2a	36,0 - 47,0	7,0	Handlaminat(lab)
		3	M-RG-M ...	7	4b, 5a, 6	1b, 2c	45,0 - 50,0	6,0	Handlaminat(lab)
		4	M-RG-M ...	7	4b, 5a, 6	1b, 2c	45,0 - 50,0	6,0	Handlaminat(lab)
		5	M-RG-M ...	13	4b, 5a, 6	1b, 2b	45,0 - 50,0	11,0	Handlaminat(lab)
		6	M-RG-M ...	13	4h, 5g, 6	1a, 2a	37,0	11,0	Handlaminat(lab)
		7	M-RG-M-M-RG-M	6	4g, 5c, 6	1d, 2b	44,0 - 54,0	5,0	Handlaminat(ind)*
Typ 2	Mattenlaminat	1	M-M-M ...	4	4b, 5a, 6	1a	30,8 - 32,5	4,0	Handlaminat(lab)
		2	M-M-M ...	7	4a, 5b, 6	1a	27,7 - 32,6	7,0	Handlaminat(ind)
		3	M-M-M ...	3	4b, 5a, 6	1b	25,0 - 30,0	3,0	Handlaminat(lab)
		4	M-M-M ...	6	4b, 5a, 6	1b	25,0 - 30,0	6,0	Handlaminat(lab)
		5	M-M-M ...	12	4b, 5a, 6	1b	25,0 - 30,0	11,0	Handlaminat(lab)
		6	M-M-M ...	12	4a, 5d, 6	1a	25,0 - 30,0	11,0	Handlaminat(lab)
		7	M-M-M ...	12	4e, 5g, 6	1a	25,0 - 30,0	11,0	Handlaminat(lab)
		8	M-M-M ...	12	4h, 5g, 6	1a	31,8	11,0	Handlaminat(lab)
		9	M-M-M ...	6	4d, 5e, 6	1c	40,0 - 44,0	5,0	Warm-Nass-Pressen
		10	M-M-M ...	4	4f, 5d, 6	1d	32,0 - 35,0	5,0	Handlaminat(ind)
Typ 3	Gewebe- laminat	1	RG-RG-RG	3	4b, 5a, 6	2a	44,8 - 45,0	2,2	Handlaminat(lab)
		2	RG-RG-RG ...	7	4a, 5b, 6	2a	47,6 - 55,3	5	Handlaminat(ind)
		3	RG	-	4e, 5g, 6	3	33,0 - 35,0	5	Faserspritzlam.

\*) lab = labormäßige Herstellung  
ind = industriemäßige Herstellung

Tabelle 3: Laminatplan

### 3.4. Probenvorbereitung

#### 3.4.1 Glasgehaltbestimmung

Die Festigkeitseigenschaften der glasfaserverstärkten Polymerwerkstoffe ändern sich nach Art und Menge der eingebrachten Glasfaserverstärkung. Die Menge der Glasfaserverstärkung kann durch Veraschen der ausgehärteten Laminaten bestimmt werden. An den nach Tabelle 3 gefertigten Laminaten werden Glasgehaltbestimmungen nach DIN 53 395 vorgenommen. Dazu werden die Proben mindestens 1/2 Stunde lang bei ca. 750°C "geglüht". Die Proben werden vor der Veraschung und danach gewogen. Man erhält dabei den Glasgewichtsanteil mit der Beziehung

$$\psi = ( 1 - \Delta G / G_0 ) \cdot 100 \quad [\text{Gew.}\%] \quad (\text{Gl. 2})$$

Der Glasgewichtsanteil  $\psi$  läßt sich über die Gleichung

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{1-\psi}{\psi} \cdot \rho(\text{Glas}) / \rho(\text{Harz})} \cdot 100 \quad [\text{Vol.}\%] \quad (\text{Gl. 3})$$

in den Fasergehalt in Vol.-% umrechnen. Nimmt man an, daß mit  $\rho_{\text{Glas}} / \rho_{\text{Harz}} \approx 2$  ein konstantes Verhältnis vorliegt, vereinfacht sich Gleichung 2 für den Glasgewichtsanteil zu

$$\psi \approx \frac{2\varphi}{1+\varphi} \quad (\text{Gl. 4})$$

und Gleichung 3 für den Glasvolumenanteil zu

$$\varphi \approx \frac{\psi}{2-\psi} \quad (\text{Gl. 5})$$

Bekanntlich können sich besonders bei Matten- und Mischlaminaten erhebliche Glasgehaltsstreuungen ergeben, obwohl gleiche Herstellungsbedingungen vorliegen. Die dadurch hervorgerufenen Festigkeitsstreuungen sind ebenfalls erheblich. Bild 4 zeigt als Beispiel die Abhängigkeit der Zugfestigkeit vom Glasgewichtsanteil für Mischlaminat Nr. 1.1. Wegen dieser starken Abhängigkeit ist es oftmals sinnvoll, die Festigkeitswerte zu relativieren, d. h., sie auf den Glasgehalt zu beziehen.

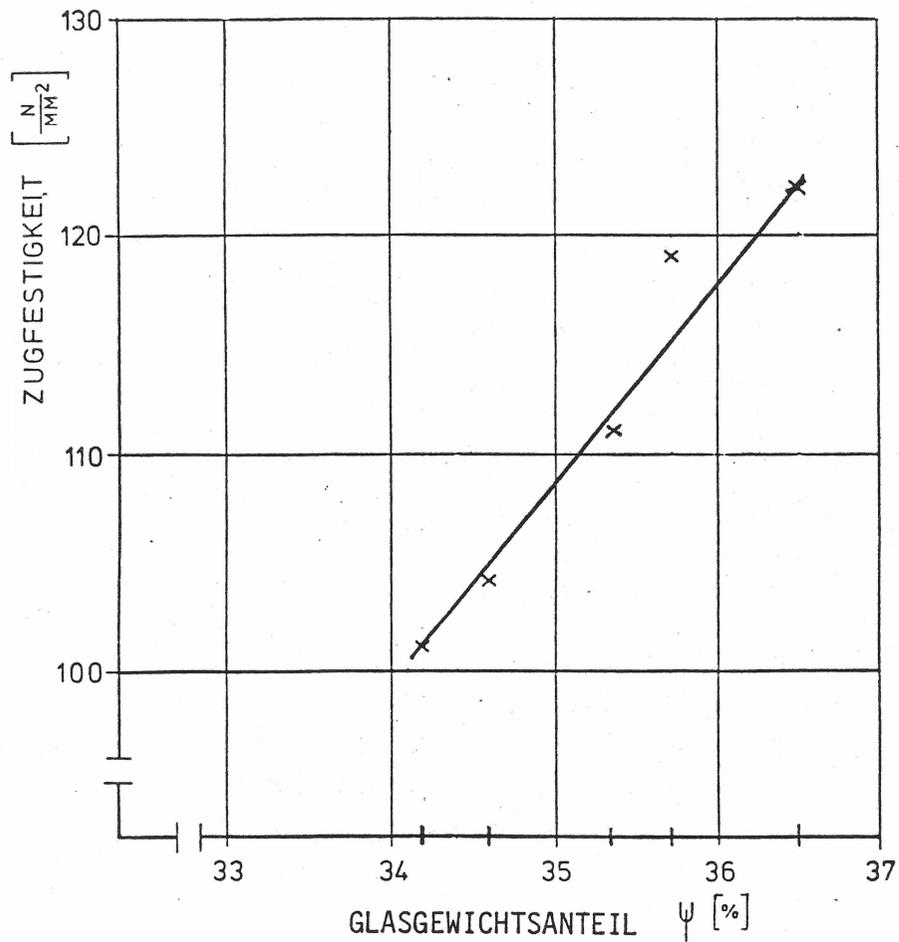


Bild 4: Einfluß der Streuung des Glasgewichtanteils auf die Zugfestigkeitswerte eines Mischlaminats Nr. 1.1

Das Mischlaminat Nr. 1.1 zeigt innerhalb des betrachteten Streubereiches eine lineare Abhängigkeit der Zugfestigkeitswerte vom Glasgewichtanteil. Für die glasgehaltsbezogene Spannung läßt sich für dieses Mischlaminat ein Wert  $\sigma_{ZB}/\psi = 310 \text{ N/mm}^2$  angeben.

### 3.4.2 Konditionierung

Die glasfaserverstärkten duroplastischen Polymerwerkstoffe werden in der letzten Phase der Verarbeitung in einem irreversiblen chemischen Vorgang vernetzt, d. h. die Moleküle bzw. Molekülketten werden durch Primärbindung miteinander räumlich eng verbunden. Der Zusammenhalt des Festkörpers ist damit weitestgehend durch Hauptvalenzbindungen gegeben, weshalb die ausgehärteten Produkte auch in der Wärme nicht mehr erweichbar sind. Die Härtingsreaktion kann durch Katalysatoren ausgelöst werden und/oder durch Wärmezufuhr. Die Geschwindigkeit der chemischen Härtingsreaktion hängt vom Aufbau des Harzes ab, von den verwendeten Härtungsmitteln, den Katalysatoren und Beschleunigern sowie von der Wärmezufuhr.

Die Härtungstemperatur kann nicht beliebig gesteigert werden, da sonst die Gefahr einer Überhärtung nicht ausgeschlossen wäre.

Da Duroplast endgültig erst durch die Härtung entstehen, werden alle Eigenschaften stark vom Grad der Aushärtung bestimmt. Aus diesem Grunde ist es wichtig, über den Aushärtungsgrad Bescheid zu wissen. Bei der Bestimmung des Aushärtegrades können drei verschiedene Methoden angewendet werden:

- 1) Oberflächenhärte nach "Shore D"
- 2) Oberflächenhärte nach Vickers DIN 50 133
- 3) Bestimmung von monomeren Styrol in Reaktionsharzformstoffen auf Basis von ungesättigten Polyesterharzen DIN 53 394

Die beiden erstgenannten Methoden sind in ihrer Ablesegenauigkeit bei glasfaserverstärkten Polymerwerkstoffen nicht genau genug, um einen Aushärtegrad zu definieren.

Die Prüfung nach DIN 53 394 dient dazu, mit Hilfe von Jodmonochlorid den Gehalt an monomeren Styrol in Reaktionsharzformstoffen auf Basis von ungesättigten Polyesterharzen zu bestimmen.

Das Styrol wird aus dem UP-Harzformstoff mit Methylenchlorid extrahiert und mit Wijs-Lösung umgesetzt. Der Überschuß an Wijs-Lösung wird jodometrisch bestimmt. Wenn der Styrol-Gehalt eines UP-Harzformstoffes auf dessen Reaktionsharzanteil bezogen werden soll, wird der Filter-Rückstand nach DIN 53 395 verascht und der Glührückstand bestimmt.

Das in UP-Harzformstoffen oft noch vorhandene unzersetzte Peroxid wird ebenfalls jodometrisch bestimmt und muß bei der Berechnung des Styrolgehaltes berücksichtigt werden.

Den Aushärtegrad von UP-Harzen mißt man durch Bestimmung des noch nicht vernetzten Monostyrols im Formstoff ( $S_x$ ) und setzt diesen Wert in Beziehung zu dem Monostyrolgehalt im flüssigen Harz vor der Vernetzung ( $S_f$ ) gemäß:

$$A_s = \frac{S_f - S_x}{S_f} \cdot 100 \quad [\%] \quad (Gl. 6)$$

Die Konditionierung der einzelnen Laminattypen zeigt Tabelle 4.

		Nr.	Lagerung	Härtung	Nachhärtung
TYP 1	MISCHLAMINAT	1.1	trocken	24h bei RT	10 h bei 110°C
		2.1	trocken	24h bei RT	-
		2.2	trocken	24h bei RT	-
		2.3	trocken	24h bei RT	-
		2.4	naß (H <sub>2</sub> O)	24h bei RT	-
		2.5	naß (H <sub>2</sub> O)	24h bei RT	10 h bei 110°C
		3.1	trocken	24h bei RT	24 h bei 100°C
		4.1	trocken	24h bei RT	24 h bei 100°C
		5.1	trocken	24h bei RT	24 h bei 100°C
		6.1	trocken	24h bei RT	-
		6.2	trocken	24h bei RT	3 h bei 100°C
7.1	naß (H <sub>2</sub> O)	24h bei RT	5 h bei 80°C		
TYP 2	MATTELAMINAT	1.1	trocken	24h bei RT	10 h bei 110°C
		2.1	trocken	24h bei RT	5 h bei 110°C
		2.2	trocken	24h bei RT	8 h bei 110°C
		2.3	trocken	24h bei RT	20 h bei 110°C
		2.4	trocken	24h bei RT	35 h bei 110°C
		2.5	trocken	24h bei RT	48 h bei 110°C
		3.1	trocken	24h bei RT	24 h bei 100°C
		4.1	trocken	24h bei RT	24 h bei 100°C
		5.1	trocken	24h bei RT	24 h bei 100°C
		6.1	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	24h bei RT	24 h bei 100°C
		7.1	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	24h bei RT	24 h bei 100°C
8.1	trocken	24h bei RT	-		
8.2	trocken	24h bei RT	3 h bei 100°C		
9.1	trocken	4 min bei 120°C	-		
10.1	trocken	24h bei RT	5 h bei 60°C		
TYP 3	GEBELAM.	1.1	trocken	24h bei RT	10 h bei 110°C
		2.1	trocken	24h bei RT	5 h bei 110°C
		2.2	trocken	24h bei RT	8 h bei 110°C
		2.3	trocken	24h bei RT	20 h bei 110°C
		2.4	trocken	24h bei RT	35 h bei 110°C
		2.5	trocken	24h bei RT	48 h bei 110°C
3.1	trocken	24h bei RT	5 h bei 60°C		

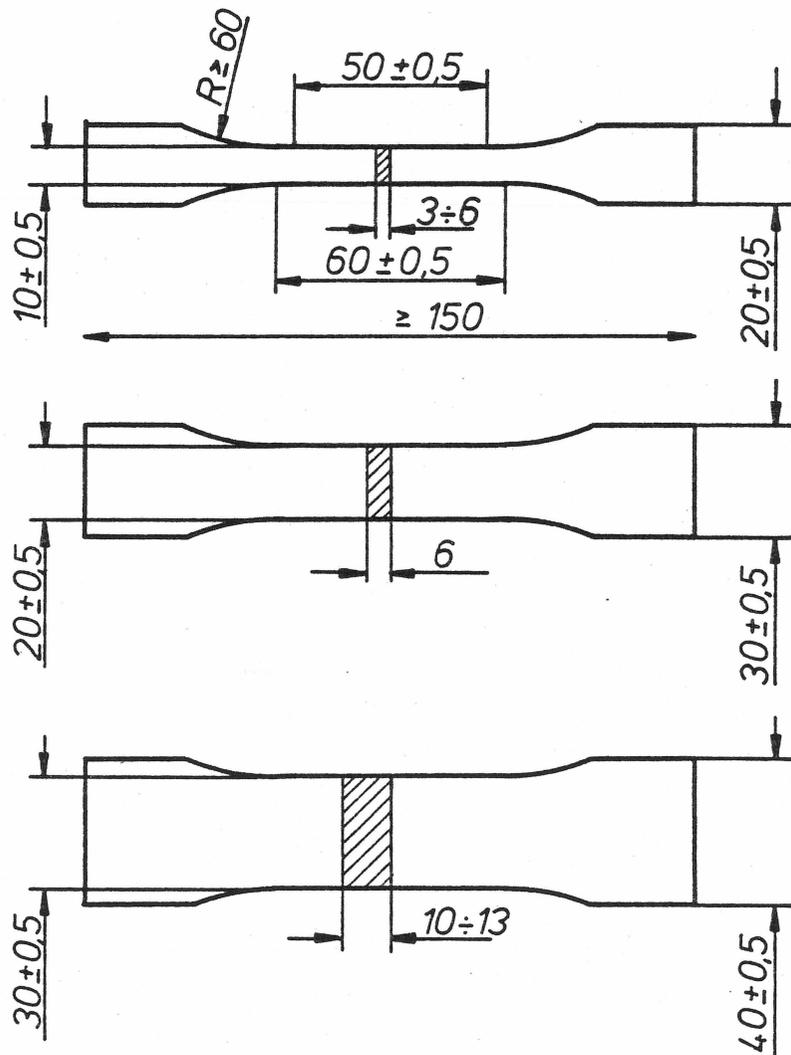
Tabelle 4: Konditionierung der Laminatte

### 3.4.3 Verwendete Probekörpergeometrien

In Vorarbeiten wurde festgestellt, daß unterschiedliche Probekörpergeometrien zu unterschiedlichen Meßwertstreuungen führen können. Die Meßwertstreuungen können vom Probenquerschnitt, der Lagenzahl und der Probenbreite abhängig sein.

In Bild 5 sind die verwendeten Probekörpergeometrien für die Zug- und Biegeversuche zusammengestellt. Die überwiegende Mehrheit aller Versuche wurde an Probestäben nach DIN 53 455 für den Zugversuch und an Probestäben nach DIN 53 452 für den Biegeversuch durchgeführt.

### Proben für den Zugversuch



DIN 53455

Maßstab 1:2

Bild 5a: Verwendete Probekörpergeometrien für die Zugversuche

### Proben für den Biegeversuch

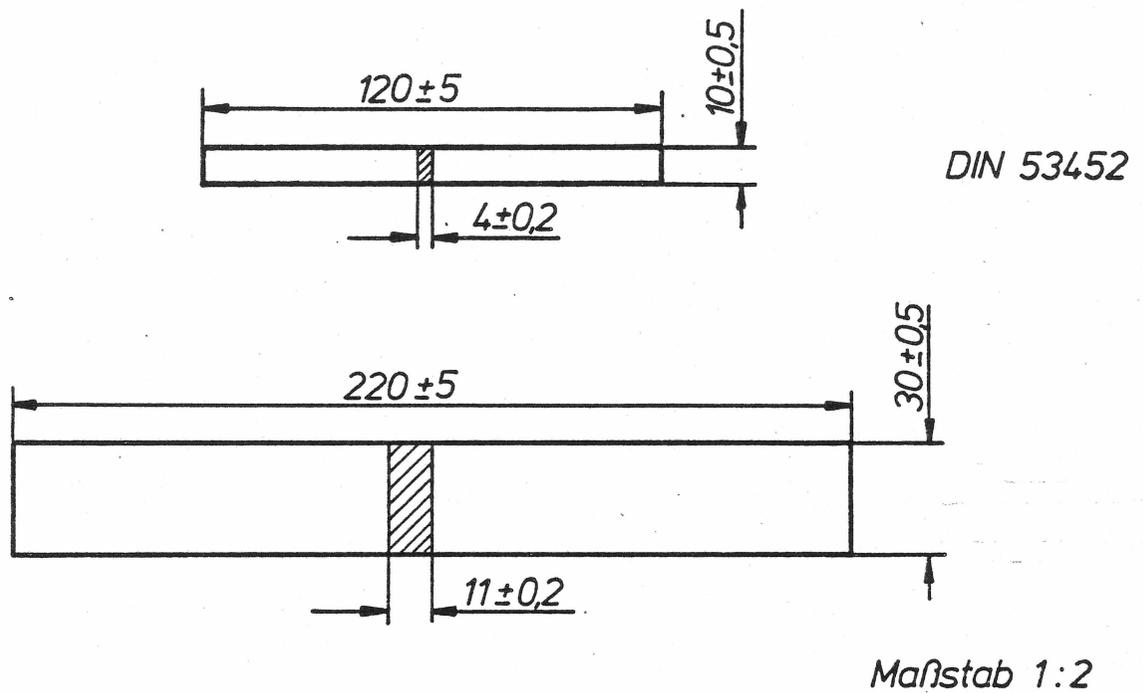


Bild 5b: Verwendete Probekörpergeometrien für die Biegeversuche

Es zeigt sich jedoch in Bild 6, daß größere Probenquerschnitte zu günstigeren Variationskoeffizienten führen können. Das Bild zeigt am Beispiel der Mattenlaminare vom Typ 2, 3.1, 4.1 und 5.1 (vgl. Tab. 4) den Einfluß der Temperatur auf den Variationskoeffizienten des Elastizitätsmoduls dieser Mattenlaminare. Größere Probenquerschnitte liefern günstigere Variationskoeffizienten. Dieses ist umso ausgeprägter, je höher die Prüftemperatur ist.

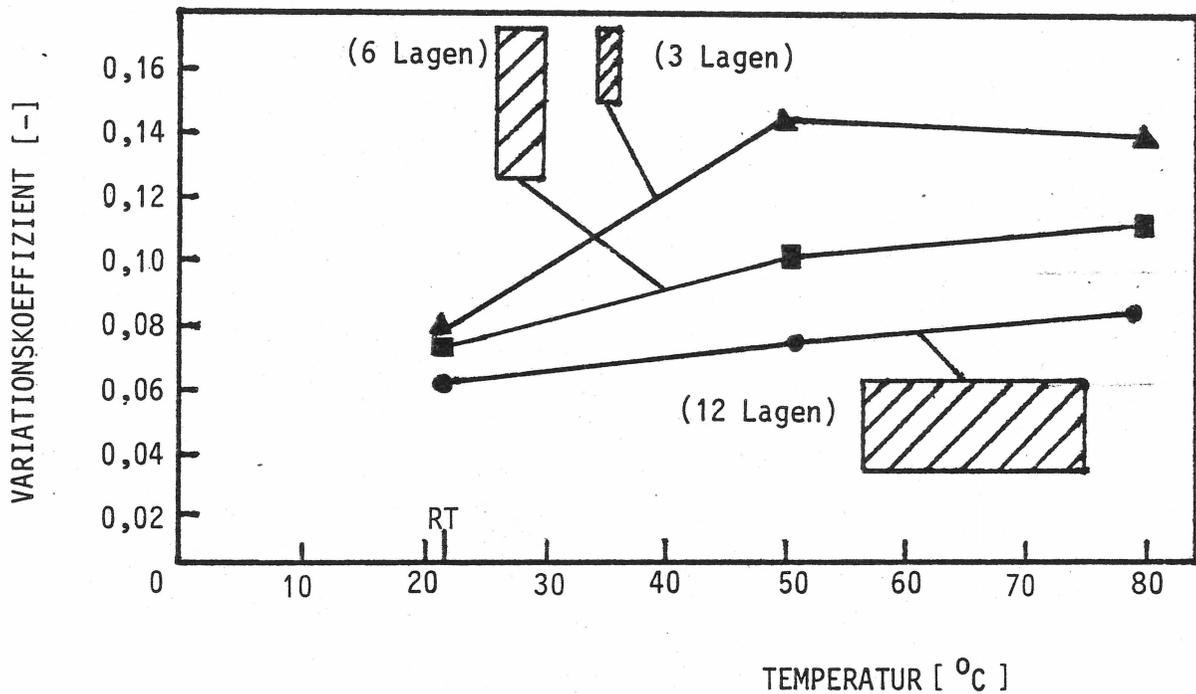


Bild 6: Einfluß der Temperatur auf den Variationskoeffizienten des Elastizitätsmoduls eines Mattenlaminats auf Grund unterschiedlicher Probenquerschnitte

## 4 Experimentelle Untersuchungen

### 4.1 Verwendete Prüfeinrichtungen zur Kennwertermittlung

Für die Durchführung der Zug- und Biegeversuche im Labor stand eine elektronische Universalprüfmaschine (Fa. Zwick) zur Verfügung. Diese Zugprüfmaschine war zusätzlich mit einer Temperierkammer ausgerüstet.

Als Probenfassungen für Zugversuche wurden Keilspannköpfe verwendet. Sie wirken selbstklemmend durch Kerbwirkung und erzeugen eine Anfangsklemmkraft durch vorgespannte Federn. Der obere Einspannkopf war mit dem elektrischen Kraftmeßsystem, das ein zur Kraft proportionales elektrisches Spannungssignal lieferte und von einem Kraft-Weg-Schreiber registriert wurde, verbunden. Der untere Einspannkopf war mit dem Querjoch verbunden, das über einen mechanischen Spindelantrieb mit konstanter Geschwindigkeit auf und ab bewegt werden konnte.

Für die Durchführung der Biegeversuche wurde ein Dreipunktbiegegehänge in die Universalprüfmaschine eingebaut.

Die Messung der Probendehnung beim Zugversuch und der Probendurchbiegung beim Biegeversuch erfolgte über induktive Setzdehnmesser an den Probekörpern.

### 4.2 Versuchsdurchführung

#### 4.2.1 Wahl des Prüfverfahrens

Die Kennwerte für die Dimensionierung werden wegen der einfacheren Versuchsdurchführung überwiegend im Zug- oder Biegeversuch bestimmt. Zugbeanspruchungen stellen sich gleichmäßig über den Prüfquerschnitt ein. Bei der Biegebeanspruchung ergibt sich eine von der neutralen Faser bis zum Rand stetig zunehmende Zug- und Druckbeanspruchung. Während nach Norm die Prüfung der Biegefestigkeit bei Dreipunktbelastung vorgenommen wird, kann der Elastizitätsmodul sowohl aus der Dreipunktbelastung als auch aus der Vierpunktbelastung bestimmt werden. Eine Ermittlung des Elastizitätsmoduls aus der Dreipunktbelastung ergibt im allgemeinen kleinere E-Modulwerte als bei Vierpunktbelastung, bei der der Querkrafteinfluß ausgeschlossen ist.

#### 4.2.1.1 Zugprüfung nach DIN 53455

Die Durchführung sämtlicher Zugversuche erfolgte nach DIN 53455. Der Zugversuch dient zur Ermittlung des Werkstoffverhaltens bei einachsiger, gleichmäßig über den Querschnitt verteilter Zugbeanspruchung. Die Zugproben (vgl. Bild 5) werden gleichmäßig und stoßfrei gereckt, bis der Bruch eintritt. Aus dem Kraft-Verlängerungsdiagramm erhält man unter Berücksichtigung des Probenquerschnitts und der Ausgangsmeßlänge ein Spannungs-Verformungsdiagramm. Die Prüfgeschwindigkeiten betragen beim Zugversuch 5 mm/min. Zum Vergleich wurden noch einige Zugversuche mit einer Prüfgeschwindigkeit von 7,5 mm/min, 10 mm/min und 12,5 mm/min gefahren. Neben den in den Tabellen 3 und 4 aufgeführten Parametern wurden bei einigen Proben auch noch die Prüftemperaturen zwischen 20°C und 80°C variiert.

Bei spröden Polymerwerkstoffen (GF-UP, GF-EP) werden Zugfestigkeit, Reißfestigkeit und Streckspannung im Gegensatz zu duktilen Materialien nicht unterschieden, da die Zug- und Reißfestigkeit in diesem Fall identisch sind und keine Streckspannung auftritt /15,17/.

#### 4.2.1.2 Biegeprüfung nach DIN 53452

Im Biegeversuch nach DIN 53452 wurden die Festigkeitseigenschaften und Formänderungseigenschaften der Lamine bei Dreipunktbiegung ermittelt. Die Versuchslänge, d. h. der Stützabstand betrug jeweils  $(16 \pm 1) \cdot h$ , wobei  $h$  der Laminatdicke entspricht. Die Prüfgeschwindigkeiten betragen beim Biegeversuch 5 mm/min bzw. 10 mm/min. Ebenso wie beim Zugversuch werden auch beim Biegeversuch die Prüftemperaturen zwischen 20°C und 80°C variiert.

#### 4.2.1.3 Kurzzeitkriechversuch

Der Kurzzeitkriechversuch diente zur Bestimmung der Kriechneigung einiger Lamine. Dazu wurden Mischlamine vom Typ 1, Nr.6.1 und Mattenlamine vom Typ 2, Nr.8.1 verwendet. Die zulässige Biegekraft von  $1600 \text{ N} \pm 20 \text{ N}$  wurde zügig, jedoch stoßfrei aufgebracht. Nach ca. 30 sec. Einregelzeit wurde die vorgewählte Kraft erreicht und danach durch einen Regelkreis konstant gehalten. Die Durchbiegung der Proben wurde kontinuierlich auf einem x-y-Schreiber aufgezeichnet. Die Versuche wurden bei Normklima 23/50 durchgeführt.

Die nach DIN 53452 noch zulässigen Randfaserdehnungen von 3,5%, die zur Vermeidung von interlaminaren Schubbrüchen nicht überschritten werden sollten, konnten nicht als Maßstab gelten, da bei max. 2,5% Randfaserdehnung sämtliche Probekörper zerstört waren.

## 5 Versuchsauswertungen und Diskussion

### 5.1 Statistische Betrachtungen

Bei der Fülle der vorliegenden Meßwerte kann mit Hilfe statistischer Auswertungen eine Beurteilung der Eigenschaftswerte der untersuchten Werkstoffe vorgenommen werden. Dabei wird insbesondere festgestellt, in welchem Bereich die Ergebnisse Vertrauen beanspruchen können und ob im Hinblick auf den Zweck der Prüfungen die Probenanzahl ausreichend war oder vergrößert werden muß.

#### 5.1.1 Häufigkeitsverteilungen

Um sich einen Überblick über größere Mengen an Daten zur Beschreibung der Eigenschaften einzelner Werkstoffe zu verschaffen, empfiehlt es sich, diese Daten grob zahlenmäßig auszuwerten /14,19,21,27-31,34,36-38/.

Ein wesentliches Hilfsmittel dazu ist das Häufigkeitsschaubild.

Um ein übersichtliches Häufigkeitsschaubild zu erhalten, ist es nötig, eine vernünftige Klassenanzahl und Klassenbreite zu wählen.

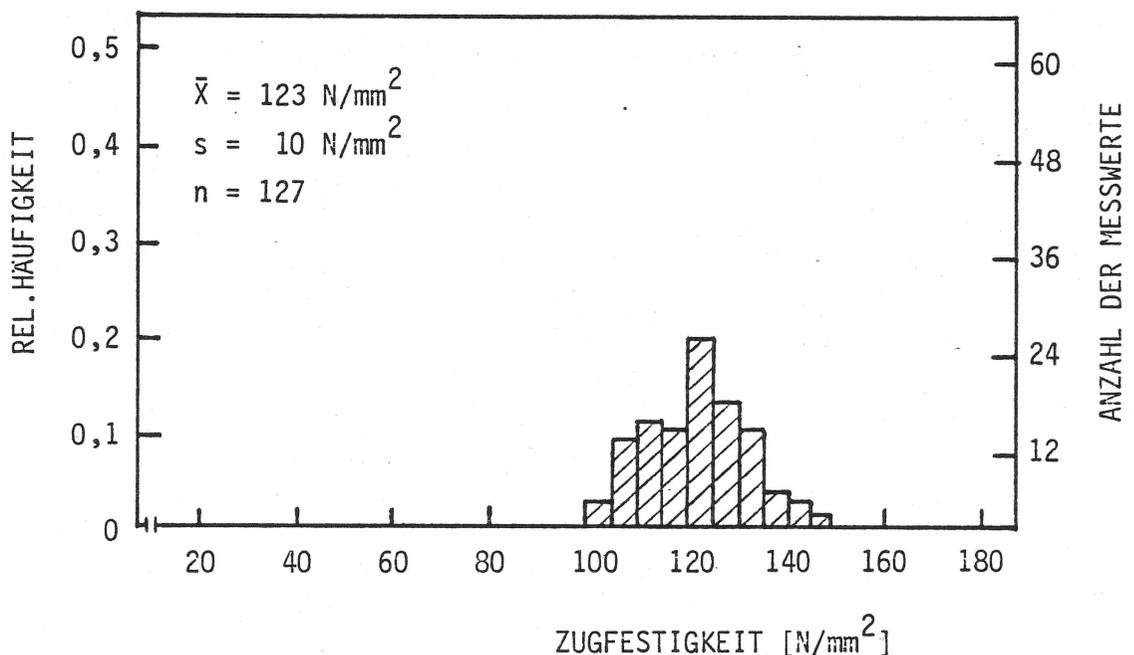


Bild 7: Häufigkeitsverteilung von Meßwerten eines Mattenlaminats Typ 2, Nr. 9.1

Ungefähr 90 % aller Daten sollten in rund 7 Klassen fallen. Damit ergeben sich bereits Klassenbreite und -anzahl. Eine andere Regel besagt, daß die Klassenanzahl ungefähr  $\sqrt{n} + 0,5$  sein soll, wobei  $n$  den Meßwertumfang darstellt. Die Klassenanzahl sollte jedoch 25 nicht überschreiten /16/.

Im Bild 7 ist die Häufigkeitsverteilung von Zugfestigkeitswerten eines Mattenlaminats vom Typ 2, Nr. 9.1 in Form eines Balkendiagramms dargestellt.

#### 5.1.1.1 Gaußsche Normalverteilung

Wird bei einer stetigen Variablen der Stichprobenumfang erhöht, so kann die Klassenbreite verringert werden, während die Häufigkeitsdichte im wesentlichen unverändert bleibt. Im Grenzfall nähert sich der Umriß des Häufigkeitsdiagramms, bzw. Balkendiagramms einer glatten Kurve, welche die Häufigkeitsverteilung der Grundgesamtheit wiedergibt /13,19,21/.

Es gibt in der Statistik viele Häufigkeitsverteilungen. Eine davon ist die Gaußsche Normalverteilung, die die Eigenschaft besitzt, sich symmetrisch um einen Mittelwert zu verteilen. Bild 8 zeigt die allgemeine Form der Normalverteilung mit der Wahrscheinlichkeitsdichte  $\varphi(x)$ .

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} \exp \left\{ -\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (\text{Gl.7})$$

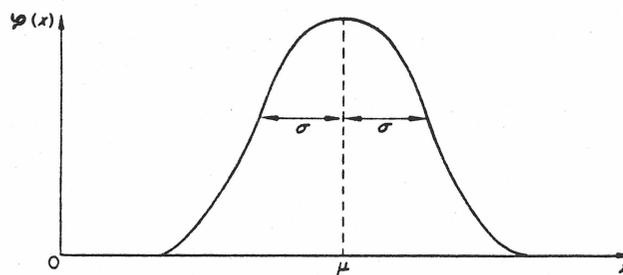


Bild 8: Gaußsche Normalverteilungsfunktion und Verteilungsdichte

Hierin ist  $x$  eine beliebige Abszisse,  $\varphi(x)$  die zugehörige Ordinate,  $\sigma$  die Standardabweichung der Verteilung und  $\mu$  der Mittelwert der Verteilung.

Mit Hilfe des Wahrscheinlichkeitsnetzes kann man sich auf graphische Weise schnell einen Überblick verschaffen, ob eine Stichprobenverteilung annähernd normalverteilt ist.

Als Beispiel für normalverteilte Meßwerte ist in Bild 9 die Häufigkeitsverteilung von Biegefestigkeitswerten eines Glasfilamentgewebelaminats dargestellt.

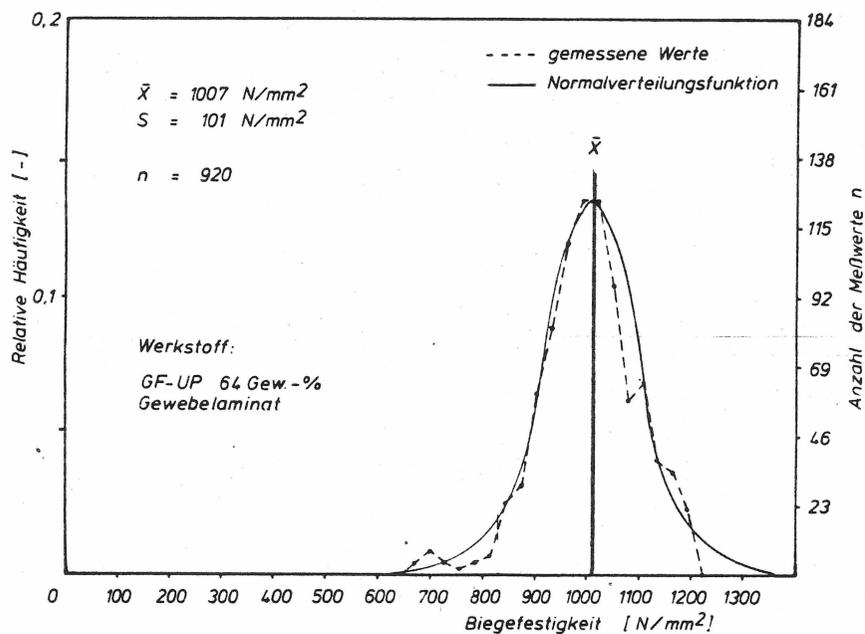


Bild 9: Häufigkeitsverteilung von 920 Meßwerten eines Glasfilamentgewebelaminats

Die gestrichelte Kurve stellt die experimentell ermittelte Verteilung von 920 Meßwerten dar. Miteingetragen ist als durchgezogene Linie die Normalverteilungsfunktion, die die Meßwerte am besten approximiert.

### 5.1.1.2 Logarithmische Normalverteilung

Viele Verteilungen von Meßwerten laufen als positiv schiefe, linkssteile Verteilungen rechts flach aus. Eine anschauliche Erklärung dafür, daß sich eine Werkstoffeigenschaft nicht symmetrisch normal verteilt, ist oft dadurch gegeben, daß die Eigenschaft einen bestimmten Schrankenwert nicht mehr unter- bzw. überschreiten kann und somit nach dieser Seite hin in ihrer Variationsmöglichkeit gehemmt ist. Ein markantes Beispiel ist der Parameter Zeit. Zeitstandversuche haben als untere Grenze immer den Wert Null, weiterhin eine Anhäufung von Meßwerten bei kürzeren Versuchszeiten und schließlich einige "Durchläufer" bei längeren Zeiten.

Diese Verteilung von Meßwerten läßt sich am besten durch die logarithmische Normalverteilung beschreiben. Die logarithmische Normalverteilung hat die Eigenschaft, nur nach einer Seite den Bereich bis  $\infty$  zu überdecken, während sie zur anderen Seite durch einen festen Wert, meist Null begrenzt ist. Die logarithmische Verteilungsfunktion läßt sich folgendermaßen beschreiben/21/:

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot \frac{1}{x} \cdot e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{für } x > 0 \quad (\text{Gl. 8})$$

Zur Prüfung, ob eine Eigenschaft eines Materials der logarithmischen Verteilungsfunktion folgt, wird das logarithmische Wahrscheinlichkeitsnetz angewandt, das eine logarithmisch geteilte Abszissenachse aufweist. Weisen die eingetragenen Meßwerte eine annähernd geradlinige Tendenz auf, so liegt zumindest eine angenäherte logarithmische Verteilung der Meßwerte vor. Das Bild 10 zeigt als Beispiel die Verteilung von Meßwerten zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls eines Mischlaminats, Typ 1, Nr.7.1.

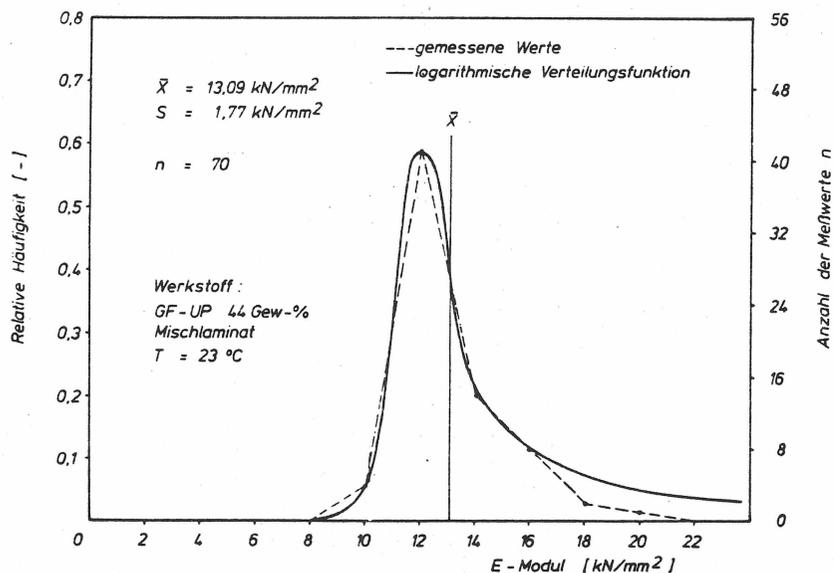


Bild 10: Logarithmische Verteilung von Meßwerten eines GF-UP Mischlaminats

Hierbei liegt eine logarithmische Normalverteilung der Meßwerte (gestrichelte Linie) vor. Diese Meßwerte lassen sich gut durch die logarithmische Normalverteilungsfunktion beschreiben (durchgezogene Linie). Der Schwerpunkt der Verteilungsdichte liegt links vom Mittelwert. Rechts vom Mittelwert befinden sich verhältnismäßig wenig Meßwerte.

### 5.1.1.3 Weitere statistische Verteilungen

Neben den bereits aufgeführten Verteilungsfunktionen, die die Meßwertverteilungen im Kurzzeitbereich sehr gut beschreiben, werden für Langzeituntersuchungen sog. Lebensdauerverteilungen angewendet/36-38/.

Weibull führte auf rein empirischer Grundlage eine Verteilungsfunktion ein, die sich in sehr guter Weise zur Beschreibung des Lebensdauerverhaltens eignet. Danach wird die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Versagen eintritt durch eine Ausfallwahrscheinlichkeit berechnet. Im Zusammenhang mit der Bestimmung von Kurzzeitdimensionierungskennwerten wird diese Verteilung jedoch nicht angewendet.

### 5.1.2 Berechnung von Fraktilwerten

Wenn über Kennwerte bestimmter Materialien mit Hilfe theoretischer Überlegungen und praktischer Erfahrungen keine hinreichend gesicherte Aussage gemacht werden kann, werden an einer begrenzten Anzahl von Probematerial Kennwerte im Versuch ermittelt. Die Ergebnisse der Einzelversuche weichen je nach den Umständen mehr oder weniger voneinander ab. Sieht man von Abweichungen ab, die sich durch grobe Fehler im Material, bei der Herstellung und beim Versuch ergeben, so liegt die Ursache für die Verschiedenheit der einzelnen Versuchsergebnisse bei den unvermeidbaren Streuungen der Festigkeit des verwendeten Laminattyps sowie den Streuungen auf Grund von z. B. Herstellbedingungen, Versuchsbedingungen, Umgebungsmedien und Temperatureinflüssen.

Es ist deshalb sinnvoll, einen Minimalwert bzw. Fraktilwert anzugeben, über dem eine bestimmte Anzahl von Meßwerten mit einer vorgegebenen Sicherheit liegen. Es ist sinnlos, unendlich viele Meßwerte eines Probenmaterials zu ermitteln. Die Angabe eines Fraktilwertes kann also immer nur mit einer bestimmten Aussagewahrscheinlichkeit  $W < 1$  gemacht werden. Das aber bedeutet, daß der ermittelte Zahlenwert für den Fraktilwert in  $(1-W) \cdot 100\%$  aller Fälle ungünstig ausfällt /8,12/.

Es ist deshalb erforderlich, daß man bei der Beurteilung von Kennwerten eines Laminattyps einen unteren Fraktilwert derart zugrunde legt, daß die Mehrzahl der Meßwerte bei der Prüfung einer Materialeigenschaft über dem Fraktilwert liegen, wenn auch ein geringer Prozentsatz  $\epsilon \cdot 100\%$  der Meßwerte kleiner als der Fraktilwert ist.

Die Berechnung des Fraktilwertes, der die Basisgröße bei der Ermittlung von Dimensionierungskennwerten bildet, erfolgt in folgender Form:

$$F_{\epsilon\%} = \bar{x} - k \cdot s \quad (\text{Gl. 9})$$

Der Fraktilwert berechnet sich aus dem Mittelwert einer Meßwertreihe, abzüglich dem Vielfachen der Standardabweichung, ausgedrückt durch einen k-Faktor. Infolgedessen, daß der Fraktilwert nur über eine begrenzte Anzahl von Meßwerten bestimmt werden kann, ist der k-Faktor sowohl vom Meßwertumfang  $n$  als auch von einer bestimmten unteren Grenze  $\epsilon$  und einer Aussagewahrscheinlich-

keit  $W$  abhängig.

$$k = f(n, \epsilon, W) \quad (\text{Gl. 10})$$

Man schließt, ausgehend vom Mittelwert  $\bar{x}$  und der Standardabweichung  $s$  einer Stichprobe mit einer gewissen Aussagewahrscheinlichkeit  $W$  auf den  $\epsilon\%$  Fraktilwert, unterhalb dessen höchstens  $\epsilon\%$  aller Meßwerte liegen.

In vielen Bereichen hat es sich eingebürgert, als unteren Fraktilwert den mit einer Aussagewahrscheinlichkeit von  $W = 95\%$  ermittelten Grenzwert für  $\epsilon = 5\%$  festzulegen. Es ist aber hinsichtlich des Einsatzbereiches der verwendeten Laminattypen abzuwägen, ob der so ermittelte Fraktilwert in seiner Größenordnung vertretbar ist oder ob andere Aussagewahrscheinlichkeiten angenommen werden müssen.

Im folgenden wird dargelegt, wie sich Fraktilwerte für normalverteilte Meßwerte und für logarithmisch-normalverteilte Meßwerte berechnen lassen.

Für normalverteilte Meßwerte berechnet sich der Fraktilwert aus den Schätzwerten für den Mittelwert  $\bar{x}$  und  $s$  für die Standardabweichung

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{Gl. 11})$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[ \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right]} \quad (\text{Gl. 12})$$

zu:

$$F_{\epsilon\%} = \bar{x} - k(n, \epsilon, W) \cdot s \quad (\text{Gl. 13})$$

Der  $k$ -Faktor kann aus einem Diagramm bestimmt werden.

Im Bild 11 ist die Abhängigkeit des  $k$ -Faktors vom Stichprobenumfang und verschiedenen Aussagewahrscheinlichkeiten aufgetragen.

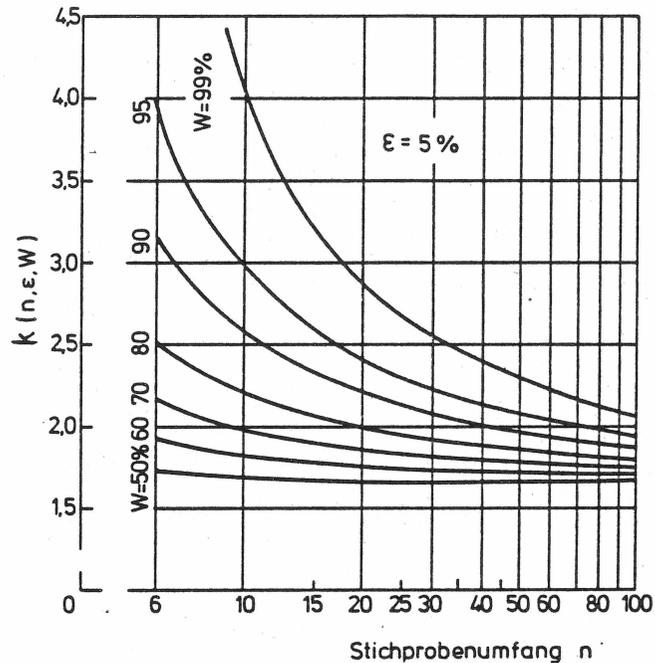


Bild 11: Abhängigkeit des k-Faktors vom Stichprobenumfang zur Bestimmung von Fraktilwerten bei normalverteilten Meßwerten /8/

Die Kurven gelten für einen 5%-Fraktilwert. Ungünstige, d.h. hohe k-Faktoren und damit ungünstige Fraktilwerte ergeben sich bei kleinen Stichprobenumfängen und hohen Aussagewahrscheinlichkeiten.

Bei der logarithmischen Normalverteilung können die Meßwerte  $x_i$  durch Transformation der Form

$$y_i = \ln \frac{x_i - a}{b} \quad (G1.14)$$

in eine Normalverteilung übergeführt werden.

Die Schätzwerte für Mittelwert und Standardabweichung berechnen sich entsprechend zu

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i \quad (G1.15)$$

und 
$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \ln \frac{x_i^{-a}}{b} - \bar{y} \right)^2}$$
 (Gl. 16)

Damit läßt sich zunächst ein fiktiver Fraktilwert  $F_{\epsilon\%}^*$  berechnen:

$$F_{\epsilon\%}^* = \bar{y} - k^*(n, \epsilon, W) \cdot s_y \quad (Gl. 17)$$

Durch Rücktransformation erhält man den endgültigen Fraktilwert in der Form:

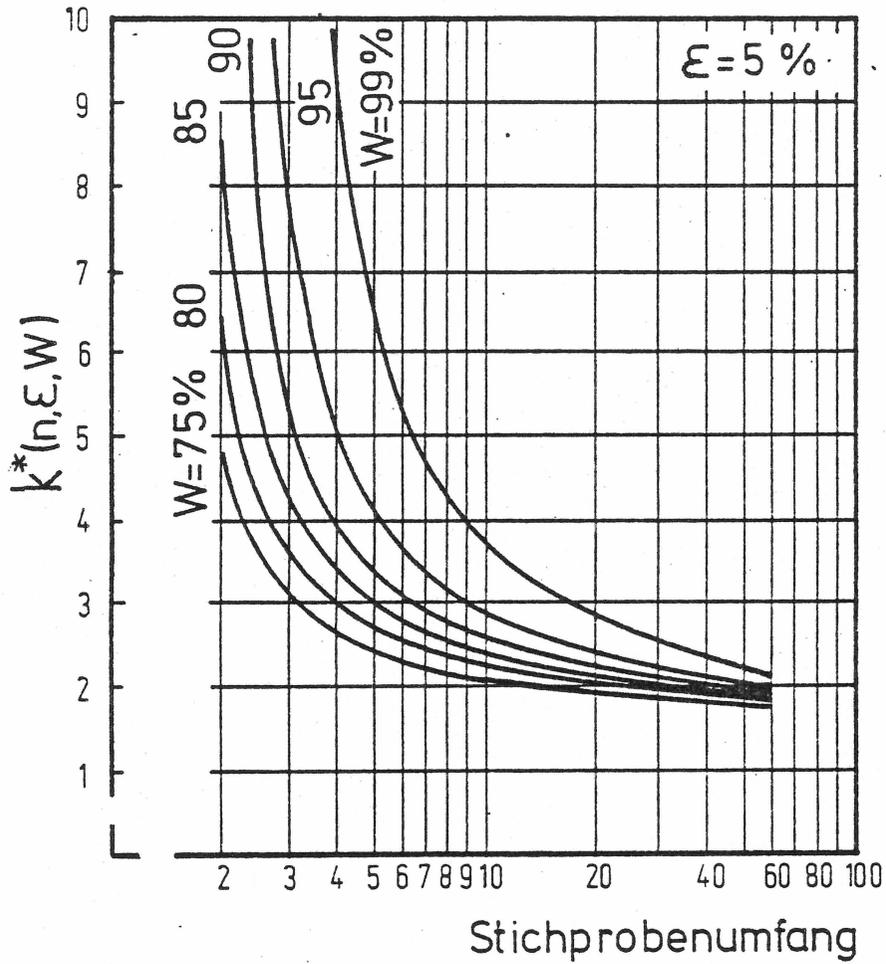
$$F_{\epsilon\%} = a + b \cdot \exp \left( F_{\epsilon\%}^* \right) \quad *) \quad (Gl. 18)$$

Da Festigkeitswerte den Wert Null auf keinen Fall unterschreiten, ist es sinnvoll,  $a = 0$  und  $b = 1$  zu setzen, wobei die Dimension von  $b$  der jeweiligen geprüften Materialeigenschaft entspricht.

Im Gegensatz zu einer Normalverteilung wird der notwendige  $k^*$ -Faktor zur Fraktilwertbestimmung bei der logarithmischen Normalverteilung aus der sog. nichtzentralen t-Verteilung bestimmt. Der  $k^*$ -Faktor berücksichtigt die Unsymmetrie bzw. schiefe Verteilung der Meßwerte. Dieses drückt sich durch eine stärkere Abhängigkeit der  $k^*$ -Faktoren vom Stichprobenumfang aus /16/.

\*) Die Schreibweise  $e^x$  wird aus drucktechnischen Gründen in der Form  $\exp(x)$  geschrieben.

Im Bild 12 ist die Abhängigkeit der  $k$ -Faktoren vom Stichprobenumfang für unterschiedliche Aussagewahrscheinlichkeiten aufgetragen.



nichtzentrale t-Verteilung

Bild 12: Abhängigkeit des  $k^*$ -Faktors vom Stichprobenumfang zur Bestimmung von Fraktilwerten bei logarithmisch normalverteilten Meßwerten

### 5.1.2.1 Einfluß des Stichprobenumfangs

Im Bild 13 ist schematisch der Verlauf der 5% Fraktilwertkurve in Abhängigkeit vom Meßwertumfang für eine 95%ige Aussagewahrscheinlichkeit aufgetragen /12/.

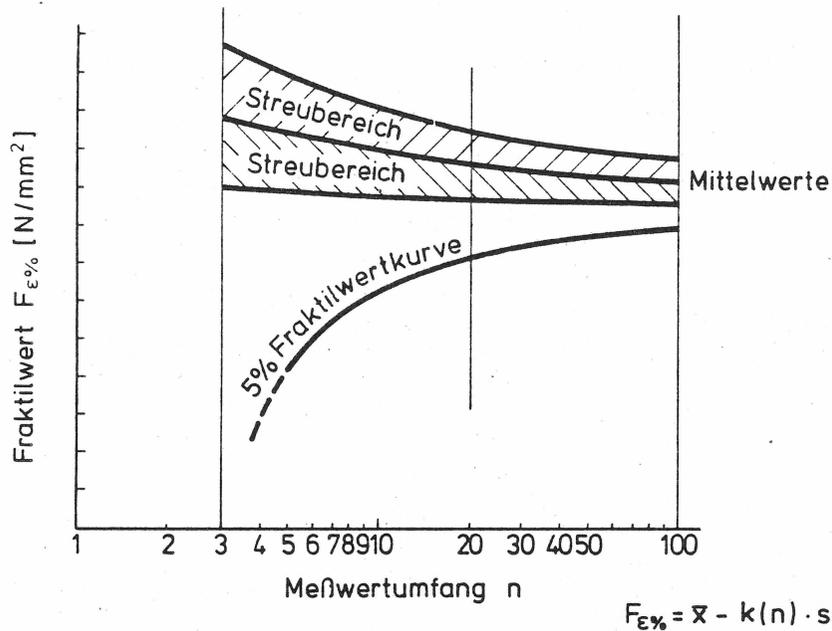


Bild 13: 5% Fraktilwert in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang für eine Aussagewahrscheinlichkeit von  $W=95\%$

Der eingezeichnete Streubereich um den Mittelwert erfaßt alle Abweichungen unabhängig voneinander durchgeführter Messungen und zeigt mit größer werdendem Stichprobenumfang ein Konvergenzverhalten. Der Kurvenverlauf der 5% Fraktilwertkurve drückt nun aus, daß man bei geringen Stichprobenumfängen von z. B.  $n = 5$  mit dem 5%-Fraktilwert auf Grund eines geringen Informationsumfanges und hoher Aussagewahrscheinlichkeit weit unterhalb des Mittelwertes einer Meßwertreihe liegt. Ein größerer Stichprobenumfang und damit größerer Informationsumfang hat zur Folge, daß der Fraktilwert näher an den Mittelwert heranrückt. Die Grenzlinie bei  $n = 20$  soll verdeutlichen, daß für einen 5% Fraktilwert und 95%iger Aussagewahrscheinlichkeit bei diesem Stichprobenumfang eine gute Annäherung des Fraktilwertes an den Mittelwert erreicht ist.

Unterhalb dieses Stichprobenumfangs fällt die Fraktilwertkurve stark ab, oberhalb dieses Stichprobenumfangs ist nur noch eine unwesentliche Veränderung der Lage des Fraktilwertes gegenüber dem Mittelwert zu verzeichnen.

### 5.1.2.2 Einfluß der Aussagewahrscheinlichkeit und der unteren Grenze

Will man mit geringerem Aufwand günstigere Fraktilwerte, so erreicht man das, indem man die Aussagewahrscheinlichkeit herabsetzt. Dieses ist in Bild 14 dargestellt.

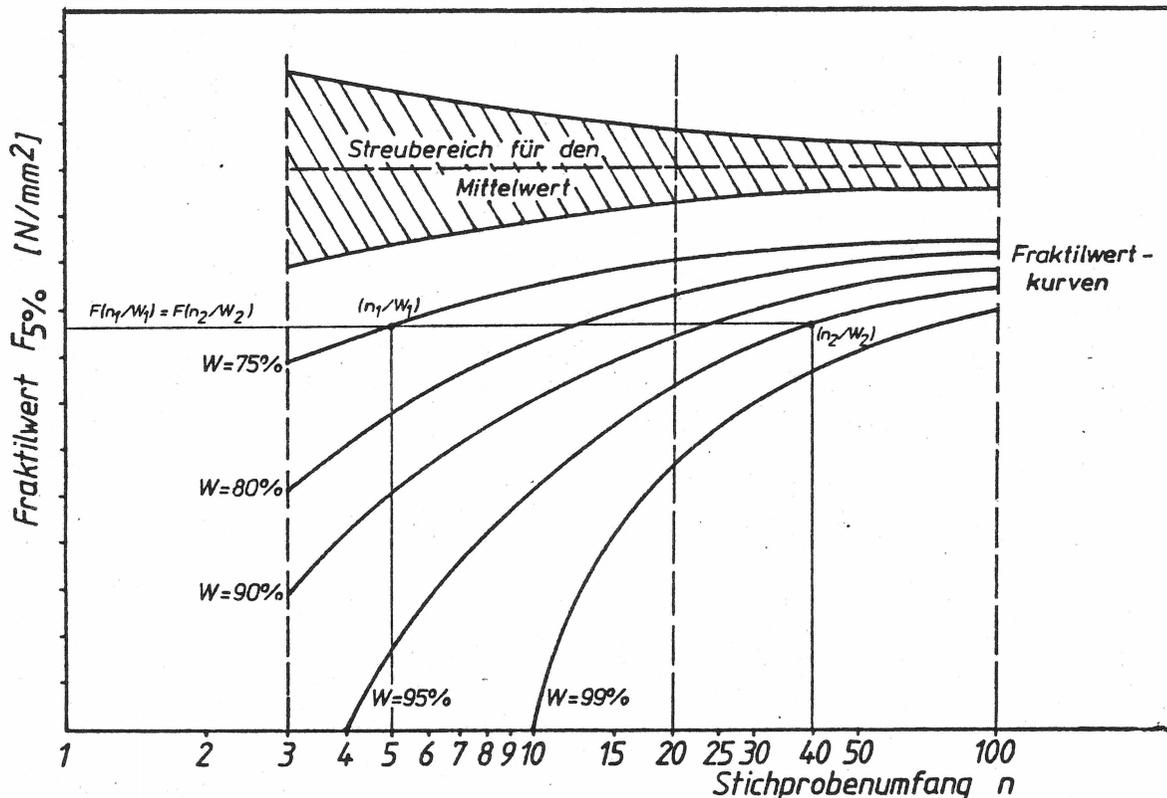


Bild 14: 5% Fraktilwert in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang und in Abhängigkeit von verschiedenen Aussagewahrscheinlichkeiten

Hierbei ist wiederum der Fraktilwert in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang aufgetragen. Zusätzlich wird der Einfluß der Aussagewahrscheinlichkeit mitberücksichtigt, was durch eine Kurvenschar zum Ausdruck kommt. Will man z. B. ein bestimmtes Niveau eines 5%-Fraktilwertes mit einem geringen Stichprobenumfang von z. B.  $n = 5$  erreichen, dann hat das für den Fraktilwert zur Folge, daß er nur mit einer 75%igen Aussagewahrscheinlichkeit behaftet ist. Das ist relativ wenig. Ein Vergleich zeigt, daß man um den gleichen Fraktilwert mit einer sehr viel besseren Aussagewahrscheinlichkeit von  $W = 95\%$  zu bekommen, schon annähernd 40 Messungen durchführen müßte. Dieses

ist sicherlich vom Standpunkt der Wirtschaftlichkeit zu überlegen, man muß sich aber auch verdeutlichen, daß bei geringeren Aussagewahrscheinlichkeiten die 5% aller Werte, die unter einem Grenzwert liegen können, noch deutlich überschritten werden können und damit die Sicherheit abnimmt.

Im Bild 15 ist ein praktisches Beispiel dafür gegeben, in welchen Größenordnungen der Elastizitätsmodul eines Gewebelaminats vom Typ 3, Nr. 1.1 bei unterschiedlichen Aussagewahrscheinlichkeiten und verschiedenen Grenzen  $\epsilon$  liegen kann.

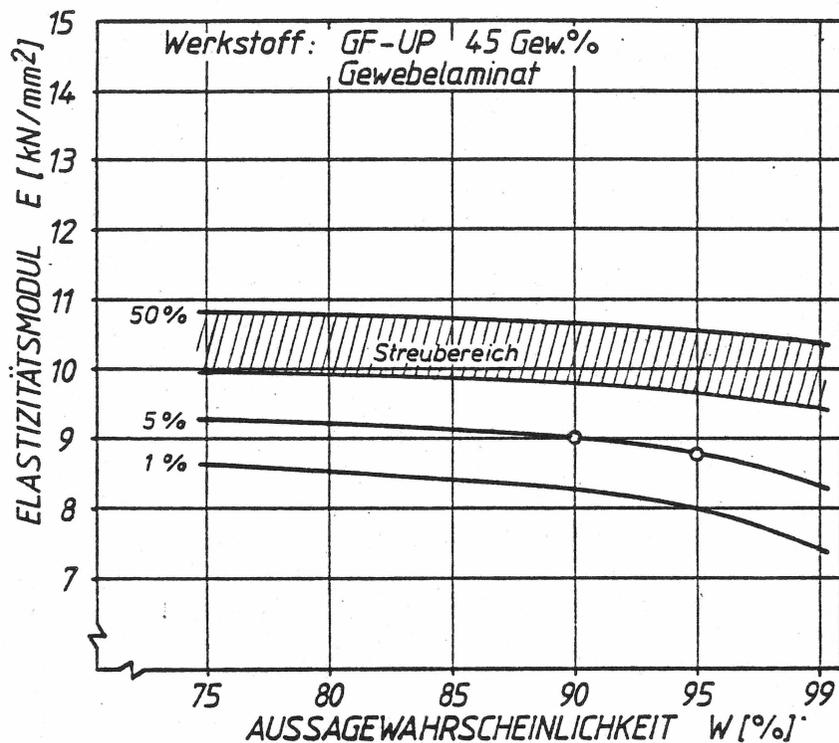


Bild 15: Elastizitätsmodul (aus 3-Punkt Biegung) als Funktion der Aussagewahrscheinlichkeit

In der graphischen Darstellung sind die Kurvenverläufe von einem 1% und 5%-Fraktilwert einem 50%igen Fraktilwert gegenübergestellt. Der 50%-Fraktilwert entspricht bei 50%iger Aussagewahrscheinlichkeit dem Mittelwert, der bei diesem Gewebelaminat in der Größenordnung von  $11000 \text{ N/mm}^2$  liegt. Der schraffierte Bereich stellt den Streubereich dar, in dem sich unterhalb des Mittelwertes etwa  $1/3$  aller Meßwerte befinden. Sinnvolle Größen zur Dimensionierung sind die 5%-Fraktilwerte mit einer Aussagewahrscheinlichkeit von entweder 90% oder 95%. Bei einem Mittelwert von etwa  $11000 \text{ N/mm}^2$  bewegen sich die beiden Werte in der Größenord-

nung von 8790 - 8990 N/mm<sup>2</sup>, also etwa 20% unterhalb des Mittelwertes. Mit 95% hat man schon eine sehr hohe Aussagewahrscheinlichkeit gewählt, oberhalb von 90 - 95% machen die Kurvenverläufe einen stärkeren Knick zu ungünstigeren Werten.

## 5.2 Mechanische Versuche

### 5.2.1 Zugversuche

Die bei kontinuierlicher Verformungssteigerung im Kurzzeitversuch gewonnenen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen ermöglichen zwar keine verbindlichen Aussagen über Langzeitbelastungen, geben aber bereits einen umfassenden Einblick in das Werkstoffverhalten mit zunehmender Belastung und erlauben bei unter gleichen Versuchsbedingungen durchgeführten Prüfungen einen schnellen Vergleich verschiedener Laminattypen/7/.

Der Vorteil der Kurzzeitzugversuche liegt in einem geringen Aufwand gegenüber Langzeitversuchen.

Die von den 3 Typenlaminaten, Mischlaminat, Mattenlaminat und Gewebelaminat bei einsinniger Zugbeanspruchung erhaltenen Kraft-Verlängerungs-Diagramme sind in Bild 16 einander gegenübergestellt.

Die im Bild 16 dargestellten Kurvenverläufe wurden an den Laminattypen 1, Nr. 1.1, 2, Nr. 1.1 und 3, Nr. 1.1 (vgl. Tab. 4) ermittelt, sind aber charakteristisch für alle entsprechend aufgebauten Laminattypen.

Alle Laminattypen zeigen zum Beginn des Zugversuchs stets einen für die Praxis als linear zu kennzeichnenden Bereich. Auffällig ist beim Mischlaminat (Typ 1) die hohe Maximalkraft bei verhältnismäßig geringer Dehnung. Die Grenze des linear elastischen Bereichs liegt bei etwa 0,43%.

Das Mattenlaminat (Typ 2) weist eine geringere Maximalkraft auf. Die Proportionalitätsgrenze liegt bei 0,56%. Mit zunehmender Kraft ergibt sich eine allmähliche Vergrößerung der Krümmung wie beim Mischlaminat.

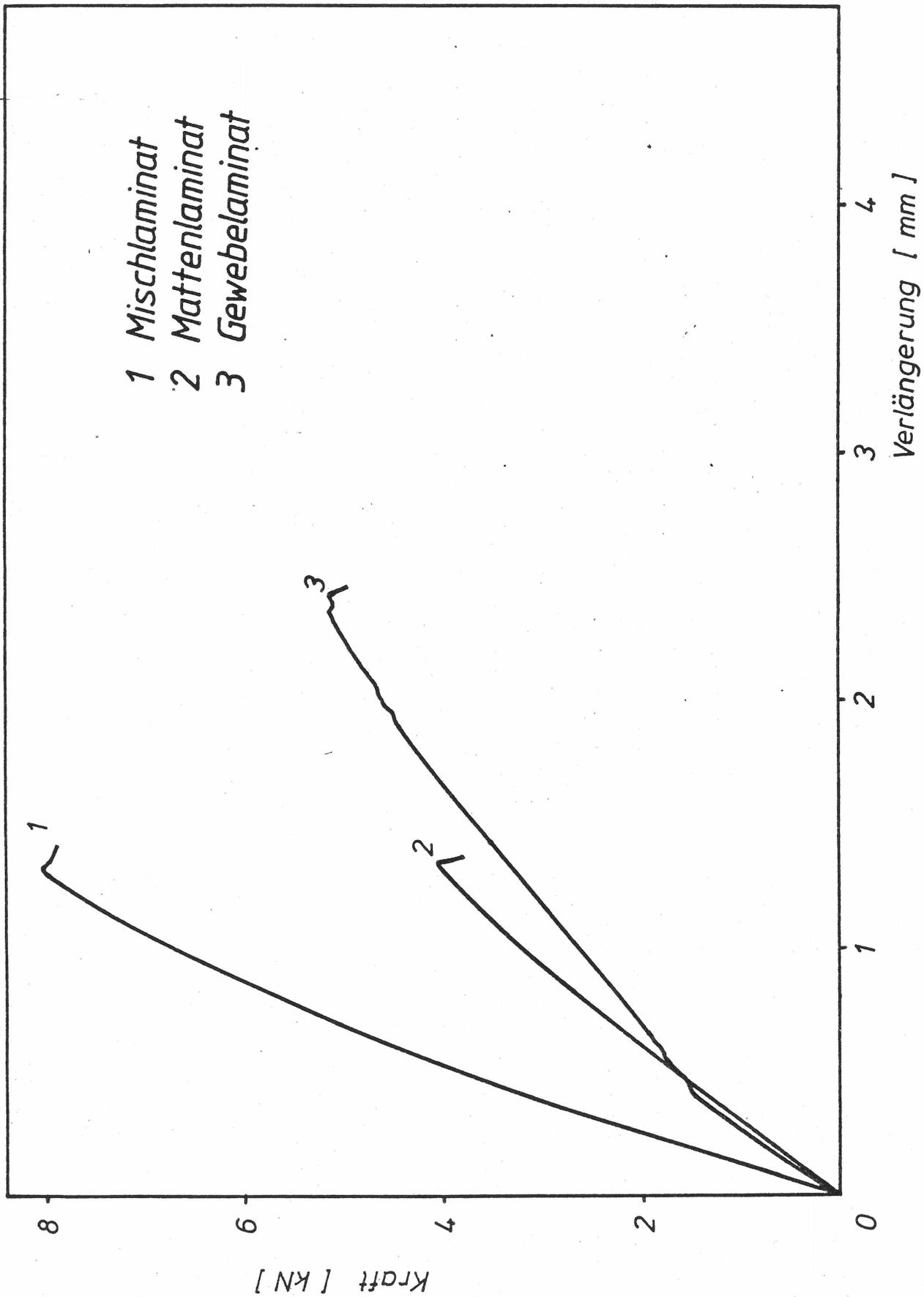


Bild 16: Kraft-Verlängerungs Diagramme von Typenlaminaten, ermittelt aus dem Zugversuch nach DIN 53455 (Maschinengeschwindigkeit  $v_M = 5 \text{ mm/min}$ )

Beim Gewebelaminat Typ 3 ist sehr gut das durch Ribbildung bei zusätzlicher Querverstärkung hervorgerufene Knie im Kraft-Verlängerungs-Diagramm zu erkennen. Durch diesen Knick verschiebt sich die maximale Kraft zu größeren Längenänderungen. Hierbei liegt die Proportionalitätsgrenze bei 0,35%.

Für die Praxis ist die Proportionalitätsgrenze dieser Laminattypen nur dann interessant, wenn die Möglichkeit des Eindringens aggressiver Medien in das Laminat besteht.

Aus den Kraft-Verlängerungs-Diagrammen (vgl. Bild 16) erhält man durch Umrechnung Spannungs-Dehnungs-Diagramme. Für die Zugfestigkeit gilt:

$$\sigma_B = \frac{F_{\max}}{A_0} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (\text{Gl.19})$$

Die x%-Dehnspannung wird dadurch ermittelt, daß man durch den Abszissenwert  $\Delta L_x$ , der einer Dehnung von x% entspricht, eine Parallele zur Anfangstangente der Kraft-Verlängerungskurve legt. Der Schnittpunkt dieser Geraden mit der Kraft-Verlängerungskurve ergibt die der x% Dehnspannung entsprechende Kraft ( $F_{sx}$ ).

$$\sigma_{sx} = \frac{F_{sx}}{A_0} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (\text{Gl.20})$$

In den Gleichungen 19 und 20 bedeuten:

$F_{\max}$  : Maximalkraft in N

$F_{sx}$  : Kraft, die der x% Dehnspannung entspricht in N

$A_0$  : Anfangsquerschnitt der Probe in  $\text{mm}^2$

Die Reißdehnung berechnet sich zu

$$\epsilon_R = \frac{\Delta L_R}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (\text{Gl.21})$$

Bei den vorliegenden Typenlaminaten entspricht  $\Delta L_R$  meistens der Längenänderung  $\Delta L_{F_{\max}}$  bei der Maximalkraft.  $L_0$  ist die Anfangsmeßlänge in mm/13/.

Die Meßwerte und Verteilung von Meßwerten der ermittelten Zugfestigkeiten der untersuchten Lamine sind im einzelnen im Anhang aufgeführt und beschrieben. (Bilder 37,41,44,52,58,64,89,91,93)

### 5.2.2 Biegeversuche

Zur Bestimmung der Biegefestigkeit der 3 verschiedenen Laminattypen werden aufgenommene Kraft-Durchbiegungs-Diagramme entsprechend Bild 17 herangezogen.

In Bild 17 sind die unterschiedlichen Kurvenverläufe für die 3 Laminattypen 1 Nr. 1.1, 2 Nr. 1.1 und 3 Nr. 1.1 dargestellt. Auch sie sind wiederum charakteristisch für entsprechende Laminattypen.

Die Biegefestigkeit errechnet sich nach der bekannten Gleichung

$$\sigma_{bB} = \frac{M_b}{J/e} = \frac{M_b}{W_b} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (\text{G1.22})$$

mit:

$\sigma_{bB}$  = Biegefestigkeit

$M_b$  = Biegemoment in Probekörpermitte beim Bruch

$J$  = Flächenträgheitsmoment in  $\text{mm}^4$

$e$  = Randfaserabstand in mm

$J/e = W_b$  = Widerstandsmoment in  $\text{mm}^3$

Dabei wird der Flächenquerschnittsanteil des Harzes in die Rechnung miteinbezogen. Die Biegefestigkeitswerte der glasfaserverstärkten Lamine sind deshalb analog zur Zugfestigkeit vom Glasfasergehalt abhängig.

Mit

$$M_b = \frac{F \cdot l_v}{4} \quad [\text{N} \cdot \text{mm}] \quad (\text{G1.23})$$

und

$$W_b = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad [\text{mm}^3] \quad (\text{G1.24})$$

berechnet sich die Biegefestigkeit an der Randfaser für Rechteckquerschnitte zu

$$\sigma_{bB} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_B \cdot l_v}{b \cdot h^2} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (\text{G1.25})$$

Die zugehörige Randfaserdehnung ist dann

$$\epsilon_{bB} = \frac{6 \cdot h \cdot f_B}{l_v^2} \cdot 100 \quad [\%] \quad (\text{G1.26})$$

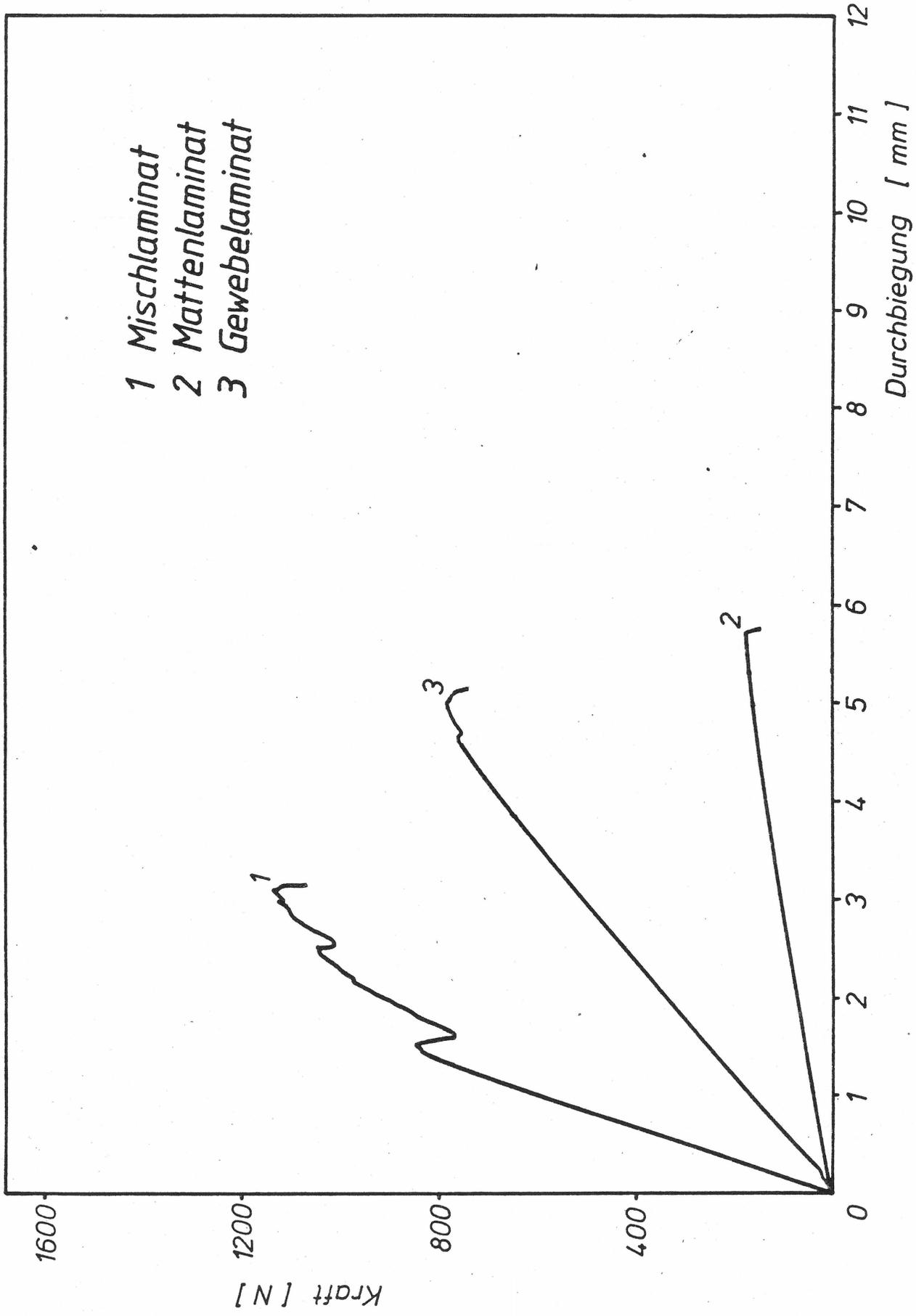


Bild 17: Kraft-Durchbiegungs Diagramme von Typenlaminaten, ermittelt aus dem 3-Punkt Biegeversuch nach DIN 53452

In den Gleichungen 23 bis 26 bedeuten

- F: Prüfkraft in N
- $l_v$ : Versuchslänge oder Auflagerabstand in mm
- b : Probekbreite in mm , h : Probenhöhe in mm
- $F_B$ : Kraft beim Bruch in N
- $f_B$ : Durchbiegung der Probe beim Bruch in mm

Beim Mischlaminat vom Typ 1, Nr.1.1 können Schädigungen in den einzelnen Laminatschichten, hervorgerufen durch interlaminare Schubbeanspruchungen durch ein periodisch auftretendes Absinken und Ansteigen der Prüfkraft nachvollzogen werden. Dieses korreliert gut mit der Lagenanzahl des Prüflaminats.

Der Kurvenverlauf des Mattenlaminats Typ 2, Nr. 1.1 und des Gewebelaminats Typ 3, Nr. 1.1 drückt einen anderen Versagensmechanismus aus. Hierbei tritt ein plötzliches Versagen des Laminats in der Druckzone beim 3-Punkt Biegeversuch auf, was sich durch eine stetige Zunahme der Prüfkraft im Kraft-Durchbiegungs-Diagramm ausdrückt, bis dann bei maximaler Durchbiegung  $f_B$  die Probe versagt.

Die ermittelten Meßwerte und Meßwertverteilungen aus den durchgeführten Biegeversuchen können aus dem Anhang entnommen werden. (Bilder 36,40,45,46,57, 61,65,67,68,77-86,87,96)

Ein Vergleich der Biegefestigkeitswerte mit den Zugfestigkeitswerten sich entsprechender Laminattypen zeigt, daß die Biegefestigkeitswerte etwas höher liegen, was sich dadurch erklären läßt, daß bei der Biegung infolge der Schubverformung eine nicht lineare Lagenbelastbarkeitsverteilung über den Querschnitt entsteht, und die inneren Fasern stärker zur Lastaufnahme herangezogen werden, als es bei linearer Lagenbelastbarkeitsverteilung, z. B. beim Zugversuch der Fall wäre.

### 5.2.3 Elastizitätsmodul

#### 5.2.3.1 Elastizitätsmodul aus Zugversuch

Im Bereich der Gültigkeit des Hookeschen Gesetzes ist der Zusammenhang zwischen Spannung  $\sigma$  und Dehnung  $\epsilon$  durch den Elastizitätsmodul E gekennzeichnet:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{L_0}{\Delta L} \quad [N/mm^2] \quad (Gl.27)$$

Die Kraft  $F \cdot \frac{L_0}{\Delta L} = E \cdot A_0$  wird häufig als Dehnsteifigkeit bezeichnet.

Bei den glasfaserverstärkten Laminaten kann die Proportionalität zwischen Spannung und Dehnung nur in jenem Bereich kleiner Dehnungen bestehen, in dem außer den Glasfasern auch das mittragende Harz dem Hookeschen Gesetz folgt (Bild 18).

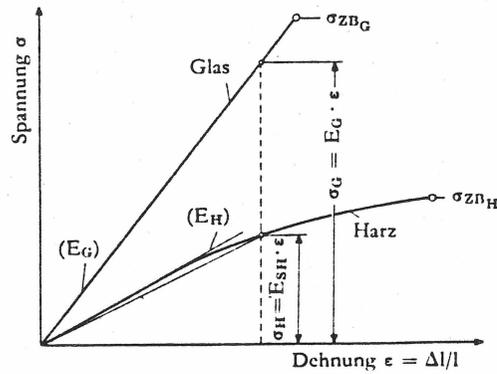


Bild 18: Spannungs-Dehnungs Diagramme für Glasfasern und Harz

Bei der exakten Behandlung des Deformationsverhaltens glasfaserverstärkter Lamine hat man den Elastizitätsmodul  $E$ , den Sekantenmodul  $E_s$  und den Tangentenmodul  $E_t$  zu unterscheiden (Bild 19).

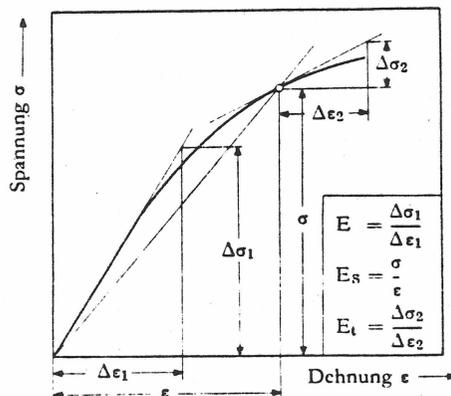


Bild 19: Zur Definition von Elastizitätsmodul  $E$ , Sekantenmodul  $E_s$  und Tangentenmodul  $E_t$

Bei technisch interessanten Glasvolumenanteilen ( $\varphi \approx 35$  Vol.-%) ist der Sekantenelastizitätsmodul eines GFK-Laminats bei einer Dehnung von 2% (das entspricht etwa der Bruchdehnung von Glasfasern) nicht einmal um 2% niedriger als der Elastizitätsmodul bei kleinen Dehnungen im Hookeschen Bereich. Für die untersuchten Laminattypen traten die bei RT zu erwartenden geringen Streuungen bei der Elastizitätsmodulbestimmung auf. Die einzelnen Meßwerte sind im Anhang aufgeführt. (Bilder 38,39,42,43,51,53,54,62,63,69-72,90,92,93-95)

### 5.2.3.2 Elastizitätsmodul aus Biegeversuch

Die Ermittlung des Elastizitätsmoduls aus dem Biegeversuch erfolgte sowohl bei 3-Punkt Biegung als auch bei 4-Punkt Biegung. Er läßt sich bei 3-Punkt Biegung folgendermaßen errechnen:

$$E = \frac{\Delta F \cdot l_v^3}{4 \cdot h \cdot b \cdot \Delta f} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (\text{Gl.28})$$

Er gibt den Zusammenhang zwischen der Biegespannung  $\sigma_b$  und der Durchbiegung  $f$  an.

Bei 4-Punkt Biegung ergibt sich für den Elastizitätsmodul.

$$E = \frac{L_A}{16} \cdot \frac{L_B^2}{J} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta f} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (\text{Gl.29})$$

Die Auflagerabstände  $L_A$  und  $L_B$  sind aus Bild 20 zu entnehmen.  $J$  ist das Flächenträgheitsmoment des Biegestabquerschnitts in  $\text{mm}^4$ .

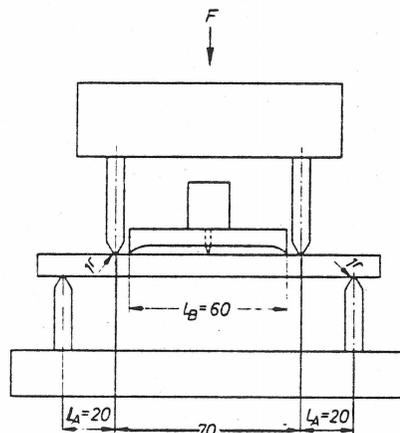


Bild 20: Schematische Darstellung eines Beispiels einer Prüfanordnung für den Biegeversuch nach DIN 53457

Aufgrund dessen, daß die Probenbreite  $b$  beim 3-Punkt Biegeversuch in der dritten Potenz in die Berechnung des Elastizitätsmoduls eingeht, muß den Herstellbedingungen der Lamine eine besondere Aufmerksamkeit beigemessen werden. Bei den untersuchten Handlaminaten treten deshalb größere Streuungen der Elastizitätsmodulwerte auf. Dieses hat aber bei der Festlegung eines Kennwertes keinen weiteren Einfluß, da überwiegend der Mittelwert der Meßwertreihen zur Berechnung herangezogen wird. Eine Gegenüberstellung unterschiedlicher E-Modul Fraktilwerte mit Angabe des Streubereiches ist dennoch im Anhang vorgenommen. (Bilder 47-50,55,56,59,60,73-75,88,97)

#### 5.2.4 Kriechneigung

Die Bestimmung der Kriechneigung eines Laminats erfolgt unter einer zulässigen Biegespannung im 3-Punkt-Biegeversuch nach DIN 53452. Dabei wird die Durchbiegung einer Probe nach 1 Std., nach 24 Std., nach 48 Std. und nach 72 Std. bestimmt. Die Berechnung des Kriechneigungsfaktors erfolgt nach

$$K = \frac{f_{x \text{ Std.}} - f_{1 \text{ Std.}}}{f_{1 \text{ Std.}}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (G1.30)$$

Dabei bedeutet  $f_{x \text{ Std.}}$  eine Durchbiegung der Probe nach verschiedenen Zeiten:  $t_1 = 24 \text{ Std.}$ ;  $t_2 = 48 \text{ Std.}$ ;  $t_3 = 72 \text{ Std.}$ . Der Kriechneigungsfaktor ist ein Maß für den Aushärtegrad eines Laminats. Große Kriechneigungen, d. h. große Kriechneigungsfaktoren bedeuten einen geringen Aushärtegrad. In diesem Falle muß ein Laminat durch Tempern ausreichend nachgehärtet werden.

Für die untersuchten Laminattypen ergaben sich für verschiedene Zeiten  $t_1$  bis  $t_3$  und in Abhängigkeit von der Temperung verschiedene Kriechneigungsfaktoren, die in Tabelle 5 zusammengefaßt sind.

	Mischlaminat		Mattenlaminat	
	ungetempert (Nr. 6.1)	getempert (Nr. 6.2)	ungetempert (Nr. 8.1)	getempert (Nr. 8.2)
$\psi$ [Gew.-%]	36	36	32	32
$\sigma_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	112,8	111,9	111,5	114,7
$E_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	8905	9209	8800	9042
$K_1(t_1)$ [%]	5,89	4,37	5,65	3,73
$K_2(t_2)$ [%]	7,15	5,56	7,40	5,97
$K_3(t_3)$ [%]	7,60	5,87	8,25	6,72

Tabelle 5: Kriechneigungsfaktoren für Matten- und Mischlaminat  
für unterschiedliche Konditionierungszustände

Im Bild 21 ist die Kriechneigung der Lamine graphisch über der Belastungszeit aufgetragen. Man erkennt sowohl für Misch- als auch für Mattenlamine eine deutliche Zunahme der Kriechneigung mit zunehmender Belastungszeit. Die getemperten Lamine zeigen aber eine deutlich günstigere Kriechneigung.

Der Kriechvorgang wird damit erklärt, daß sich die in entspanntem Zustand ungeordneten Molekülketten während der Belastungsphase ausrichten und je nach Vernetzungsgrad mehr oder weniger dehnen. Diese Dehnung kann als elastischer Verformungsanteil interpretiert werden. Bei höheren Belastungen können sich auch einzelne Knoten oder Vernetzungspunkte lösen, was sich durch irreversibles Verformungsverhalten bzw. Fließen äußert. Diesem Materialverhalten kann durch Temperung der Lamine entgegengewirkt werden.

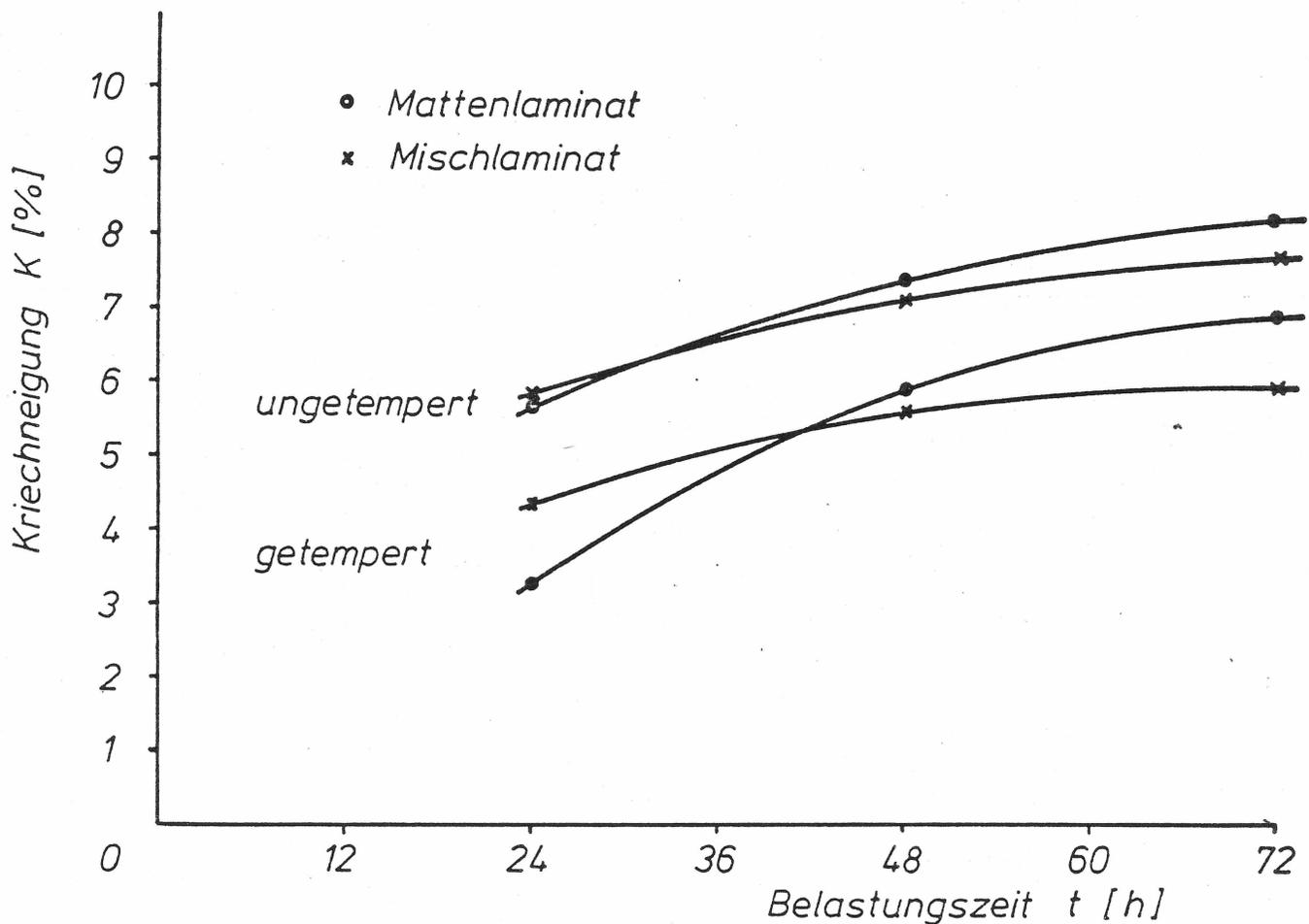


Bild 21: Kriechneigung für verschiedene Laminattypen

Da sich der Elastizitätsmodul bei den Kurzzeitkriechversuchen zeitabhängig verändert, kann dieser als sog. 'Kriechmodul' auch für die Bewertung herangezogen werden. Im Bild 22 ist die Zeitabhängigkeit des Kriechmoduls für die o. g. Mischlaminat und Mattenlaminat im Zeitraum bis 72 Std. dargestellt.

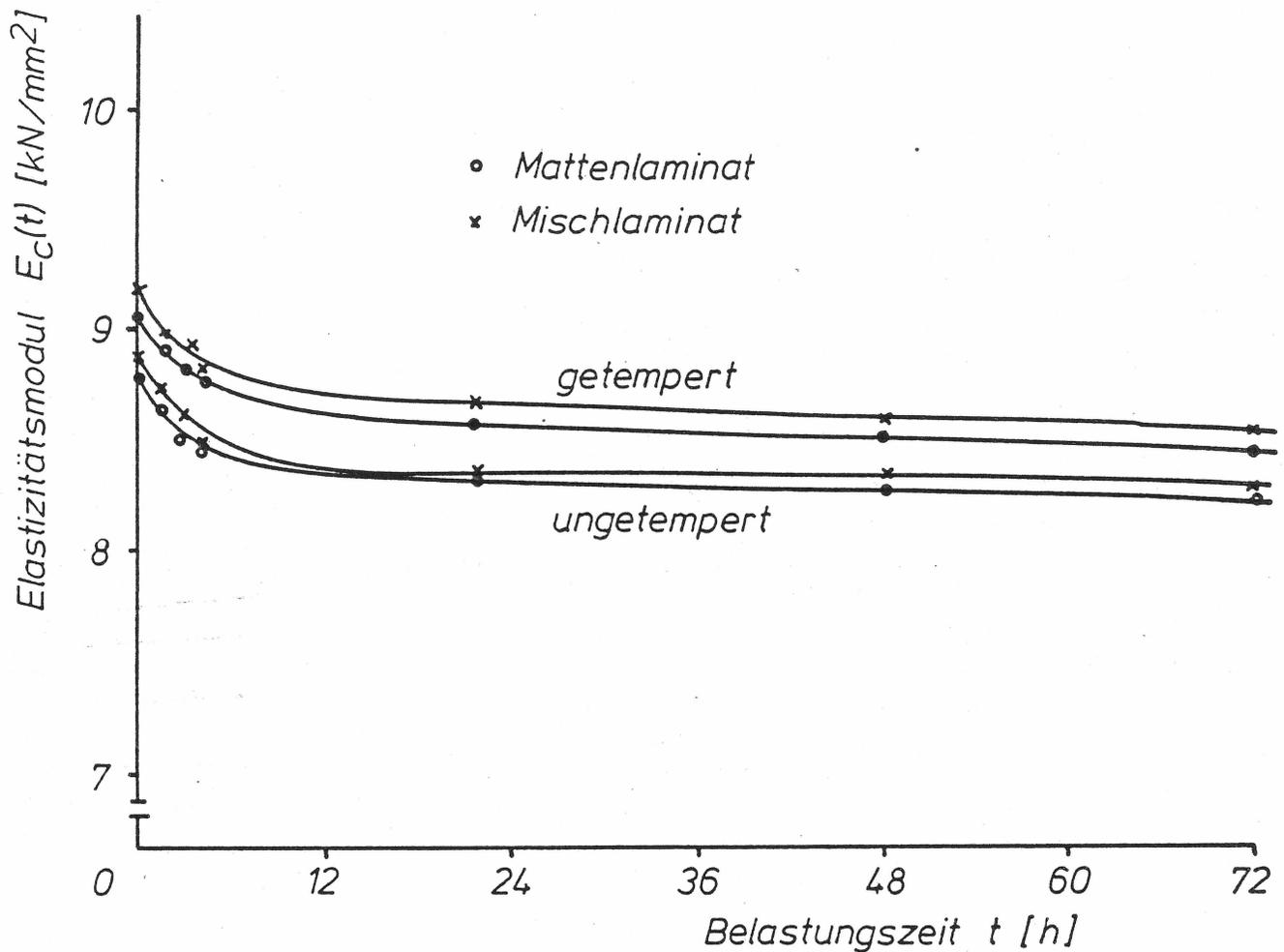


Bild 22: Kriechmodul als Funktion der Zeit von einem Mattenlaminat und einem Mischlaminat

Für die Bewertung der Materialeigenschaften ist es wichtig, Kriechneigung und Kriechmodul auch nach einer Belastungsdauer von 24 Std. zu ermitteln, da gerade der Kriechneigungsfaktor mit zunehmender Belastungszeit noch starke Veränderungen aufweist.

### 5.2.5 Einfluß der Probengeometrie

Zur Versuchsauswertung wurden bei den Mischlaminaten vom Typ 1, Nr. 3.1, Nr. 4.1 und Nr. 5.1 und bei den Mattenlaminaten vom Typ 2, Nr. 3.1, Nr. 4.1 und Nr. 5.1 die Probenquerschnitte variiert, um den Einfluß von Probenbreite und Lagenzahl auf die Streuung der Meßwerte zu erfassen.

Im Bild 6 wurde bereits gezeigt, daß der gesamte Probenquerschnitt einen Einfluß auf den Variationskoeffizienten haben kann. Dabei muß man aber zwischen Probenbreite und Lagenzahl differenzieren.

Im Bild 23 ist der Einfluß der Lagenzahl auf die glasgehaltbezogene Zugfestigkeit eines Mattenlaminats dargestellt. Die Lagenzahl übt keinen sehr großen Einfluß auf das Niveau der Festigkeitswerte aus. Vielmehr weisen alle Lamine mit einer Lagenzahl zwischen 2 und 6 ähnliche Festigkeitswerte auf, wobei die Streubereiche auch ähnlich groß sind.

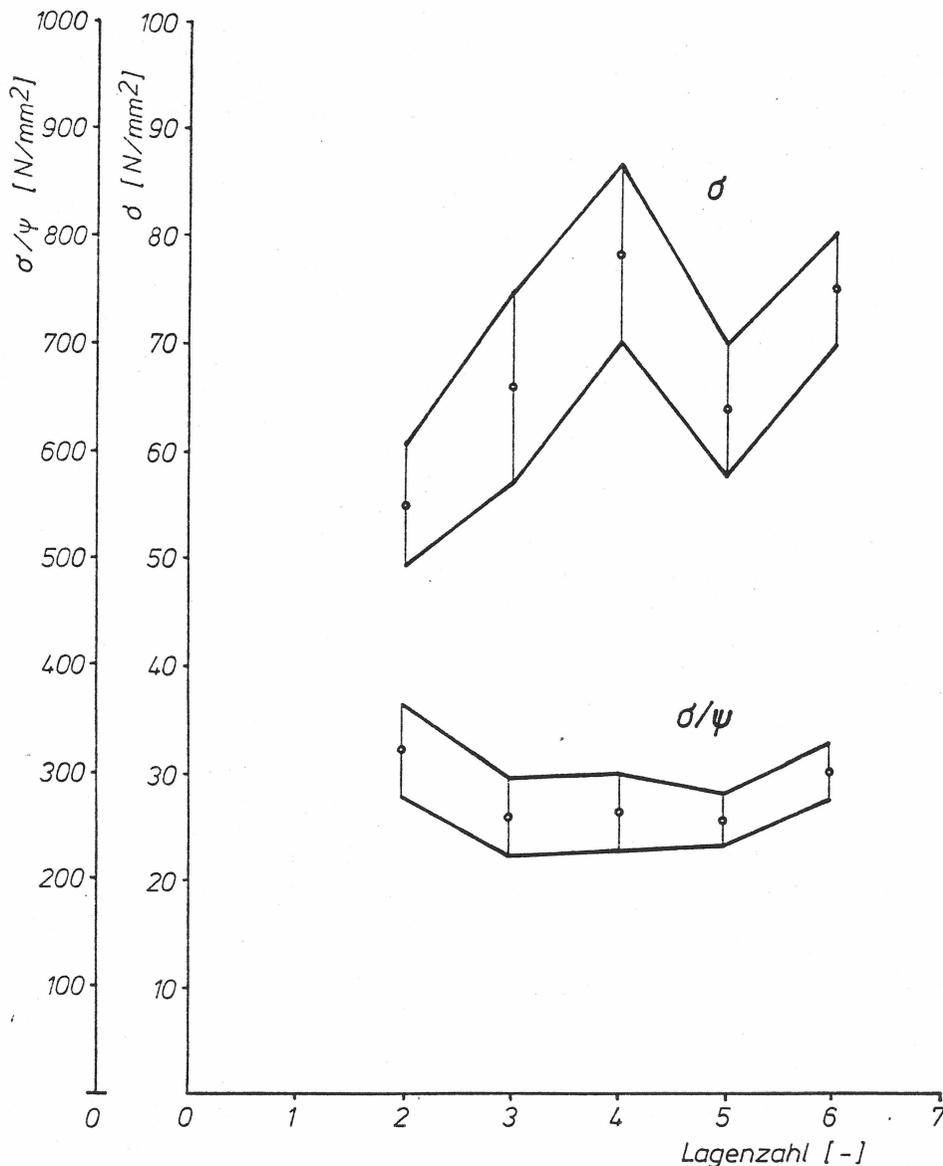


Bild 23: Einfluß der Lagenzahl auf die Zugfestigkeit und die glasgehaltbezogene Spannung eines Mattenlaminats

Daraus läßt sich ableiten, daß bei Mattenlaminaten vorwiegend eine größere Probenbreite zu einer geringeren Meßwertstreuung führen kann. Dieses kann durch Messungen an Mischlaminaten mit gleicher Lagenzahl und verschiedener Probenbreite nicht bestätigt werden (Bild 24).

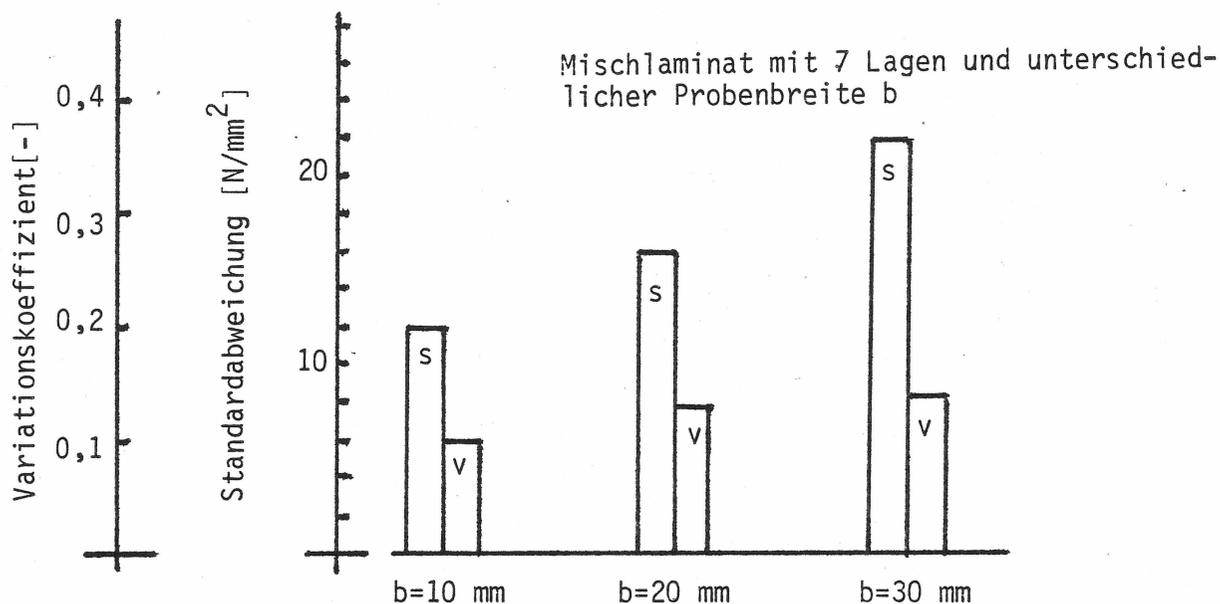


Bild 24: Variationskoeffizient v und Standardabweichung s ermittelter Zugfestigkeitswerte eines Mischlaminats in Abhängigkeit von der Probenbreite

Dort zeigt sich eine weitgehende Unabhängigkeit des Variationskoeffizienten von der Probenbreite bei gleicher Lagenzahl für ermittelte Zugfestigkeitswerte der Mischlaminats.

#### 5.2.6 Einfluß des Glasgehaltes

Mischlaminats, Mattenlaminats und Gewebelaminats weisen eine ausgeprägte Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften vom Glasgehalt auf.

Der Glasgehalt ist für die Zugfestigkeit eine charakteristische Größe. Aus Bild 25 ergibt sich je nach Verstärkungsart eine maximale Zugfestigkeit bei Glasgehalten zwischen 35 Gew.-% und 60 Gew.-%.

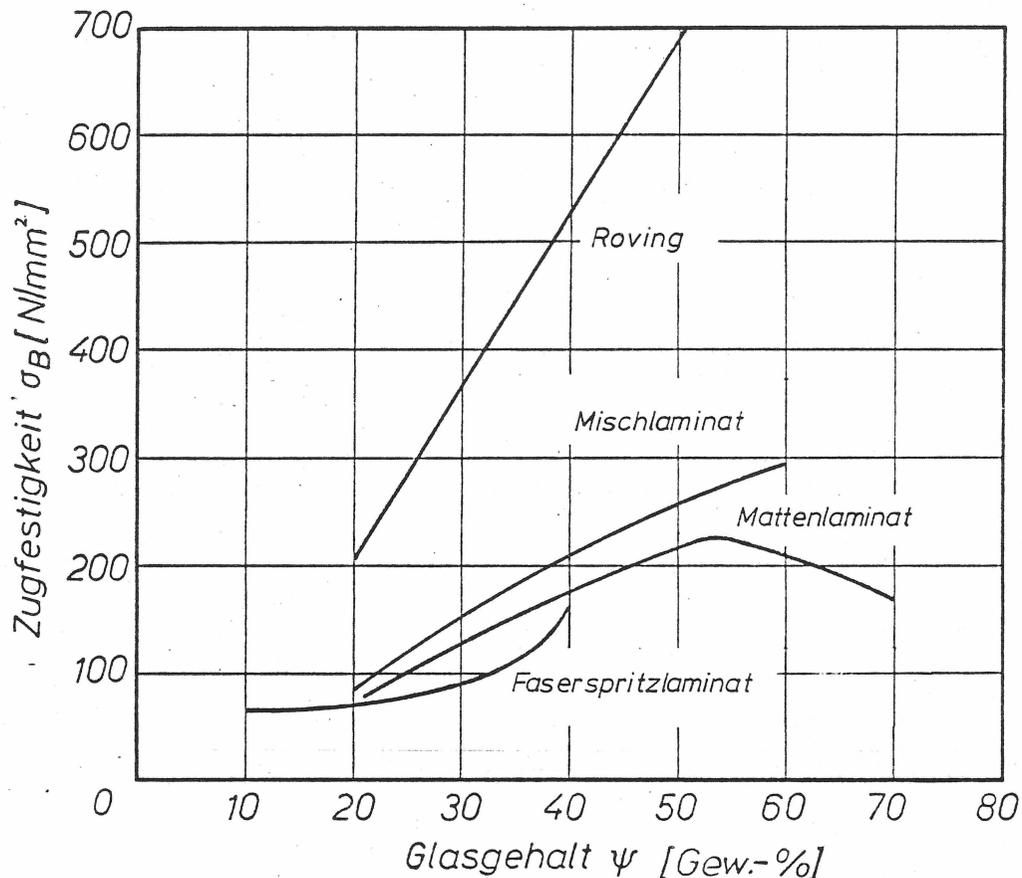


Bild 25: Zugfestigkeit in Abhängigkeit vom Glasgehalt für verschiedene Laminattypen

Rovings haben gegenüber Misch- Matten bzw. Gewebelaminaten eine sehr hohe Zugfestigkeit in Faserrichtung. Sie werden daher nur zur Verstärkung von Werkstücken eingesetzt, die vorzugsweise in einer Richtung beansprucht werden. Mattenlaminaten dagegen weisen quasi isotrope Festigkeitseigenschaften in allen Richtungen auf. Dazwischen liegen Mischlaminaten und Gewebelaminaten. Um aber die Einflußgröße Glasgehalt zu relativieren, müssen bei vergleichenden Untersuchungen die mechanischen Kennwerte auf den Glasgehalt bezogen werden. Für Mattenlaminaten, Mischlaminaten und Rovings ergibt sich dabei im interessierenden Bereich ein konstantes Verhältnis.

### 5.2.7 Einfluß des Aushärtegrades und der Temperatur

Da Duroplaste endgültig erst durch die Härtung entstehen, werden alle Eigenschaften vom Grad der Aushärtung beeinflusst. Dieses gilt sowohl für kalt härtende Systeme wie auch für warm härtende Systeme. Die Endwerte (Reststyrolgehalt  $\ll 1\%$ ) werden bei der Kalthärtung nur sehr langsam erreicht, bei der Warmhärtung geht die Temperatur als sehr wichtiger Parameter ein. Temperatur und Aushärtegrad können also nicht getrennt voneinander betrachtet werden, sondern wirken wechselseitig auf die mechanischen Eigenschaften ein.

Die Geschwindigkeit der chemischen Härtungsreaktion hängt vom Aufbau des Harzes ab sowie von den Härtern, Beschleunigern und der Temperatur. Bei einer Temperaturerhöhung um  $10^{\circ}\text{C}$  verdoppelt bis verdreifacht sich die Geschwindigkeit. Die Härtezeit  $t$  läßt sich nach folgender Gleichung beschreiben /35/

$$t = e^{c(\delta_0 - \delta)} \quad (\text{Gl. 31})$$

Dabei ist  $c$  eine für den jeweiligen Harztyp charakteristische Größe

$$c = \frac{d \ln t}{d\delta} \quad (\text{Gl. 32})$$

$\delta_0$  ist die Temperatur, die notwendig ist, um das Harz z. B. in einer Sekunde auszuhärten. Die Festigkeit der Glasfasern im Laminat fällt bis  $150^{\circ}$  nicht nennenswert ab. Entscheidend für den Temperatureinfluß auf die glasfaserverstärkten Harze sind deshalb die Eigenschaften der Gießharze. Entsprechend ihrem Anteil an der Kraftübertragung hat die Umgebungstemperatur einen mehr oder weniger starken Einfluß.

Da die Festigkeitskennwerte der Harze mit abnehmender Temperatur zunehmen, steigen auch die Festigkeiten und Steifigkeiten der glasfaserverstärkten Lamine an. Selbst die Zähigkeit weist bei tiefen Temperaturen günstige

Werte auf. Sie kann sogar, wie an Mattenlaminaten gezeigt wurde, bei tiefen Temperaturen ansteigen. Eine Versprödung bei tiefen Temperaturen tritt nicht ein. Für die untersuchten Lamine ist es wichtig zu wissen, welche möglichen oberen Einsatztemperaturen vorliegen. In den Bildern 26 und 27 ist die Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Temperatur für ein Mischlaminat Typ 1, Nr. 2.1 bis 2.5 und die Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der Temperatur für das gleiche Mischlaminat dargestellt. Die jeweils linken Diagramme zeigen die Abhängigkeit für Lamine, die bei RT gehärtet, die rechten Diagramme zeigen die Abhängigkeit für Lamine, die 10 Std. bei  $110^{\circ}\text{C}$  nachgehärtet wurden. Die Kurven 1 zeigen in beiden Fällen den Verlauf bzw. die Abhängigkeit für die errechneten Mittelwerte, die Kurven 3 zeigen die Verläufe für die 5% Fraktilwerte mit einer Aussagewahrscheinlichkeit von 95%. Die Kurven 2 stellen eine mögliche Lage des Fraktilwertes dar, wenn anstatt 56 Proben unendlich viele Proben zur Verfügung gestanden hätten. In jedem Fall aber liegt der Verlauf der Kurve 2 oberhalb dem Verlauf der Kurve 3, für den nur ein begrenzter Informationsumfang vorliegt.

Im Bild 26 ist bei dem Mischlaminat, das bei Raumtemperatur gehärtet wurde, eine starke Abnahme der Biegefestigkeit mit zunehmender Prüftemperatur von  $40^{\circ}\text{C}$  auf  $60^{\circ}\text{C}$  zu verzeichnen. Aufgrund großer Streuungen liegt der 5%-Fraktilwert weit unterhalb des Mittelwertes. Obwohl bei allen Prüftemperaturen die Streuungen in der gleichen Größenordnung liegen, nimmt der Variationskoeffizient immer ungünstigere Werte an. Während der Variationskoeffizient bei  $20^{\circ}\text{C}$  Prüftemperatur noch bei 10,8% liegt und bei  $40^{\circ}\text{C}$  Prüftemperatur bei 11,3% liegt, nimmt er bei  $60^{\circ}\text{C}$  Prüftemperatur auf 17,5% zu. Es ist deshalb wichtig, vergleichende Wertungen anhand der Variationskoeffizienten vorzunehmen. Beim Laminat, das 10 Std. bei  $110^{\circ}\text{C}$  nachgehärtet wurde, ist eine etwas geringere Streuung festzustellen und eine größere Gleichmäßigkeit über den gesamten Temperaturbereich zu verzeichnen. Dieses drückt sich durch ein geringeres Abfallen der Biegefestigkeitswerte und eine geringere Abweichung des 5%-Fraktilwertes vom Mittelwert aus. Außerdem liegen die ermittelten Werte im allgemeinen höher als die, die bei den Laminaten ermittelt wurden, die bei Raumtemperatur gehärtet wurden. Der Variationskoeffizient steigt im betrachteten Temperaturbereich von 9,2% auf 11,2%. Somit kann als Maß für die Gleichmäßigkeit von Kennwerten die Abweichung der Variationskoeffizienten untereinander herangezogen werden.

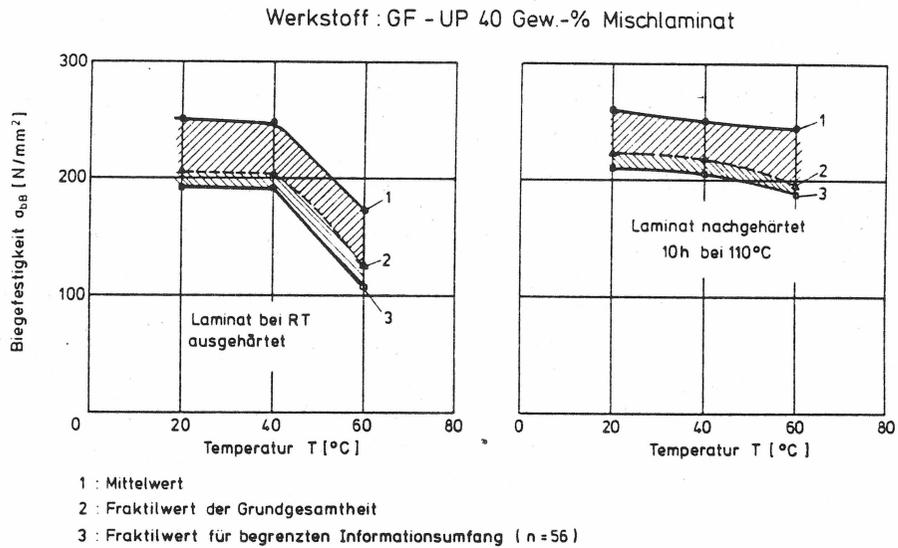


Bild 26: Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur für ein Mischlaminat

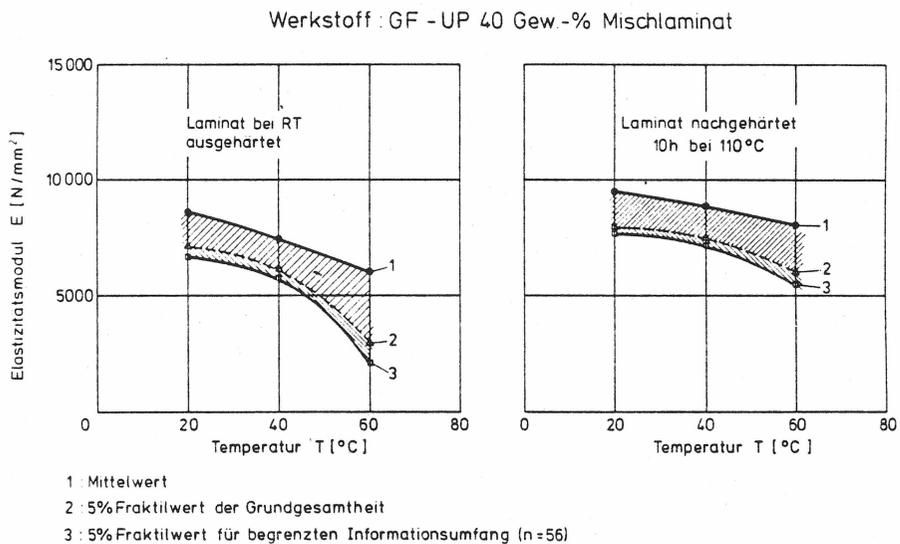


Bild 27: Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Temperatur für ein Mischlaminat

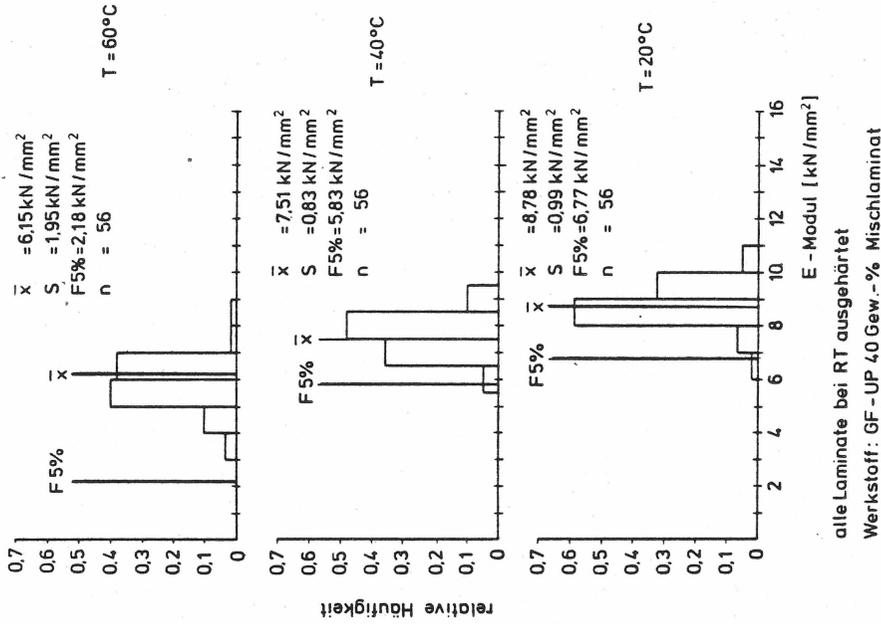


Bild 29: Relative Häufigkeitsverteilung der Elastizitätsmodulwerte eines Mischlaminats in Abhängigkeit von der Temperatur

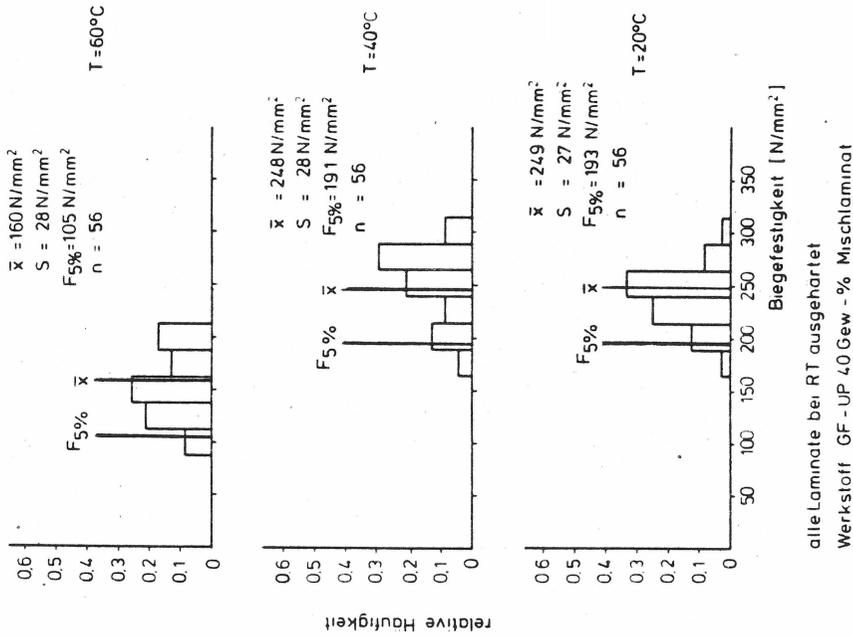


Bild 28: Relative Häufigkeitsverteilung der Biegefestigkeitswerte eines Mischlaminats in Abhängigkeit von der Temperatur

Die Streuung der Elastizitätsmodulwerte in Abhängigkeit von der Temperatur und vom Aushärtegrad zeigt Bild 27.

Für beide Lamine, sowohl für das bei Raumtemperatur gehärtete als auch für das nachgehärtete Laminat ist eine Abnahme des E-Moduls mit zunehmender Prüftemperatur zu verzeichnen. Die Werte für das Laminat, das nachgehärtet wurde, liegen aber etwas höher. Der Variationskoeffizient steigt für das Mischlaminat, das bei RT gehärtet wurde, von 11,3% bei 20°C Prüftemperatur auf über 30% bei 60°C Prüftemperatur. Eine Nachhärtung bewirkt aber, ähnlich wie bei der Biegefestigkeit, eine größere Gleichmäßigkeit der E-Modulwerte im untersuchten Temperaturbereich. Der Variationskoeffizient steigt bei dem nachgehärteten Laminat von 10,3% auf 14,7%. Die Bilder 28 und 29 zeigen die Häufigkeitsverteilungen der einzelnen Meßwerte für die Mischlamine, die bei Raumtemperatur gehärtet wurden.

Im Bild 28 ist die relative Häufigkeit der Biegefestigkeitswerte aufgetragen. Während sich die Meßwerte bei RT noch normal um den Mittelwert verteilen, findet bei der Prüftemperatur von 40°C und 60°C schon eine Umlagerung zu nicht-normalen bzw. logarithmisch normalverteilten Meßwerten statt. Ähnliches kann bei der Häufigkeitsverteilung der Elastizitätsmodulwerte (Bild 29) beobachtet werden. Dabei ist der starke Abfall des Fraktilwertes bei einer Prüftemperatur von 60°C auffällig. Es handelt sich dabei um eine linksseitige Verschiebung der Meßwerte zu niedrigeren Werten, was durch die ausgeprägte Abhängigkeit des E-Moduls glasfaserverstärkter Lamine von der Prüftemperatur zu erklären ist. Dieses Verhalten läßt sich sinnvoll durch die logarithmische Normalverteilungsfunktion beschreiben (vgl. 5.1.1.2).

## 5.2.8 Verhalten gegenüber Umgebungsmedien

### 5.2.8.1 Einfluß der Wasserlagerung

Bei der Lagerung glasfaserverstärkter Lamine in Wasser können einerseits die Harze Wasser absorbieren, andererseits besteht die Möglichkeit, daß die Glasfasern direkt angegriffen werden.

In Abhängigkeit von der Einwirkungsdauer ist die Wasseraufnahme mit einer Gewichtszunahme verbunden. Unversiegelte Lamine weisen die stärkste Gewichtszunahme auf.

Sind die Laminatschnittstellen versiegelt, kann Wasser durch harzreiche Oberflächen in das Laminat eindringen und entlang den Grenzflächen Glasfaser-Harz weiterdiffundieren.

Der Einfluß von Alterungsvorgängen auf die mechanischen Eigenschaften von glasfaserverstärkten Laminaten ist jedoch überwiegend nur bei langzeitigen Lagerungen zu erfassen. Bei den untersuchten Mischlaminaten Nr. 2.4 und 2.5 konnten keine bedeutsamen Änderungen der mechanischen Eigenschaften festgestellt werden. Die Bilder 30 - 33 zeigen Häufigkeitsverteilungen von Biegefestigkeitswerten und Elastizitätsmodulwerten eines Mischlaminats. Die Proben wurden 1 Woche in Wasser gelagert. Die Meßwerte der Proben mit höherem Glasgehalt (47 Gew.-%) weisen eine etwas kleinere Streuung der Meßwerte auf als die Proben mit geringerem Glasgehalt (36 Gew.-%). Im Vergleich zu trockenen gelagerten Proben sind keine Unterschiede in den Eigenschaften zu erkennen. Wesentliche Unterschiede und größere Einflüsse treten erst dann auf, wenn die Wasserlagerung über einen längeren Zeitraum bei erhöhten Temperaturen vorgenommen wird.

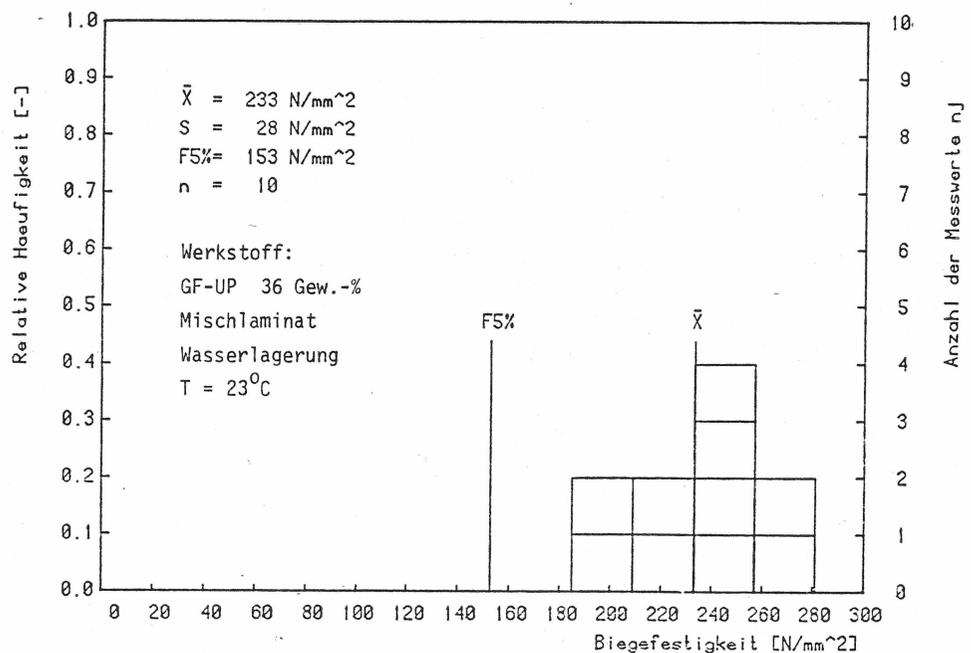


Bild 30: Häufigkeitsverteilung von Biegefestigkeitswerten eines Mischlaminats

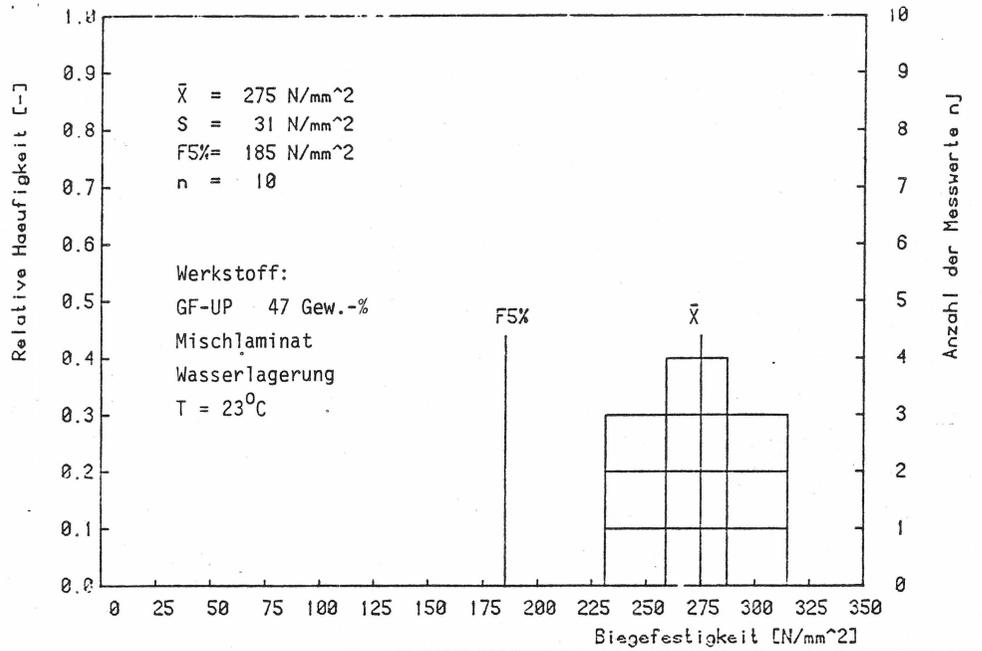


Bild 31: Häufigkeitsverteilung von Biegefestigkeitswerten eines Mischlaminats

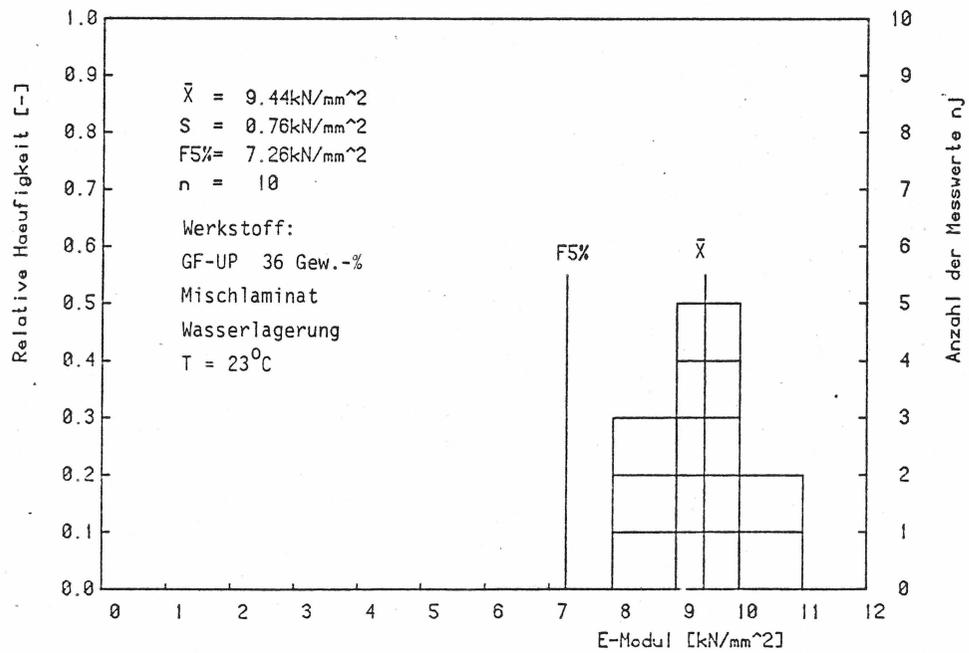


Bild 32: Häufigkeitsverteilung von Elastizitätsmodulwerten eines Mischlaminats

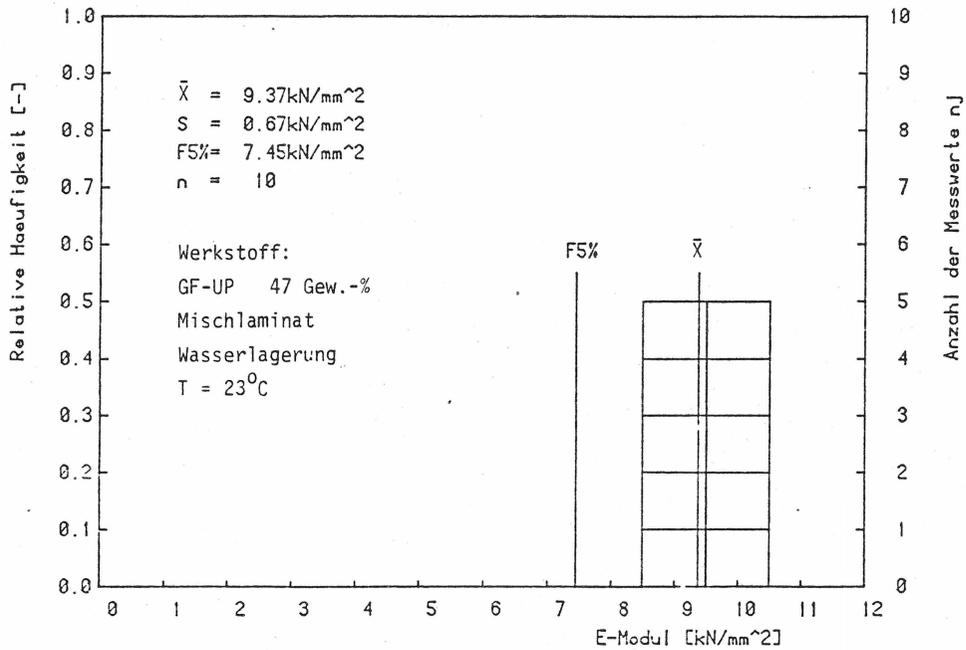


Bild 33: Häufigkeitsverteilung von Elastizitätsmodulwerten eines Mischlaminats

#### 5.2.8.2 Einfluß korrosiver Medien

Ein wichtiger Faktor für das Verhalten von glasfaserverstärkten Laminaten in aggressiven Medien ist die gleichzeitige mechanische Beanspruchung. Zur Schädigung tragen im wesentlichen eine korrosive und eine mechanische Schädigungskomponente bei, die sich in der Praxis zu verschiedenen großen Anteilen und sehr unregelmäßig überlagern können. Da die meisten Harze resistent gegenüber schwach konzentrierten Säuren sind, muß die eingebettete Glasfaser auf jeden Fall durch eine geschlossene Oberflächenschicht (Gelcoat) auf dem Laminat geschützt werden, da aufgrund von Mikrorissen die Diffusion von Flüssigkeiten bei bloß liegenden Fasern stark beschleunigt wird und zu frühzeitigem Versagen des Verbundes führt. Dieses ist umso ausgeprägter, je größer die "Faserlänge pro Volumen" eines Laminats ist (z. B. Mattenlaminat und m. E. Mischlaminat).

### 5.2.9 Fertigungseinflüsse

Zur Erfassung der Fertigungseinflüsse werden verschiedene Mischlamine Nr. 7.1, Mattenlamine Nr. 9.1 und Nr. 10.1 sowie Faserspritzlamine Nr. 3.1 von verschiedenen Herstellern gefertigt und untereinander geprüft. Die mechanischen Prüfungen sollten Aufschluß darüber geben, wie groß die Streuungen der Meßwerte sind, wenn verschiedene Laboratorien und Betriebe nach gleichen Angaben fertigen und wie groß Streuungen sind, wenn eine oder mehrere Prüfstellen prüfen.

Geprüft wurden unterschiedliche mechanische Eigenschaften: Zugfestigkeit, Biegefestigkeit, Elastizitätsmodul aus Zug- und Biegeversuch, wobei der Elastizitätsmodul beim Biegeversuch aus 3-Punkt und 4-Punkt-Biegung ermittelt wurde. Die Prüfungen wurden folgendermaßen durchgeführt und ausgewertet:

#### 1) Mattenlaminat: Warm-Naß-Pressen

- a) Verschiedene Prüfer aus Laboratorien und Betrieben prüfen je ein nach gleichen Angaben gefertigtes Laminat eines anderen Herstellers
- b) 1 Prüfer prüft von jedem Labor und Betrieb ein nach gleichen Angaben gefertigtes Laminat

#### 2) Faserspritzlaminat

- a) Verschiedene Prüfer aus Laboratorien und Betrieben prüfen je ein nach gleichen Angaben gefertigtes Laminat eines anderen Herstellers

#### 3) Mattenlaminat (Handlaminat)

- a) Verschiedene Prüfer prüfen das gleiche Laminat eines Herstellers
- b) Verschiedene Prüfer aus Laboratorien und Betrieben prüfen je ein nach gleichen Angaben gefertigtes Laminat eines anderen Herstellers
- c) Ein Prüfer prüft von jedem Labor und Betrieb ein nach gleichen Angaben gefertigtes Laminat

4) Mischlaminat (Handlaminat)

- a) Ein Prüfer prüft von jedem Labor und Betrieb ein nach gleichen Angaben gefertigtes Laminat
  
- b) Verschiedene Prüfer aus Laboratorium und Betrieb prüfen je ein nach gleichen Angaben gefertigtes Laminat eines anderen Herstellers

In Tabelle 6 sind die einzelnen Meßwerte aufgeführt. Obwohl die mechanischen Eigenschaften vom Glasgehalt abhängen, wurde beim Vergleich der Streuungen der Kennwerte der Glasgehalt nicht besonders berücksichtigt. Dieses ist auch nicht notwendig, da der Glasgehalt der geprüften Lamine in den einzelnen 4 Gruppen nur minimale Schwankungen aufweist. Die größten Abweichungen des Glasgehalts treten beim Faserspritzlaminat mit  $v = 4,8\%$  auf.

Das Mattenlaminat, das im Warm-Naß-Preßverfahren hergestellt wurde, weist die geringsten Variationskoeffizienten auf. Dabei ist zu beachten, daß die Messungen, die von nur einem Prüfer durchgeführt wurden, noch etwas genauer sind.

Das Faserspritzlaminat zeigt sehr große Schwankungen der Meßwerte. Lediglich der aus dem Zugversuch ermittelte Elastizitätsmodul streut mit nur  $8,3\%$  um den Mittelwert. Auch wenn derartige Prüfungen nach dem gleichen Schema und unter gleichen Bedingungen ablaufen, ergeben sich jedoch immer wieder große Unterschiede in den gemessenen Werten. Weiterhin ist eine Gleichartigkeit aller Prüfkörper nur bedingt vorhanden, wenn verschiedene Prüfer verschiedene Lamine prüfen.

Sehr große Schwankungen treten auch beim Mattenlaminat auf, das im Handlaminierverfahren hergestellt wurde. Dieses liegt weniger an den Prüfungen, sondern vielmehr an der Herstellung einzelner Lamine.

Ähnliches ist auch bei dem Mischlaminat zu beobachten, obwohl hierbei die prozentualen Abweichungen der Meßwerte vom Mittelwert etwas geringer ausfallen als beim Mattenlaminat im Handlaminierverfahren.

	Kennwert [N/mm <sup>2</sup> ]	Glas- gehalt [Gew.-%]	Meßwert- umfang n	Standard- abweichung [N/mm <sup>2</sup> ]	Frakti- wert *) [N/mm <sup>2</sup> ]	Variations- koeffizient [%]
Mattenlaminat Warm-Naß Preßverfahren	1a) $\sigma_b = 203$ ;	$\psi = 43$ ;	n = 60;	s = 27;	F = 149;	v=13,3
	$\sigma_z = 126$ ;	43;	60;	10;	106;	7,9
	$E_{z0,1} = 8900$	43	50	1010	6810	11,3
	$E_{z0,5} = 8130$	43	50	970	6140	11,9
	1b) $\sigma_b = 194$	42	70	19	155	9,8
	$\sigma_z = 119$	42	70	11	96	9,2
	$E_{z0,1} = 9500$	42	70	1040	7440	10,9
	$E_{z0,5} = 8660$	42	70	790	7090	9,1
Faserspritzlaminat	2) $\sigma_z = 91$	33	80	27	37	29,7
	$\sigma_b = 175$ glatt	32	80	44	88	25,1
	$\sigma_b = 183$ rauh	35	50	24	133	13,1
	$E_b = 6970$ glatt	32	80	1590	3850	22,8
	$E_b = 7150$ rauh	35	50	1140	4810	15,9
	$E_b = 9160$ glatt	32	60	2020	5090	22,1
	$E_b = 9680$ rauh	36	25	2100	4890	21,7
	$E_z = 9620$	34	48	800	7960	8,3
Mattenlaminat Handlaminat	3a) $\sigma_z = 104$	30	49	16	70	15,4
	$E_{z0,05} = 9520$	30	38	1880	5520	19,7
	$E_{z0,5} = 8280$	30	39	950	6260	11,5
	$E_{b0,5} = 8990$	30	55	1270	6400	14,1
	$E_{b0,5} = 9080$	30	25	1740	5120	19,2
	$\sigma_b = 185$	30	54	22	141	11,9

\*)  $\epsilon = 5\%$ ,  $W = 95\%$

Tabelle 6a: Einfluß der Herstellung und Prüfung (Überblick)

	Kennwert [N/mm <sup>2</sup> ]	Glas- gehalt [Gew.-%]	Meßwert- umfang n	Standard- abweichung [N/mm <sup>2</sup> ]	Frakti- wert *) [N/mm <sup>2</sup> ]	Variations- koeffizient [%]
Mattenlaminat Handlaminat	3b) $\sigma_z = 102$	32	78	15	72	14,7
	$E_{bo,1} = 9670$	32	55	1210	7210	12,5
	$E_{bo,1} = 8940$	31	25	710	7310	7,9
	$\sigma_b = 187$	32	72	26	134	13,9
	$E_{zo,5} = 8100$	32	57	1830	4400	22,6
	$E_{zo,5} = 9870$	32	60	1910	6020	19,4
3c)	$\sigma_z = 97$	34	90	22	54	22,7
	$\sigma_b = 176$	34	95	25	128	14,2
	$E_{bo,5} = 9850$	34	90	2340	5300	23,8
Mischlaminat Handlaminat	4a) $\sigma_b = 194$	42	100	44	108	22,7
	$\sigma_b = 225$	45	88	29	168	12,9
	4b) $E_{zo,1} = 13090$	44	70	1770	9570	13,5
	$E_{zo,1} = 12570$	42	88	1670	9310	13,3
	$E_{zo,5} = 11900$	42	84	1410	9150	11,8
	$E_{zo,5} = 12240$	44	69	1170	9910	9,6
	$E_b = 9630$	41	48	1460	6610	15,2
	$E_b = 9640$	43	50	830	7940	8,6
	$E_{b4Pkt} = 11040$	42	78	3650	3880	33,1

\*)  $\epsilon = 5\%$ ,  $W = 95\%$

Tabelle 6b: Einfluß der Herstellung und Prüfung (Überblick)

Im Bild 34 ist als weiteres Beispiel die Häufigkeitsverteilung von Meßwerten zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls eines Faserspritzlaminats mit 35 Gew.-% Faseranteil dargestellt.

Die schmale Glockenkurve wurde an Probestäben ermittelt, die aus einer Charge eines Herstellers stammen, während die breite Glockenkurve die Meßwertverteilung aus mehreren Chargen verschiedener Hersteller wiedergibt.

Die Proben wurden aus dem gleichen Grundmaterial hergestellt und die

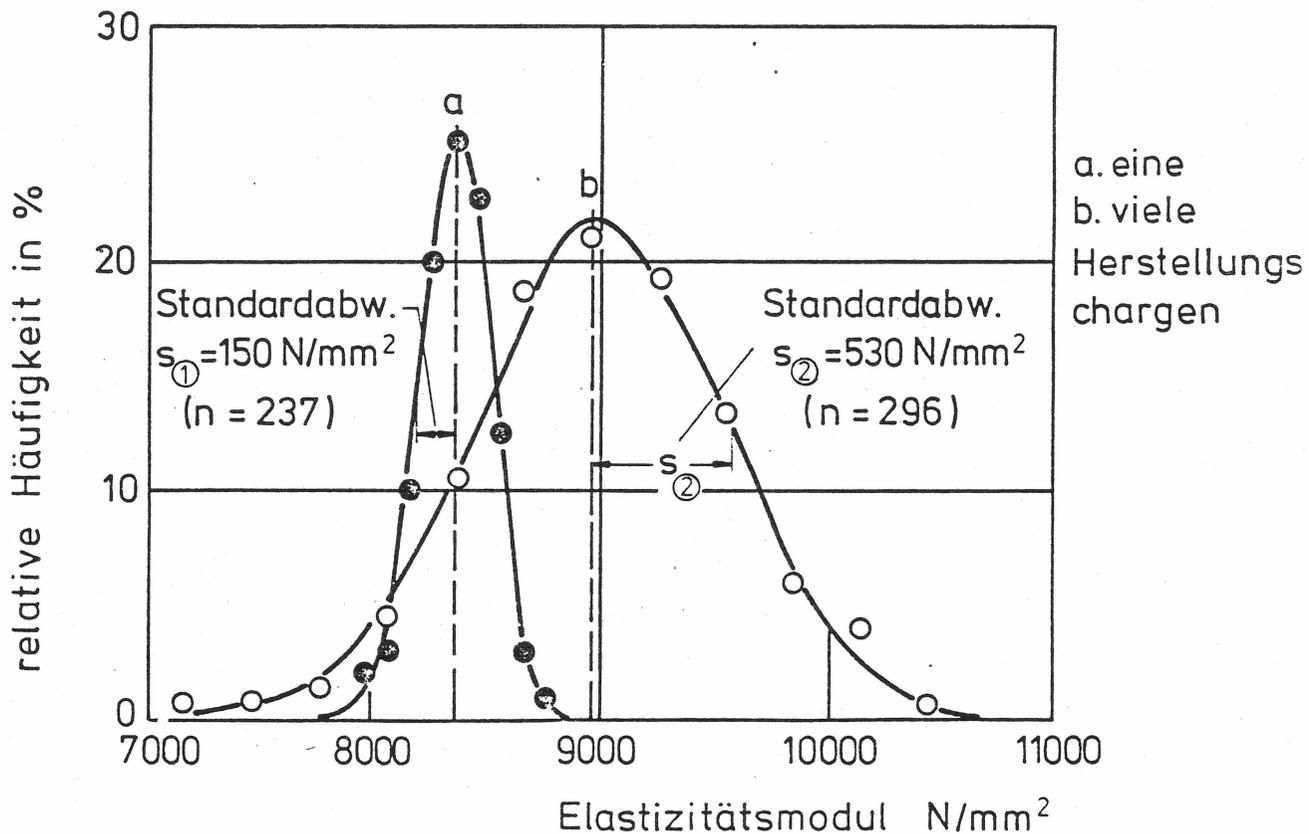


Bild 34: Häufigkeitsverteilung von Elastizitätsmodulwerten eines Faserspritzlaminats mit 35 Gew.-% Glasfaseranteil

Meßwerte wurden nach genormten Prüfverfahren ermittelt. Der Vergleich zeigt unterschiedlich große Streubreiten der E-Modul Werte. Beide Meßreihen, die im übrigen ein in dieser Größenordnung ähnlichen Stichprobenumfang aufweisen, streuen jeweils um einen Mittelwert und obwohl das Niveau des Mittelwertes vieler Chargen höher ist als das Niveau des Mittelwertes aus einer Charge, liegen dabei die kleinsten Meßwerte noch unterhalb der kleinsten Meßwerte, die aus einer Charge stammen. Dieses spielt letztlich bei Sicherheitsfragen eine bedeutende Rolle.

## 6 Zusammenfassung

Die mechanischen Werkstoffeigenschaften glasfaserverstärkter duroplastischer Polymerwerkstoffe unterliegen stark den Variablen der Herstellung und Verarbeitung sowie Temperatureinflüssen und Umgebungsmedien.

Dieses drückt sich in der mehr oder weniger starken Streuung der Meßwerte aus. Es ist deshalb notwendig, Meßwerte statistisch zu erfassen und auszuwerten.

Aufgrund der Streuungen kann dem Mittelwert keine größere Bedeutung als Werkstoffkennwert beigemessen werden. Sicherer ist das Dimensionieren mit Fraktilwerten, weil sie in Verbindung mit geeigneten Sicherheitsbeiwerten und durch die gut erfaßbare Abhängigkeit vom Stichprobenumfang  $n$ , einer unteren Grenze  $\varepsilon$  und der Aussagewahrscheinlichkeit  $W$  einen statistisch abgesicherten Kennwert darstellen.

Der Probenumfang spielt bei der Kennwertermittlung glasfaserverstärkter Polymerwerkstoffe eine bedeutende Rolle. Für einen 5%-Fraktilwert mit einer Aussagewahrscheinlichkeit  $W = 95\%$  stellt eine Probenanzahl von  $n = 20$  eine sinnvolle Größe dar. Dabei steht der ermittelte Fraktilwert noch in einem günstigen Verhältnis zum Mittelwert einer Meßwertreihe.

Wird die Aussagewahrscheinlichkeit verringert, so erhöht sich bei gleichem Probenumfang der Fraktilwert, aber er wird unsicherer.

Will man das Niveau eines Fraktilwertes beibehalten, so erreicht man das durch geeignetes Anpassen des Probenumfangs.

Die Rechnung mit Fraktilwerten setzt eine genaue Kenntnis der Verteilung der Meßwerte einer Werkstoffeigenschaft voraus. Häufig läßt sich die Verteilung der Meßwerte gut durch eine logarithmische Normalverteilungsfunktion approximieren. Dabei ist dann zu beachten, daß die Fraktilwerte über einen  $k$ -Faktor aus der nicht zentralen  $t$ -Verteilung bestimmt werden.

Die Streuung von Meßwerten eines glasfaserverstärkten Misch-Matten- oder Gewebelaminats läßt sich durch geeignete Wärmebehandlung und Nachhärtung in weiteren Fällen stark verringern. Dadurch ergeben sich auch günstigere Fraktilwerte.

Die beschriebenen Untersuchungen zur Bestimmung von Dimensionierungskennwerten von Misch-Matten- und Gewebelaminaten zeigen die Notwendigkeit auf nicht mehr mit mittleren Erwartungswerten zu rechnen, sondern einen aus einem größeren Stichprobenumfang ermittelten Fraktilwert zu benutzen, der dann die Basis zur weiteren Bauteilberechnung bildet.

## 7 Literaturverzeichnis

- [ 1] Sicherheit im Ingenieurbau - Grundlagen zur Beurteilung.  
Beiträge zum 1. Sicherheitsseminar des Instituts für Bau-  
technik, 3. verbesserte Auflage  
(Februar 1982)
  
- [ 2] Dimensionieren von Bauteilen aus GFK  
VDI 2013 (1970)
  
- [ 3] Oberbach, K., Werkstoffauswahl nach mechanischen und physi-  
kalischen Eigenschaften, VDI BW 4071
  
- [ 4] Domke, H. und A. Rübber, Einfluß des tatsächlichen Lastab-  
laufes auf das Kriechverhalten und Festigkeit von Kunst-  
stoffkonstruktionen, Plastikonstruktion 6, 1976, pp. 173-180
  
- [ 5] Domke, H., Rübber, A. und W. Fix, Einfluß des wirklichen  
Temperaturablaufes auf Kriechverhalten und Festigkeit von  
tragenden Bauteilen, Plastikonstruktion 2, 1977 pp. 52 - 57
  
- [ 6] Einsfeld, U., Beurteilungsverfahren für tragende Bauteile aus  
Kunststoffen, VDI (1975) pp. 31 - 46
  
- [ 7] Dolfen, E. Bemessungsgrundlagen für tragende Bauelemente  
aus glasfaserverstärkten Kunststoffen, Diss. 1969, IKV Aachen
  
- [ 8] Struck, W., Zur Berechnung von einseitigen Grenzwerten (Frak-  
tilen) bei der statistischen Auswertung von Meßergebnissen  
Materialprüfung 9 (1967) pp. 218 - 222
  
- [ 9] Ehrenstein, G. W., Polymerwerkstoffe, Hanser Verlag,  
München, Wien 1978

- [10] Macherauch, E., Festlegung und Bedeutung von Sicherheitsbeiwerten, in: Hausen, W. u. P. Esslinger, Werkstofftechnische Probleme bei Gasturbinenriebwerken, Werkstofftechnische Verlagsgesellschaft, Karlsruhe 1979
- [11] Ehrenstein, G.W. u. G. Erhard, Lagebericht, Konstruieren mit Kunststoffen
- [12] Ehrenstein, G.W. und R. Spaude; Die Genauigkeit von Kurzzeitkennwerten bei glasfaserverstärkten Gießharzen  
Kunststoffe 72, 8 (1982)
- [13] DIN-Normen: 50145, 53444, 53454, 53455, 53457, 53598, 55302, 55303
- [14] Dally, J.W., Statistical Treatment of Experimental Data, J.o. Experimental Mechanics 11 (1978)
- [15] Ehrenstein, G.W. und H.D. Martin, Konstruieren und Berechnen von GFK-Teilen, Beiheft zur Zeitschrift Kunststoff-Berater, Umschau Verlag, Frankfurt a. Main
- [16] Kühlmeyer, M., Die nicht zentrale t-Verteilung  
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1970
- [17] Ehrenstein, G.W., Festigkeits- und Verformungsverhalten von Kunststoffen, Konstruktive Elemente Methoden 7, 8 (1976)
- [18] Ehrenstein, G. W., Glasfaserverstärkte Kunststoffe  
Kontakt und Studium Bd. 62, Expert Verlag 1981
- [19] Leaver, R. H., und T. R. Thomas, Versuchsauswertung  
Uni-Text, Vieweg Verlag Braunschweig 1977

- [20] Taprogge, R., Konstruieren mit Kunststoffen, VDI-Verlag, Düsseldorf 1974
- [21] Sachs, L., Angewandte Statistik, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1978
- [22] Struck, W., Forschungsbericht 58, BAM (1979)
- [23] Kausch, H.H, Bruchverhalten, Bauteilgestaltung und Zuverlässigkeit von Kunststoffwerkstoffen, Materialprüfung 20, (1978) 1
- [24] Baehre, R., Bauteilprüfung als Bemessungsgrundlage Materialprüfung 20 (1978) 1
- [25] Kupfer, H., Sicherheit und Zuverlässigkeit von Tragwerken im Bauwesen, Materialprüfung 20 (1978) 1
- [26] Suchanek, H. J., Auswirkungen fertigungsbedingter Eigenschaftsstreuungen, 10. IKV Kolloquium 1981
- [27] Owen, D. B., Handbook of Statistical Tables Addison-Wesley Pub. Comp., Inc. 1962
- [28] Spatz, C. und Johnston, J.O., Basic Statistics: Tales of Distribution, Brooks-Cole Pub Comp. 1976
- [29] Davies, O.L. und Goldsmith, P.L., Statistical Methods in Research and Production, Longman Group Ltd. London 1977
- [30] Bethea, R.M., Duran, B.S. und Boullion, T.L., Statistical Methods for Engineers and Scientists, Marcel Dekker Inc., New York, Basel 1975
- [31] Kausch, H.H., Statistische Analyse, Materialprüfung 6 (1964) 7 pp. 246-47
- [32] Gaube, E., Kunststoffe 66 (1976) 1, pp. 2 - 8
- [33] Stockmayer, P., Kunststoffe 67 (1977) 8, p. 470
- [34] Wagner, R. und R. Lang, Statistische Auswertung von Meß- und Prüfergebnissen, Deutsche Arbeitsgem. für Qualitätskontrolle, Berlin-Frankfurt 1968

- [35] Schreyer, G., Konstruieren mit Kunststoffen  
Teil 1, Hanser Verlag, München (1972)
- [36] Weibull, W., A statistical distribution  
function of wide applicability, J. o.  
Appl. Mech. 18 (1951) pp. 293 - 297
- [37] Keil, St., Statistische Natur der Ergebnisse  
von Lebensdauerbestimmungen und Auswertung  
dieser Ergebnisse mit Hilfe der Wahrschein-  
lichkeitsrechnung, VDI-Lehrgang: Statistik in der  
Meß- und Versuchstechnik, Kurs 31-02-10  
Karlsruhe (1979)
- [38] Reichelt, C., Rechnerische Ermittlung der  
Kenngrößen der Weibull-Verteilung,  
Fortschritts-Berichte, Reihe 1, Nr. 56, VDI-Verlag  
Düsseldorf (1978)
- [39] Schmidt, K.F.A., Textilglas für die Kunststoffverstärkung  
Zechner & Hüthig Verlag, Speyer 1972
- [40] Imhof, A., Hochspannungsisolierstoffe, Karlsruhe  
Braun. 1957
- [41] Schmitz, G. K. u. A. G. Metcalfe, Stress Corrosion of E-glass  
fiber, Industrial and Engineering Chemistry, I & EC Product Research  
and Development 5 (1966) No. 1 pp. 1-8
- [42] Hollinger, D. L. u. H. T. Plant, Environmental effects on  
delayed failure in glass fibres, 21st ATC, SPI Chicago 1966,  
13-B, pp. 1-12

8 Anhang

8.1 Rechnerprogramme zur Auswertung technischer Meßreihen

Mit Hilfe des Rechnerprogramms ist der Benutzer in der Lage, Meßreihen statistisch auszuwerten und die Ergebnisse auf einem Plotter graphisch darzustellen.

Das Programm ist in der Programmiersprache "BASIC" geschrieben und läuft nach folgendem Plan ab:

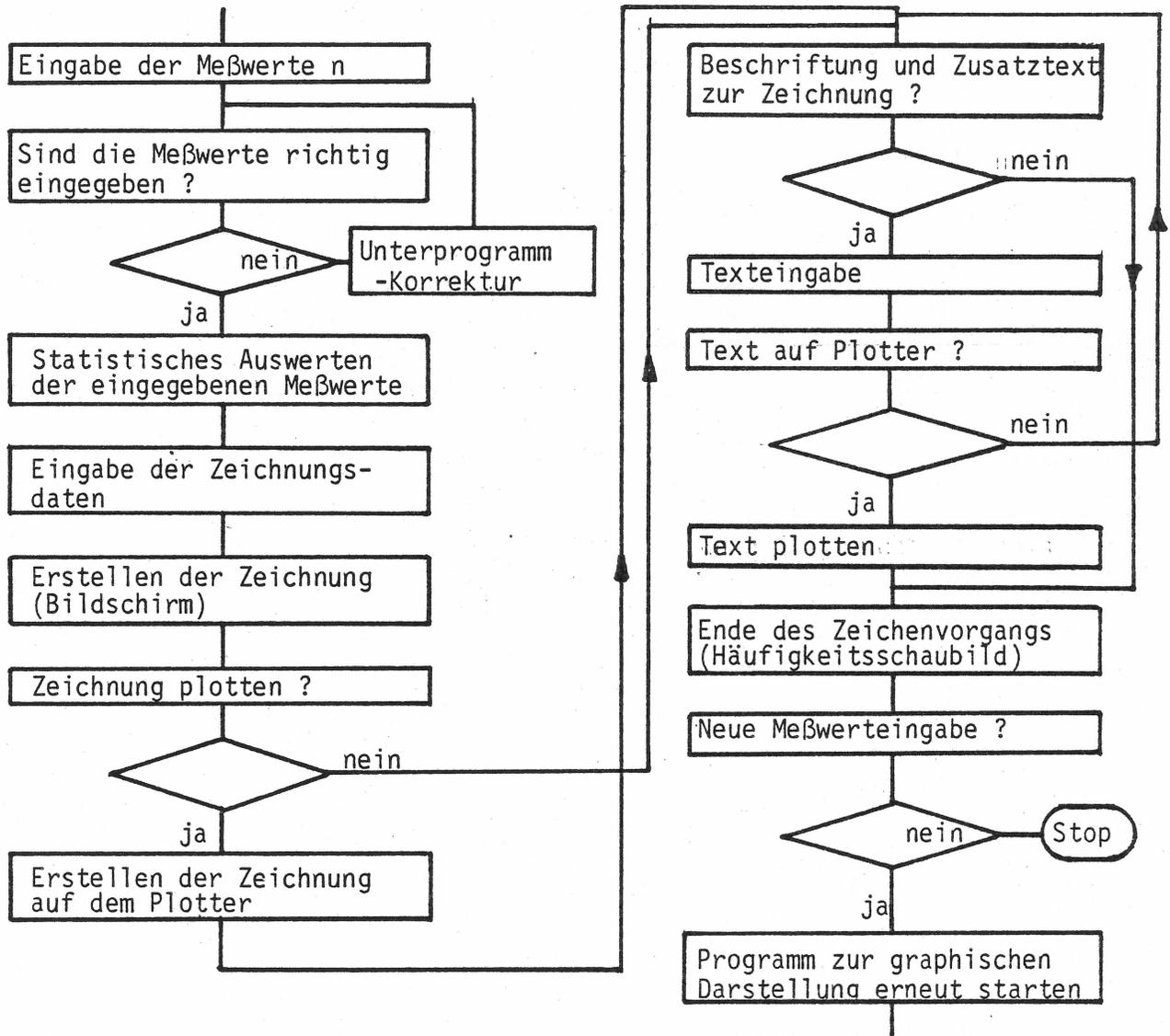


Bild 35: Flußschaubild zur graphischen Darstellung der Häufigkeitsverteilung technischer Meßreihen

8 GO TO 3040

12 GO TO 3680

16 GO TO 3740

20 GO TO 3790

24 GO TO 3540

28 RUN 2530

100 REM GRAPHISCHE AUSWERTUNG VON MESSWERTREIHEN

110 Q9=32

120 PRINT "WELCHE ADRESSE HAT DER PLOTTER"

130 INPUT P

140 T1=1.4

150 T2=2.7

160 PRINT @P,17:T1,T2

170 P9=SQR(2\*PI)

180 DIM F(500),K5(40)

190 DIM Y(10),A\$(1),N\$(1)

200 PRINT "GIB MESSWERTE EIN UND TRENNE DIE WERTE DURCH &gt;&gt;RETURN&lt;&lt;"

210 N=0

220 F8=0

230 FOR I=1 TO 500

240 PRINT I;".: G\_";

250 INPUT F(I)

260 IF F(I)=0 THEN 280

270 NEXT I

280 PRINT "IST MESSWERTEINGABE IN ORDNUNG J/N ?";

290 INPUT R\$

300 IF R\$="J" THEN 320

310 GOSUB 3540

320 FOR I=1 TO 500

330 IF F(I)=0 THEN 370

340 F8=F8+F(I)

350 N=N+1

360 NEXT I

370 FOR I=2 TO N

380 IF F(I)&gt;F(I-1) THEN 420

390 F9=F(I-1)

400 F(I-1)=F(I)

410 F(I)=F9

420 NEXT I

430 W2=F(N)

440 FOR I=2 TO N

450 IF F(I)&lt;F(I-1) THEN 490

460 F9=F(I-1)

470 F(I-1)=F(I)

480 F(I)=F9

490 NEXT I

500 W1=F(N)

510 M=F8/N

520 PRINT "MITTELWERT M=";M

530 F6=0

540 FOR I=1 TO N

550 F7=(F(I)-M)^2

560 F6=F6+F7

570 NEXT I

580 S=SQR(F6/(N-1))

590 PRINT "STANDARDABWEICHUNG S=";S

600 D1=1.645

610 F1=M-D1\*S

620 F2=M+D1\*S

630 PRINT "FRAKTILWERT (5%) F1=";F1

640 PRINT "FRAKTILWERT (95%) F2=";F2

650 PRINT "KLEINSTER WERT:";W1

660 PRINT "GRÖSSTER WERT:";W2

670 PRINT "GIB ANZAHL DER KLASSEN K=";

680 INPUT K1

690 K2=W2-W1

700 K3=K2/K1

```

710 PRINT "RES. KLASSENBREITE K3=";K3
720 PRINT "WAEHLE VERNUENFTIGE KLASSENBREITE: ";
730 INPUT K3
740 PRINT "GIB WERT DER UNTERSTEN KLASSENGRENZE AN :";
750 INPUT K5(1)
760 K1=0
770 FOR I=2 TO 20
780 K1=K1+1
790 K5(I)=K5(I-1)+K3
800 IF K5(I)>W2 THEN 820
810 NEXT I
820 DIM X(K1)
830 X=0
840 FOR I=1 TO N
850 FOR J=2 TO K1+1
860 IF F(I)=>K5(J) THEN 890
870 X(J-1)=X(J-1)+1
880 GO TO 900
890 NEXT J
900 NEXT I
910 FOR A=1 TO K1
920 X(A)=X(A)/N
930 NEXT A
940 D=1.645
950 F1=M-D*S
960 F2=M+D*S
970 REM **ENDEERFASSUNG**
980 REM*****
990 REM *****;LIS
1000 REM verteilung darstellen
1010 GOSUB 1070
1020 PRINT "L_neue Messreihe j/n ?";
1030 INPUT A$
1040 DELETE X
1050 IF A$="j" THEN 200
1060 END
1070 REM *****
1080 REM Balkendiagramm zeichnen
1090 PRINT "L_Balkendiagramm zeichnen"
1100 REM *** Daten untersuchen ***
1110 Y2=X(1)
1120 FOR J=2 TO K1
1130 IF Y2>X(J) THEN 1150
1140 Y2=X(J)
1150 NEXT J
1160 PRINT "J_vorhandene Daten:"
1170 PRINT "maximale Hoehe=";Y2
1180 REM *** Diagramm zeichnen ***
1190 PRINT "J_Angaben zur Ausfuehrung der Zeichnung"
1200 PRINT "Gesamthoehe des Diagrammes ? ";
1210 INPUT Y2
1220 PRINT "mimimaler + maximaler X-Wert";
1230 INPUT X1,X2
1240 PRINT "Schraffur der Balken"
1250 PRINT "Abstand der Linien: x,y:";
1260 INPUT S1,S2
1270 PRINT "Text zur X-Achse ?"
1280 INPUT X$
1290 PRINT "Text zur Y-Achse LINKS ?"
1300 INPUT Y$
1310 PRINT "TEXT ZUR Y-ACHSE RECHTS ?"
1320 INPUT Z$
1330 PRINT "Achsenunterteilung fuer X , Y LINKS , Y RECHTS ?";
1340 INPUT A1,A2,A3
1350 PRINT "Wieviele horizontale Linien (maximal 10) ?";
1360 INPUT N2
1370 IF N2=0 THEN 1420
1380 PRINT "Eingabe der Werte, jeden Wert durch >>RETURN<< trennen"

```

```
1390 FOR J=1 TO N2
1400 INPUT Y(J)
1410 NEXT J
1420 PRINT "Normalverteilung zeichnen j/n ? ";
1430 INPUT N$
1440 IF N$="n" THEN 1470
1450 PRINT "Anzahl der Punkte auf der Kurve ? ";
1460 INPUT N9
1470 REM *** zeichnen***
1480 P$="n"
1490 PAGE
1500 VIEWPORT 20,120,10,90
1510 WINDOW X1,X2,0,Y2
1520 AXIS @Q9:A1,A2,X1,0
1530 AXIS @Q9:0,A3,X2,0
1540 MOVE @Q9:X1,Y2
1550 DRAW @Q9:X2,Y2
1560 FOR J=1 TO K1
1570 B1=K5(J)
1580 B2=B1+K3
1590 H1=0
1600 H2=X(J)
1610 IF H2=0 THEN 1680
1620 MOVE @Q9:B1,H1
1630 DRAW @Q9:B1,H2
1640 DRAW @Q9:B2,H2
1650 DRAW @Q9:B2,H1
1660 REM ***** SCHRAFFUR ***
1670 GOSUB 2730
1680 NEXT J
1690 M1=0.7*Y2
1700 M2=0.07*Y2+M1
1710 MOVE @Q9:M,0
1720 DRAW @Q9:M,M1
1730 MOVE @Q9:M,M2
1740 PRINT @Q9:"M"
1750 MOVE @Q9:F1,0
1760 DRAW @Q9:F1,M1
1770 MOVE @Q9:F1,M2
1780 PRINT @Q9:"F"
1790 REM *** Achsen beschriften & horizontale Linien***
1800 IF A2=0 THEN 1870
1810 Y0=0
1820 Y0=Y0+A2
1830 IF Y0>Y2 THEN 1890
1840 MOVE @Q9:X1,Y0
1850 PRINT @Q9:"H_H_H_H_H_H_";Y0
1860 GO TO 1820
1870 MOVE @Q9:X1,Y2
1880 PRINT @Q9:"H_H_H_H_H_H_";Y2
1890 IF A3=0 THEN 1980
1900 Y5=Y2*N
1910 WINDOW X1,X2,0,Y5
1920 Y0=0
1930 Y0=Y0+A3
1940 IF Y0>Y5 THEN 1980
1950 MOVE @Q9:X2,Y0
1960 PRINT @Q9:Y0
1970 GO TO 1930
1980 AXIS @Q9:0,A3,X2,0
1990 WINDOW X1,X2,0,Y2
2000 IF N2=0 THEN 2050
2010 FOR J=1 TO N2
2020 MOVE @Q9:X1,Y(J)
2030 DRAW @Q9:X2,Y(J)
2040 NEXT J
2050 IF A1=0 THEN 2250
2060 X0=X1
```

```
2070 XO=X0+A1
2080 IF XO>X2 THEN 2120
2090 MOVE @Q9:X0,0
2100 PRINT @Q9:"J_H_";X0
2110 GO TO 2070
2120 REM ***normalverteilung zeichnen
2130 IF N$="n" THEN 2250
2140 P8=1/(P9*S*S)
2150 P7=1/(2*S)
2160 X0=X1
2170 X3=(X2-X1)/N9
2180 Y0=P8*EXP(-P7*(X0-M)^2)
2190 MOVE @Q9:X0,Y0
2200 FOR J=1 TO N9
2210 X0=X0+X3
2220 Y0=P8*EXP(-P7*(X0-M)^2)
2230 DRAW @Q9:X0,Y0
2240 NEXT J
2250 IF Q9=32 THEN 2280
2260 REM PRINT @P,7:
2270 REM *** plotten ***
2280 IF P$="j" THEN 2460
2290 PRINT "^_plotten j/n ? ";
2300 INPUT P$
2310 IF P$="n" THEN 2470
2320 VIEWPORT 0,150,0,100
2330 WINDOW 0,297,0,210
2340 VIEWPORT 24.98989,126,24,93.5
2350 WINDOW X1,X2,0,Y2
2360 MOVE @P:X1+(X2-X1)*0.6,-0.1*Y2
2370 PRINT @P:X$
2380 MOVE @P:X1,0
2390 PRINT @P,25:90
2400 PRINT @P:"K_K_K_K_K_";Y$
2410 MOVE @P:X2,0
2420 PRINT @P:"J_J_J_J_";Z$
2430 PRINT @P,25:0
2440 Q9=P
2450 GO TO 1520
2460 Q9=32
2470 REM *** texteingabe***
2480 N1=1
2490 HOME
2500 FOR K=1 TO 3*N1-1
2510 PRINT
2520 NEXT K
2530 PRINT "zusatzlicher Text j/n ? ";
2540 INPUT A$
2550 IF A$="n" THEN 2710
2560 PRINT "x,y,Text=";
2570 INPUT X0,Y0,T$
2580 MOVE X0,Y0
2590 PRINT T$
2600 HOME
2610 FOR K=1 TO 3*N1+1
2620 PRINT
2630 NEXT K
2640 N1=N1+1
2650 PRINT "Plotten j/n ?";
2660 INPUT P$
2670 IF P$="n" THEN 2490
2680 MOVE @P:X0,Y0
2690 PRINT @P:T$
2700 GO TO 2490
2710 PRINT "^_I_I_Ende der Zeichnung"
2720 RETURN
2730 REM *****
2740 REM Schraffur eines Balkens
```

2750 IF S1=0 THEN 2890

2760 XO=B1

2770 RO=1

2780 XO=XO+S1

2790 IF XO>B2 THEN 2890

2800 IF RO THEN 2850

2810 MOVE @Q9:XO,H1

2820 DRAW @Q9:XO,H2

2830 RO=1

2840 GO TO 2780

2850 MOVE @Q9:XO,H2

2860 DRAW @Q9:XO,H1

2870 RO=0

2880 GO TO 2780

2890 IF S2=0 THEN 3030

2900 YO=H1

2910 RO=1

2920 YO=YO+S2

2930 IF YO=>H2 THEN 3030

2940 IF RO THEN 2990

2950 MOVE @Q9:B1,YO

2960 DRAW @Q9:B2,YO

2970 RO=1

2980 GO TO 2920

2990 MOVE @Q9:B2,YO

3000 DRAW @Q9:B1,YO

3010 RO=0

3020 GO TO 2920

3030 RETURN

3040 REM \*\*\*\*\* Blattumrandung \*\*\*\*\*

3050 P=4

3060 T1=1.792

3070 T2=2.816

3080 PRINT @32:"GIB TEXT: SCHRITTFELD OBERE ZEILE "

3090 INPUT F\$

3100 PRINT @32:"GIB TEXT: SCHRITTFELD UNTERE ZEILE "

3110 INPUT G\$

3120 VIEWPORT 0,150,0,100

3130 WINDOW 0,297,0,210

3140 MOVE @P:5,5

3150 RDRAW @P:287,0

3160 RDRAW @P:0,200

3170 RDRAW @P:-287,0

3180 RDRAW @P:0,-200

3190 RMOVE @P:0,25

3200 RDRAW @P:287,0

3210 RMOVE @P:-30,0

3220 RDRAW @P:0,-25

3230 MOVE @P:90,5

3240 RDRAW @P:0,25

3250 MOVE @P:8,14

3260 PRINT @P,17:3.18,5.2

3270 PRINT @P:"GHK"

3280 RMOVE @P:0.3,0

3290 PRINT @P:"GHK"

3300 PRINT @P,17:1.9,3.45

3310 MOVE @P:28,19.5

3320 PRINT @P:"INSTITUT FUR "

3330 MOVE @P:64.7,25.5

3340 PRINT @P:","

3350 MOVE @P:66.3,25.5

3360 PRINT @P:","

3370 MOVE @P:28,10.5

3380 PRINT @P:"WERKSTOFFTECHNIK"

3390 MOVE @P:266,19.5

3400 MOVE @P:272,10.5

3410 PRINT @P:"E/Sp"

3420 MOVE @P:95,19.5

```
3430 PRINT @P,17:1.5,3
3440 PRINT @P:F$
3450 MOVE @P:95,10.5
3460 PRINT @P:G$
3470 PRINT @32:"GIB DATUM"
3480 INPUT H$
3490 MOVE @P:270,19.5
3500 PRINT @P:H$
3510 PRINT @P,17:1.9,3.45
3520 INIT
3530 END
3540 REM      KORREKTUR - UNTERPROGRAMM
3550 I=0
3560 FOR I=1 TO 500
3570 IF F(I)=0 THEN 3600
3580 PRINT I;"":      ";F(I)
3590 NEXT I
3600 PRINT "WELCHER MESSWERT IST FALSCH ?;"
3610 INPUT I
3620 PRINT "F(";I;")=";
3630 INPUT F(I)
3640 PRINT "IST NOCH EIN MESSWERT FALSCH J/N ?";
3650 INPUT E$
3660 IF E$="J" THEN 3600
3670 RETURN
3680 VIEWPORT 0,150,0,100
3690 WINDOW 0,297,0,210
3700 MOVE @4:20,190
3710 PRINT @4,17:1.4,2.8
3720 PRINT @4:"MESSWERTE",F
3730 END
3740 PRINT "MITTELWERT           M=";M
3750 PRINT "STANDARDABWEICHUNG  S=";S
3760 PRINT "FRAKTILWERT (5%)    F1=";F1
3770 PRINT "FRAKTILWERT (95%)   F2=";F2
3780 END
3790 PRINT @37,26:1
3800 LIST @1:
3810 PRINT @37,26:0
3820 END
```

## 8.2 Bilder, Meßwerte und Tabellen

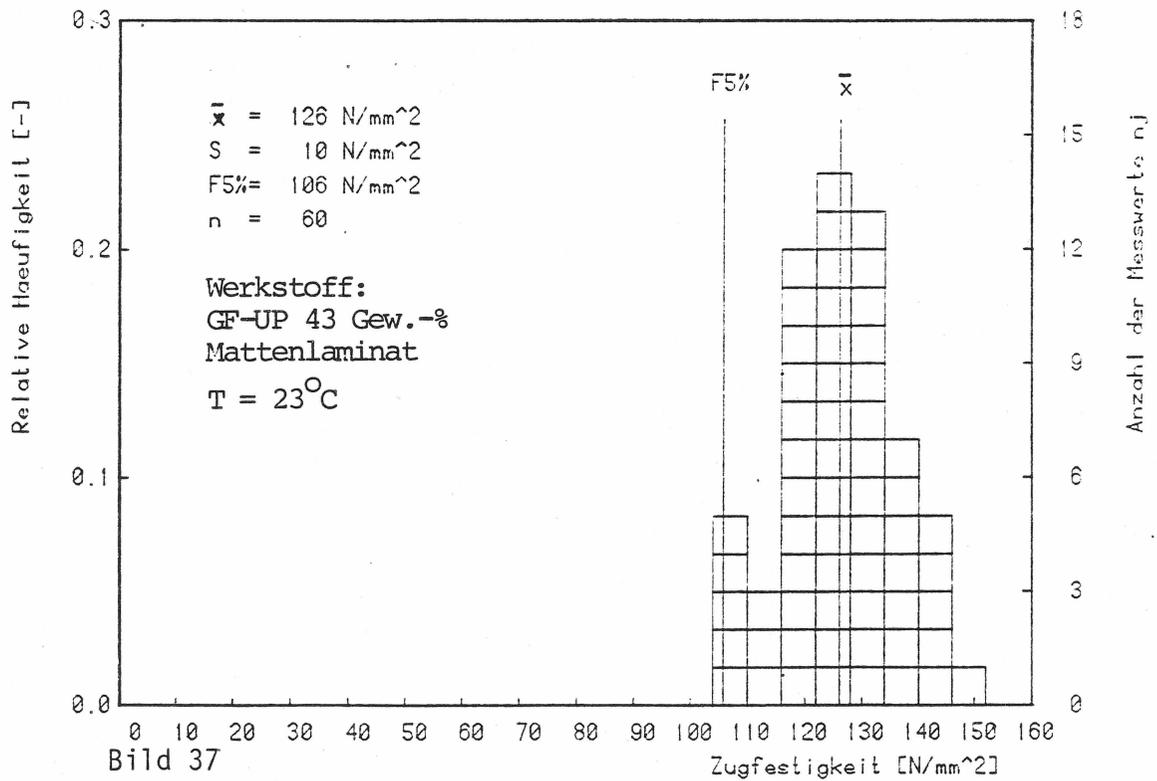
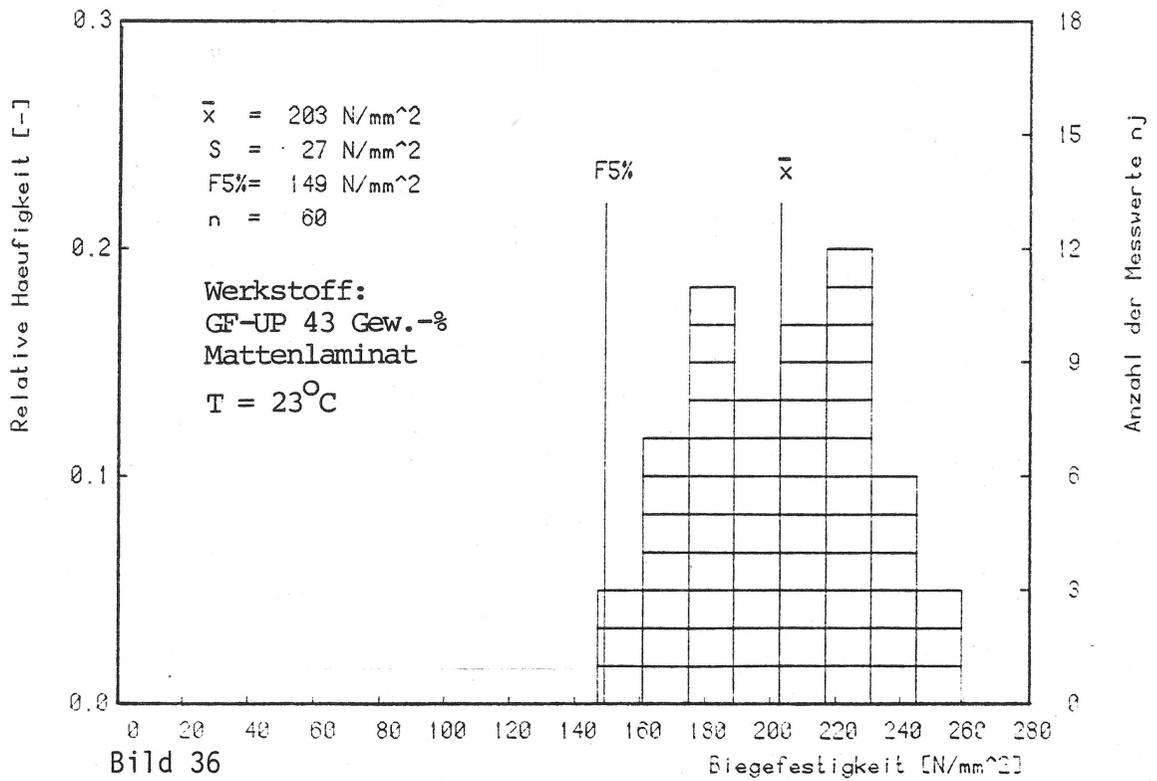
### 8.2.1 Häufigkeitsverteilungen von Meßwerten

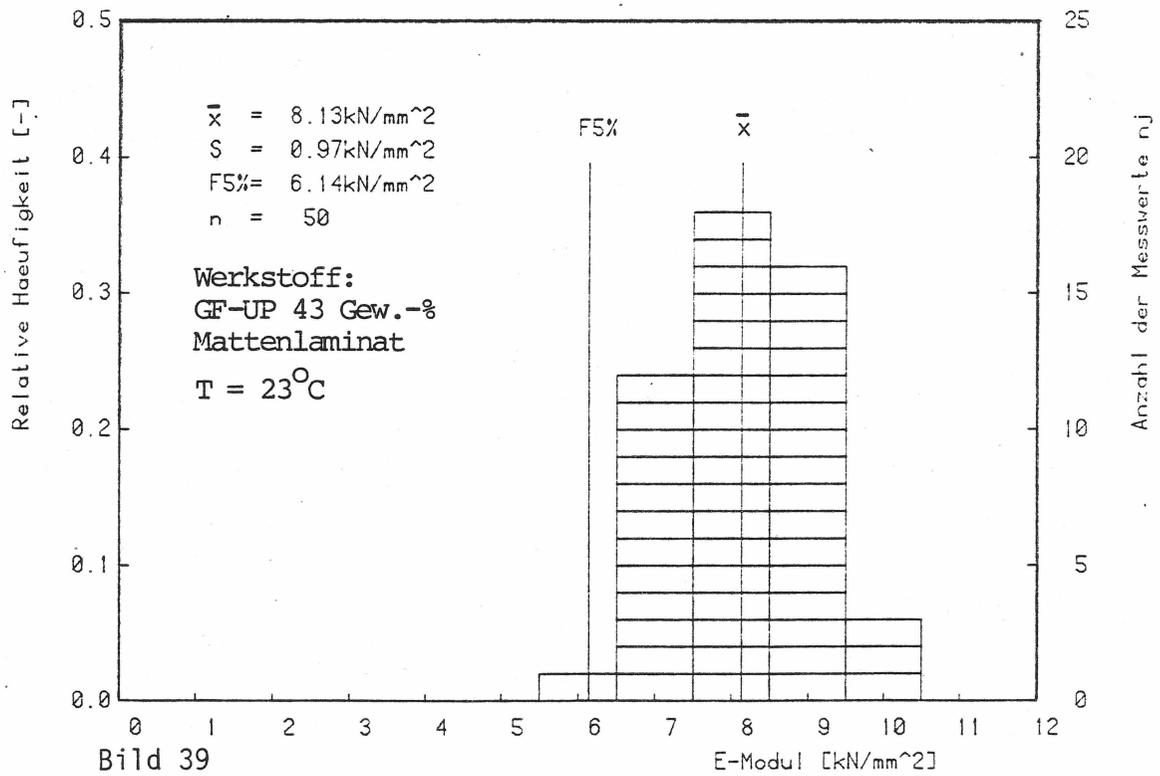
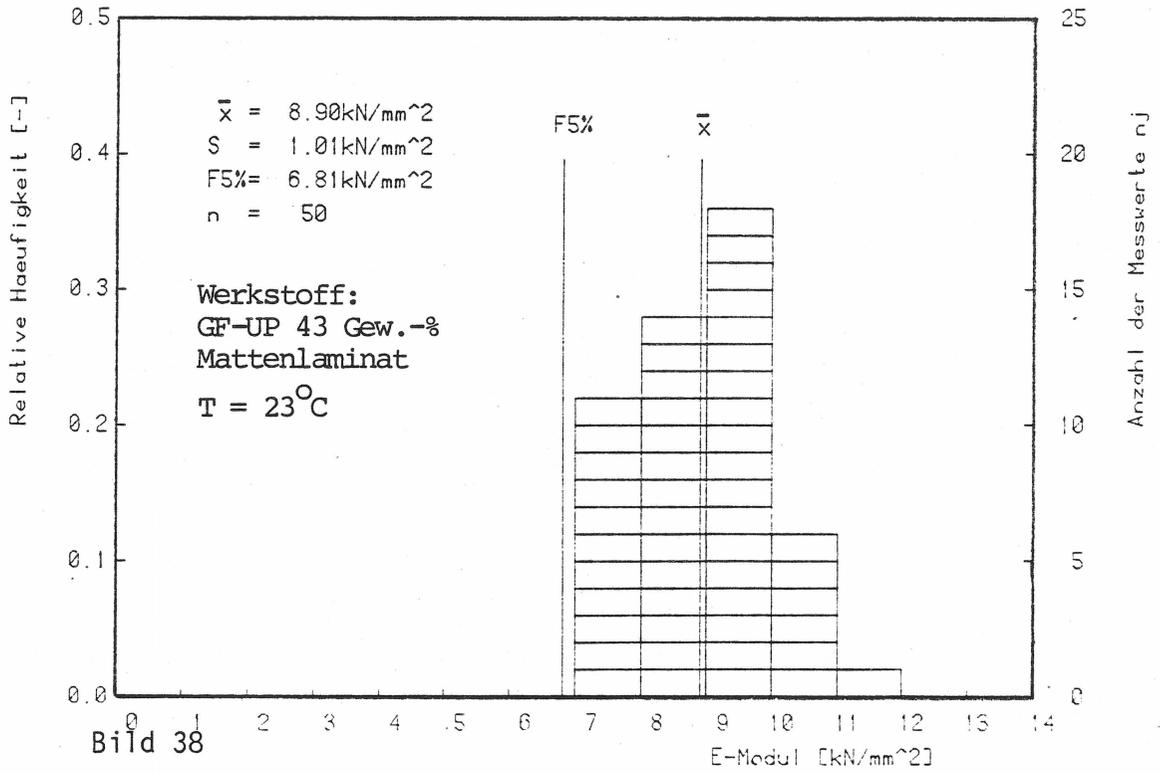
Im folgenden sind die relativen Häufigkeiten der Meßwerte unterschiedlicher mechanischer Werkstoffeigenschaften zusammengestellt. Aufgetragen sind die Zugfestigkeitswerte, Biegefestigkeitswerte und Elastizitätsmoduln.

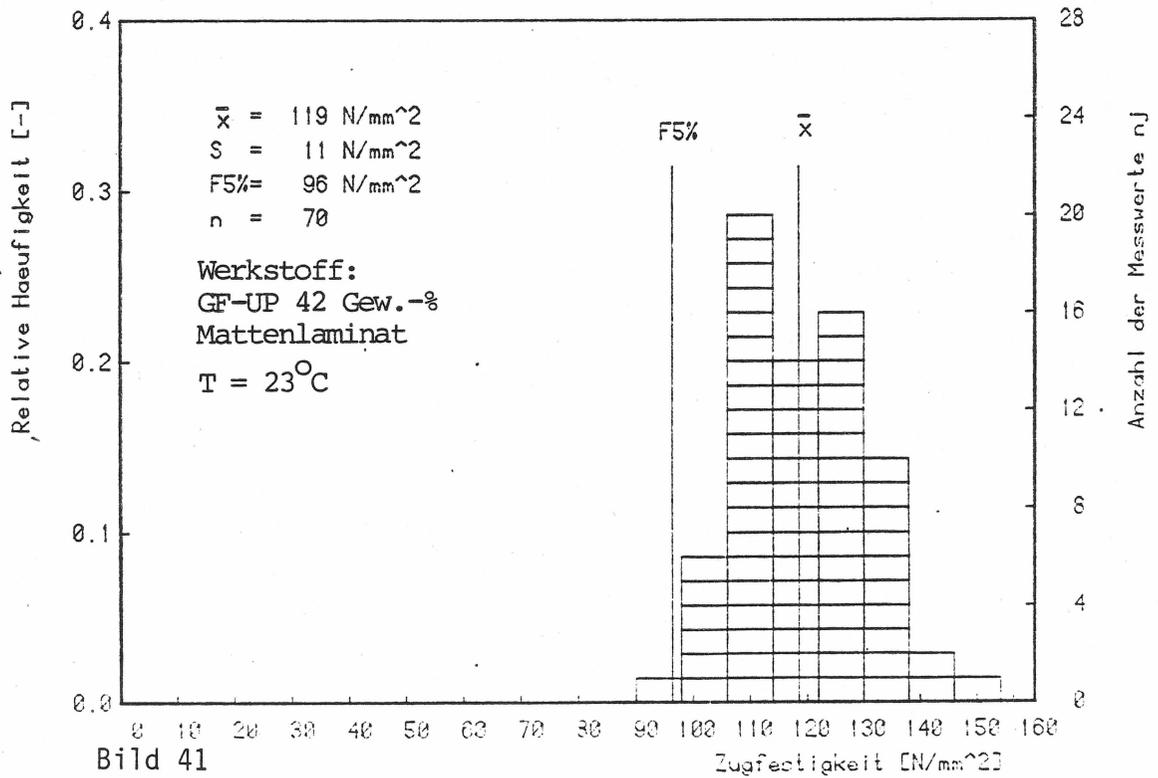
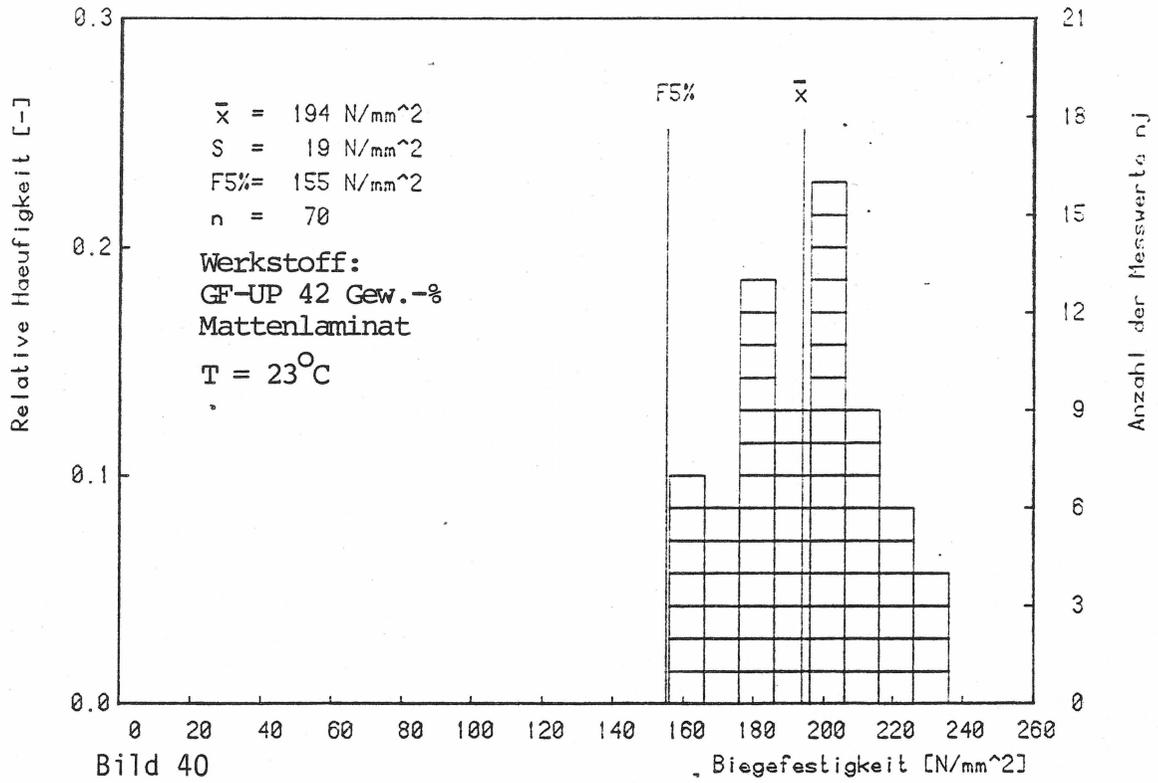
#### 8.2.1.1 Häufigkeitsverteilungen für unterschiedliche Fertigungseinflüsse

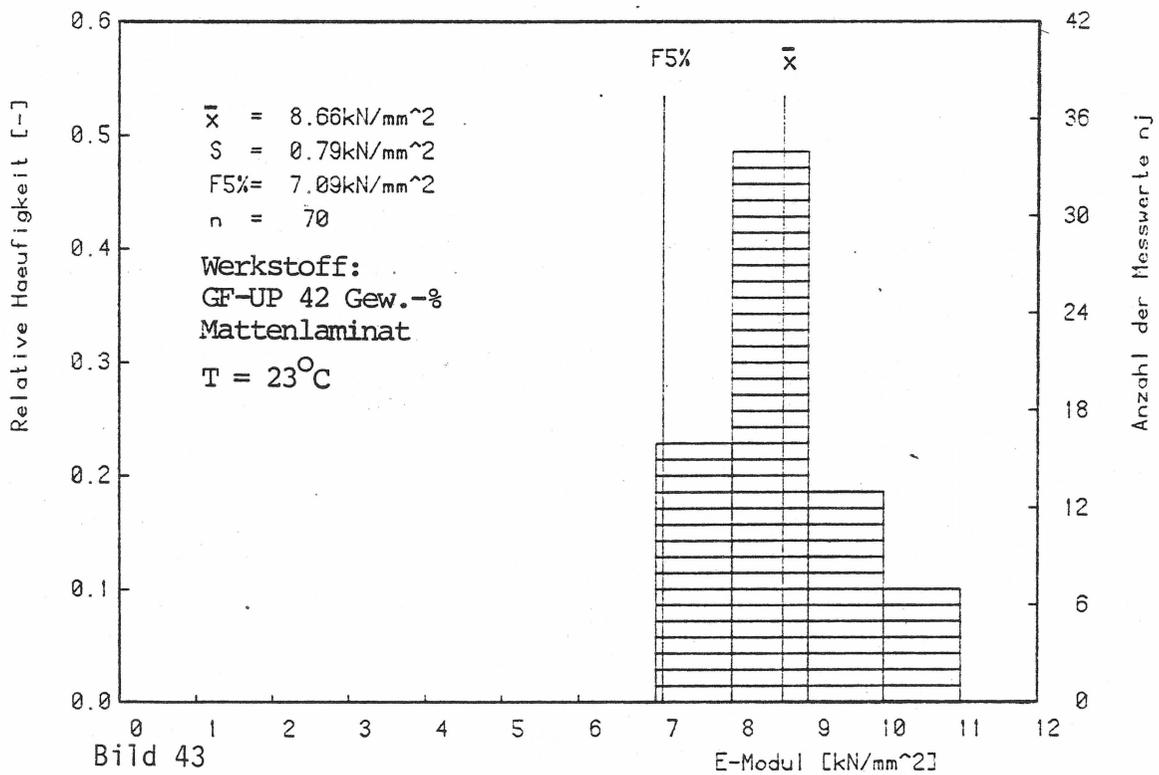
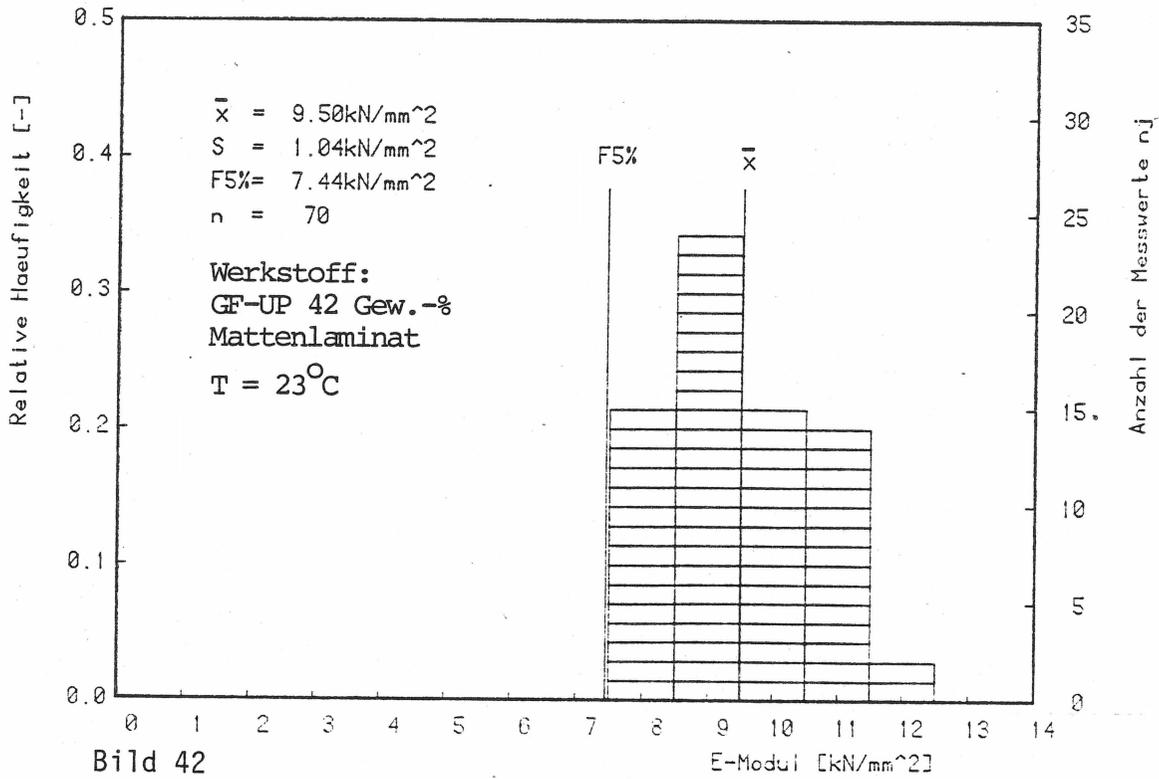
In den Bildern 36 - 75 sind die Häufigkeitsverteilungen von Meßwerten für die in Tabelle 6 aufgeführten mechanischen Eigenschaften verschiedener Laminattypen dargestellt. Für die Fälle, in denen die Meßwertverteilung von Normalverteilungsfunktionen abweichen, ist zu beachten, daß die Meßwerte von mehreren Prüfern ermittelt wurden und die Lamine teilweise von verschiedenen Herstellern stammen. Dann kann eine Überlagerung von Meßwertverteilungen stattfinden. In solchen Fällen müßte man die einzelnen Meßwerte jeder Prüfer auseinanderdividieren. Damit wäre aber keine Vergleichsmöglichkeit mehr gewährleistet.

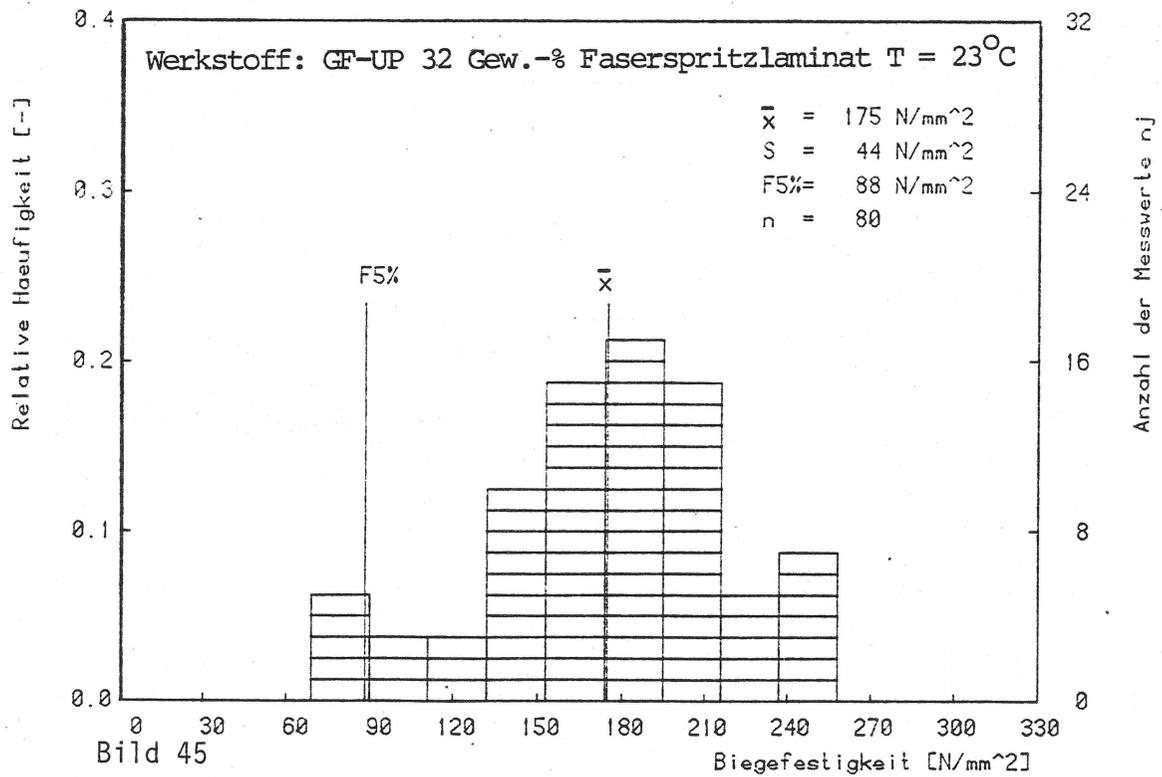
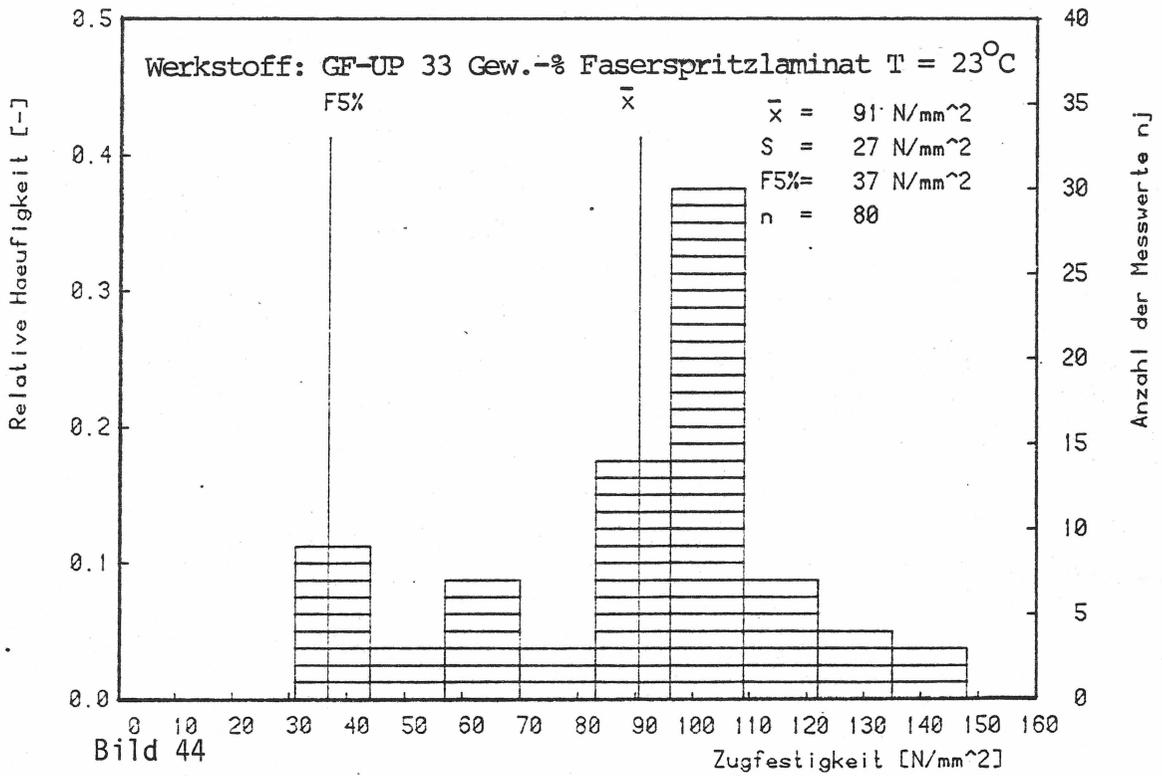
- Bild 36-39: Mattenlaminat (Warm-Naß-Preßverfahren)  
Verschiedene Prüfer aus Laboratorien und Betrieben prüfen je ein nach gleichen Angaben gefertigtes Laminat eines anderen Herstellers.
- Bild 40-43: Mattenlaminat (Warm-Naß-Preßverfahren)  
Ein Prüfer prüft von jedem Labor und Betrieb ein nach gleichen Angaben gefertigtes Laminat.
- Bild 44-51: Faserspritzlaminat  
Verschiedene Prüfer aus Laboratorien und Betrieben prüfen je ein nach gleichen Angaben gefertigtes Laminat eines anderen Herstellers.
- Bild 52-57: Mattenlaminat (Handlaminat)  
Verschiedene Prüfer prüfen das gleiche Laminat eines Herstellers.
- Bild 58-63: Mattenlaminat (Handlaminat)  
Verschiedene Prüfer aus Laboratorien und Betrieben prüfen je ein nach gleichen Angaben gefertigtes Laminat eines anderen Herstellers.
- Bild 64-66: Mattenlaminat (Handlaminat)  
Ein Prüfer prüft von jedem Labor und Betrieb ein nach gleichen Angaben gefertigtes Laminat.
- Bild 67-68: Mischlaminat (Handlaminat)  
Ein Prüfer prüft von jedem Labor und Betrieb ein nach gleichen Angaben gefertigtes Laminat.
- Bild 69-75: Mischlaminat (Handlaminat)  
Verschiedene Prüfer aus Laboratorium und Betrieb prüfen je ein nach gleichen Angaben gefertigtes Laminat eines anderen Herstellers.

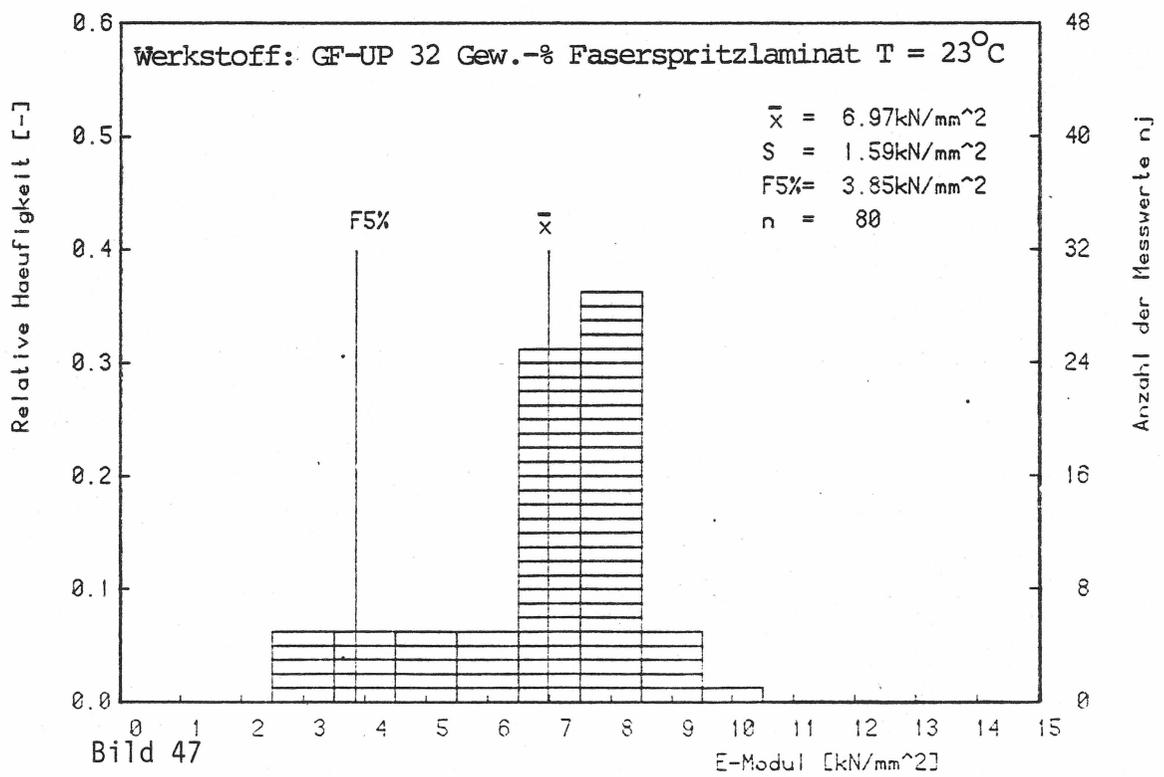
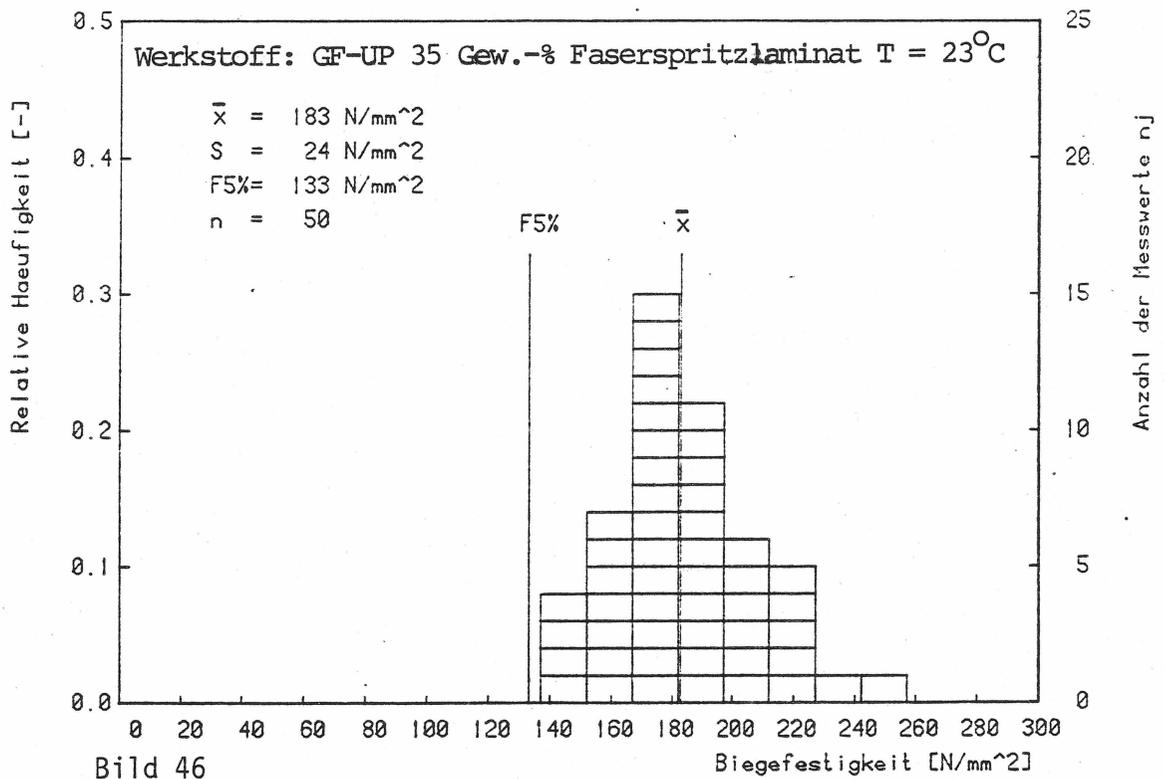


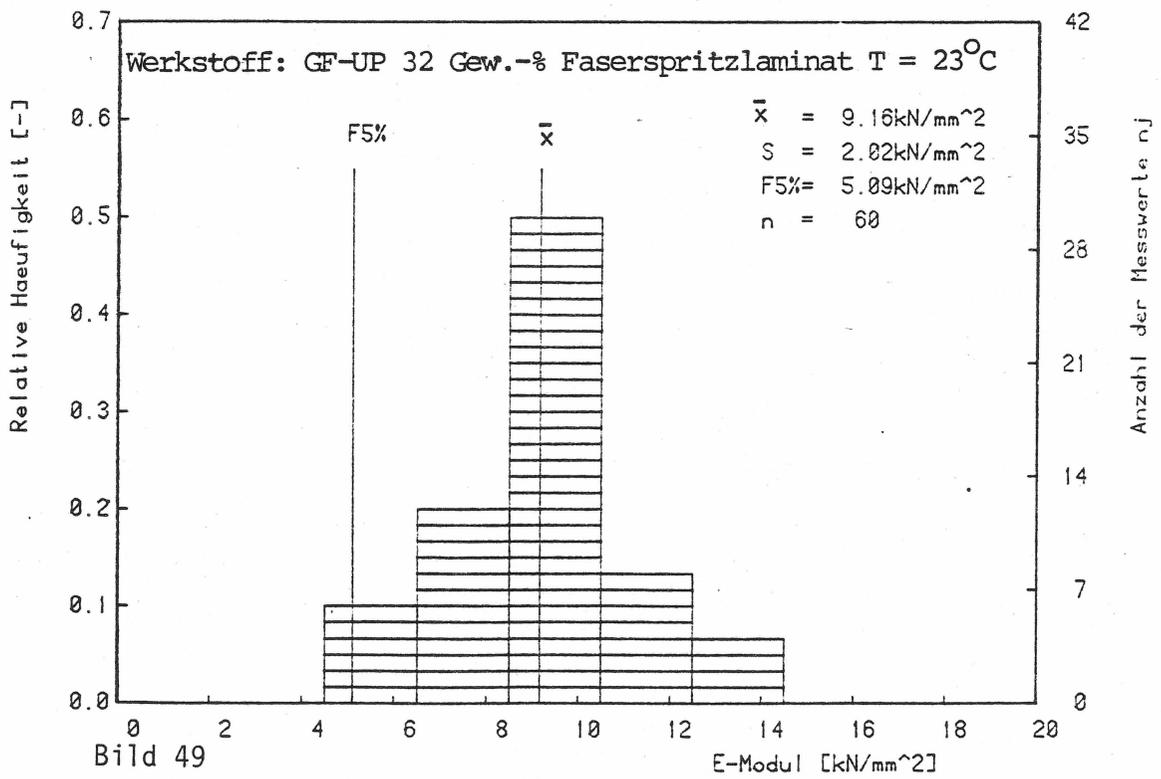
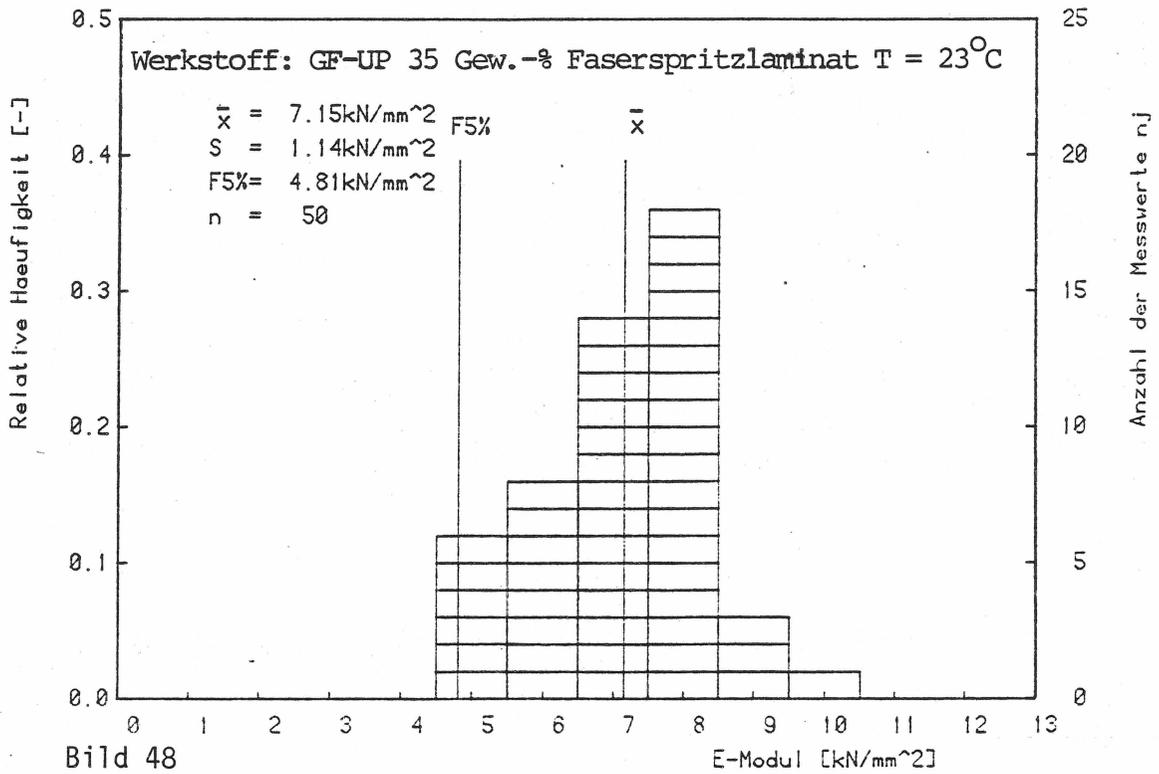


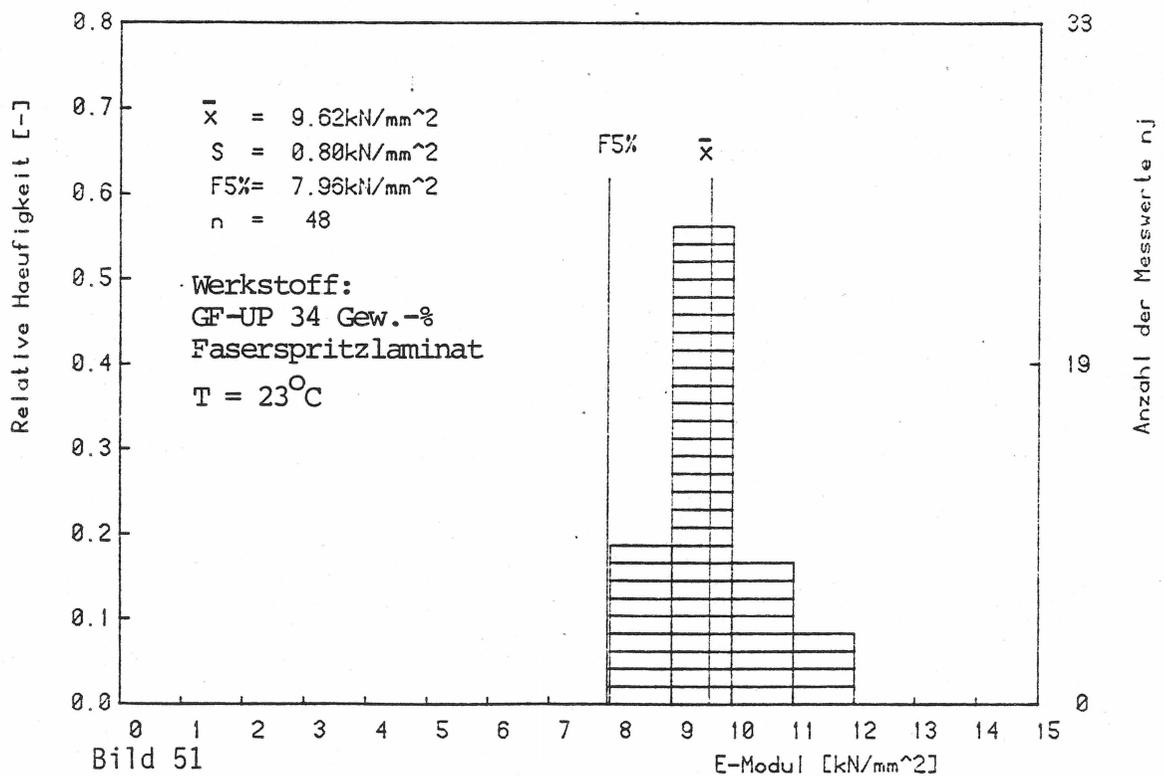
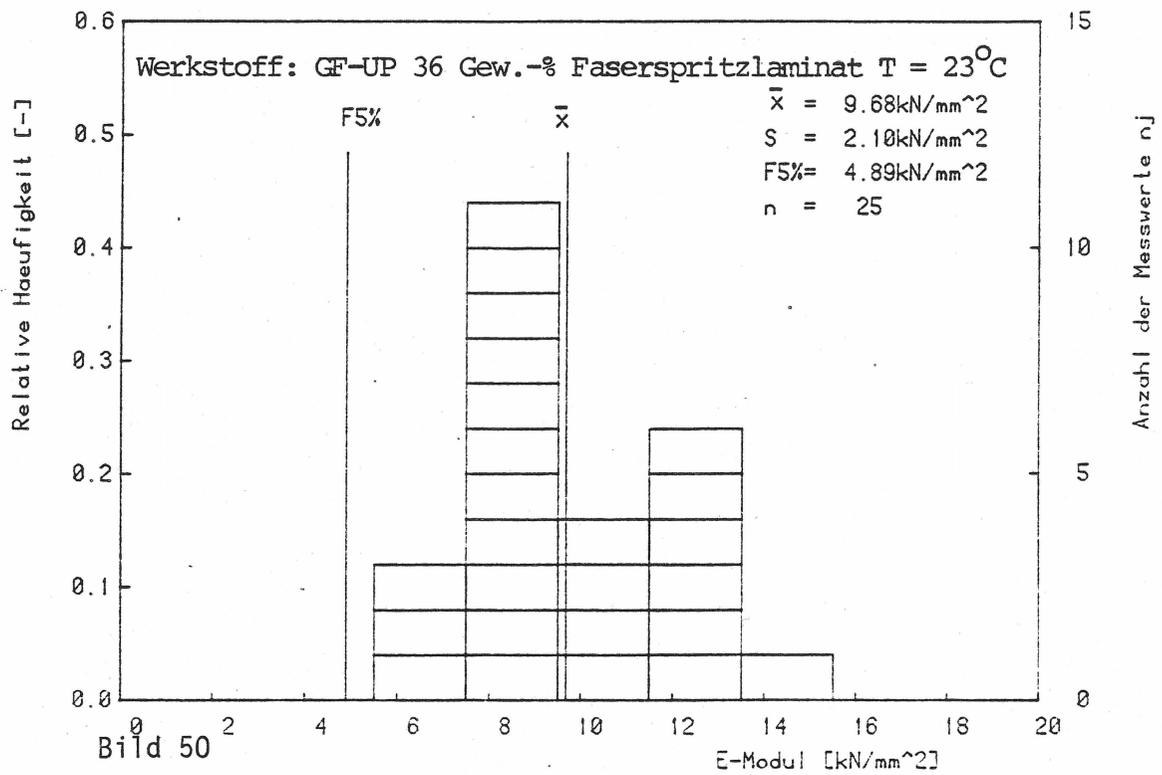


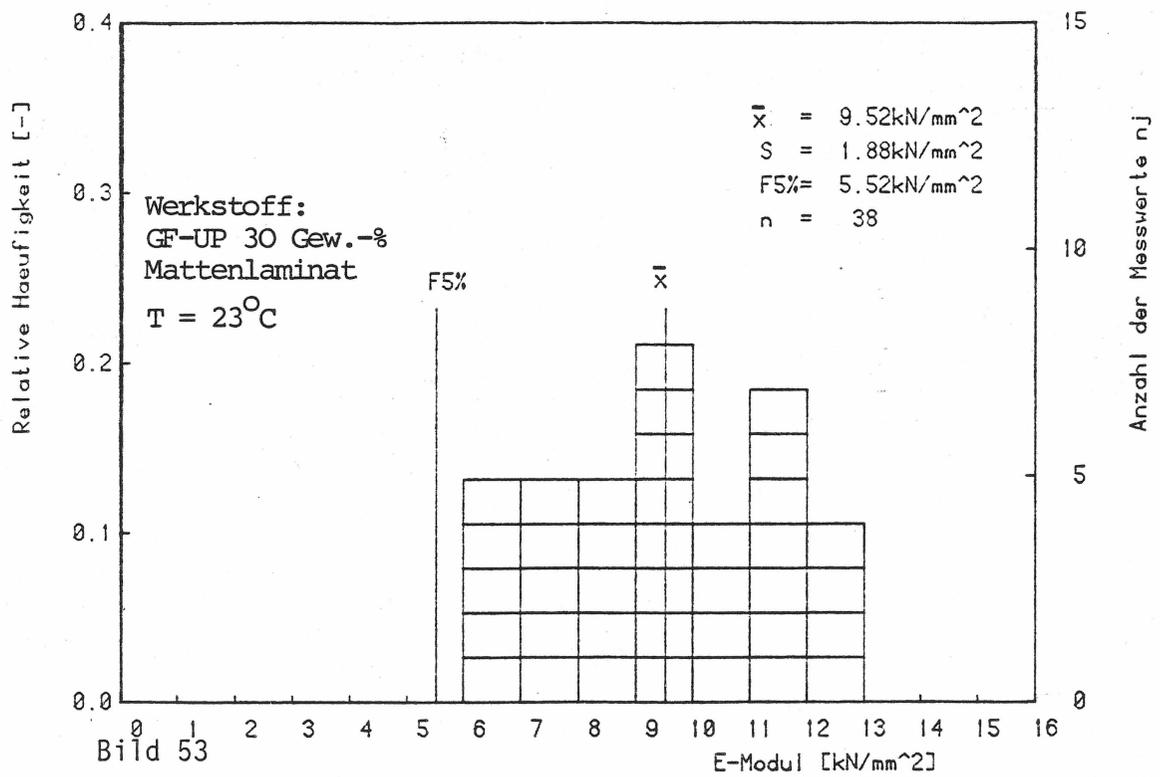
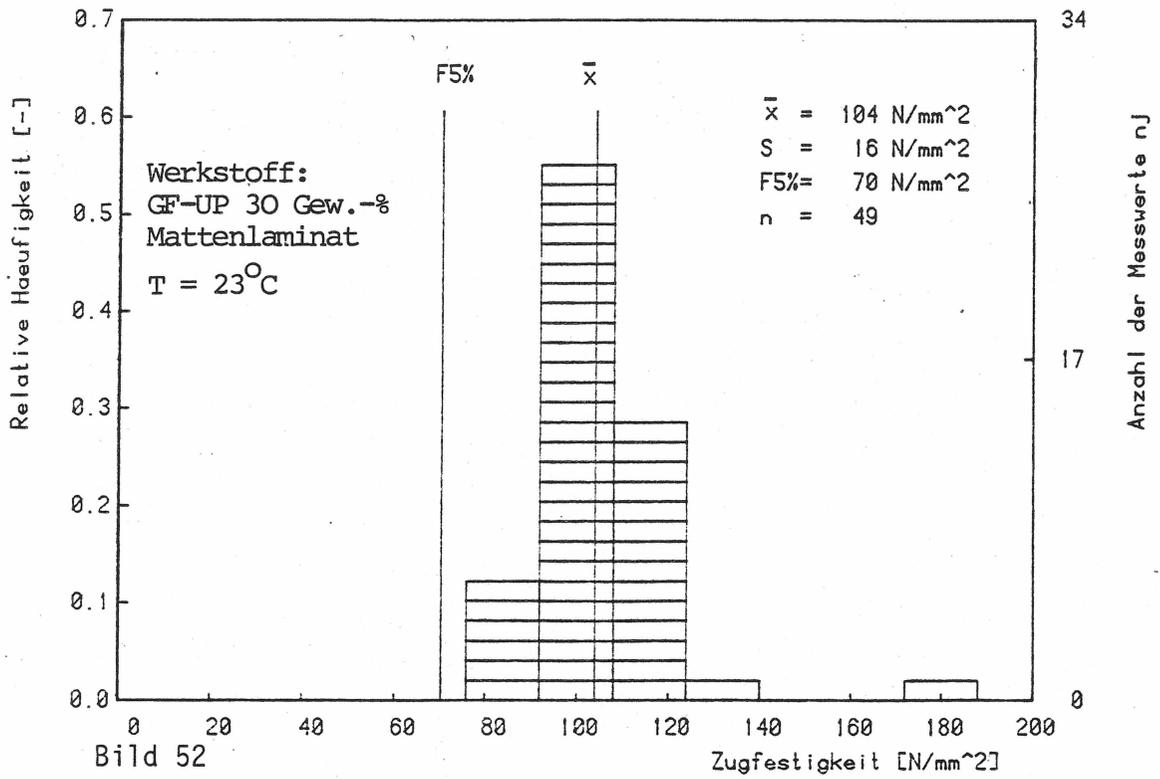


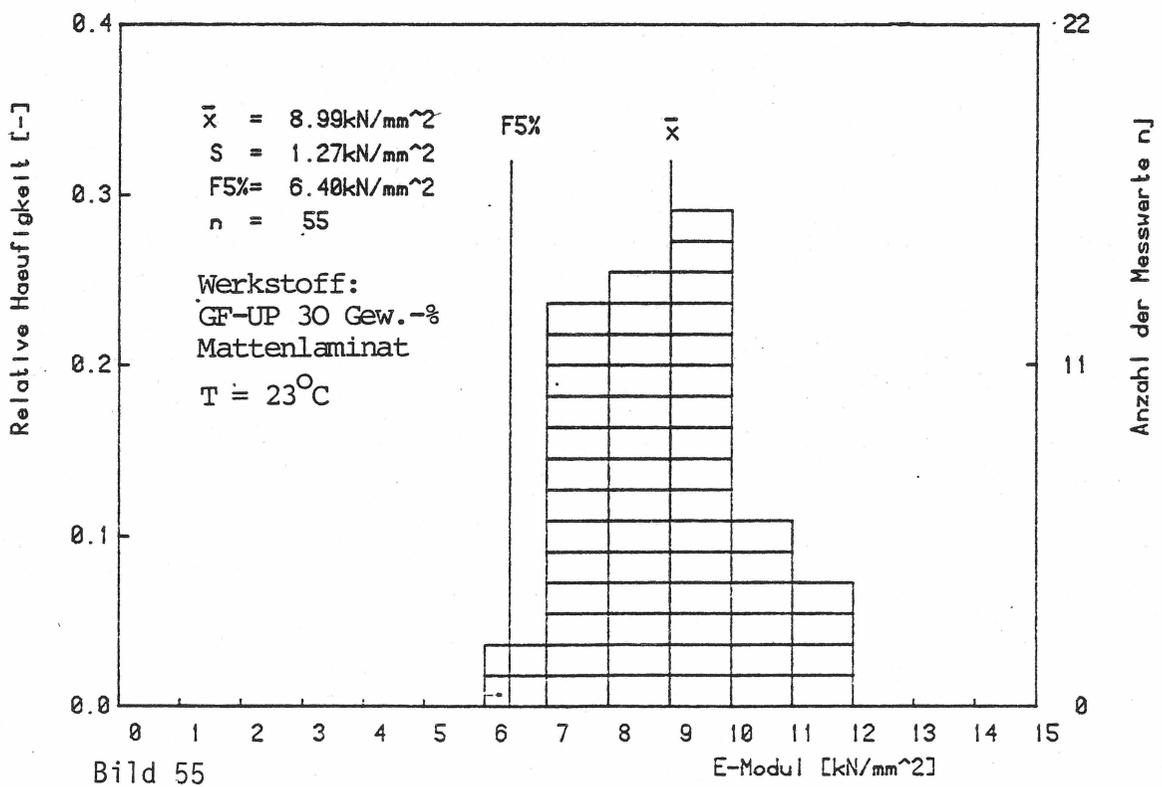
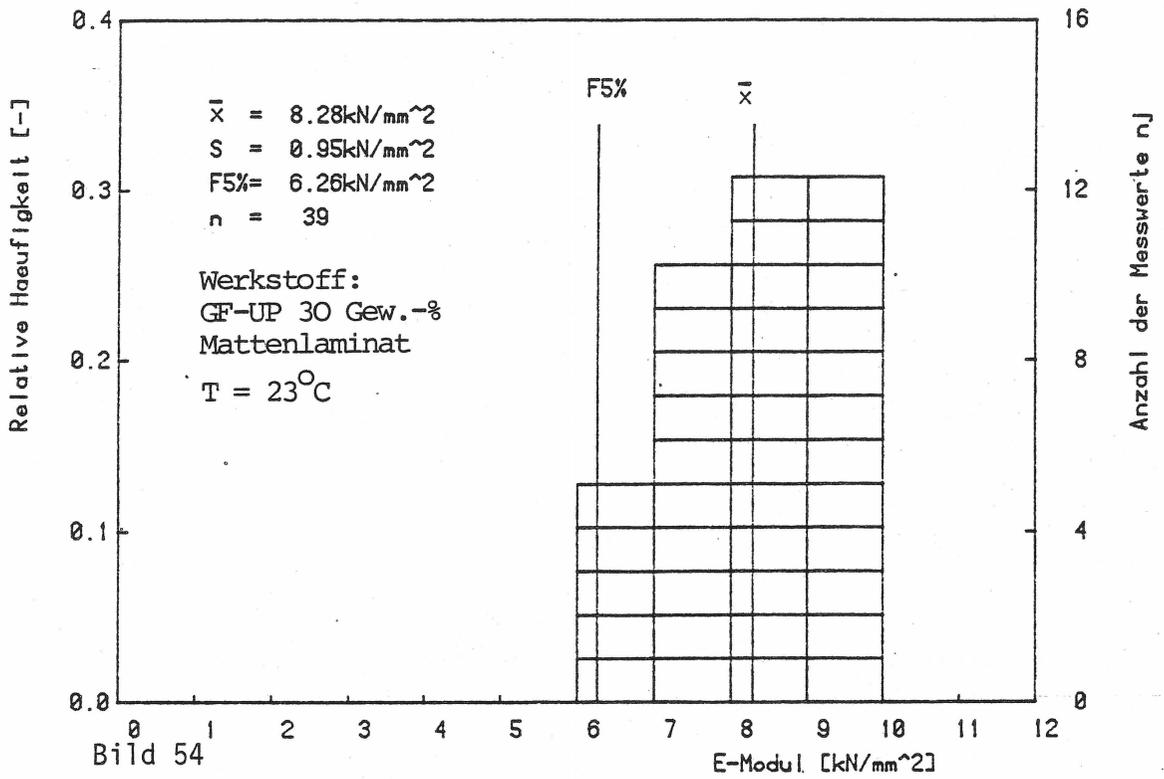


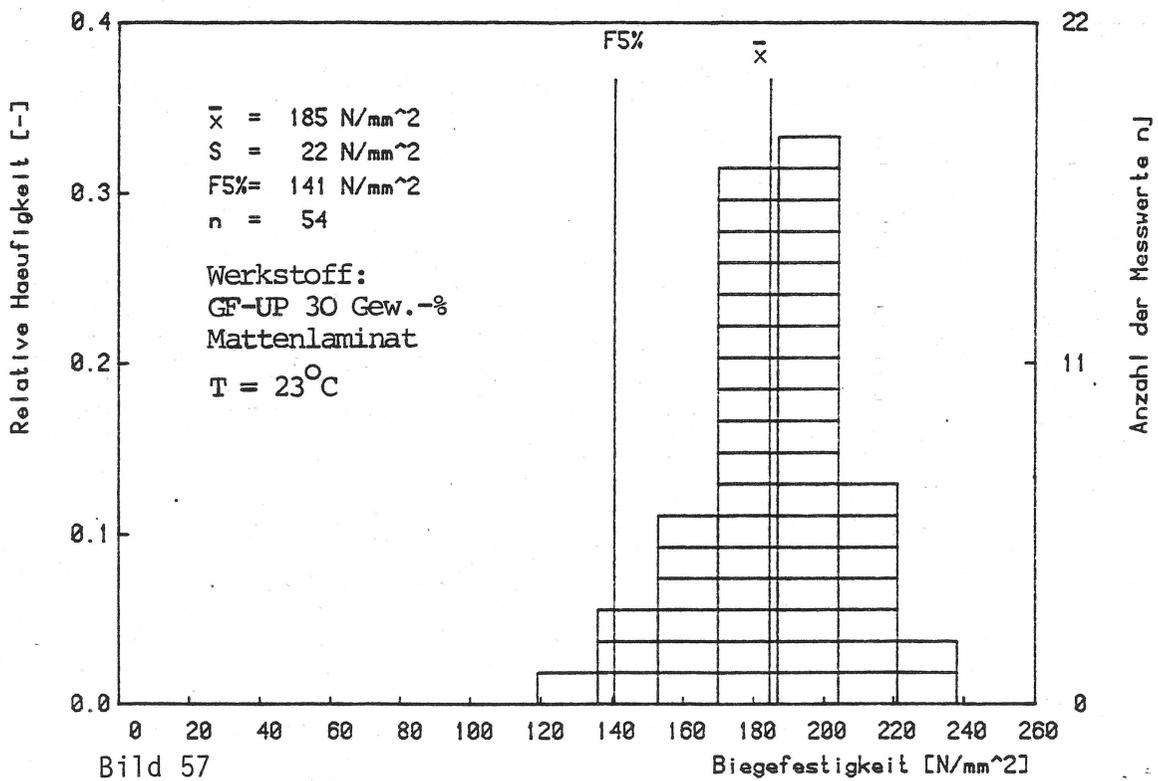
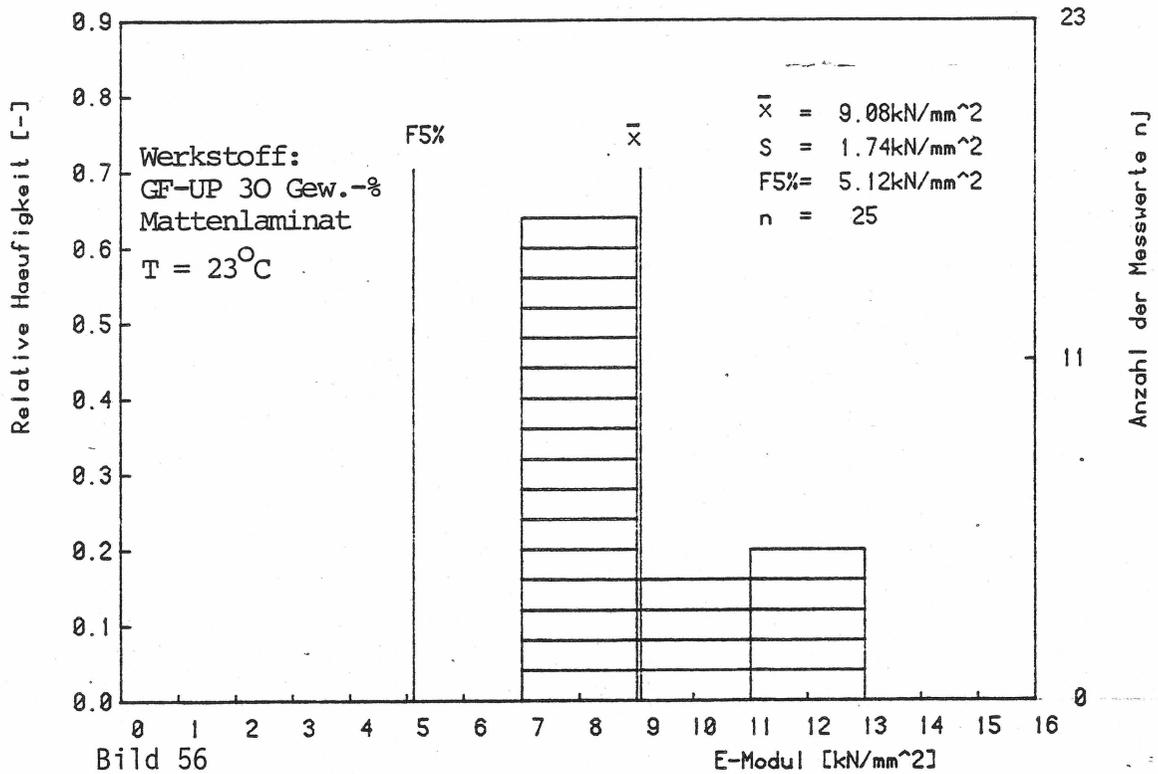


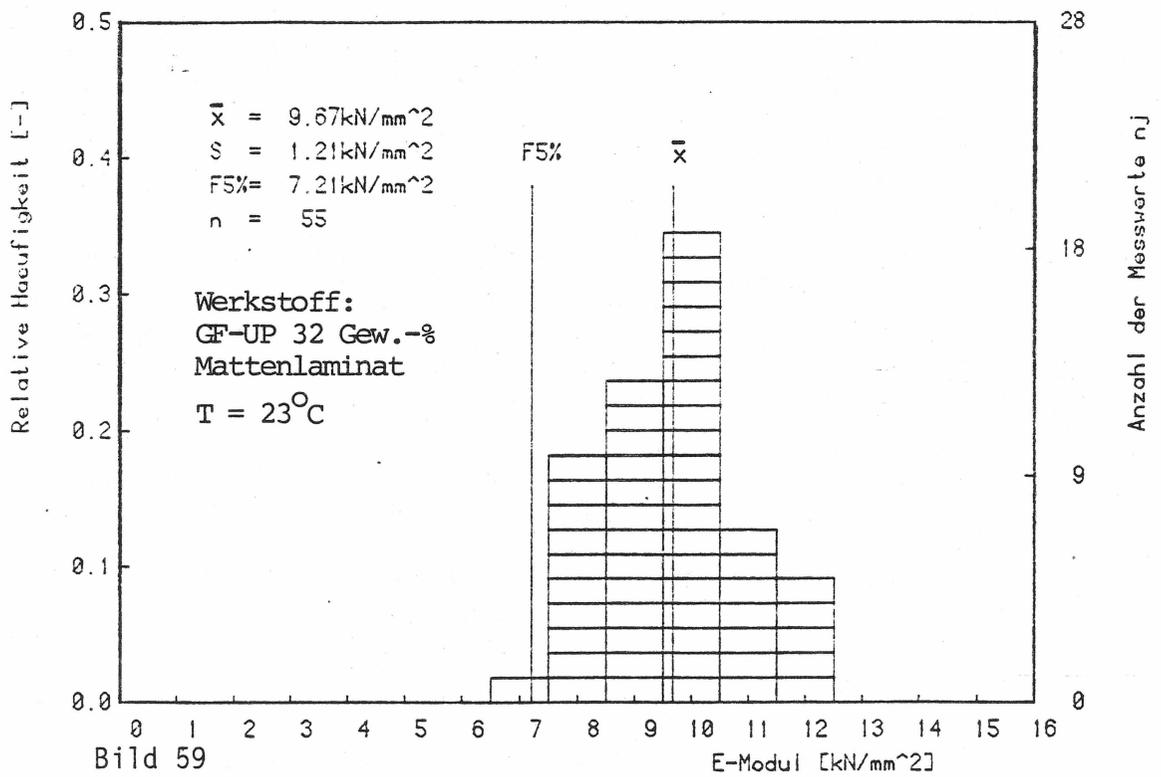
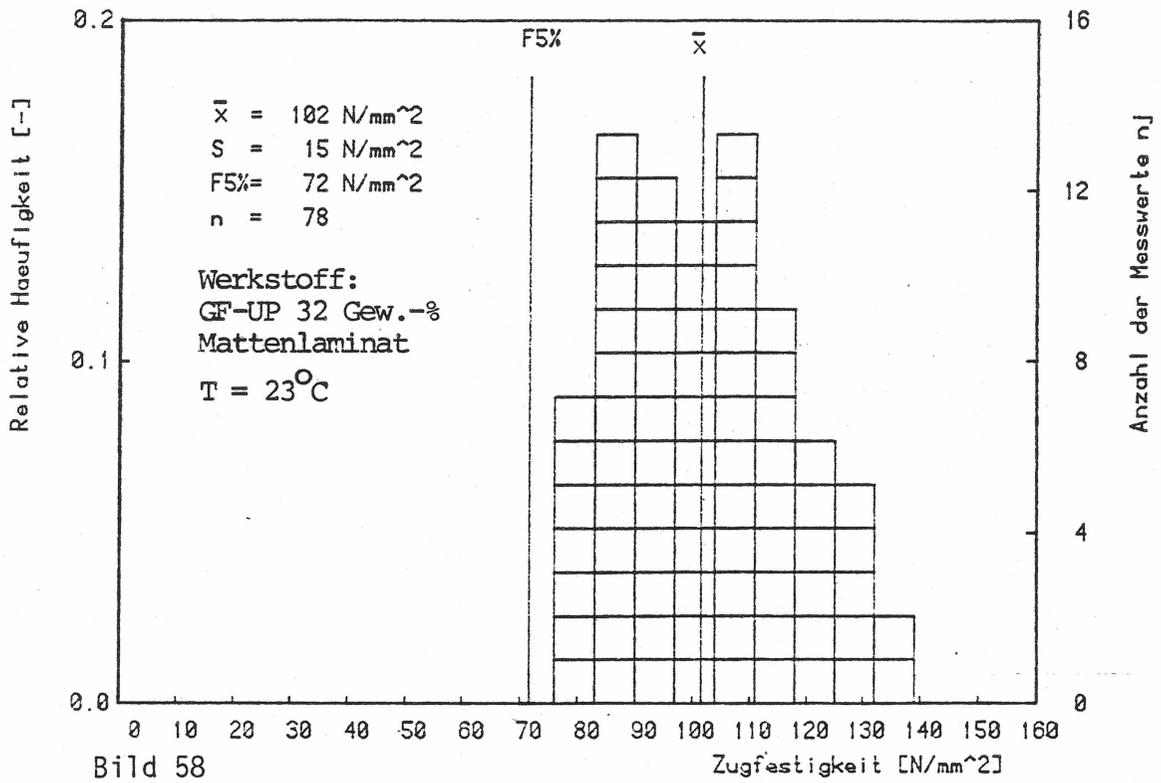


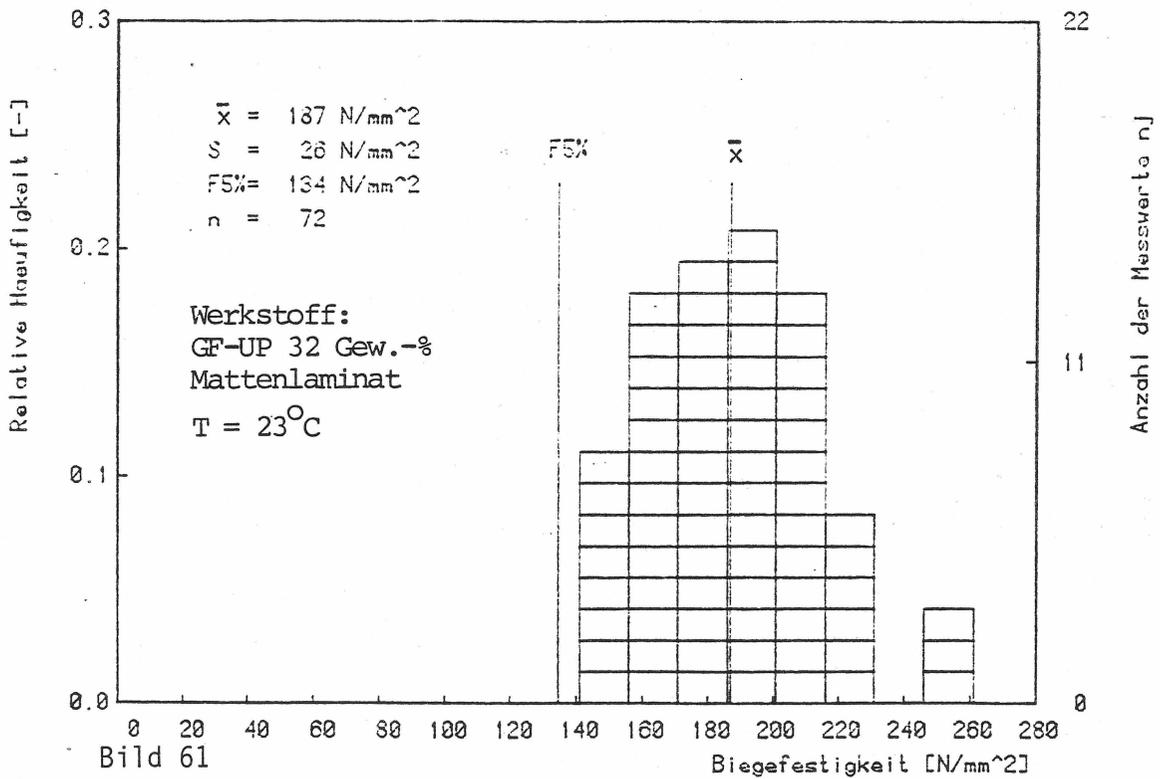
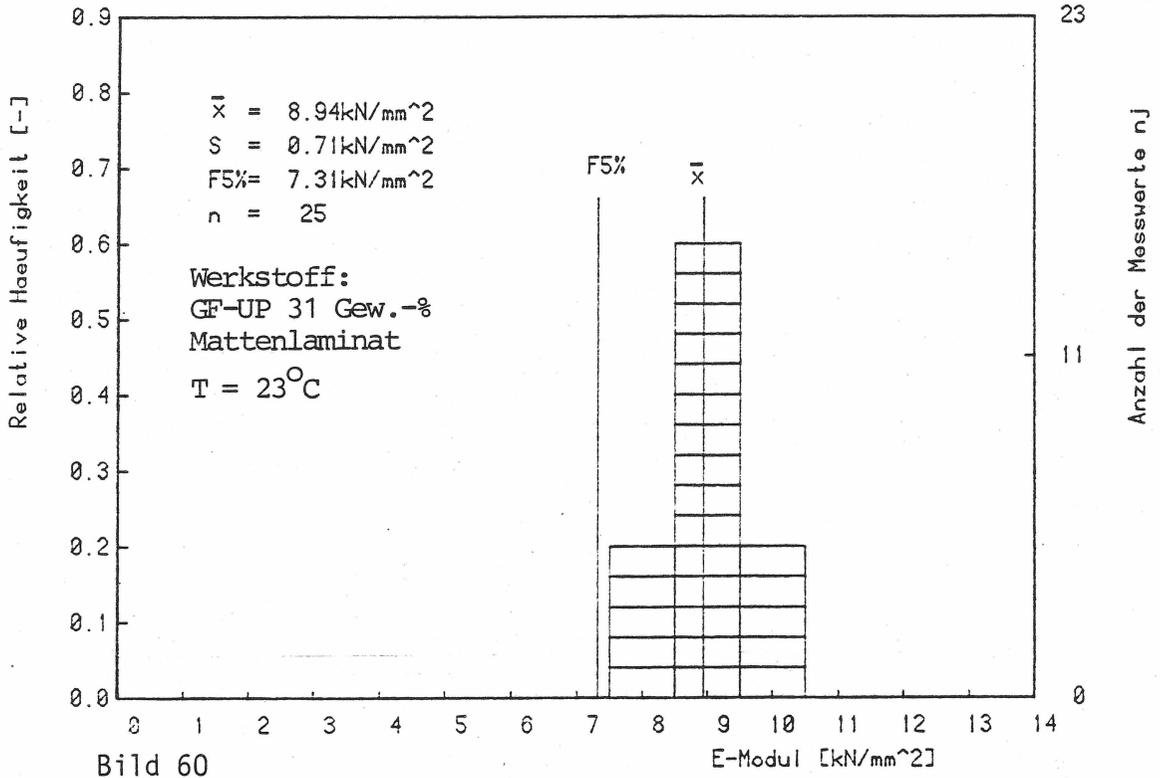


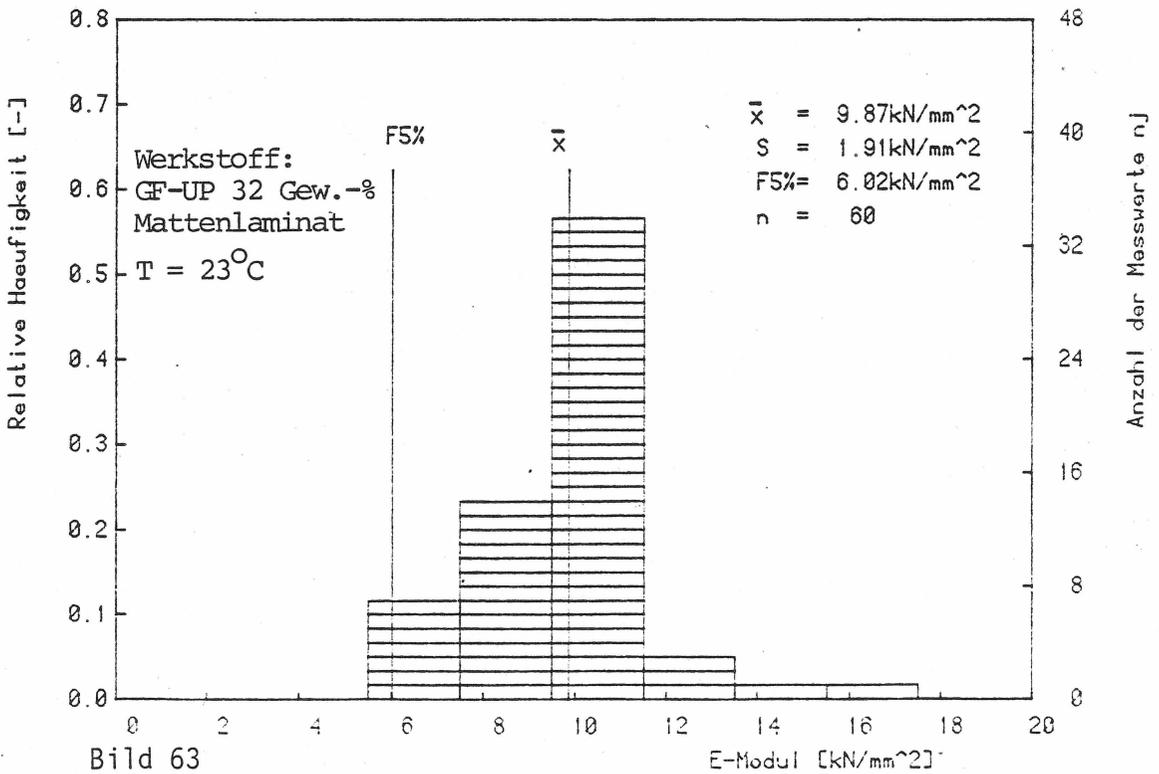
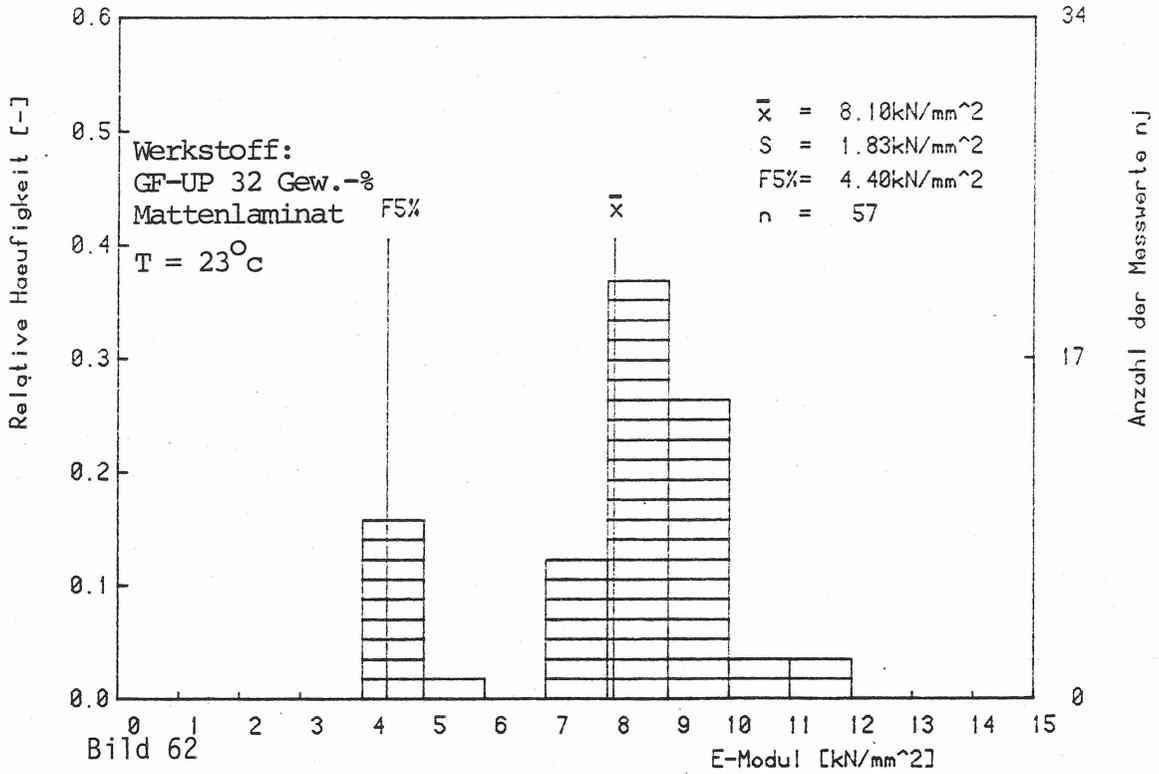


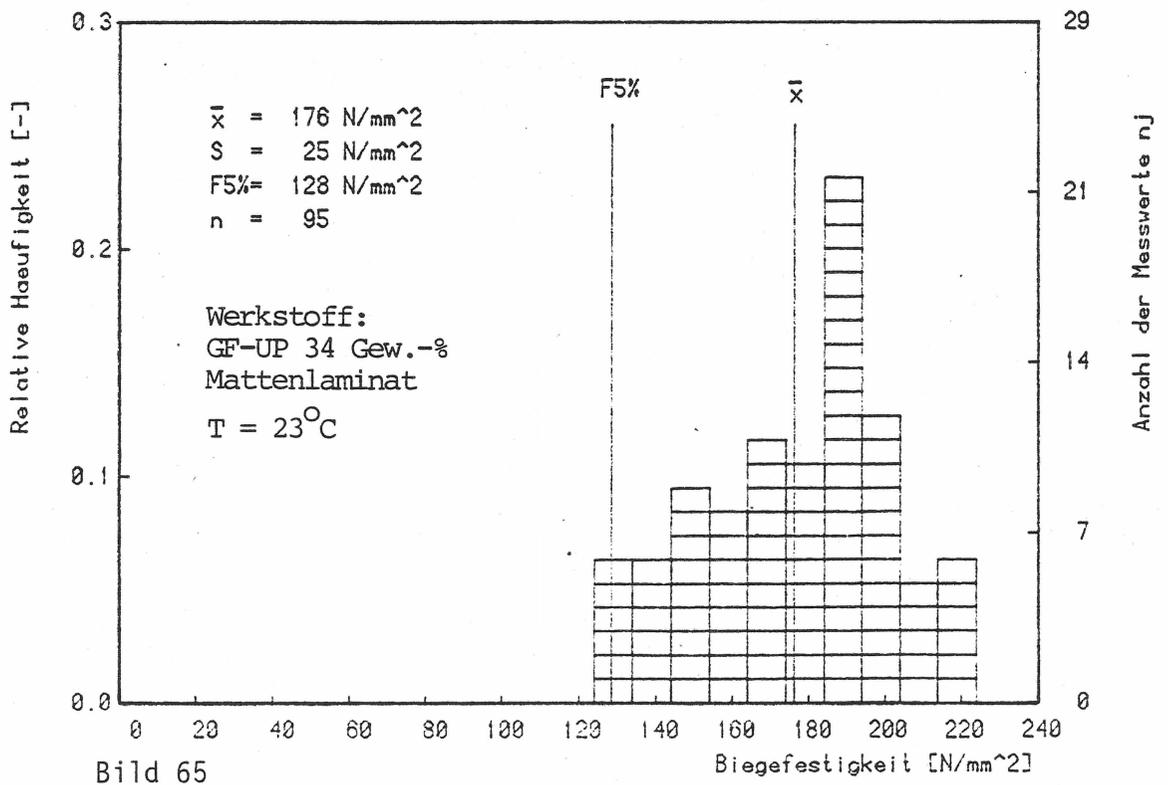
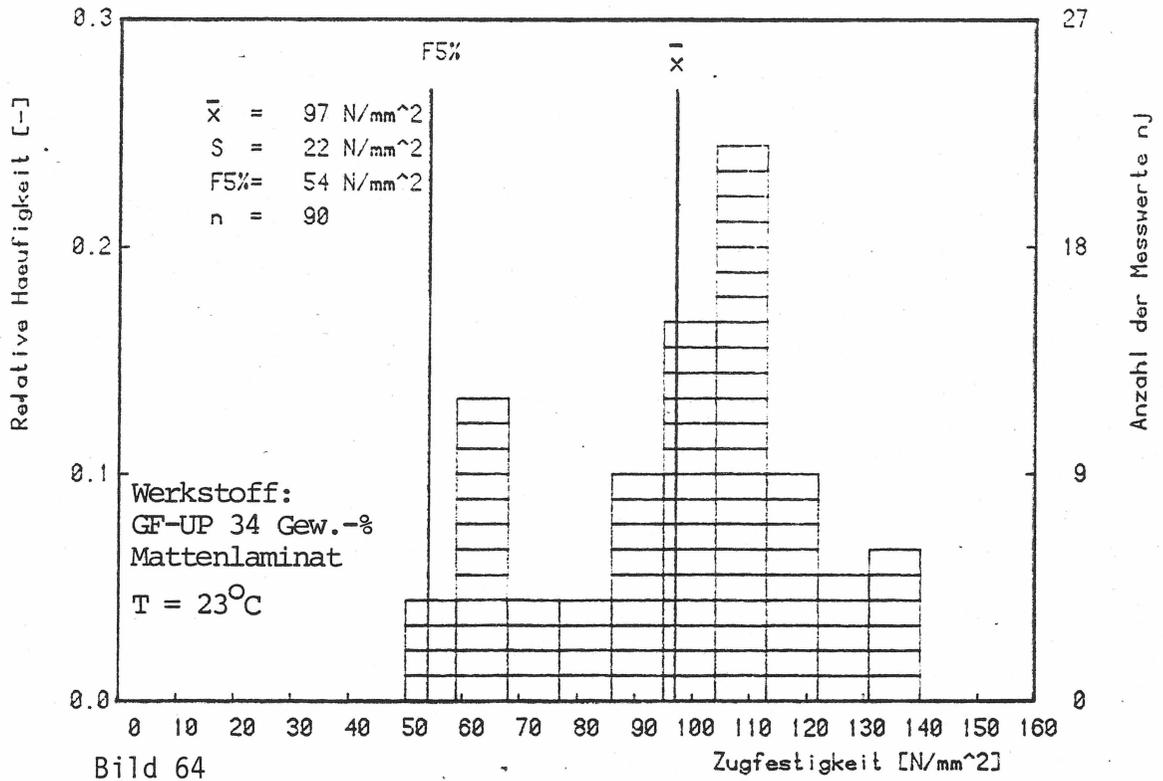


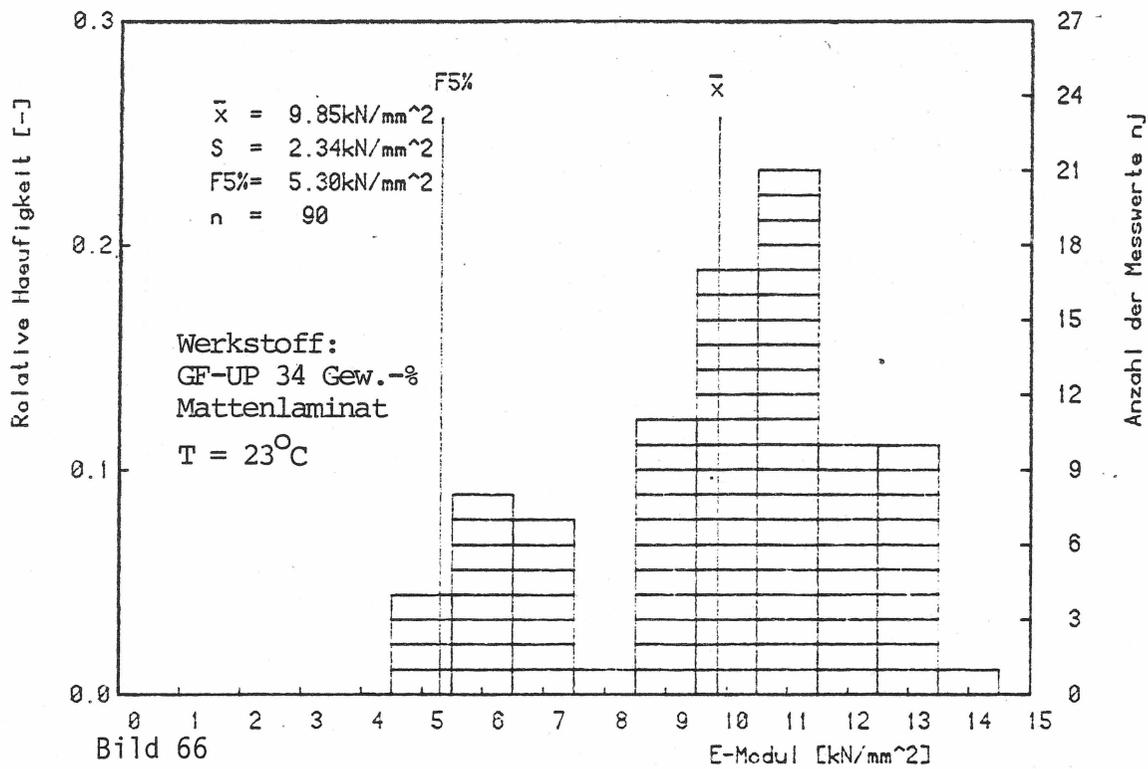


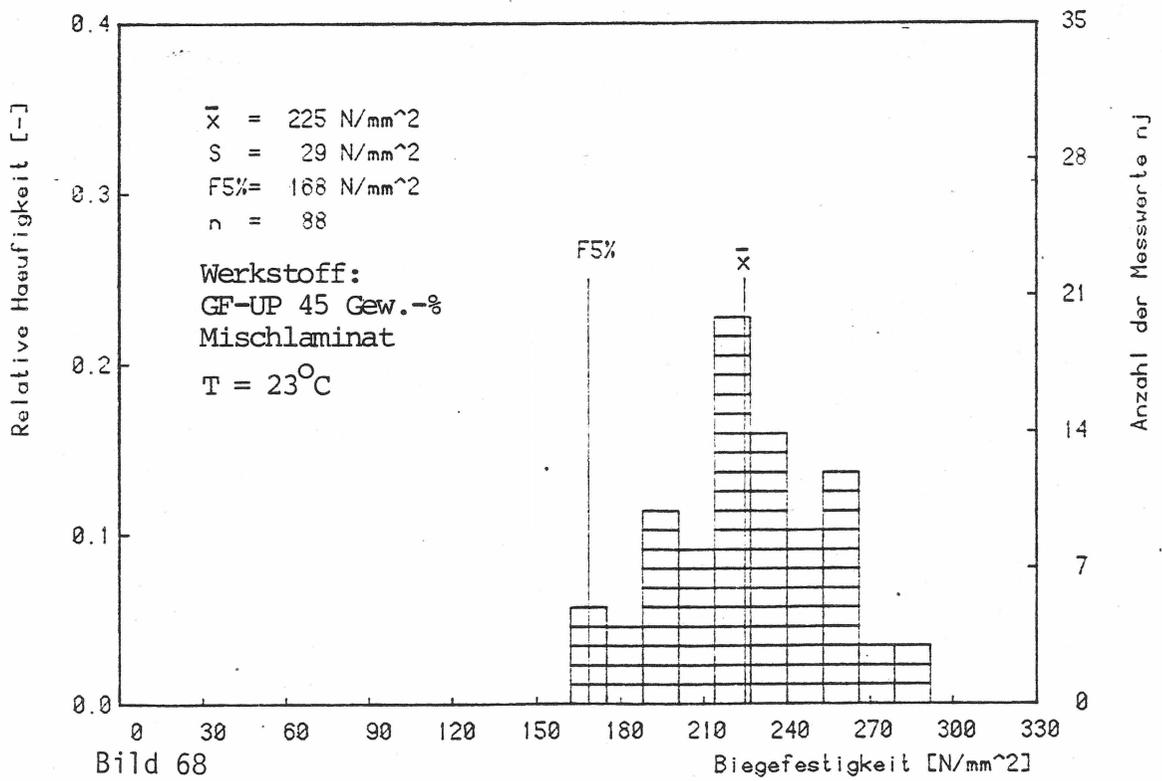
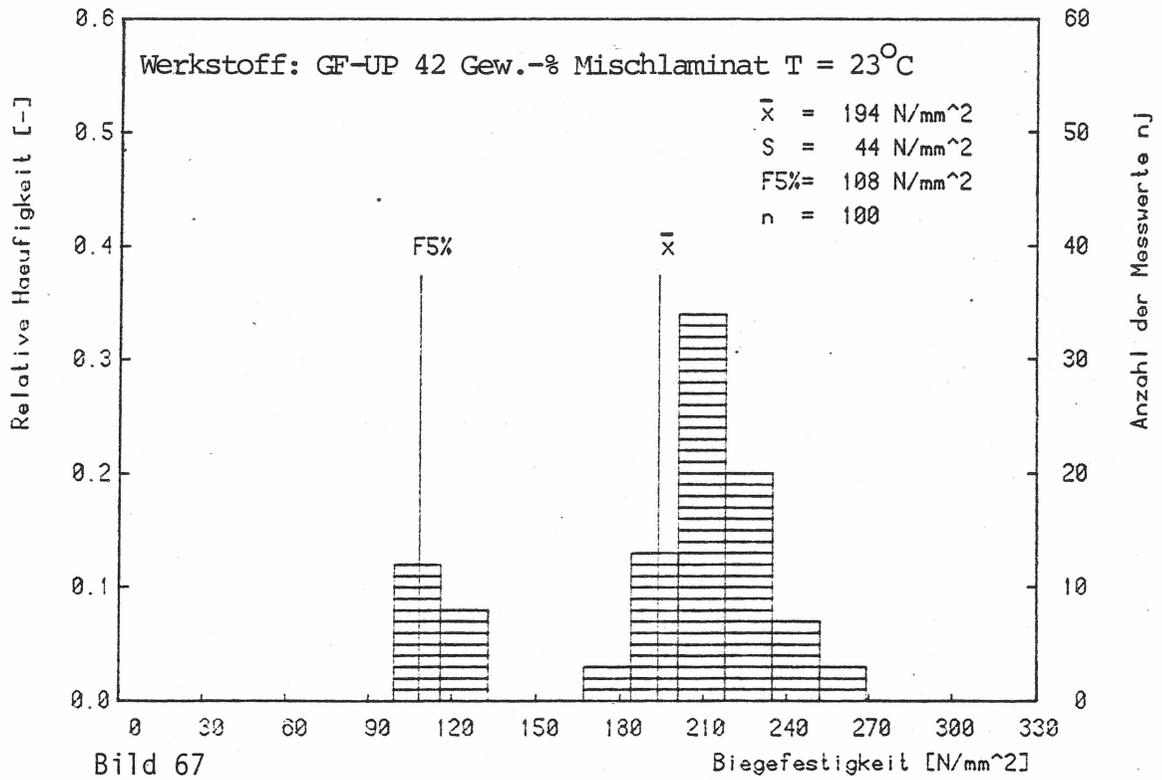


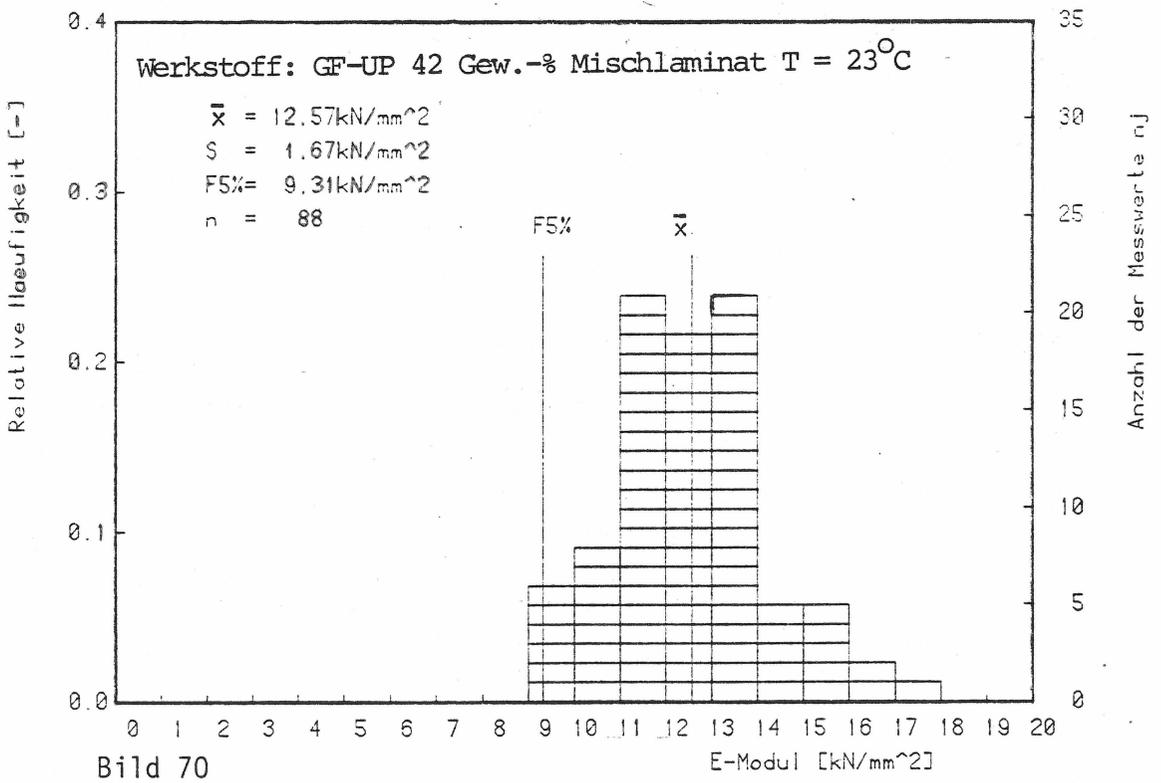
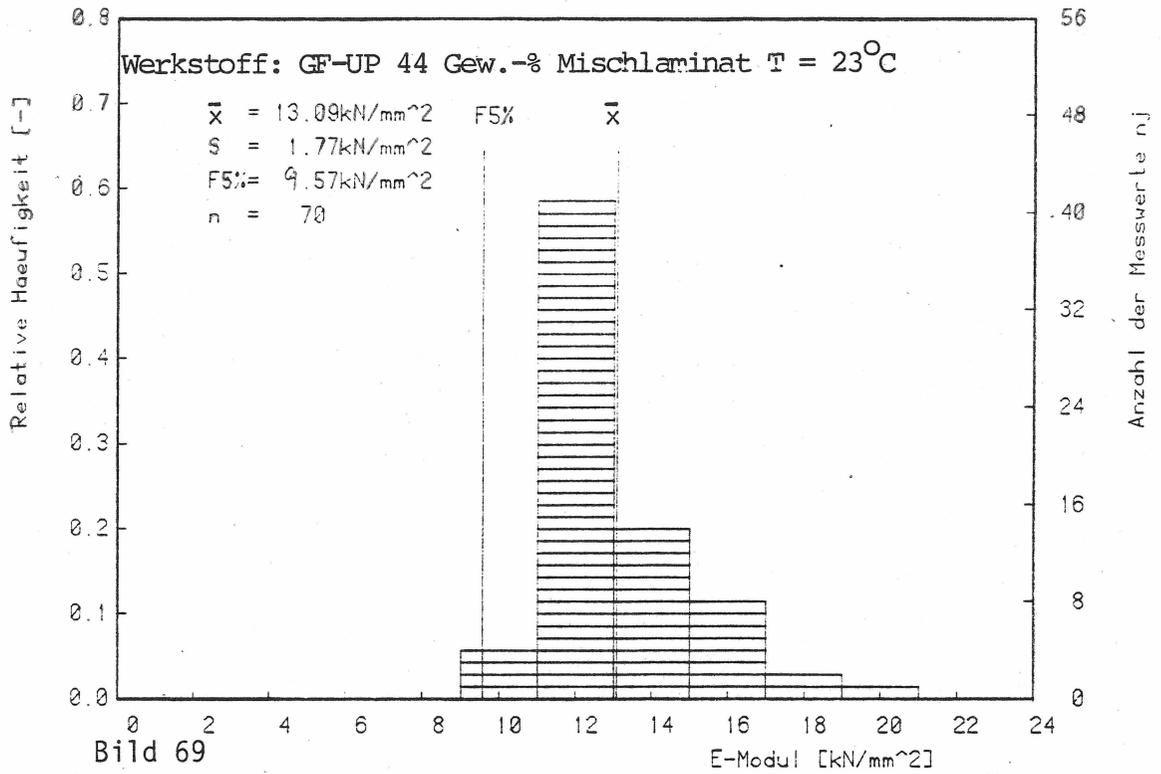












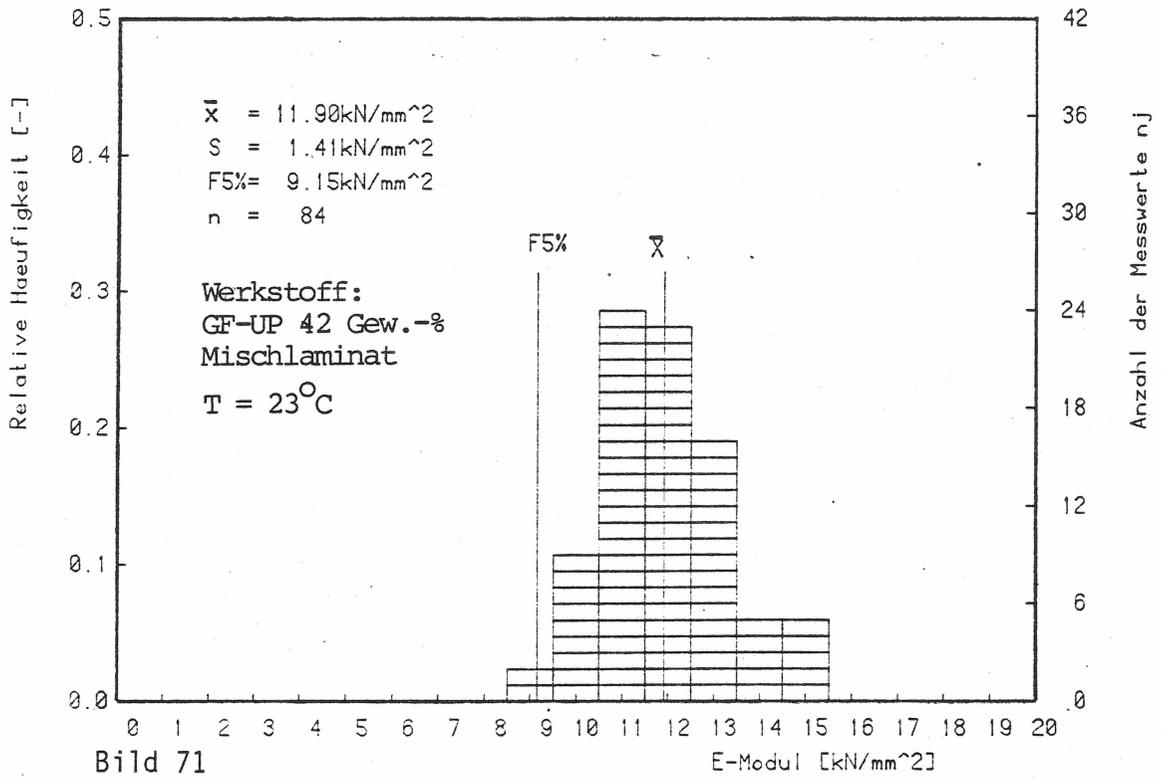


Bild 71

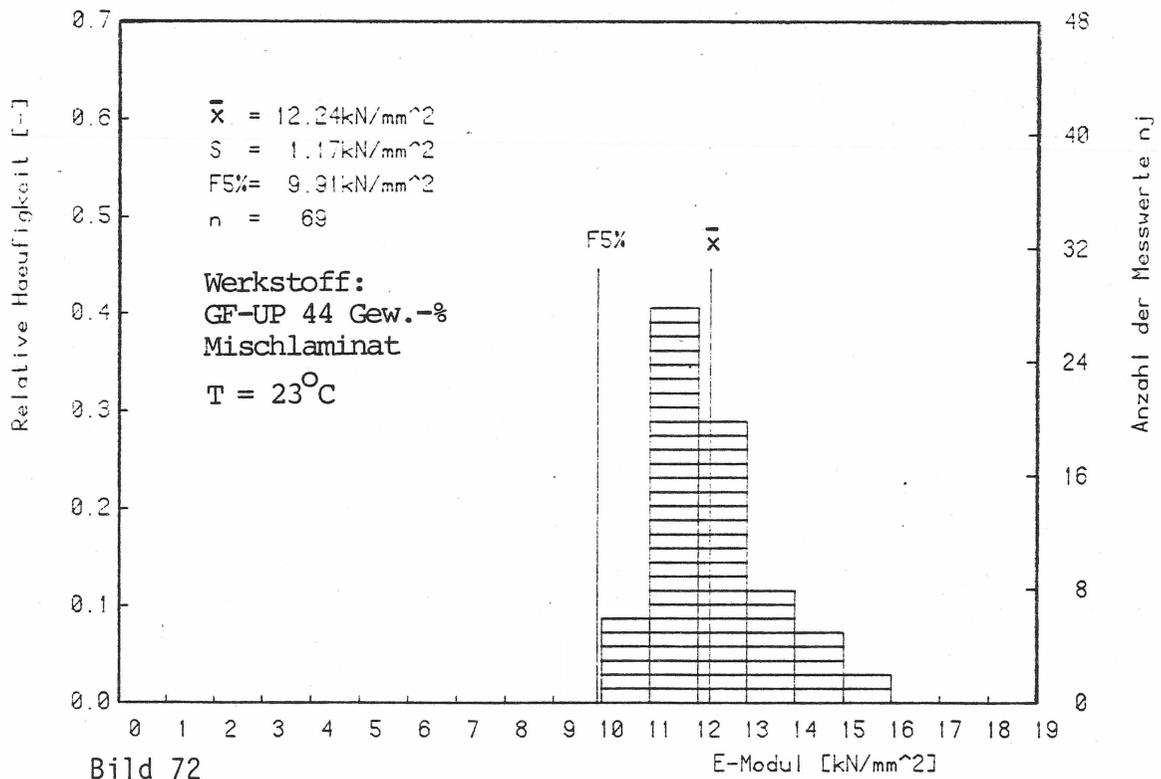
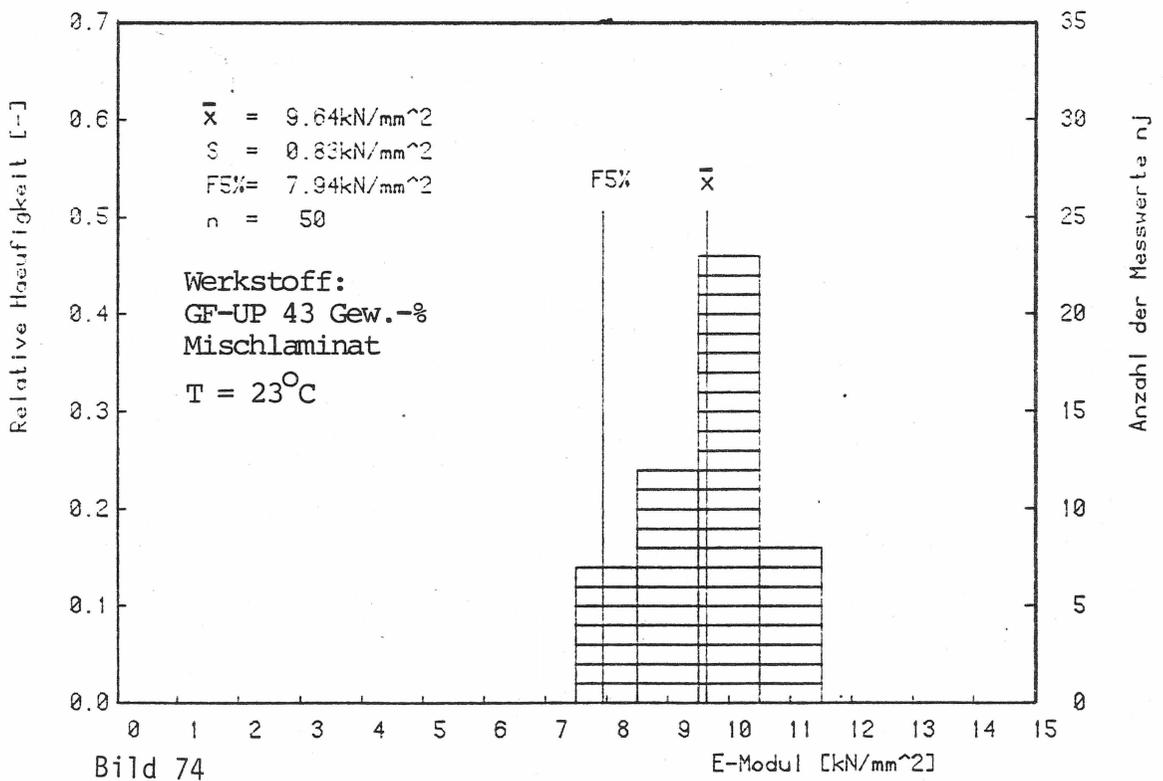
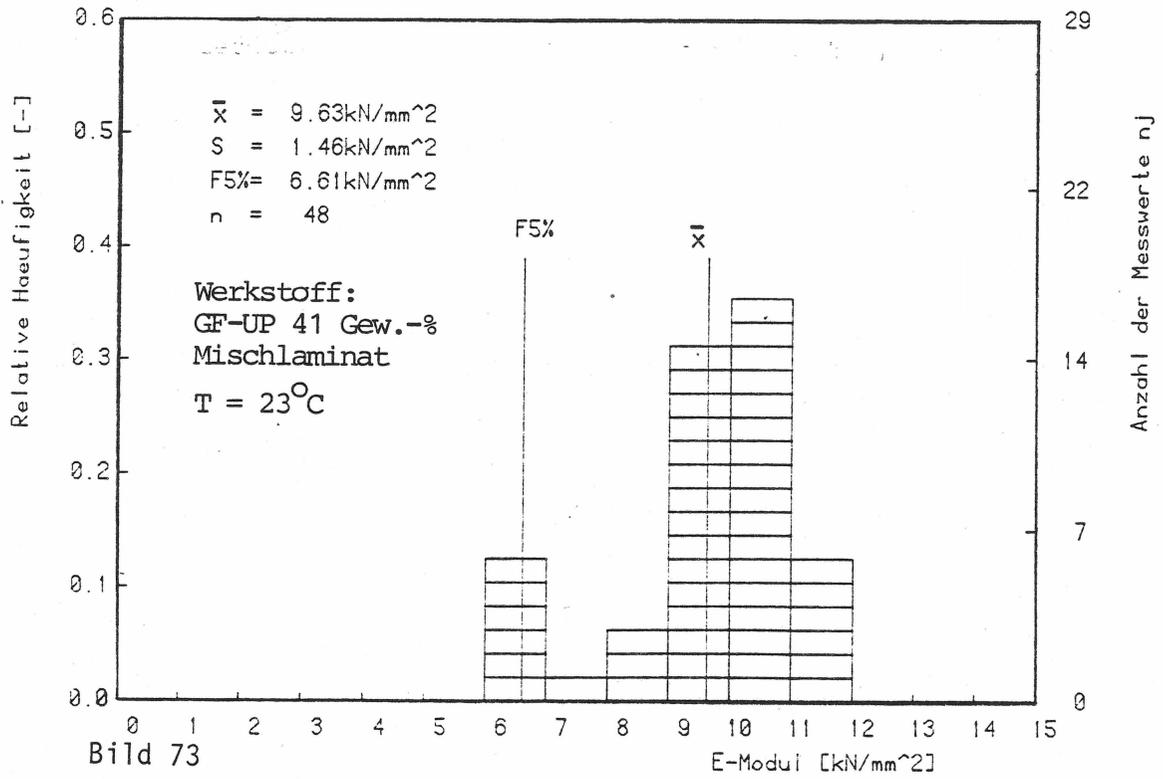
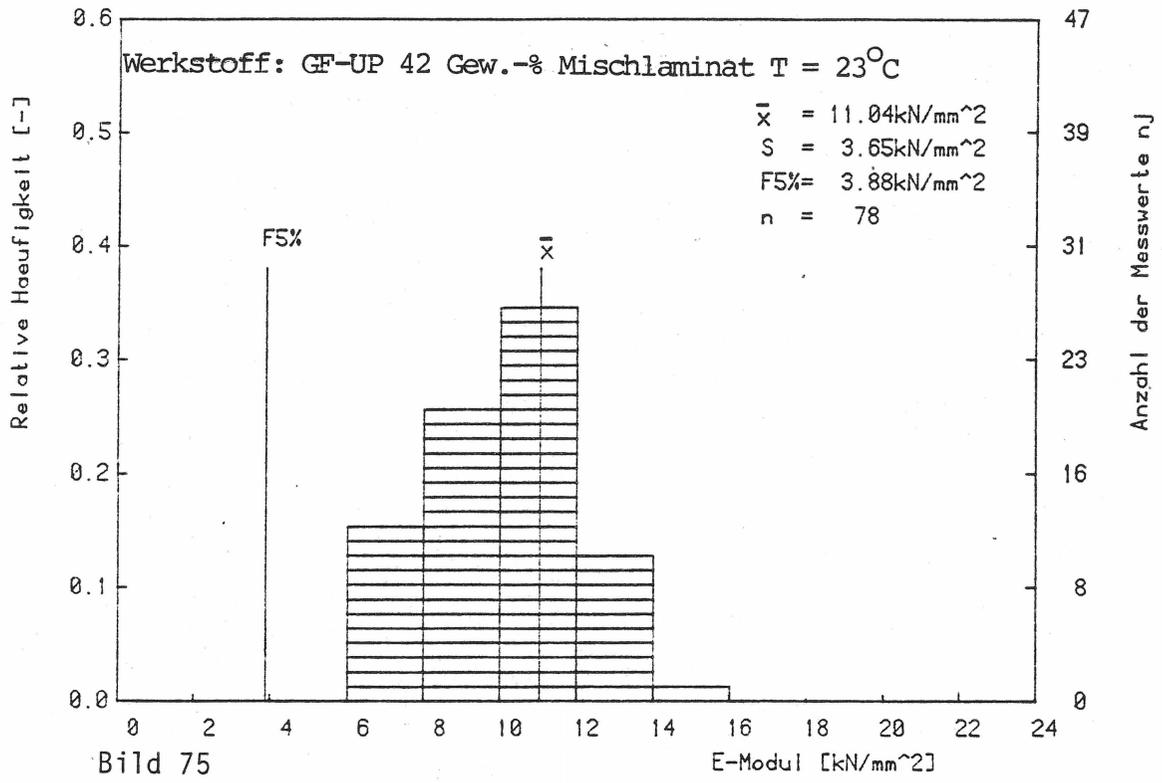


Bild 72





### 8.2.1.2 Häufigkeitsverteilungen für sehr große Stichprobenumfänge

Die Bilder 77 - 86 zeigen die Häufigkeitsverteilungen von ermittelten Biegefestigkeitswerten eines Glasfilamentgewebelaminats (vgl. Bild 9). Die Verteilungen untergliedern sich in Einzelmessungen über 10 Jahre. Aus den Einzelmessungen resultiert die Gesamtverteilung mit 920 Meßwerten. Bild 76 gibt einen Überblick der Einzelmessungen in Abhängigkeit von der Zeit.

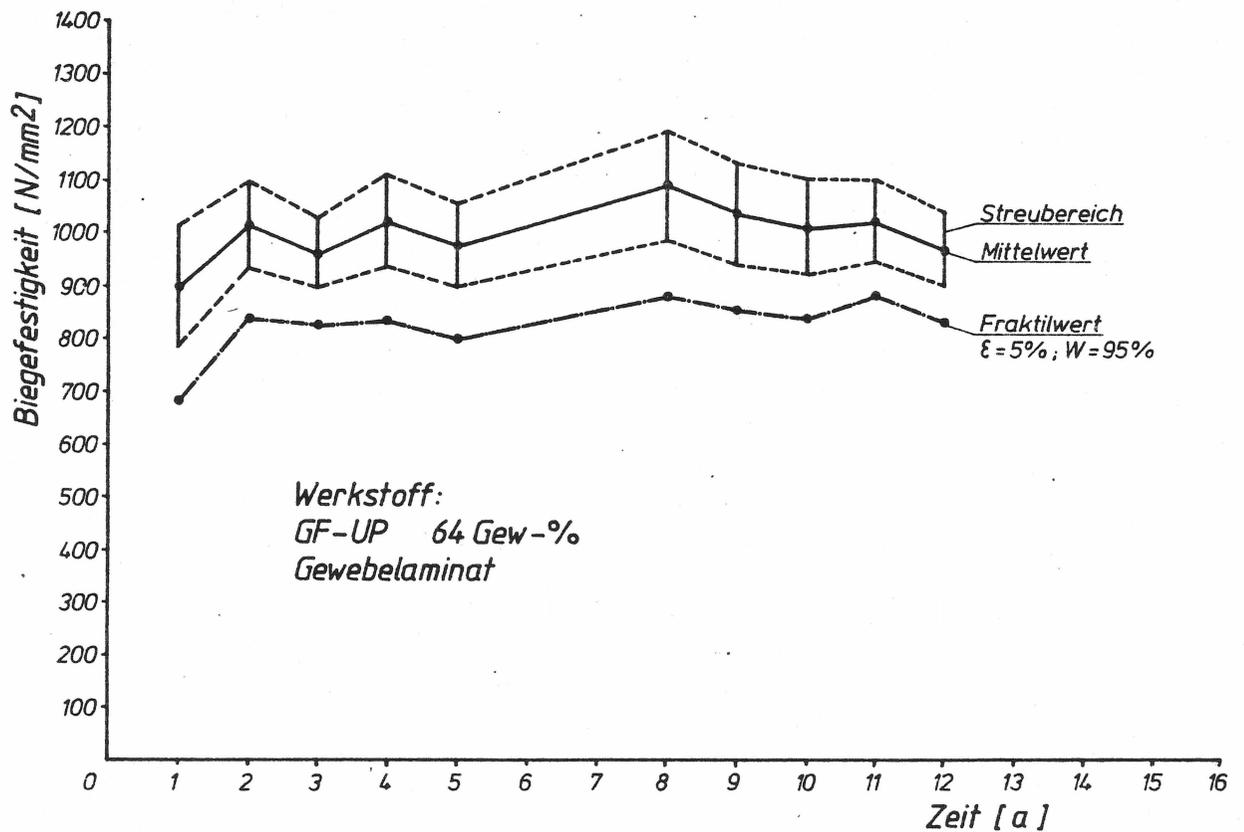
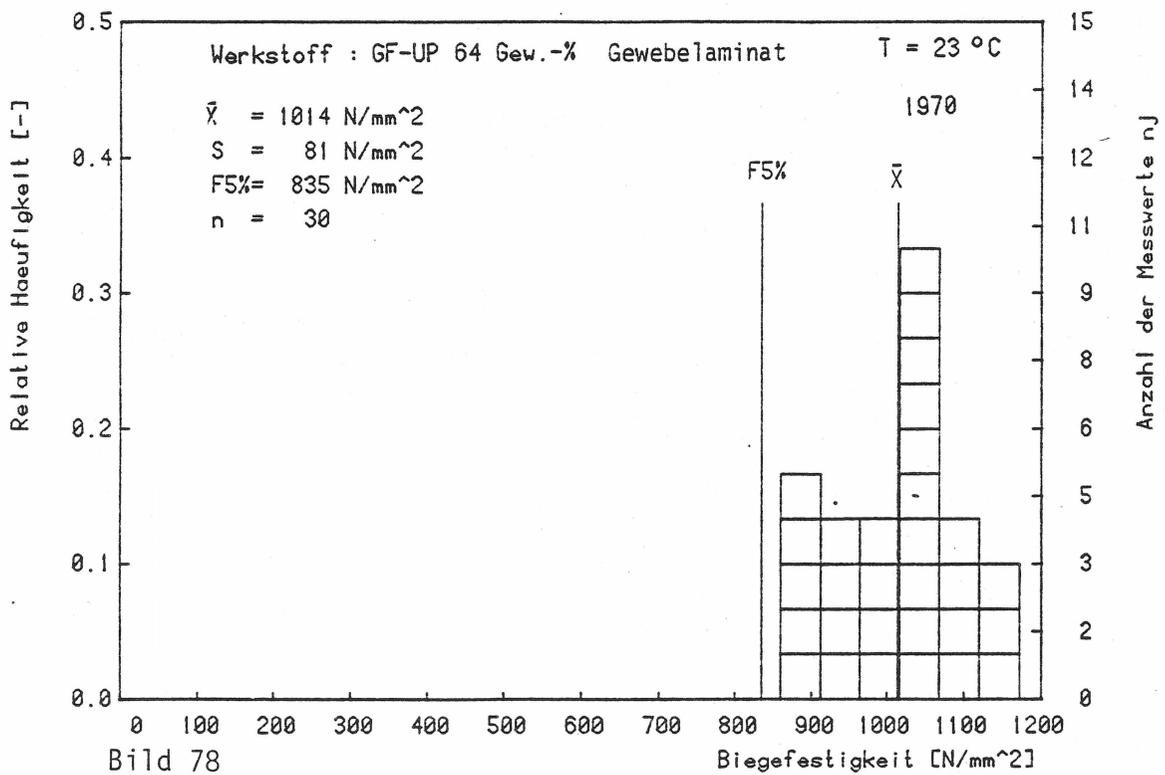
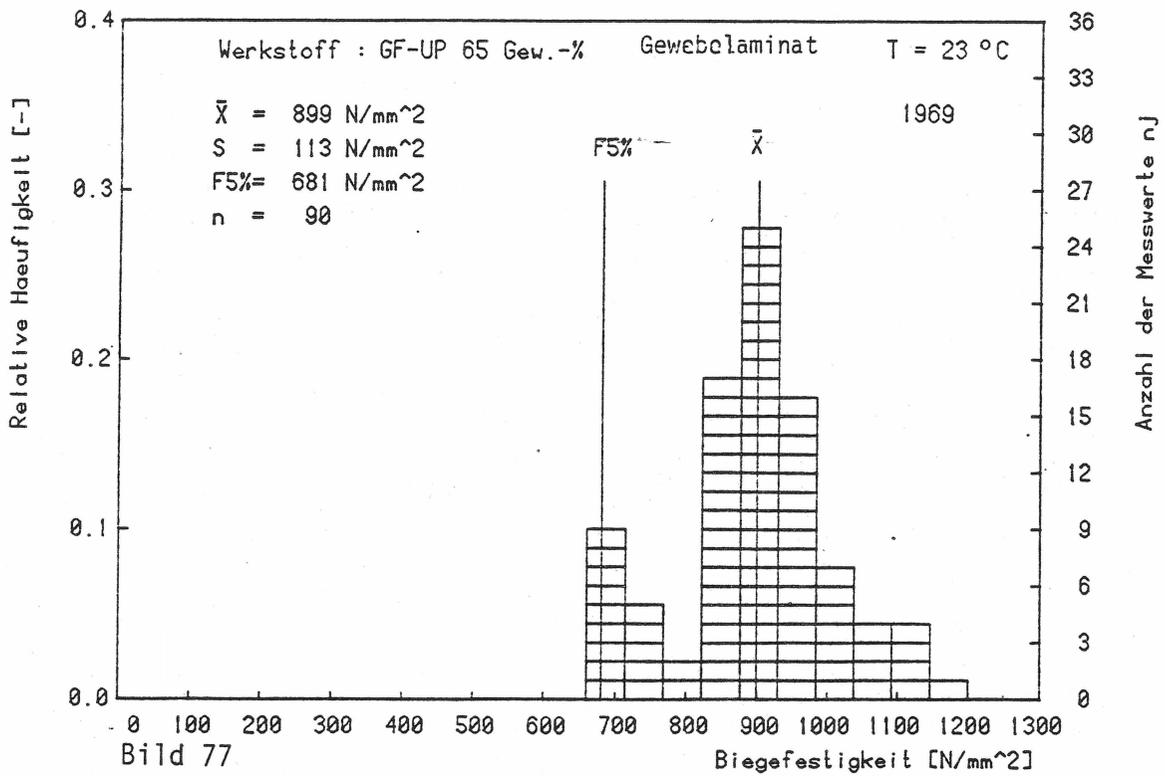
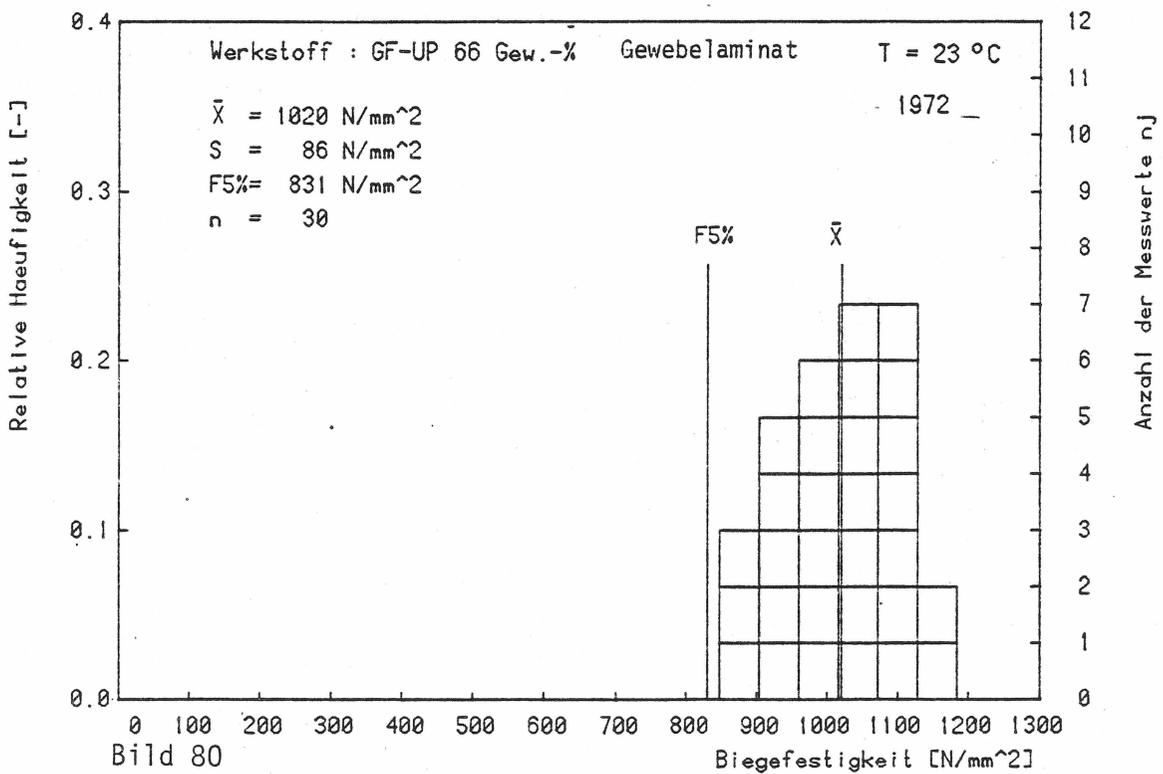
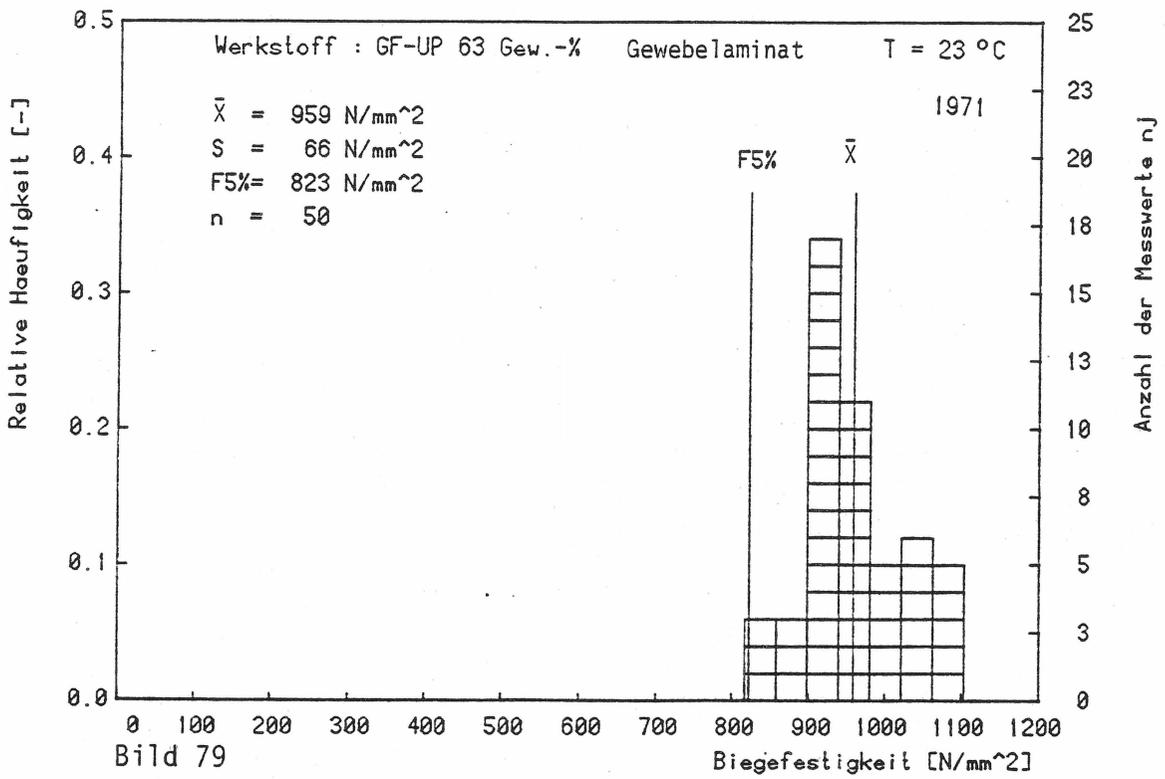


Bild 76: Überblick über Einzelmessungen von Biegefestigkeitswerten eines Glasfilamentgewebelaminats





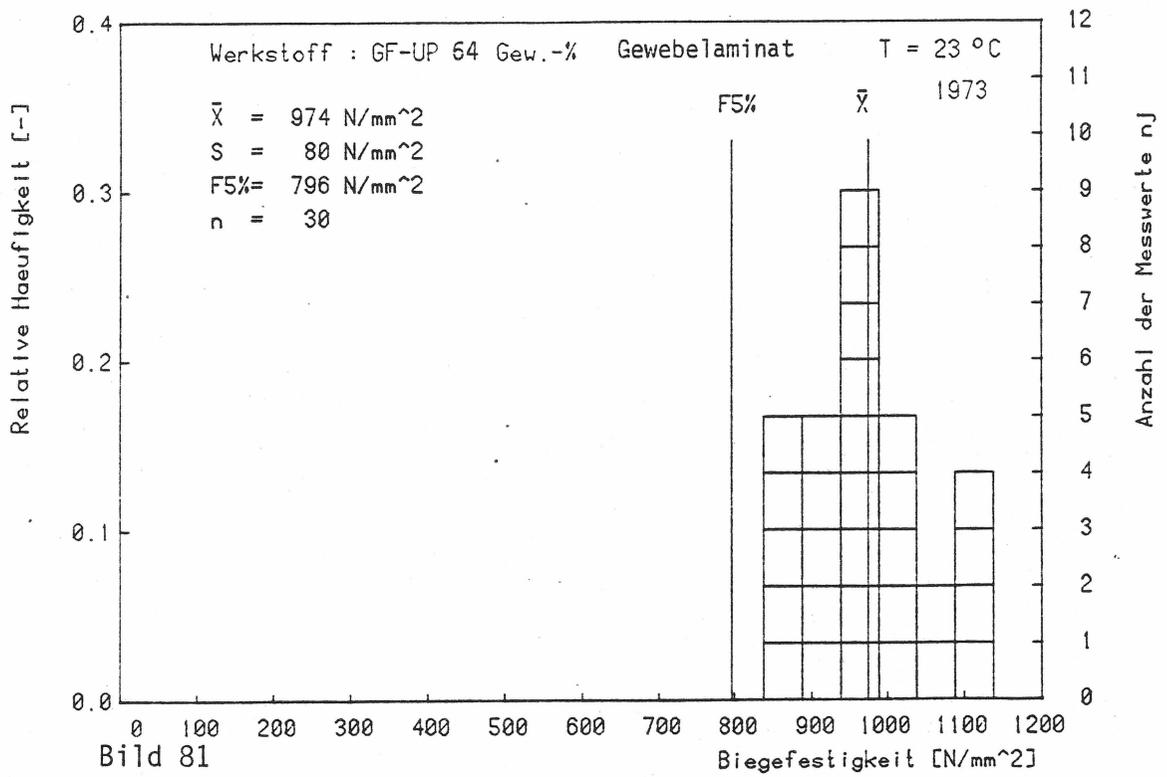


Bild 81

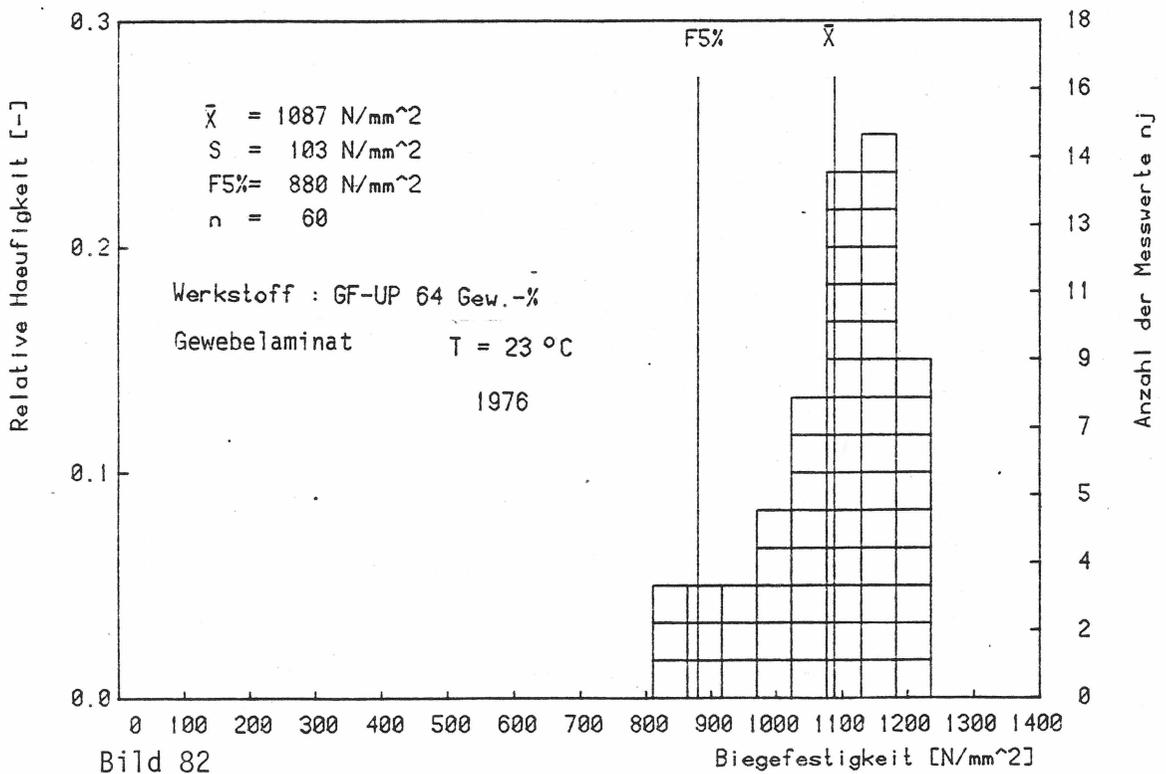
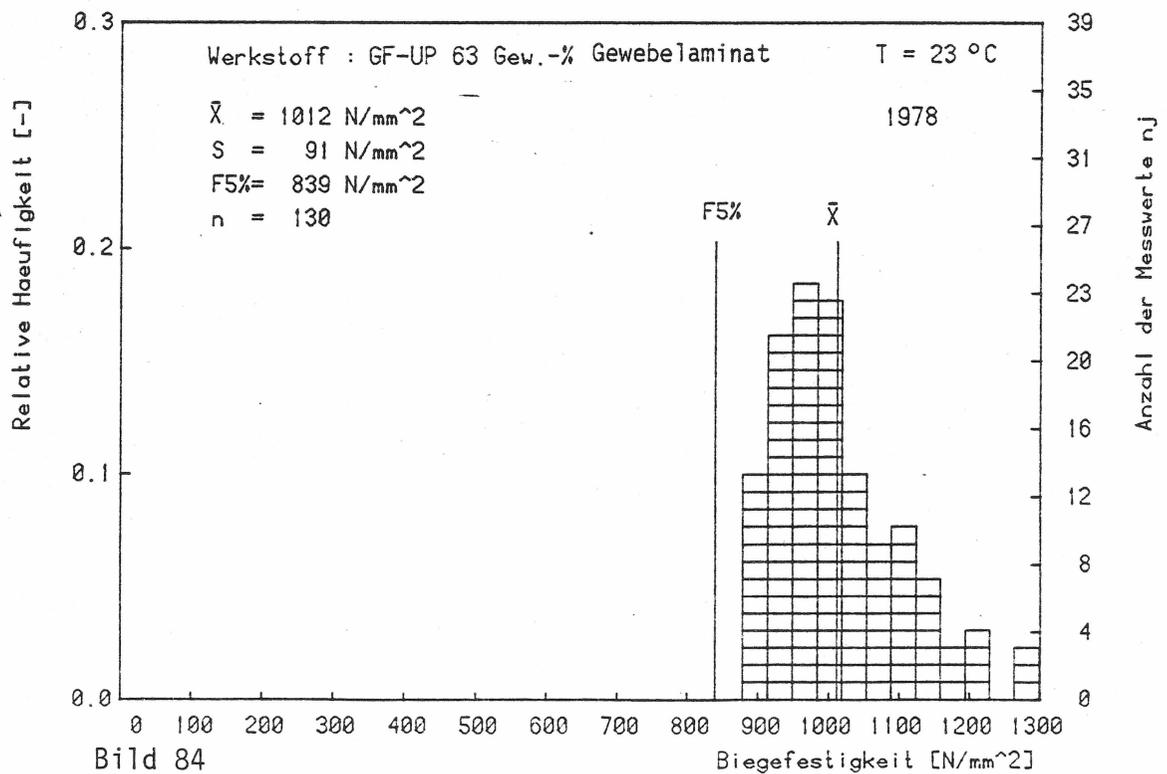
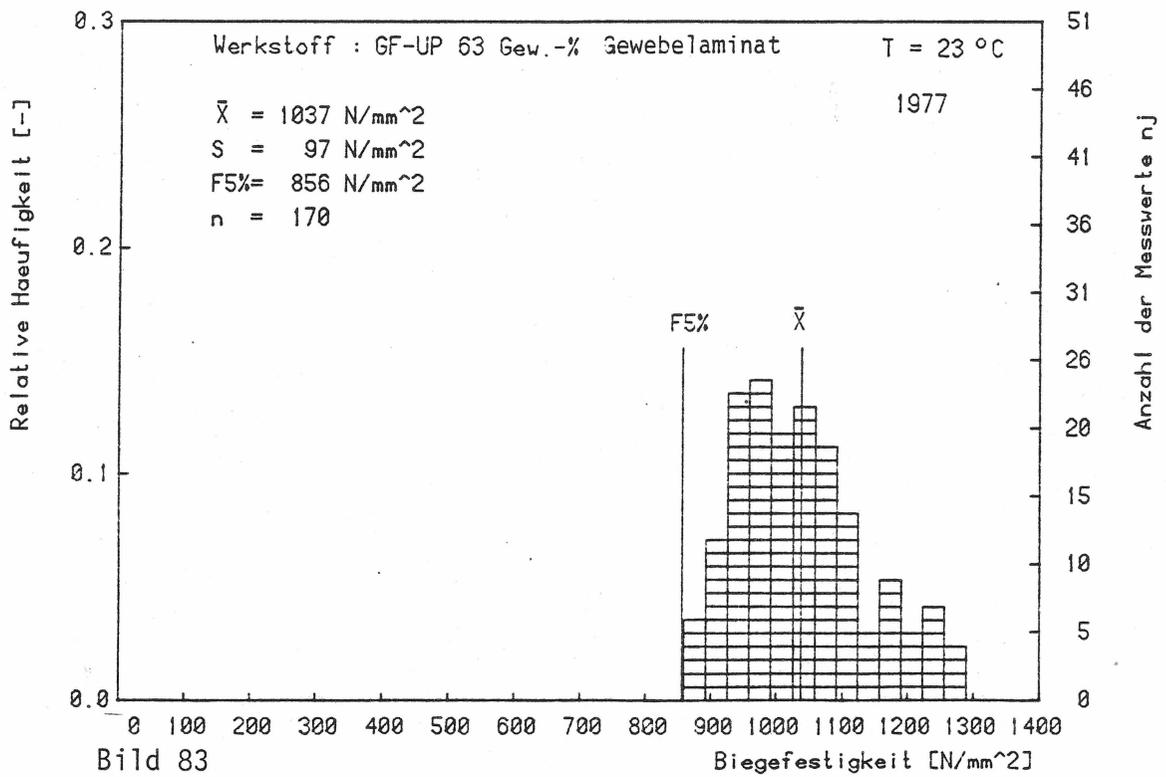


Bild 82



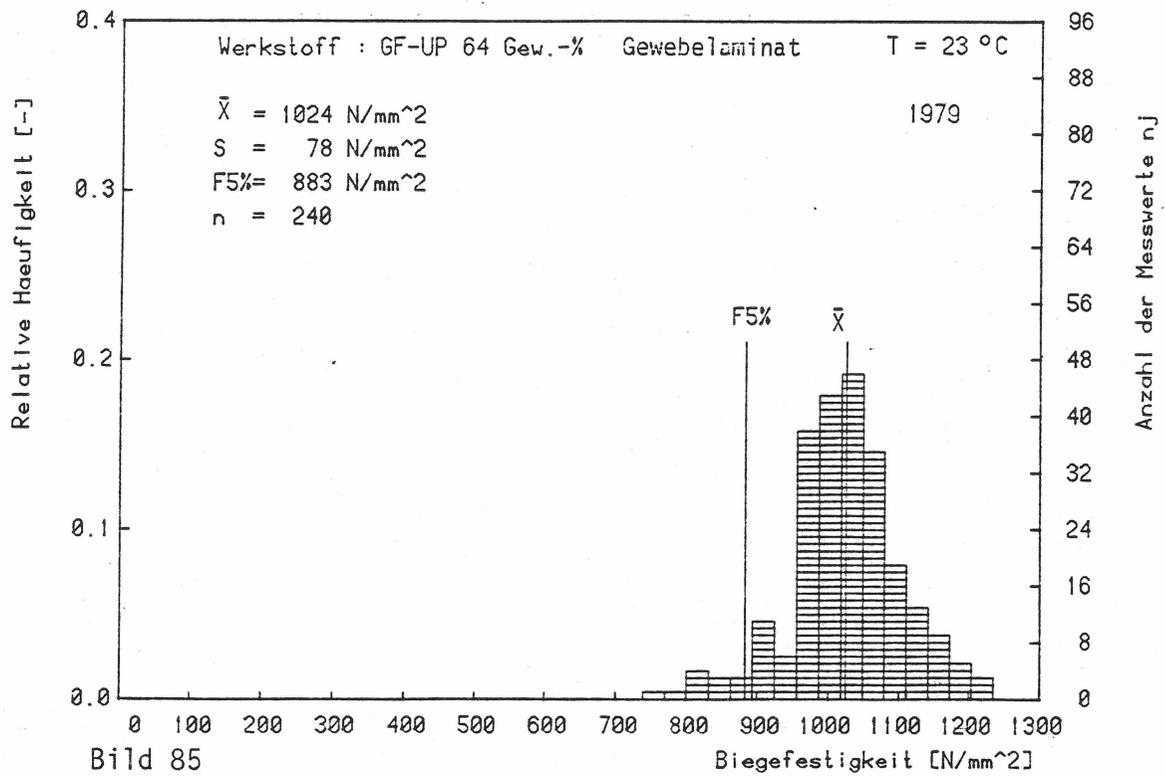


Bild 85

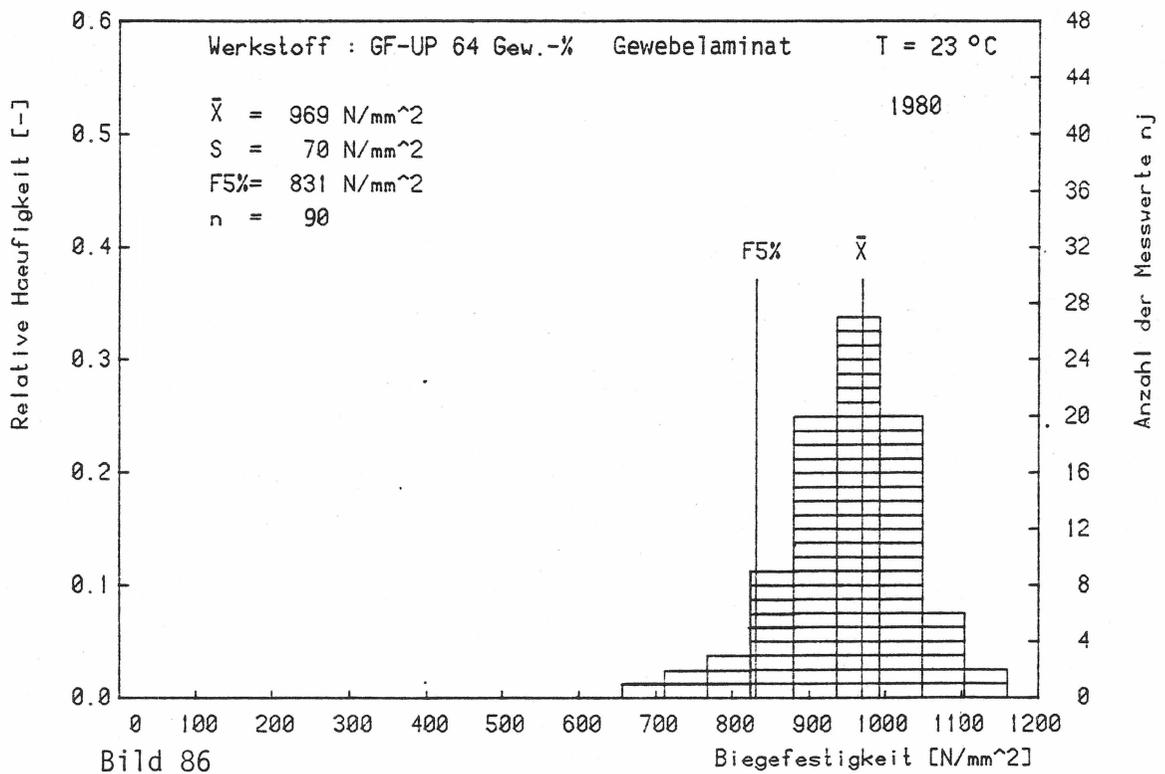


Bild 86

### 8.2.1.3 Mittelwert und Fraktilwert in Abhängigkeit vom Probenumfang

Für die untersuchten Mischlaminat Nr. 1.1 und Mattenlaminat Nr. 1.1 sind neben den Häufigkeitsverteilungen auch die Mittelwerte und Fraktilwerte in Abhängigkeit vom Probenumfang aufgezeichnet. Die Bilder 87 - 97 zeigen diese Abhängigkeit. Mit zunehmendem Probenumfang ergeben sich günstigere Fraktilwerte. Die angegebenen Werte gelten für eine untere Grenze  $\epsilon = 5\%$  und für eine Aussagewahrscheinlichkeit  $W = 95\%$ .

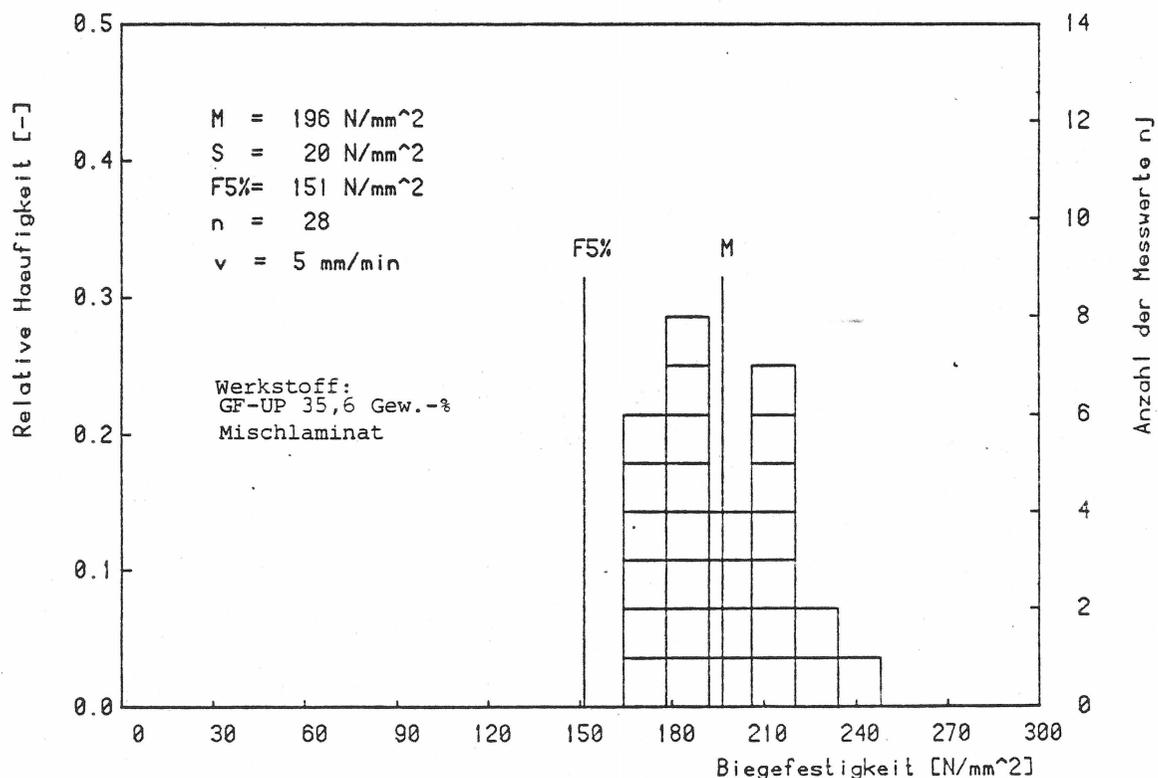
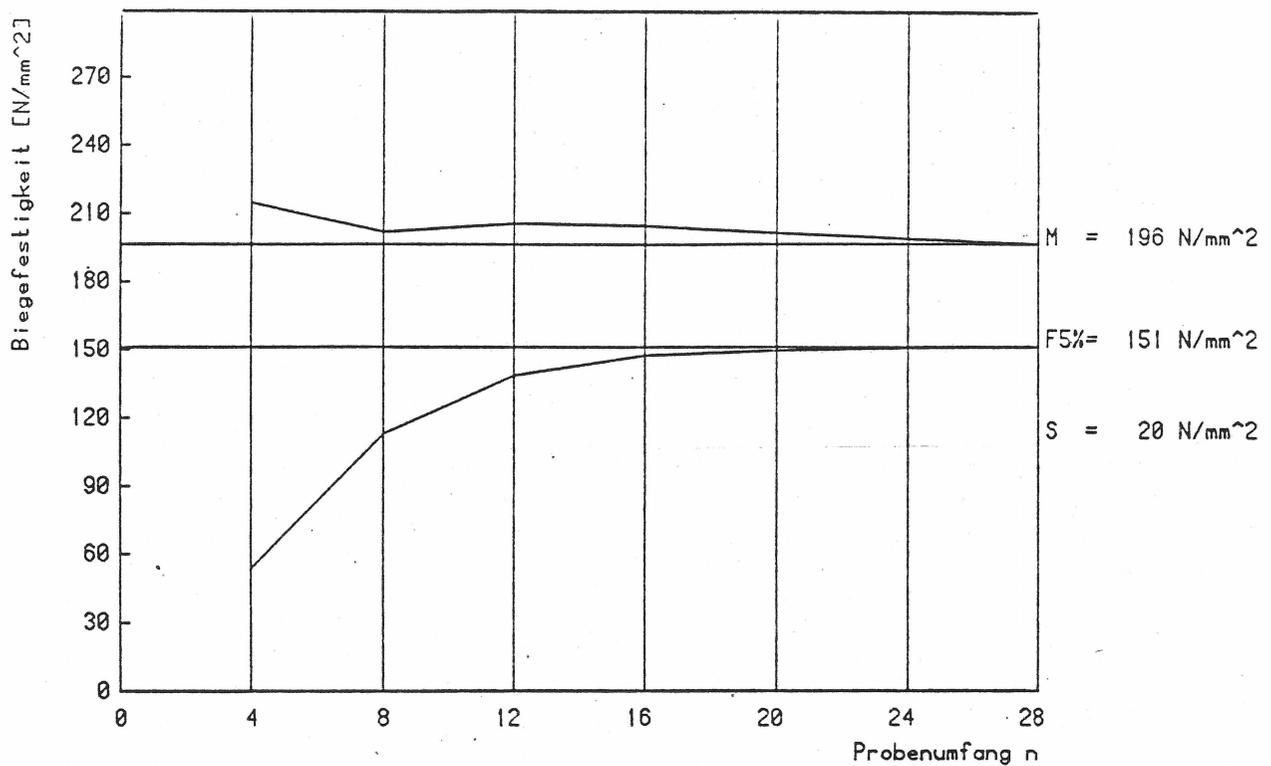


Bild 87

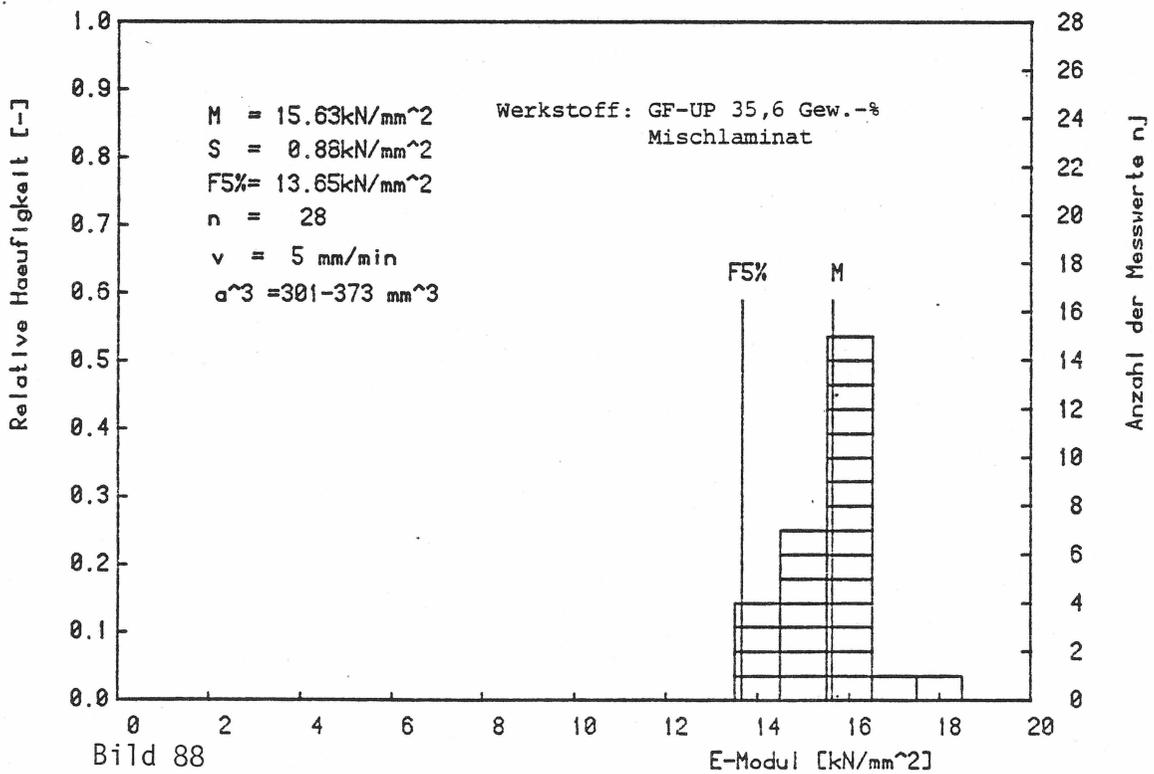
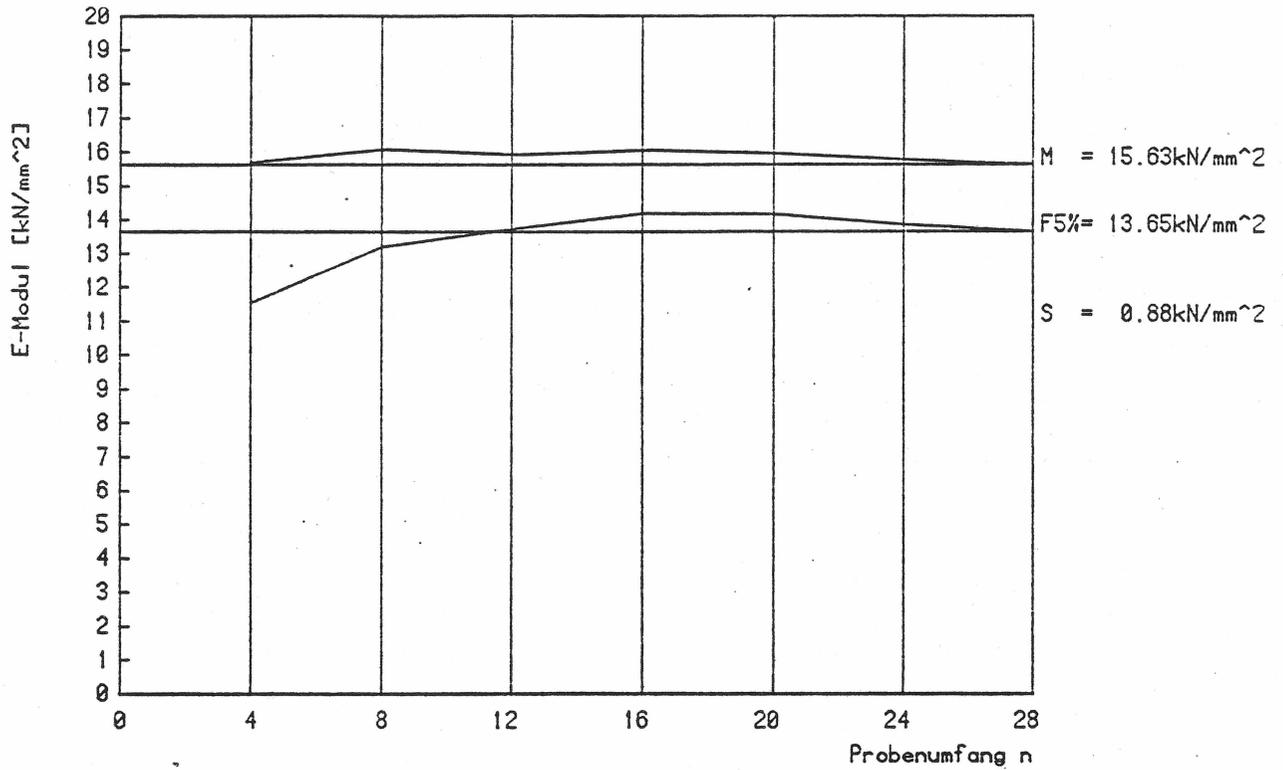


Bild 88

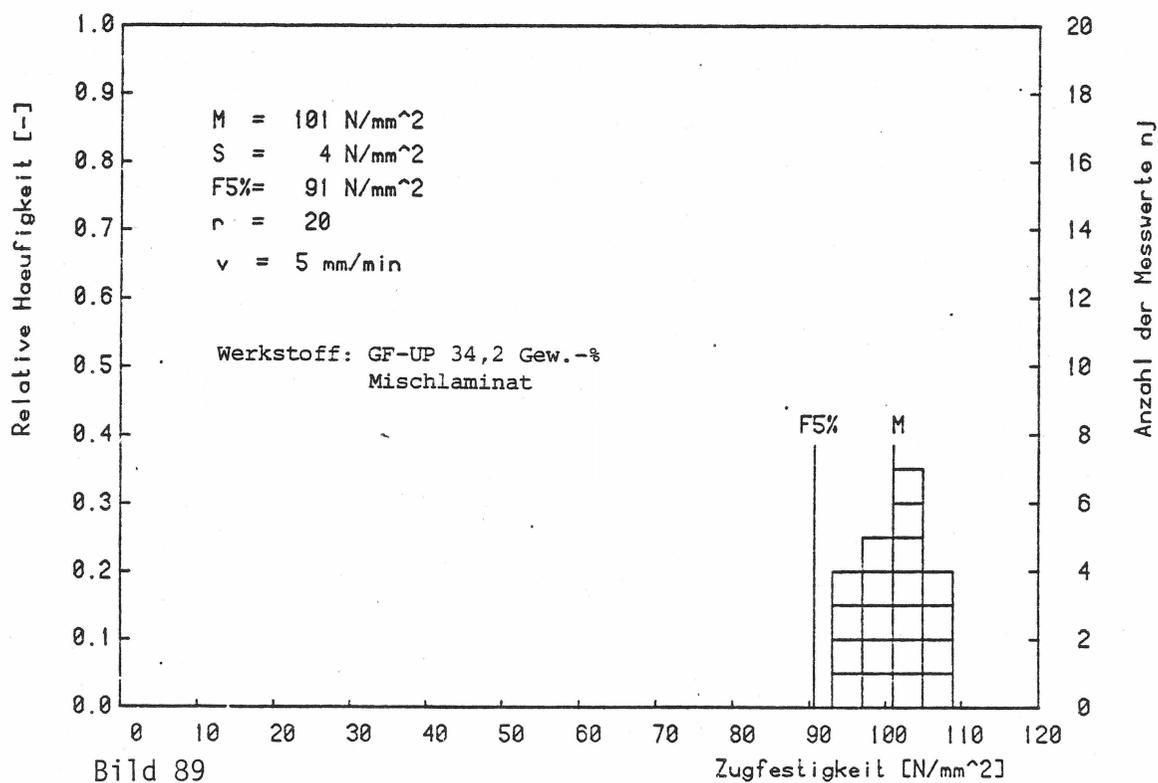
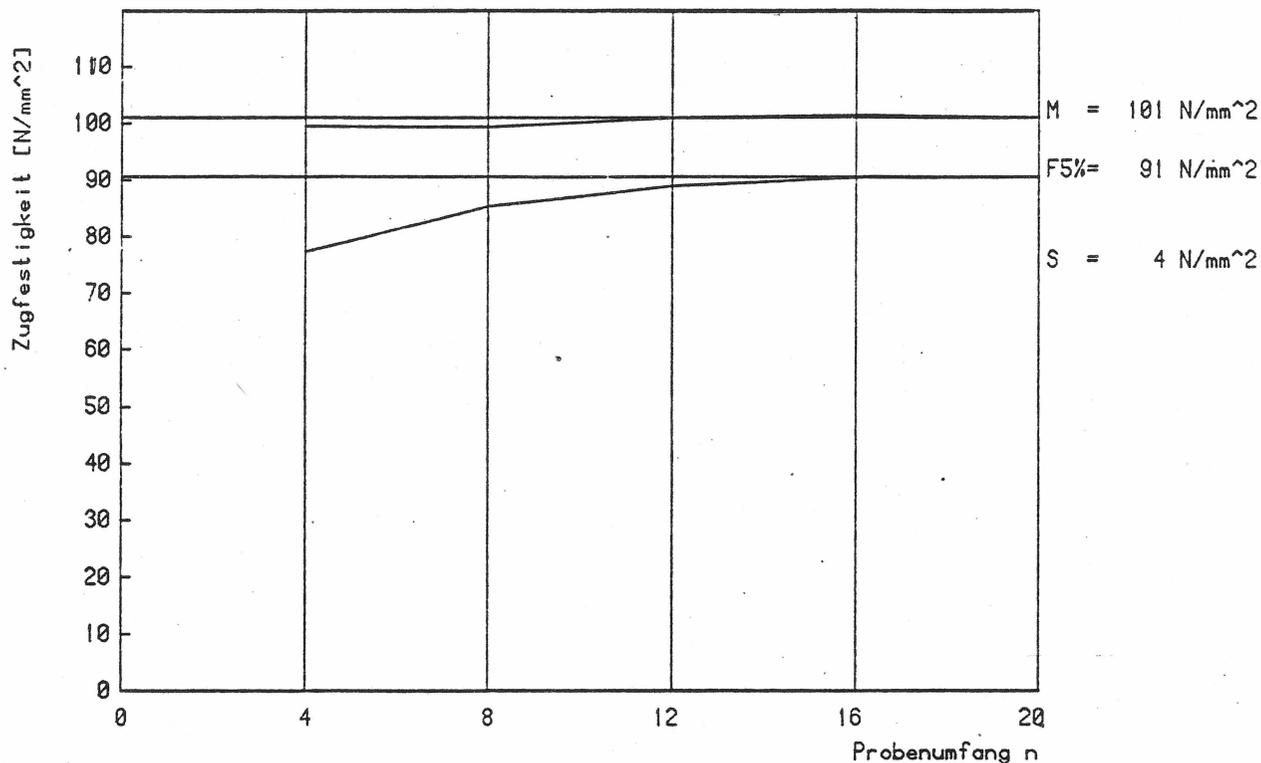


Bild 89

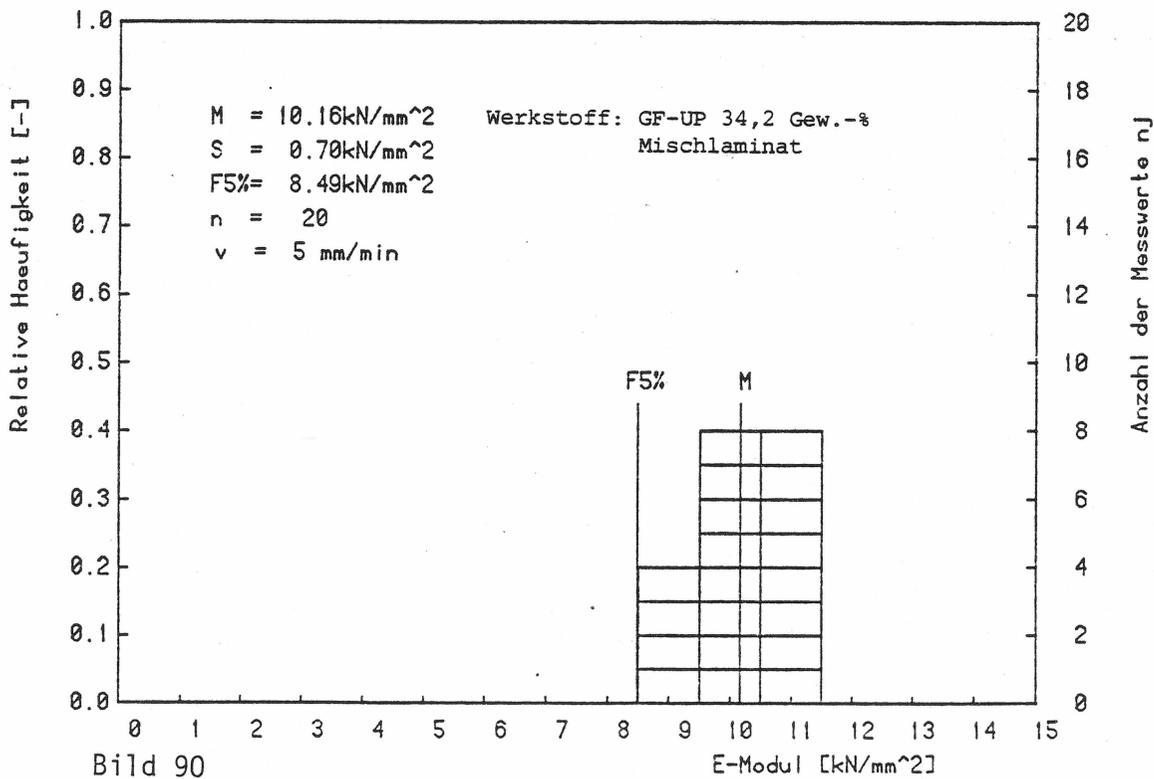
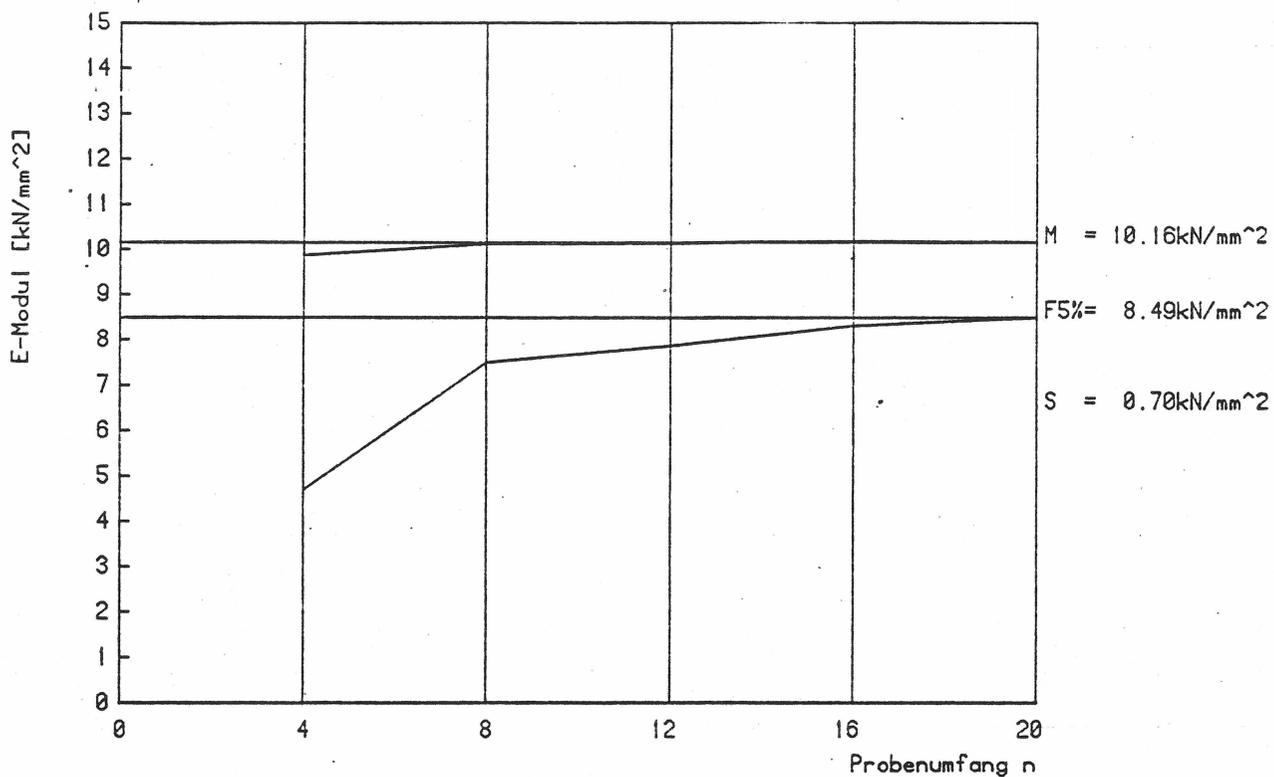


Bild 90

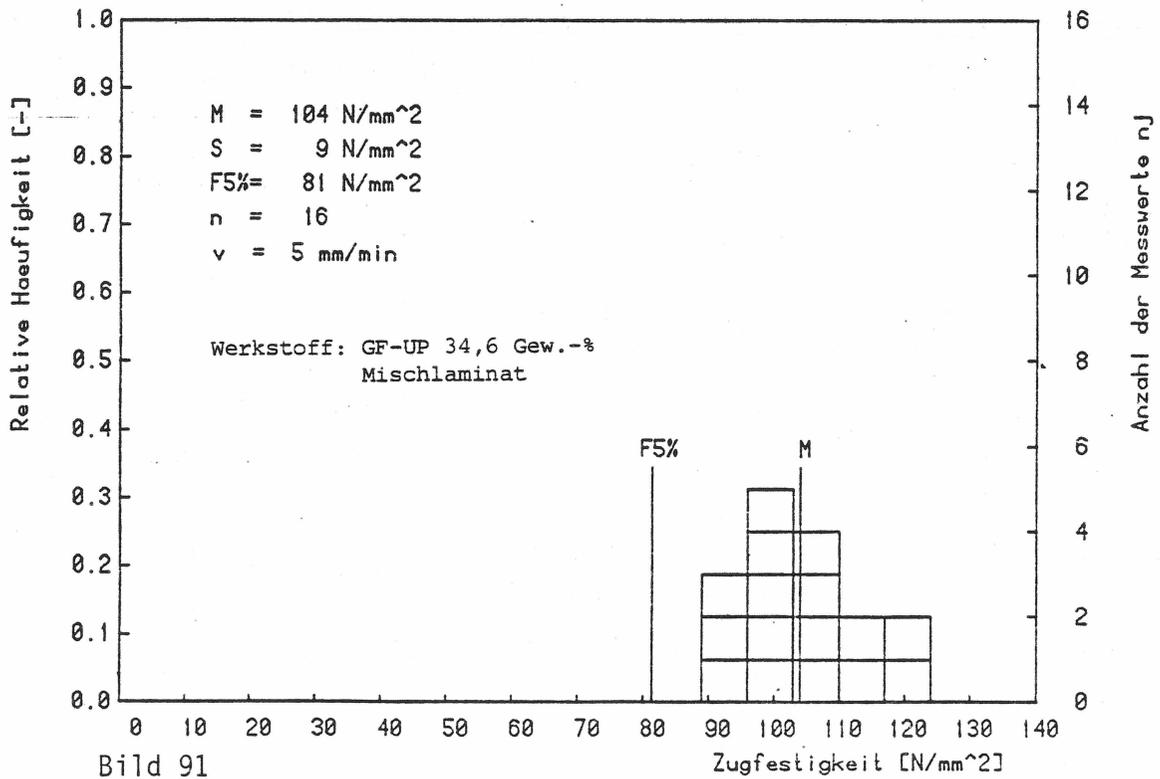
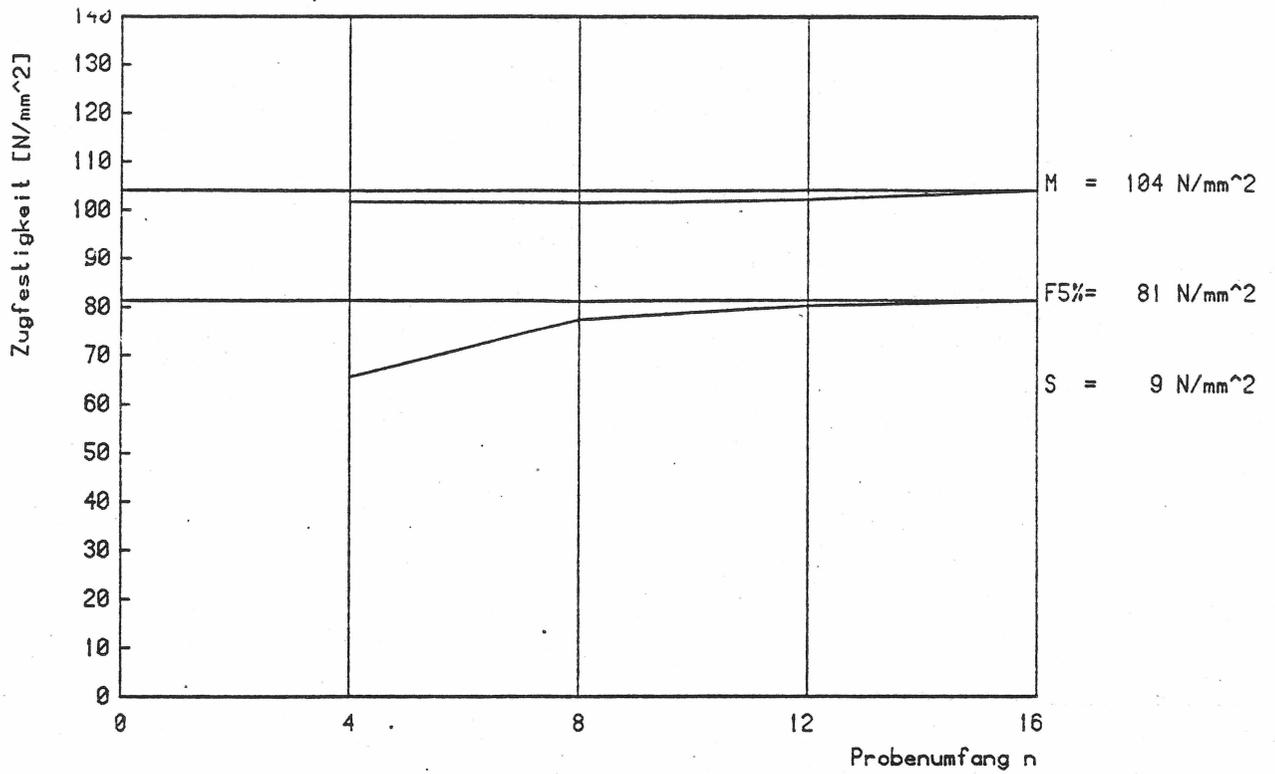


Bild 91

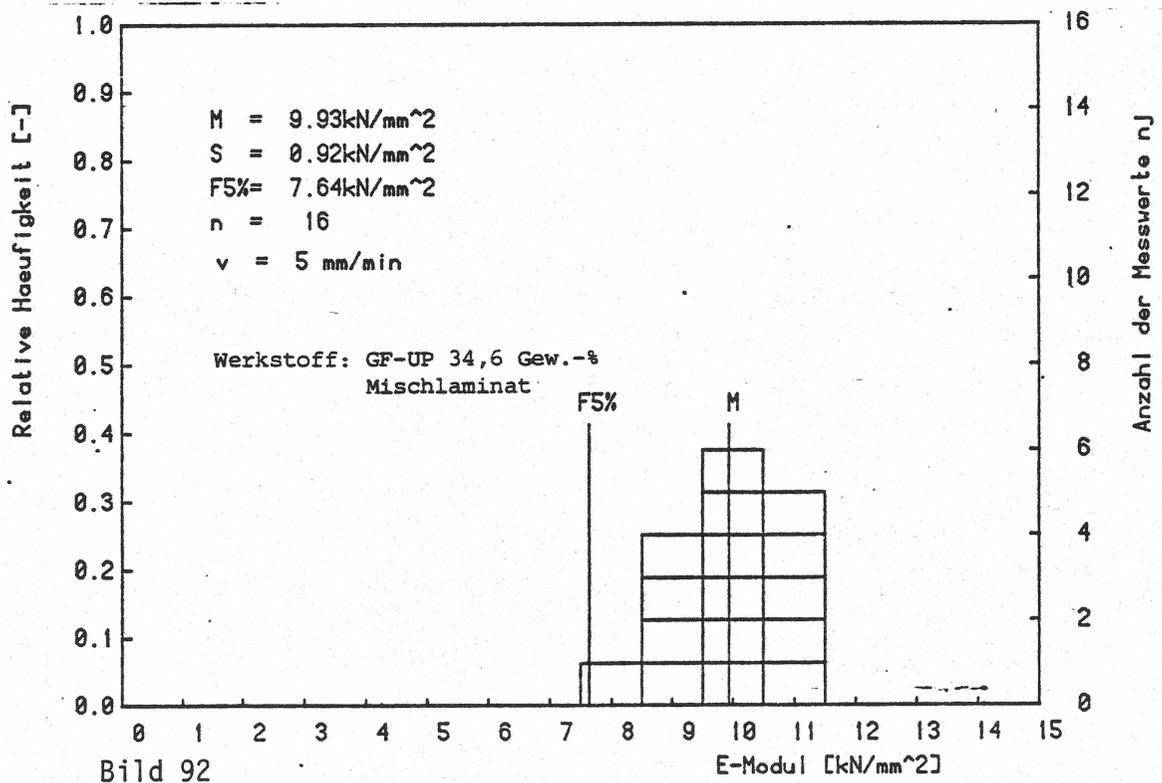
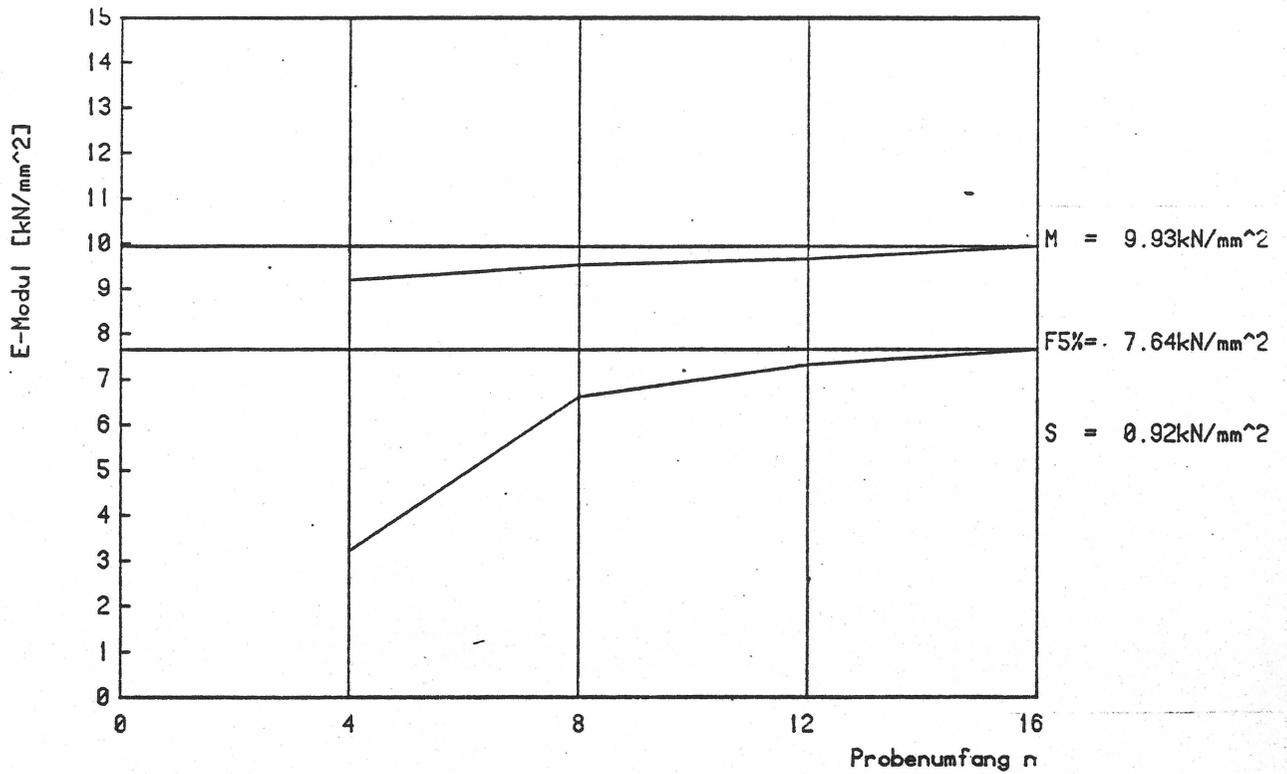
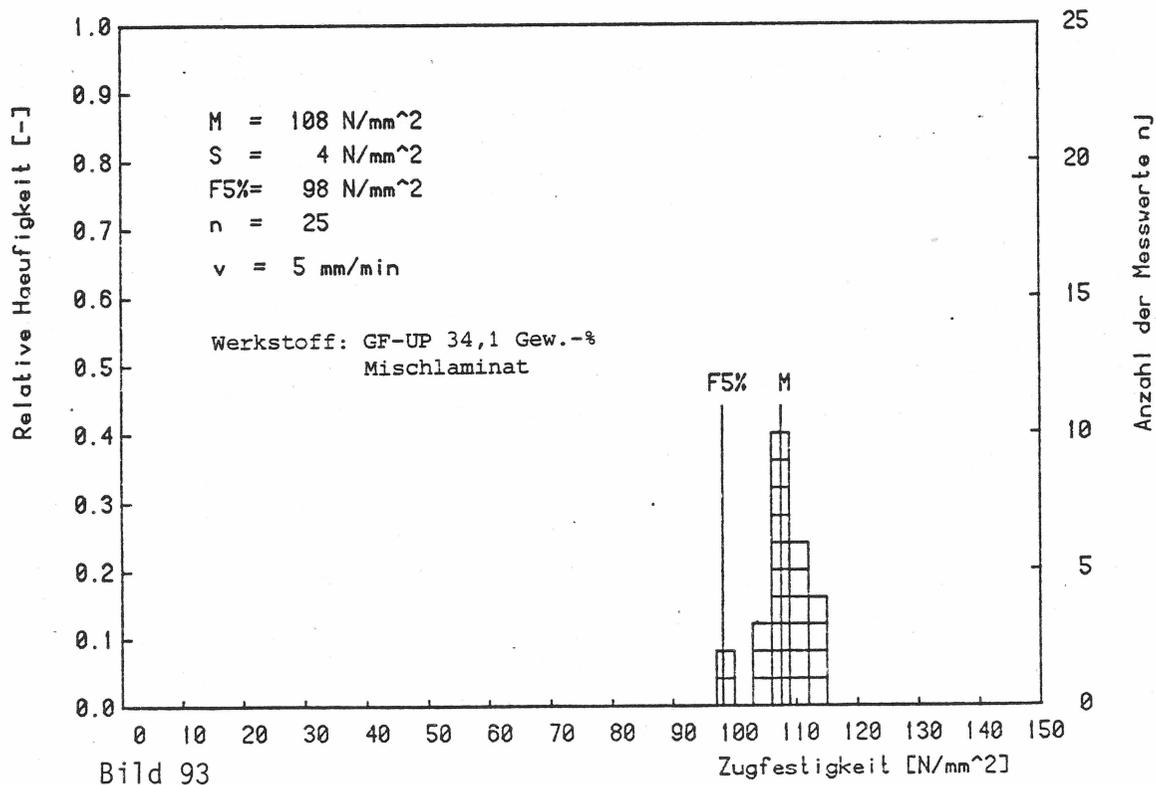
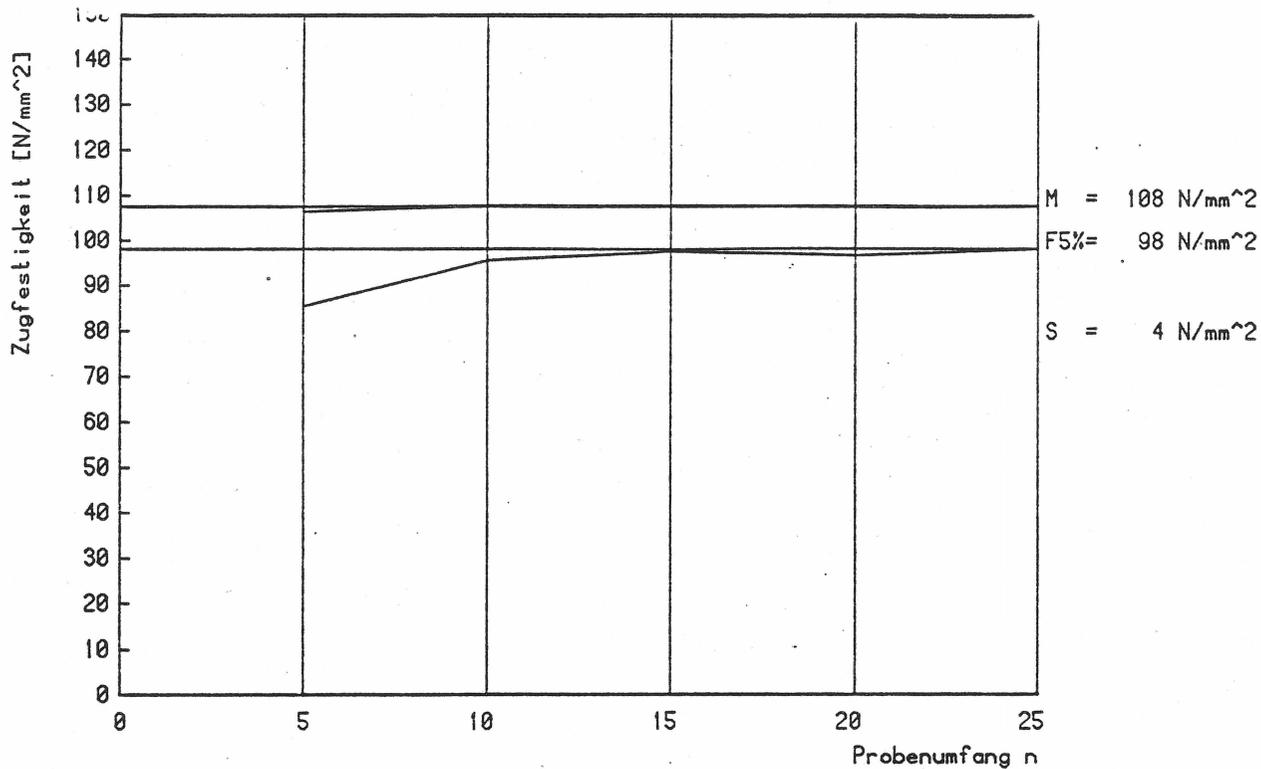


Bild 92



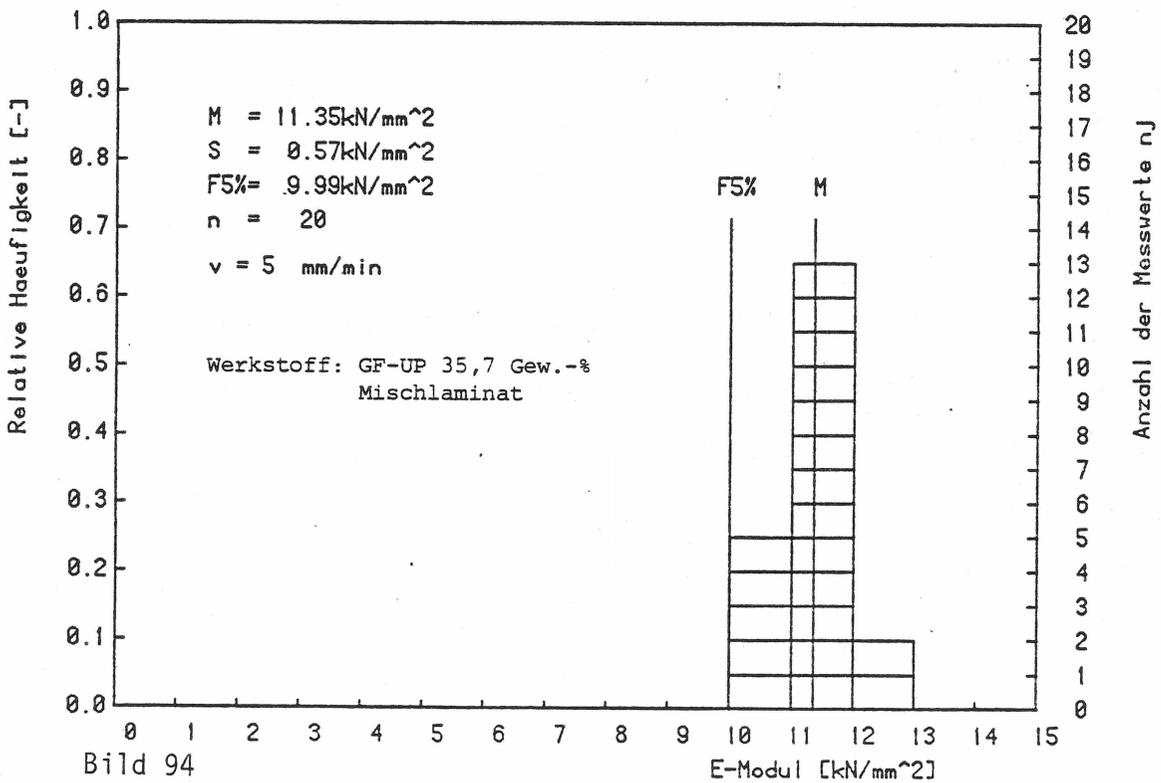
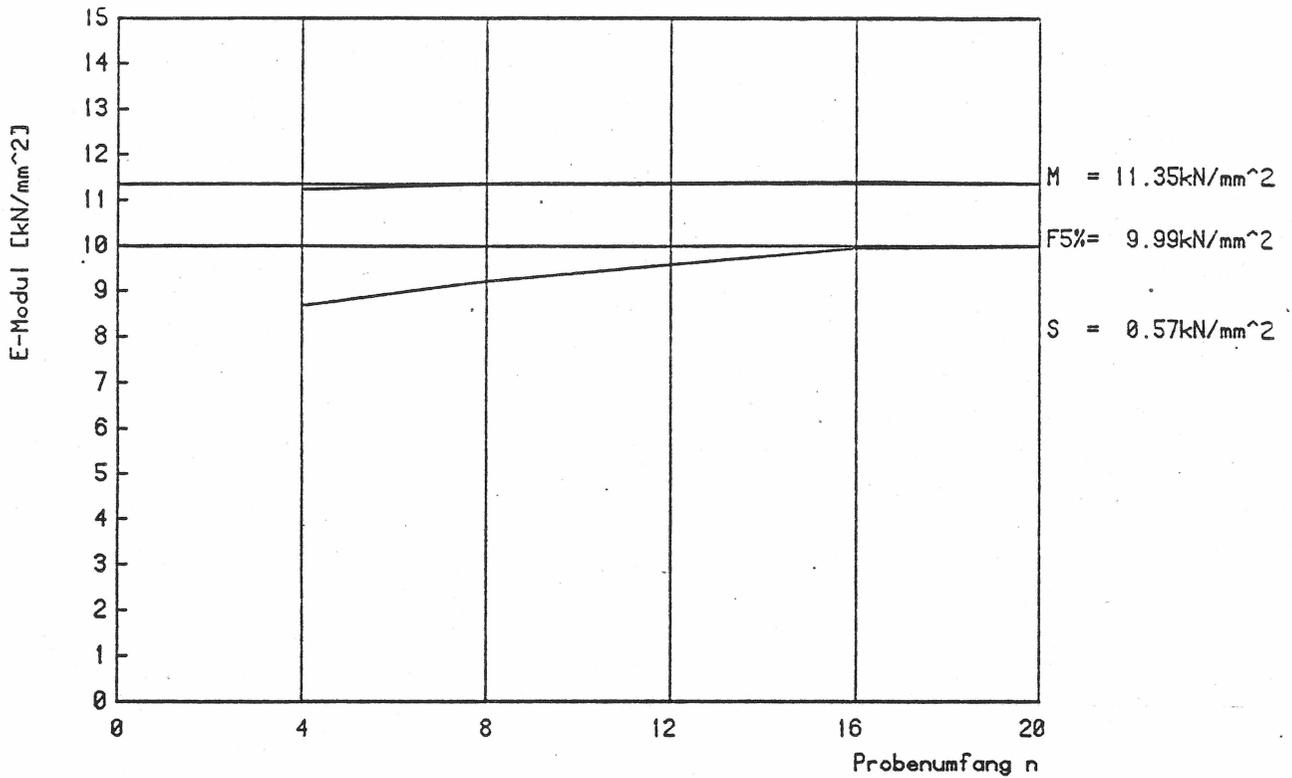
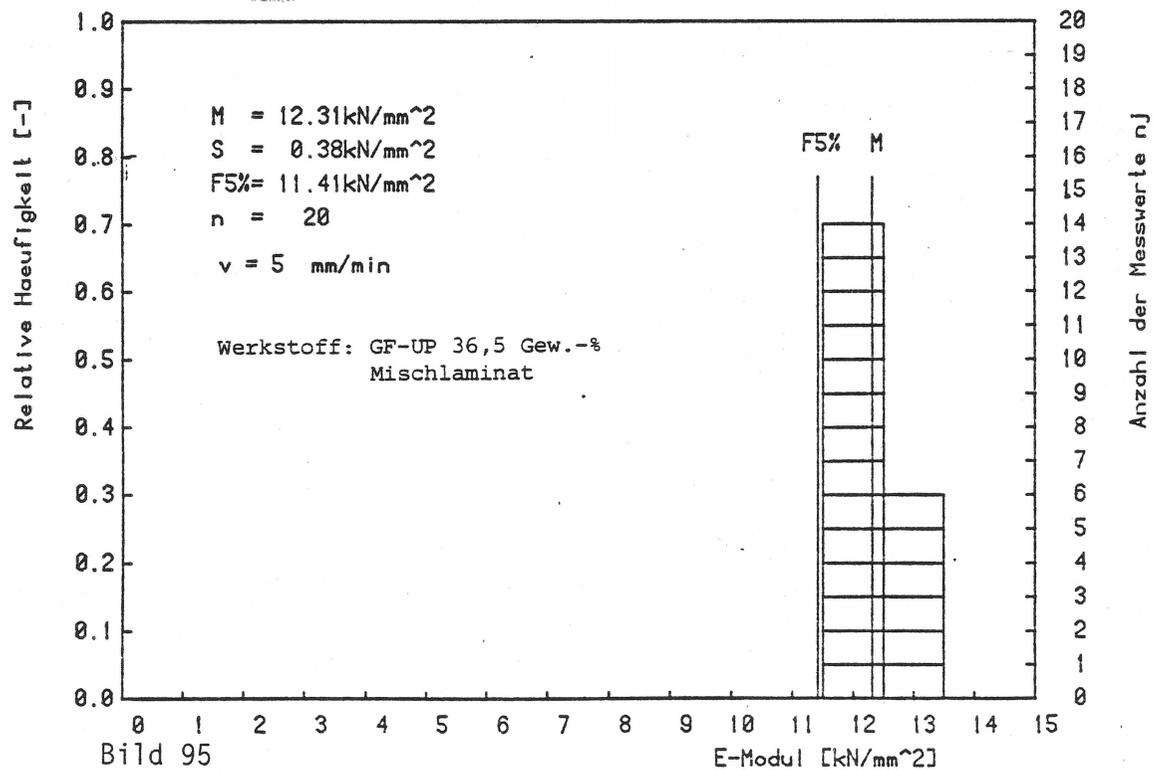
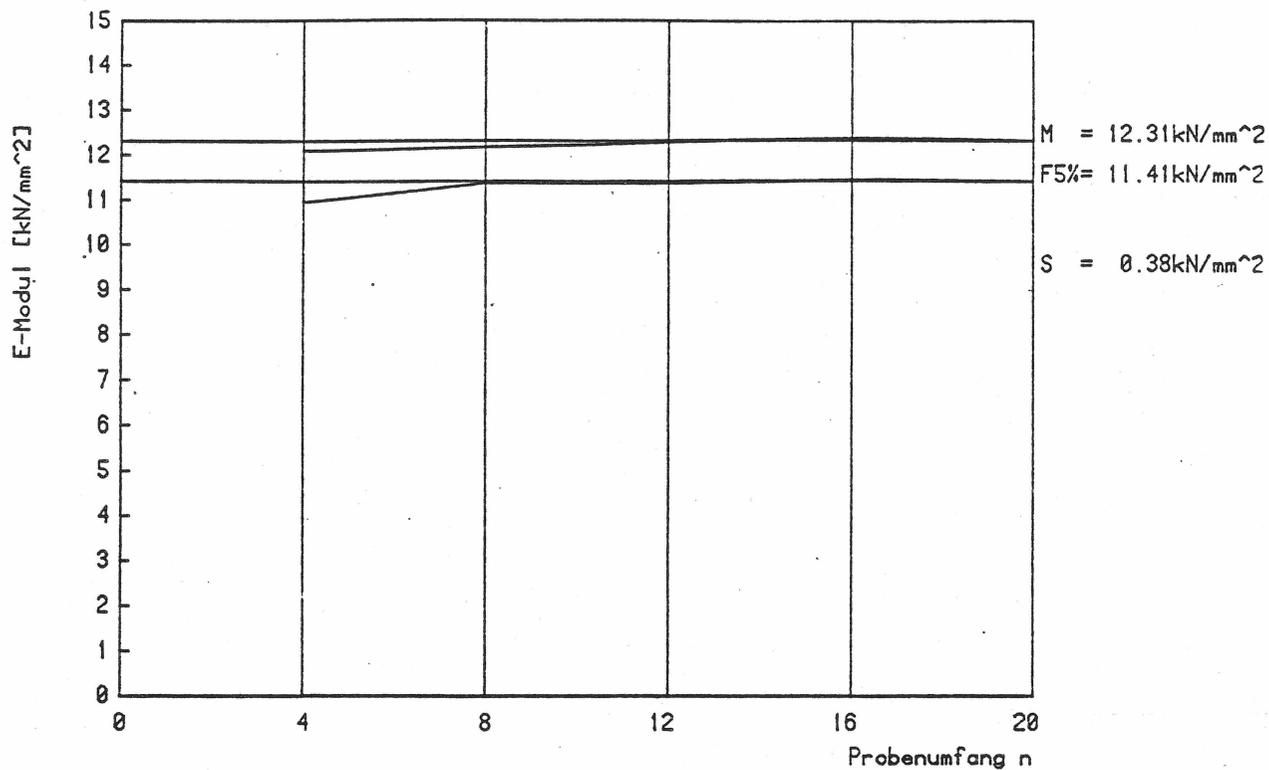


Bild 94

E-Modul [kN/mm<sup>2</sup>]



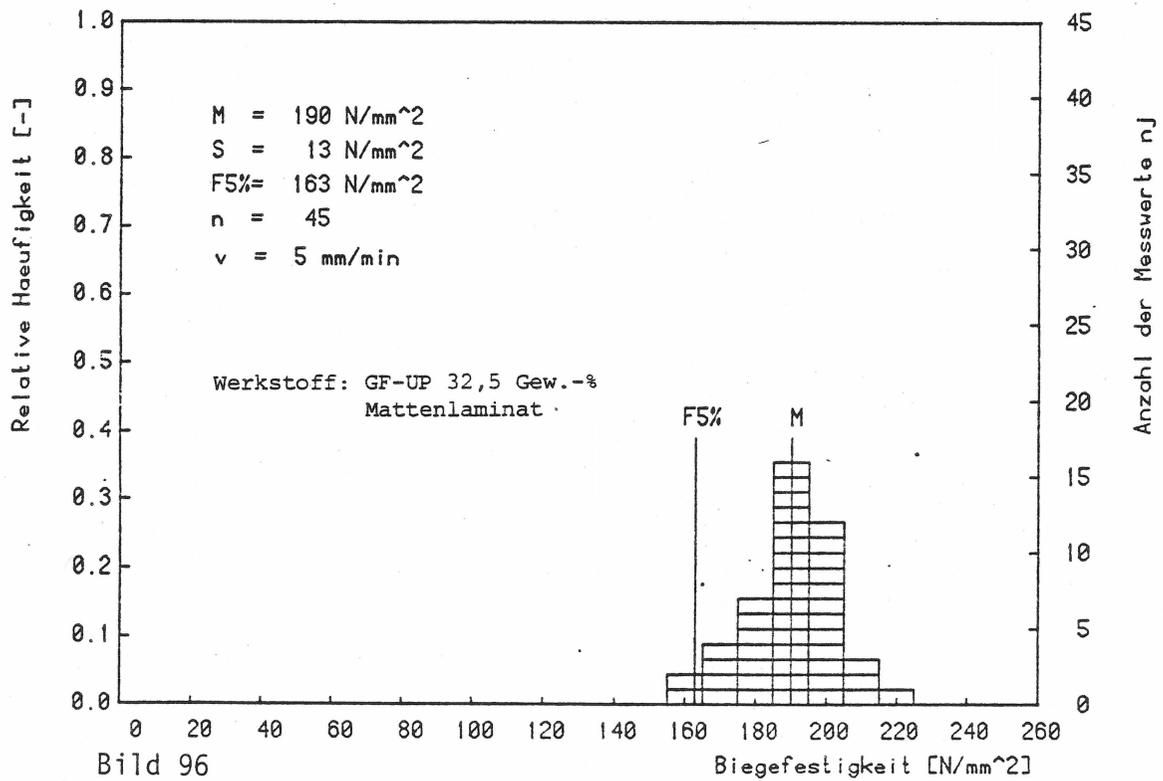
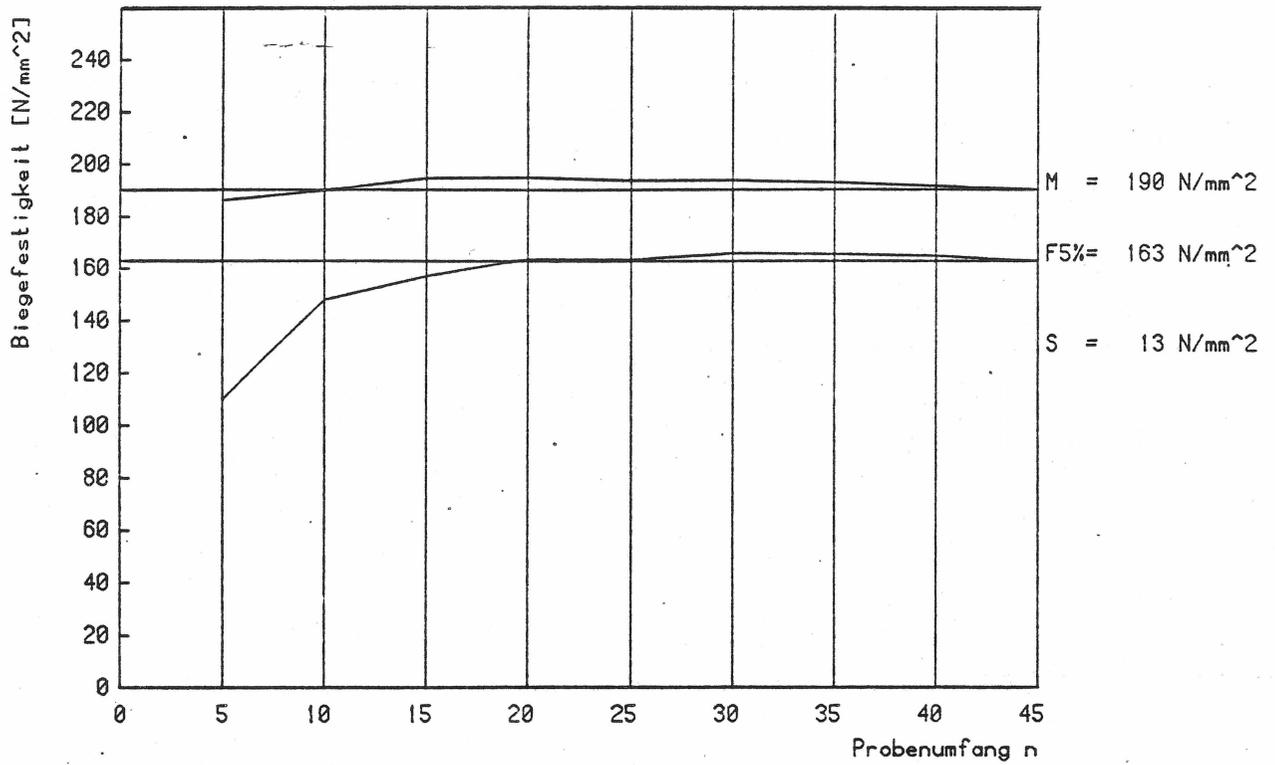


Bild 96

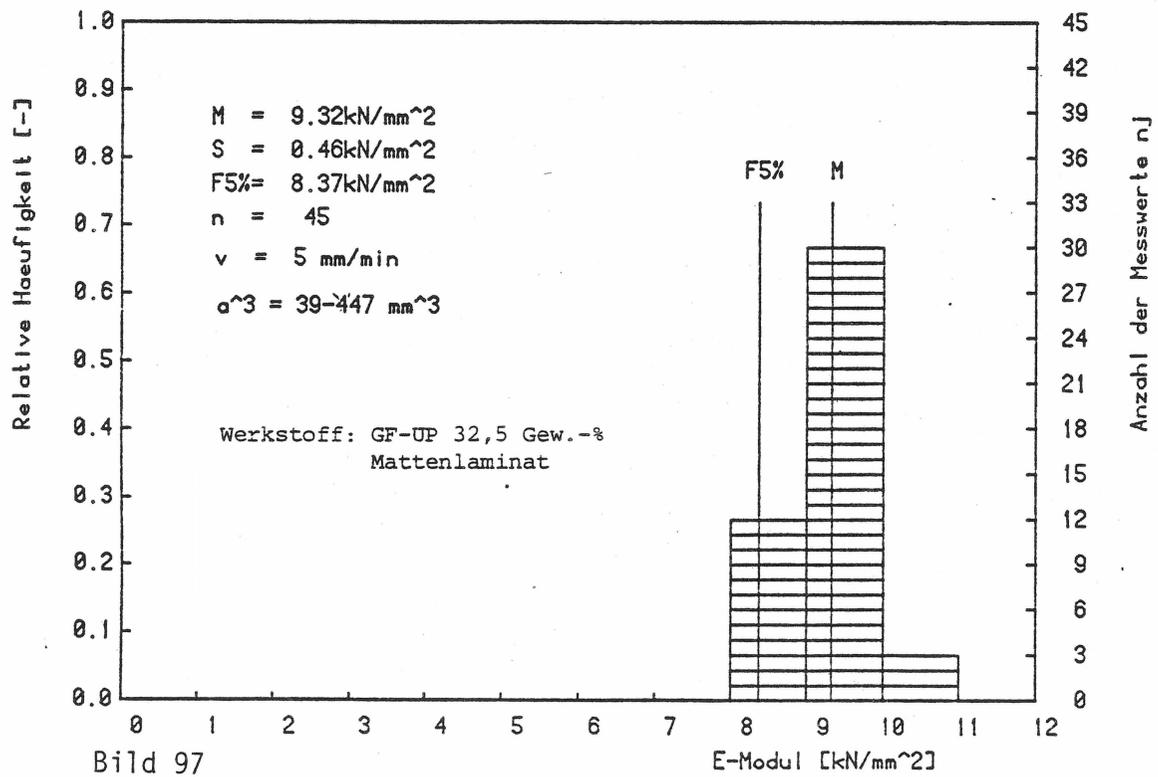
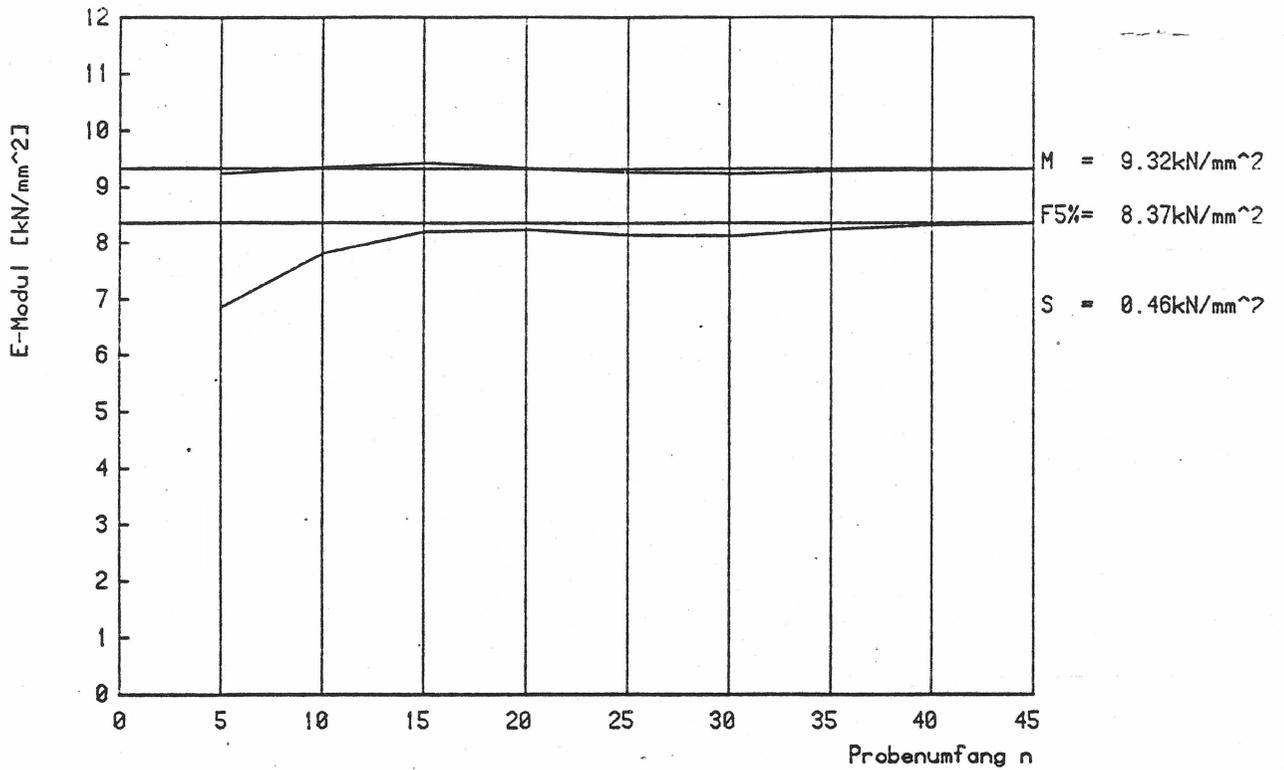


Bild 97

### 8.2.2 Fraktilwerte für verschiedene Aussagewahrscheinlichkeiten

Um den Einfluß der Aussagewahrscheinlichkeit  $W$  und der Grenze  $\epsilon$  auf das Niveau des Fraktilwertes zu verdeutlichen, sind in den Bildern 98 - 139 die Fraktilwerte für unterschiedliche mechanische Eigenschaften für Mischlamine Nr. 1.1, Mattenlamine Nr. 1.1 und Gewebelamine Nr. 1.1 in Abhängigkeit von der Aussagewahrscheinlichkeit  $W$  und der unteren Grenze  $\epsilon$  aufgetragen. Es werden jeweils 1%, 5% und 50% Fraktilwerte miteinander verglichen. Die Meßwerte sind für Aussagewahrscheinlichkeiten zwischen 75% und 99% tabelliert.

WERKSTOFF:

GF-UP 35,6 Gew.-%

Mischlaminat

Biegefestigkeit

$\bar{X} = 196 \text{ N/mm}^2$

$S = 20 \text{ N/mm}^2$

$n = 28$

AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT

		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	143,480	142,000	140,200	137,820	134,040	125,960
	5 %	158,440	157,280	155,880	154,020	151,080	144,840
	10 %	166,340	165,340	164,140	162,540	160,020	154,700
	20 %	175,820	174,980	173,980	172,660	170,580	166,280
	30 %	182,560	181,820	180,920	179,760	177,980	174,280
	40 %	188,220	187,540	186,720	185,680	184,000	180,840
	50 %	193,420	192,760	192,000	191,040	189,560	186,660

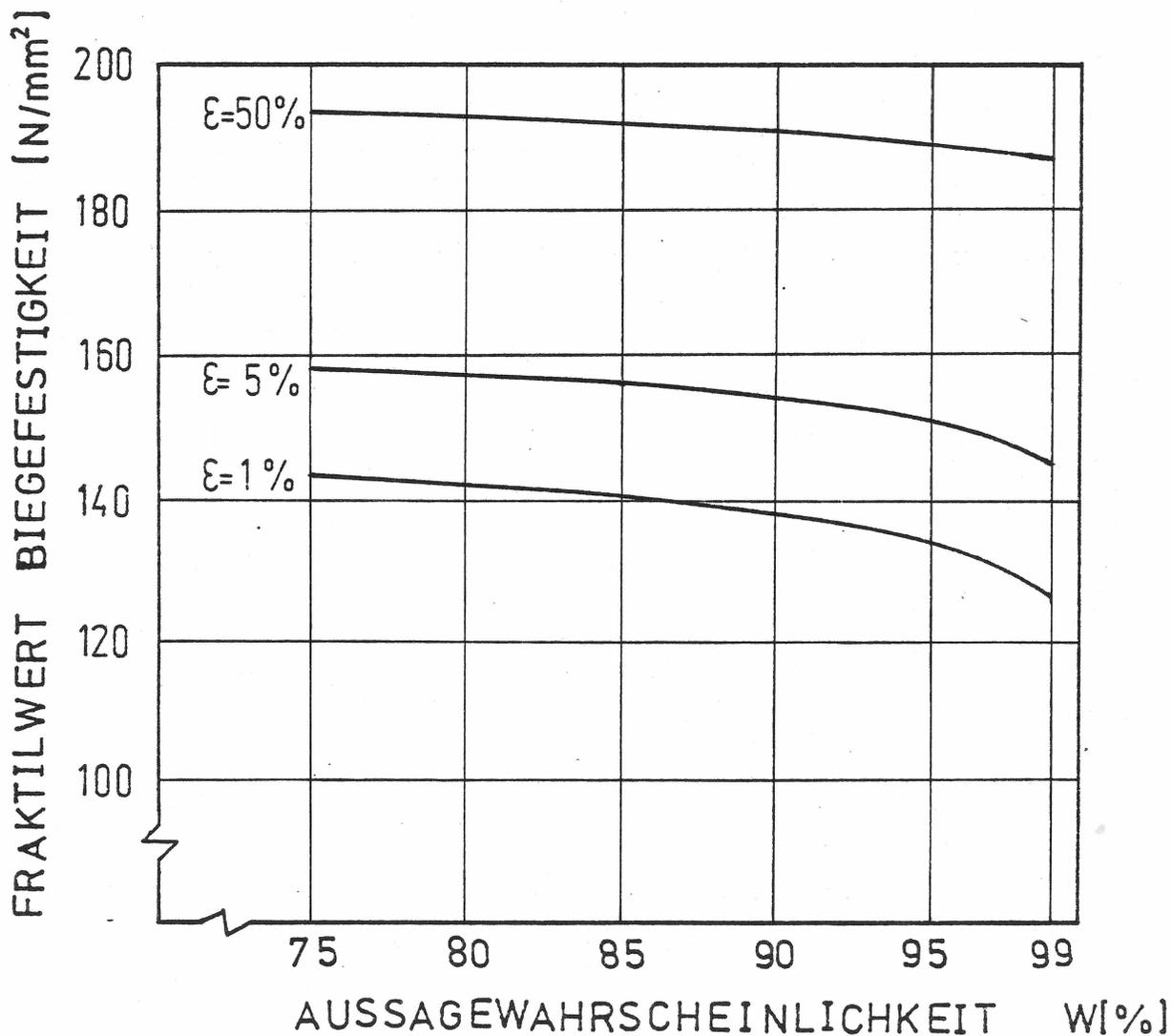


Bild 98

WERKSTOFF:

GF-UP 35,6 Gew.-%

Mischlaminat

Elastizitätsmodul

$X_i = 15,63 \text{ kN/mm}^2$

$S = 0,88 \text{ kN/mm}^2$

$n = 28$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	13,319	13,254	13,175	13,070	12,904	12,548
	5 %	13,977	13,926	13,865	13,783	13,654	13,379
	10 %	14,325	14,281	14,228	14,158	14,047	13,813
	20 %	14,742	14,709	14,661	14,603	14,512	14,322
	30 %	15,039	15,009	14,966	14,915	14,837	14,674
	40 %	15,288	15,260	15,222	15,176	15,106	14,963
	50 %	15,516	15,490	15,454	15,412	15,347	15,219

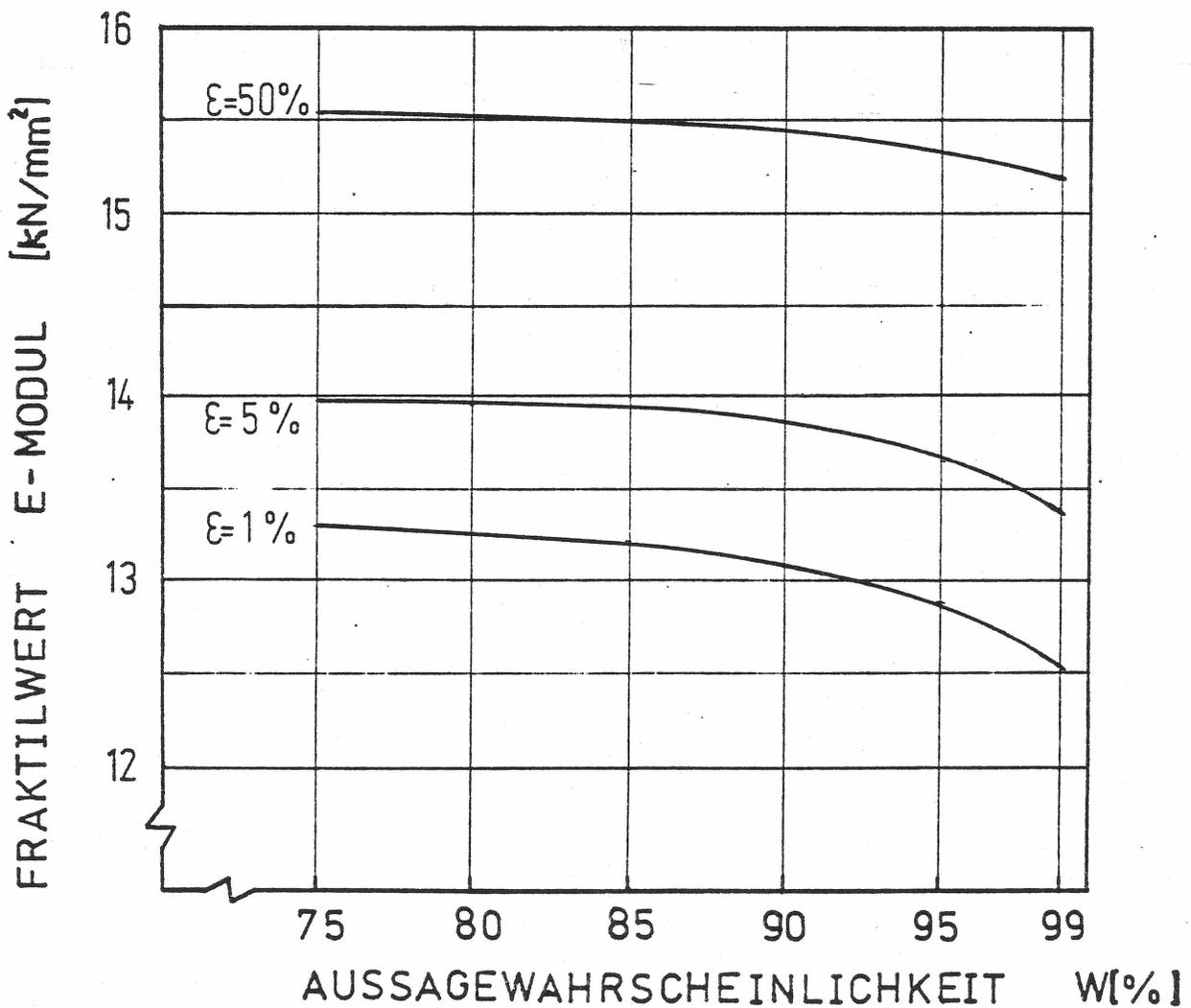


Bild 99

WERKSTOFF:

GF-UP 35,8 Gew.-%  
Mischlaminat  
Biegefestigkeit

$\bar{x} = 173 \text{ N/mm}^2$

$s = 11 \text{ N/mm}^2$

$n = 15$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	142,475	141,243	139,725	137,668	134,280	126,558
	5 %	151,099	150,142	148,965	147,381	144,774	138,878
	10 %	155,653	154,828	153,827	152,463	150,252	145,269
	20 %	161,076	160,405	159,580	158,469	156,687	152,727
	30 %	164,915	164,321	163,606	162,660	161,142	157,831
	40 %	168,116	167,577	166,939	166,092	164,772	161,945
	50 %	171,031	170,536	169,942	169,183	167,995	165,542

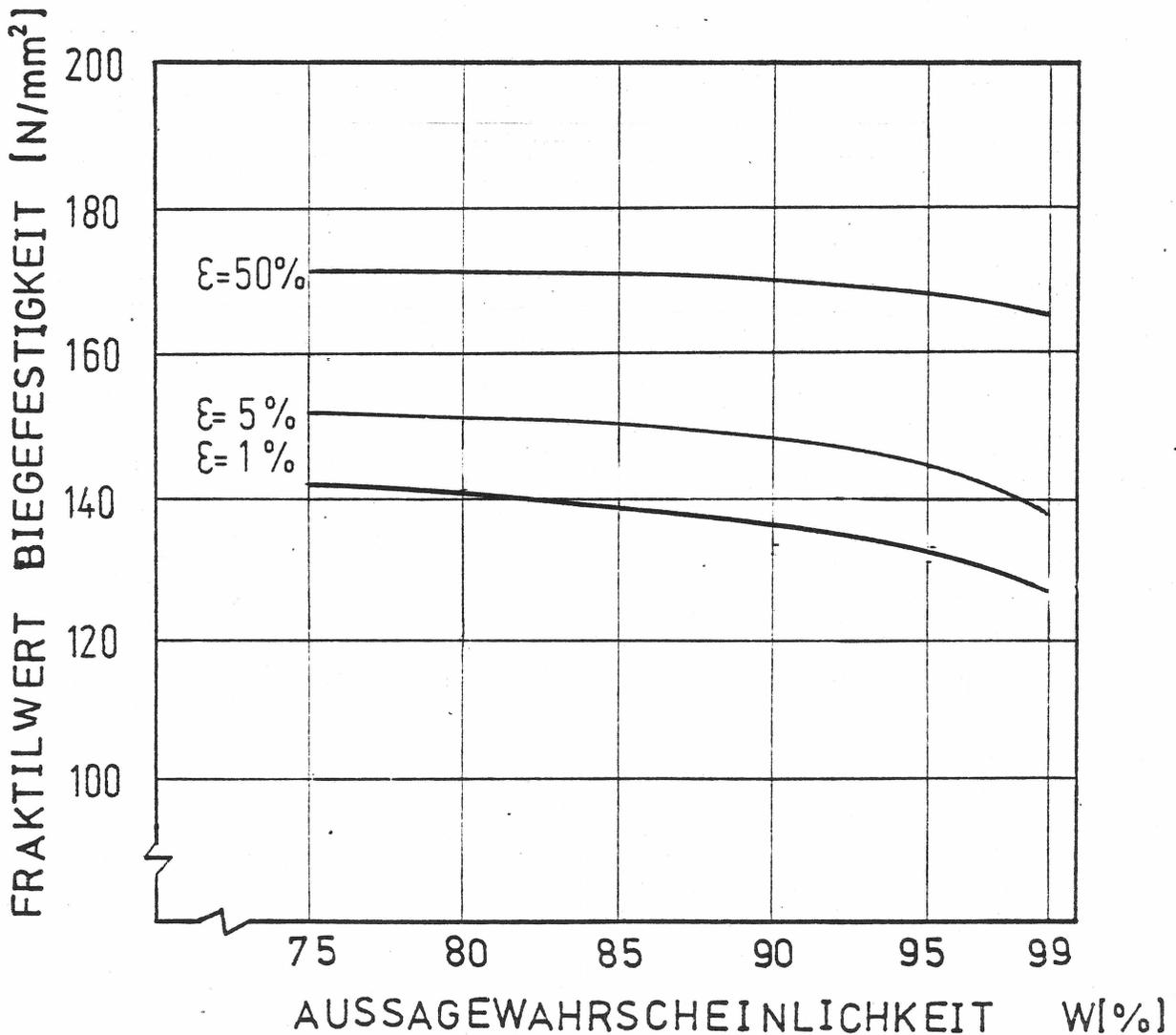


Bild 100

WERKSTOFF:

GF-UP 35,8 Gew.-%

Mischlaminat

Elastizitätsmodul

$\bar{x} = 16,59 \text{ KN/mm}^2$

$s = 0,76 \text{ KN/mm}^2$

$n = 18$

AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT

		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	14,521	14,445	14,353	14,230	14,029	13,580
	5 %	15,106	15,048	14,977	14,881	14,726	14,382
	10 %	15,416	15,366	15,304	15,223	15,090	14,799
	20 %	15,786	15,744	15,693	15,626	15,519	15,287
	30 %	16,047	16,011	15,967	15,909	15,817	15,621
	40 %	16,266	16,233	16,193	16,147	16,061	15,892
	50 %	16,467	16,436	16,398	16,351	16,278	16,130

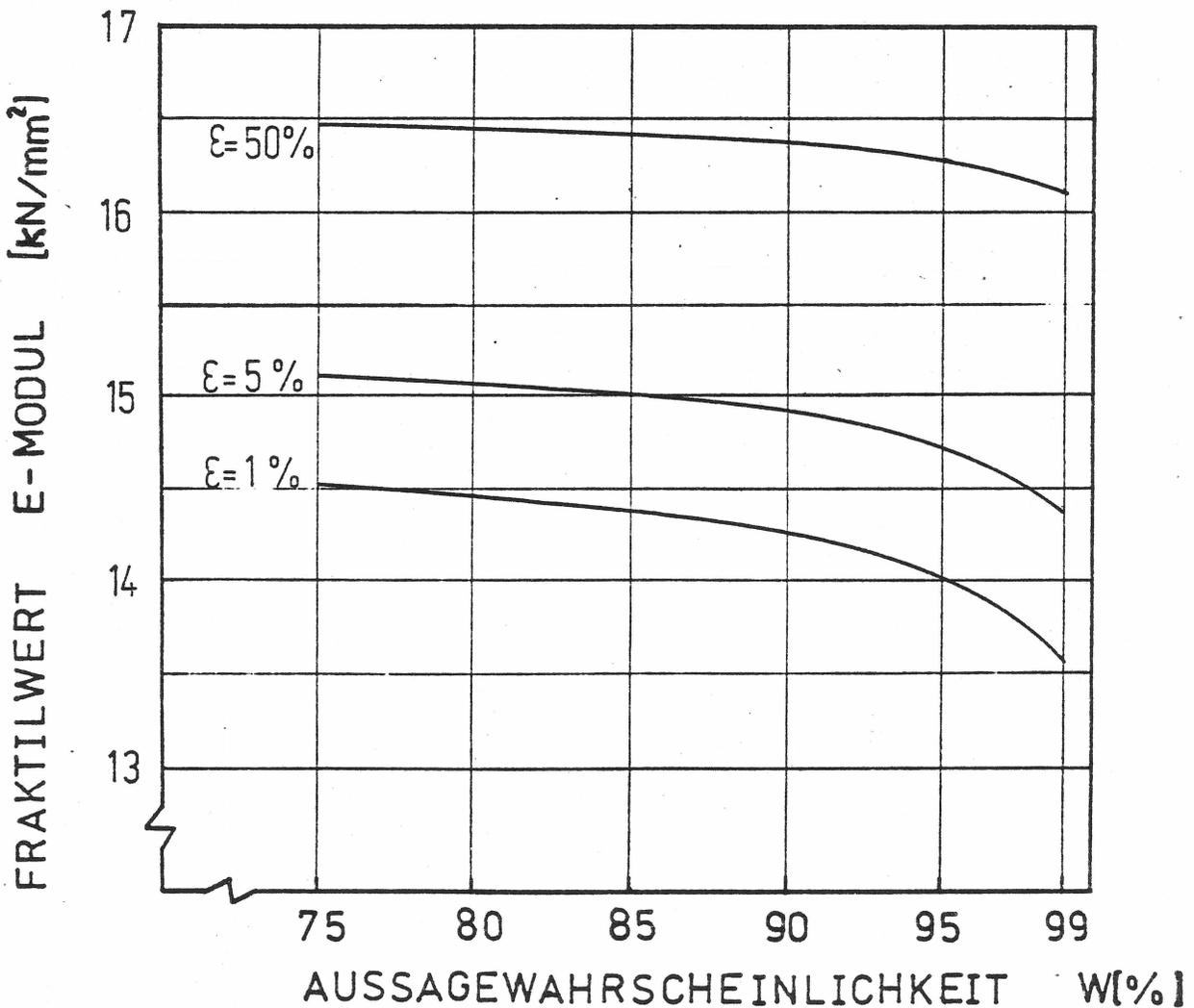


Bild 101

WERKSTOFF:

GF-UP 34,1 Gew.-%

Mischlaminat

Zugfestigkeit

$\bar{X} = 108 \text{ N/mm}^2$

$S = 4 \text{ N/mm}^2$

$n = 25$

AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT

		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	97,408	97,092	96,704	96,192	95,368	93,596
	5 %	100,420	100,172	99,872	99,472	98,832	97,468
	10 %	102,012	101,800	101,536	100,192	100,648	99,484
	20 %	103,920	103,740	103,524	103,240	102,792	101,852
	30 %	105,272	105,112	104,924	104,676	104,288	103,488
	40 %	106,408	106,264	106,092	105,868	105,524	104,824
	50 %	107,452	107,316	107,152	106,944	106,632	106,008

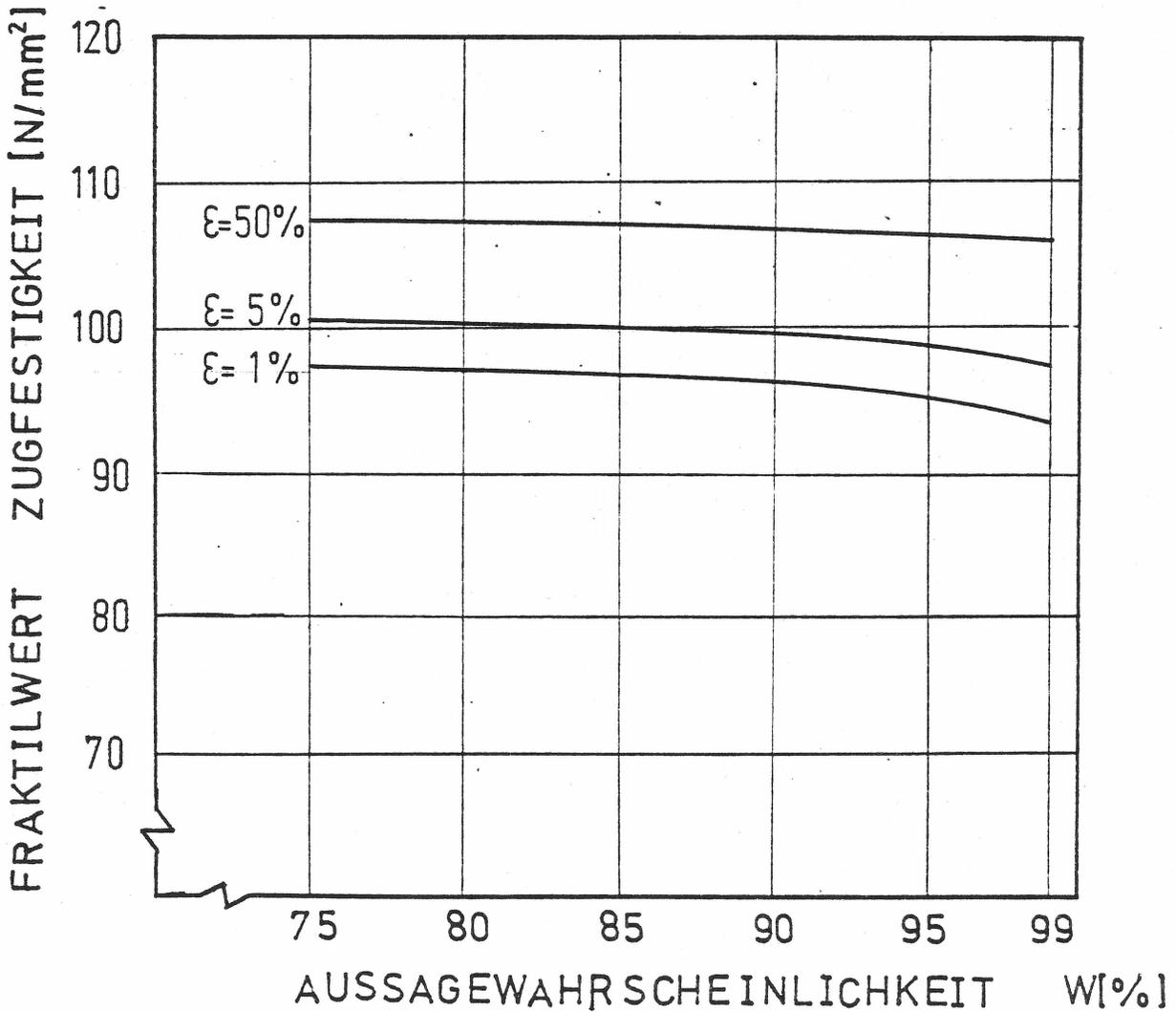


Bild 102

WERKSTOFF:

GF-UP 34,1 Gew.-%

Mischlaminat

Elastizitätsmodul

$$\bar{x} = 11,67 \text{ KN/mm}^2$$

$$s = 0,55 \text{ KN/mm}^2$$

$$n = 25$$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	10,214	10,170	10,117	10,037	9,933	9,689
	5 %	10,628	10,594	10,552	10,497	10,409	10,222
	10 %	10,847	10,818	10,781	10,734	10,659	10,499
	20 %	11,109	11,084	11,055	11,016	10,954	10,825
	30 %	11,295	11,273	11,256	11,213	11,165	11,050
	40 %	11,451	11,431	11,408	11,377	11,330	11,233
	50 %	11,595	11,576	11,553	11,525	11,482	11,396

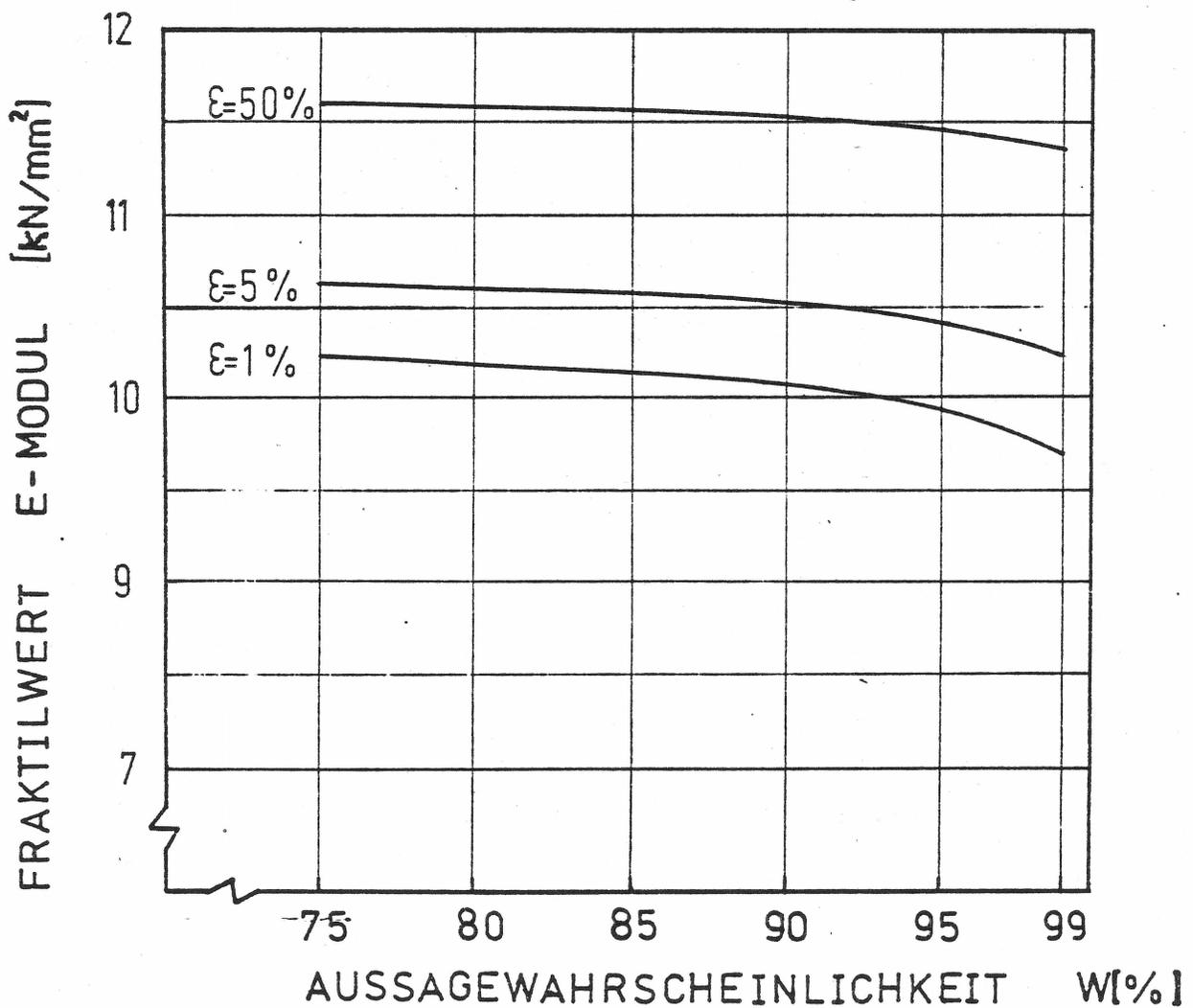


Bild 103

WERKSTOFF:

GF-UP 34,6 Gew.-%  
Mischlaminat  
Zugfestigkeit

$X_i = 104 \text{ N/mm}^2$   
 $S = 9 \text{ N/mm}^2$   
 $n = 16$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	79,196	78,242	77,054	75,452	72,824	66,893
	5 %	86,216	85,469	84,551	83,309	81,284	76,748
	10 %	89,915	89,267	88,484	87,422	85,703	81,869
	20 %	94,334	93,803	93,155	92,291	90,905	87,845
	30 %	97,457	96,989	96,422	95,684	94,496	91,940
	40 %	100,058	99,644	99,140	98,474	97,439	95,252
	50 %	102,443	102,047	101,588	100,985	100,058	98,141

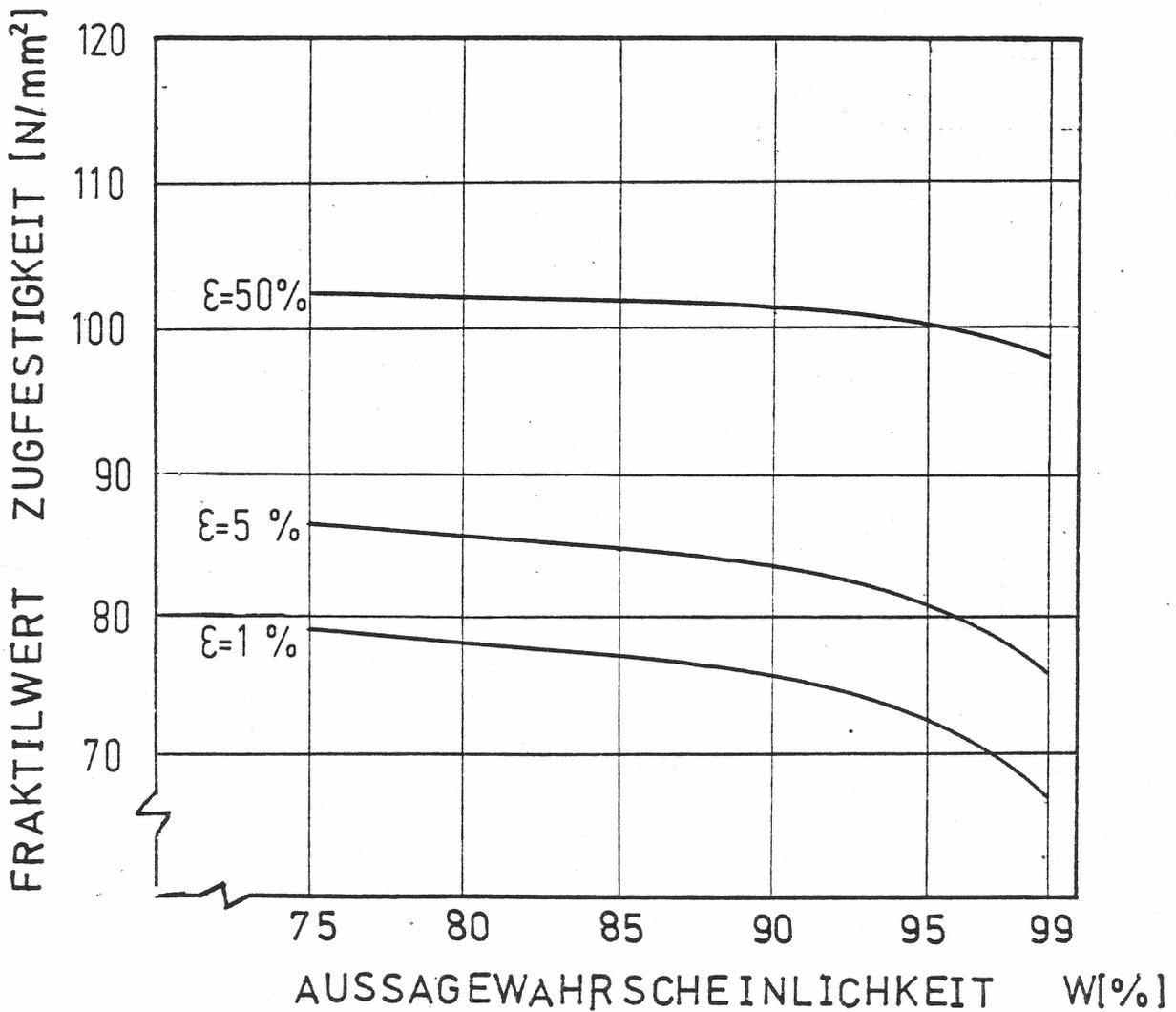


Bild 104

WERKSTOFF:

GF-UP 34,6 Gew.-%  
Mischlaminat  
Elastizitätsmodul

$\bar{x} = 9,93 \text{ kN/mm}^2$

$s = 0,92 \text{ kN/mm}^2$

$n = 16$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	7,394	7,297	7,176	7,012	6,743	6,137
	5 %	8,112	8,036	7,942	7,815	7,608	7,144
	10 %	8,490	8,424	8,344	8,235	8,060	7,668
	20 %	8,942	8,888	8,821	8,733	8,591	8,279
	30 %	9,261	9,213	9,155	9,080	8,958	8,697
	40 %	9,527	9,485	9,433	9,365	9,259	9,036
	50 %	9,771	9,730	9,683	9,622	9,527	9,331

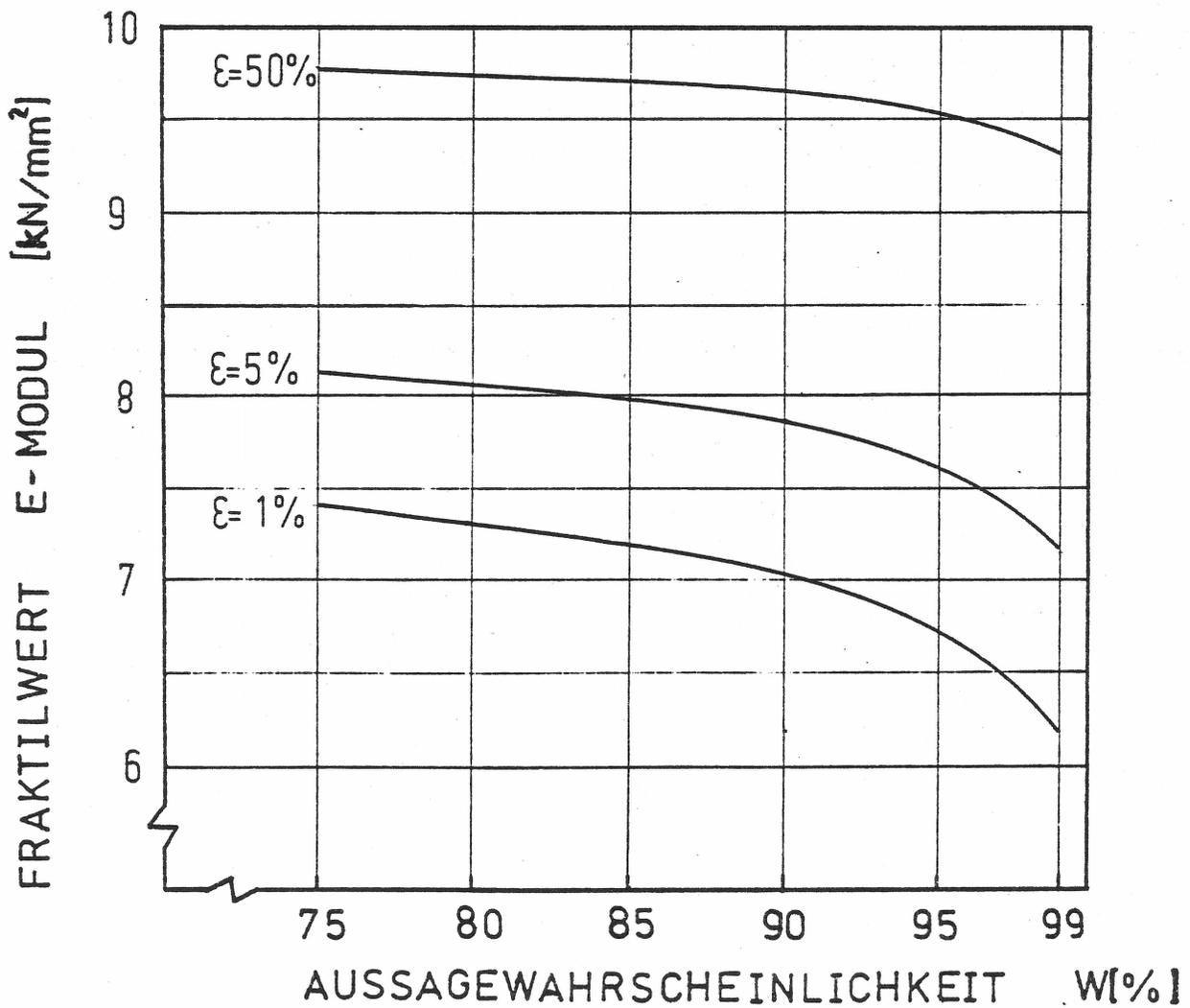


Bild 105

WERKSTOFF:

GF-UP 35,7 Gew.-%

Mischlaminat

Zugfestigkeit

$\bar{X} = 119 \text{ N/mm}^2$

$s = 9 \text{ N/mm}^2$

$n = 20$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	94,727	93,899	92,891	91,532	89,345	84,512
	5 %	101,612	100,964	100,181	99,128	97,436	93,728
	10 %	105,248	104,690	104,015	103,115	101,666	98,516
	20 %	109,595	109,136	108,578	107,831	106,661	104,132
	30 %	112,673	112,268	111,782	111,134	110,126	107,993
	40 %	115,256	114,878	114,437	113,870	112,979	111,125
	50 %	117,614	117,272	116,858	116,327	115,517	113,888

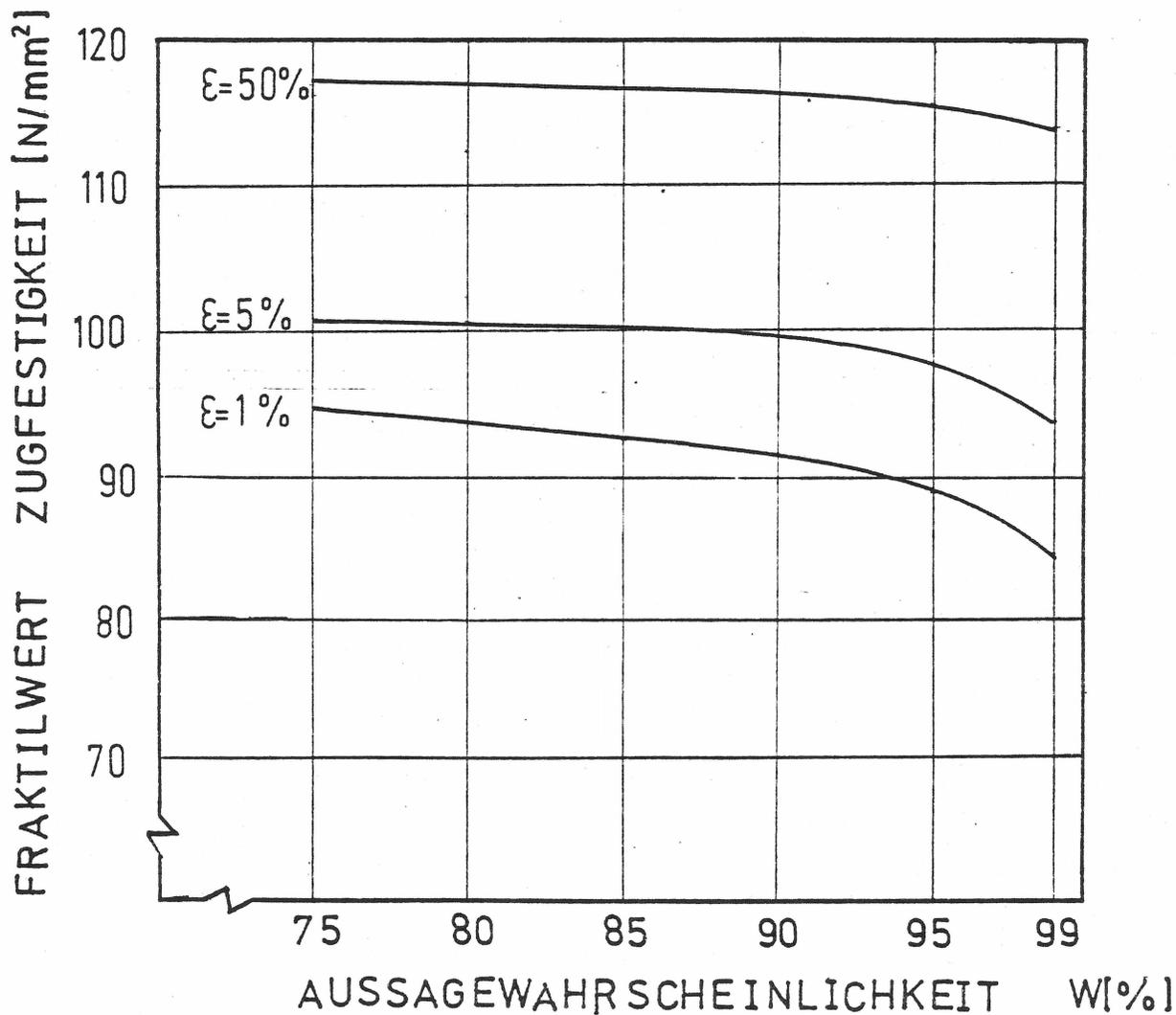


Bild 106

WERKSTOFF:

GF-UP 35,7 Gew.-%

Mischlaminat

Elastizitätsmodul

$\bar{x}_i = 11,35 \text{ kN/mm}^2$

$s = 0,57 \text{ kN/mm}^2$

$n = 20$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	9,813	9,760	9,696	9,610	9,472	9,166
	5 %	10,248	10,208	10,158	10,091	9,984	9,749
	10 %	10,479	10,444	10,401	10,344	10,252	10,053
	20 %	10,754	10,725	10,690	10,643	10,569	10,408
	30 %	10,949	10,924	10,893	10,857	10,788	10,653
	40 %	11,113	11,089	11,061	11,025	10,969	10,851
	50 %	11,262	11,241	11,214	11,181	11,129	11,026

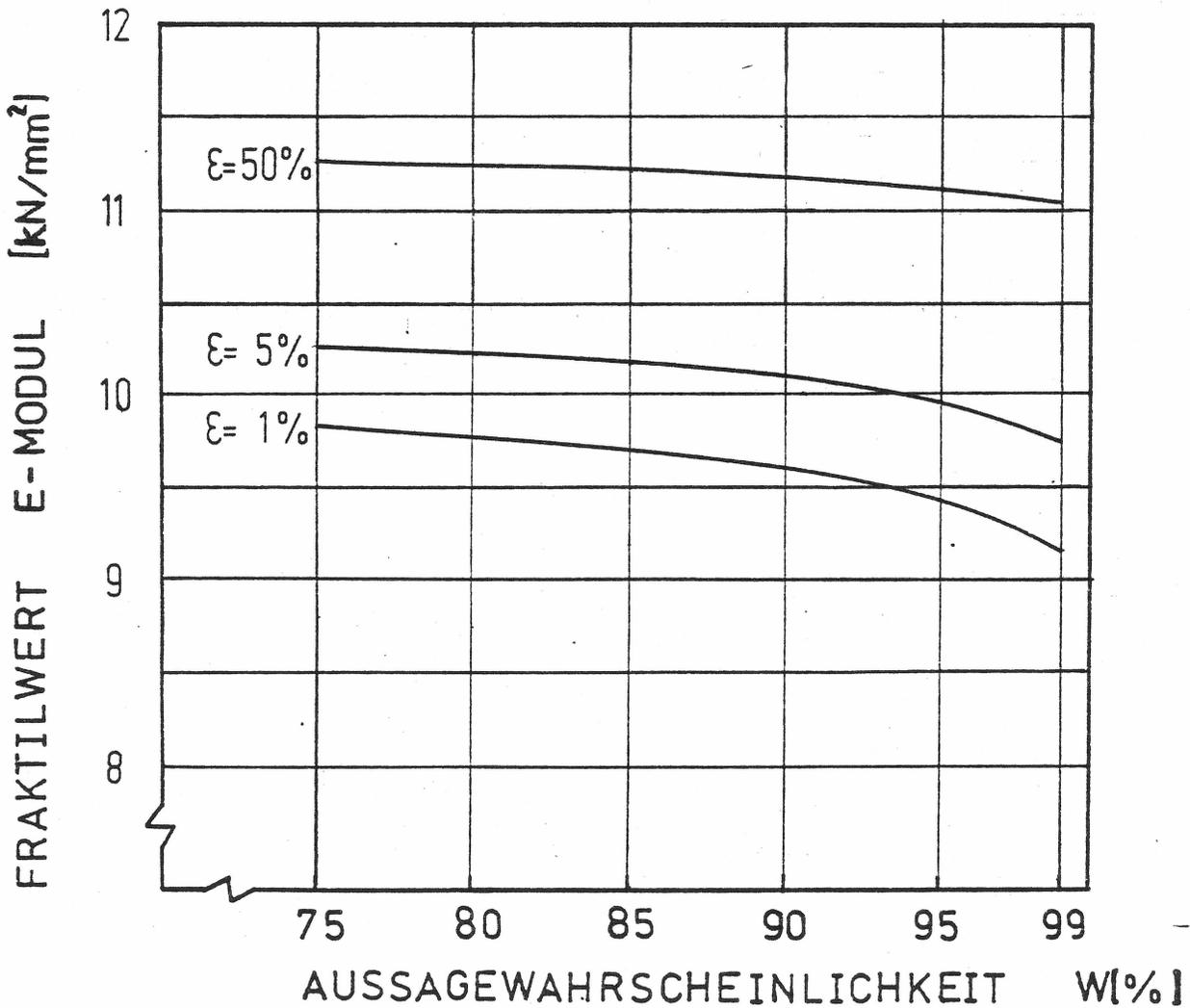


Bild 107

WERKSTOFF:

GF-UP 34,4 Gew.-%  
Mischlaminat  
Zugfestigkeit

$\bar{x} = 106 \text{ N/mm}^2$

$s = 9 \text{ N/mm}^2$

$n = 25$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	82,168	81,457	80,584	78,432	77,578	73,591
	5 %	88,945	88,387	87,712	86,812	85,372	82,303
	10 %	92,527	92,050	91,456	90,682	89,458	86,839
	20 %	96,820	96,415	95,929	95,290	94,282	92,167
	30 %	99,862	99,502	99,079	98,521	97,648	95,848
	40 %	102,418	102,094	101,707	101,203	100,429	98,854
	50 %	104,767	104,461	104,092	103,624	102,922	101,518

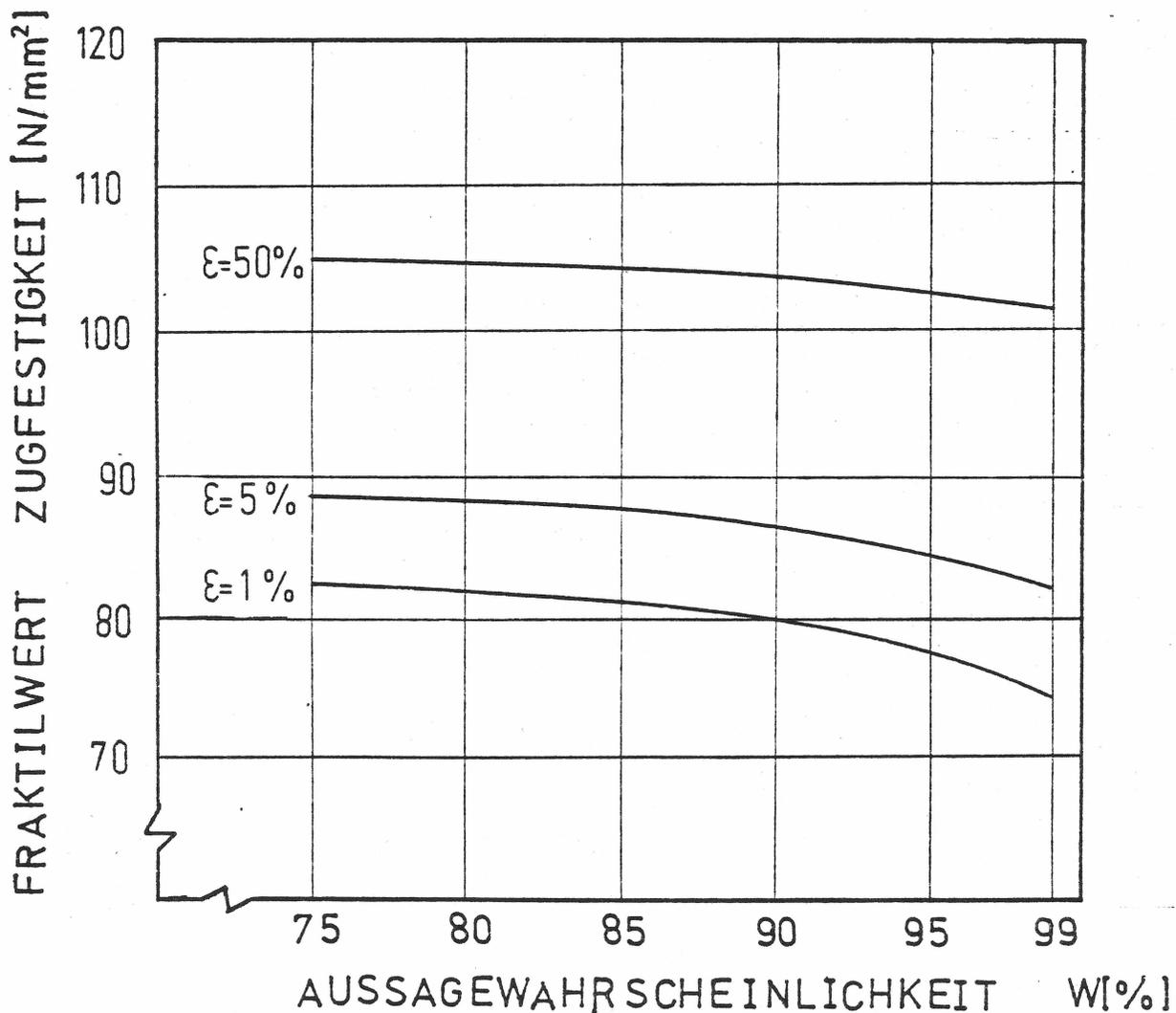


Bild 108

WERKSTOFF:

GF-UP 35,8 Gew.-%  
Mischlaminat  
Elastizitätsmodul

$\bar{x} = 15,15 \text{ kN/mm}^2$

$s = 0,64 \text{ kN/mm}^2$

$n = 15$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	13,374	13,302	13,070	13,028	12,894	12,448
	5 %	13,876	13,820	13,752	13,659	13,508	13,165
	10 %	14,141	14,093	14,034	13,867	13,826	13,537
	20 %	14,456	14,417	14,369	14,305	14,201	13,970
	30 %	14,680	14,645	14,603	14,548	14,460	14,267
	40 %	14,866	14,834	14,797	14,748	14,671	14,507
	50 %	15,035	15,007	14,972	14,928	14,859	14,716

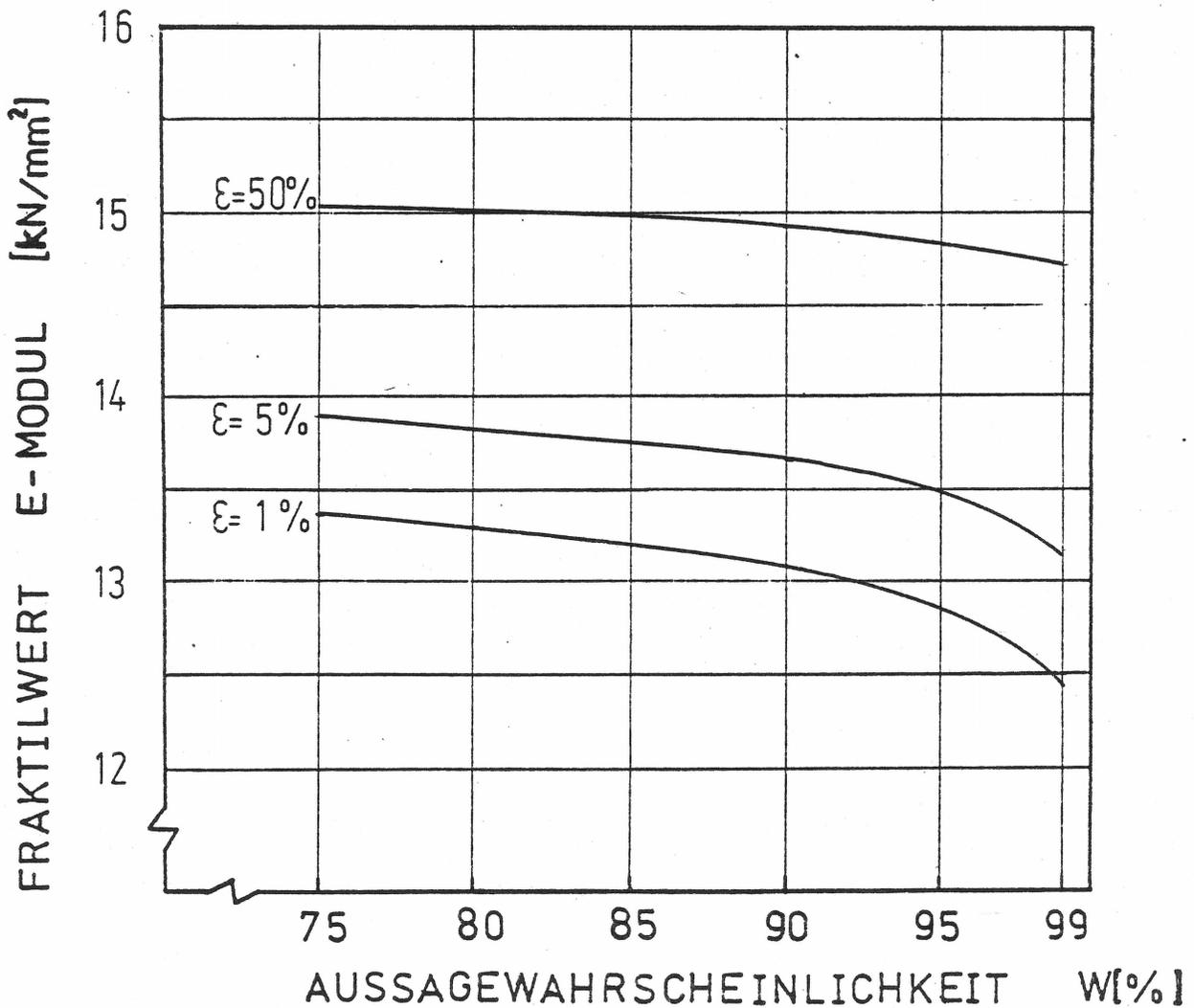


Bild 109

WERKSTOFF:

GF-UP 35,8 Gew.-%  
Mischlaminat  
Biegefestigkeit

$\bar{X} = 190 \text{ N/mm}^2$

$S = 14 \text{ N/mm}^2$

$n = 18$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	151,878	150,492	148,798	146,530	142,820	134,560
	5 %	162,672	161,594	160,278	158,514	155,658	149,330
	10 %	168,370	167,446	166,312	164,814	162,364	157,007
	20 %	175,188	174,418	173,480	172,248	170,274	165,990
	30 %	180,004	179,332	178,520	177,456	175,762	172,150
	40 %	184,036	183,420	182,697	181,740	180,256	177,148
	50 %	187,732	187,158	186,472	185,604	184,260	181,530

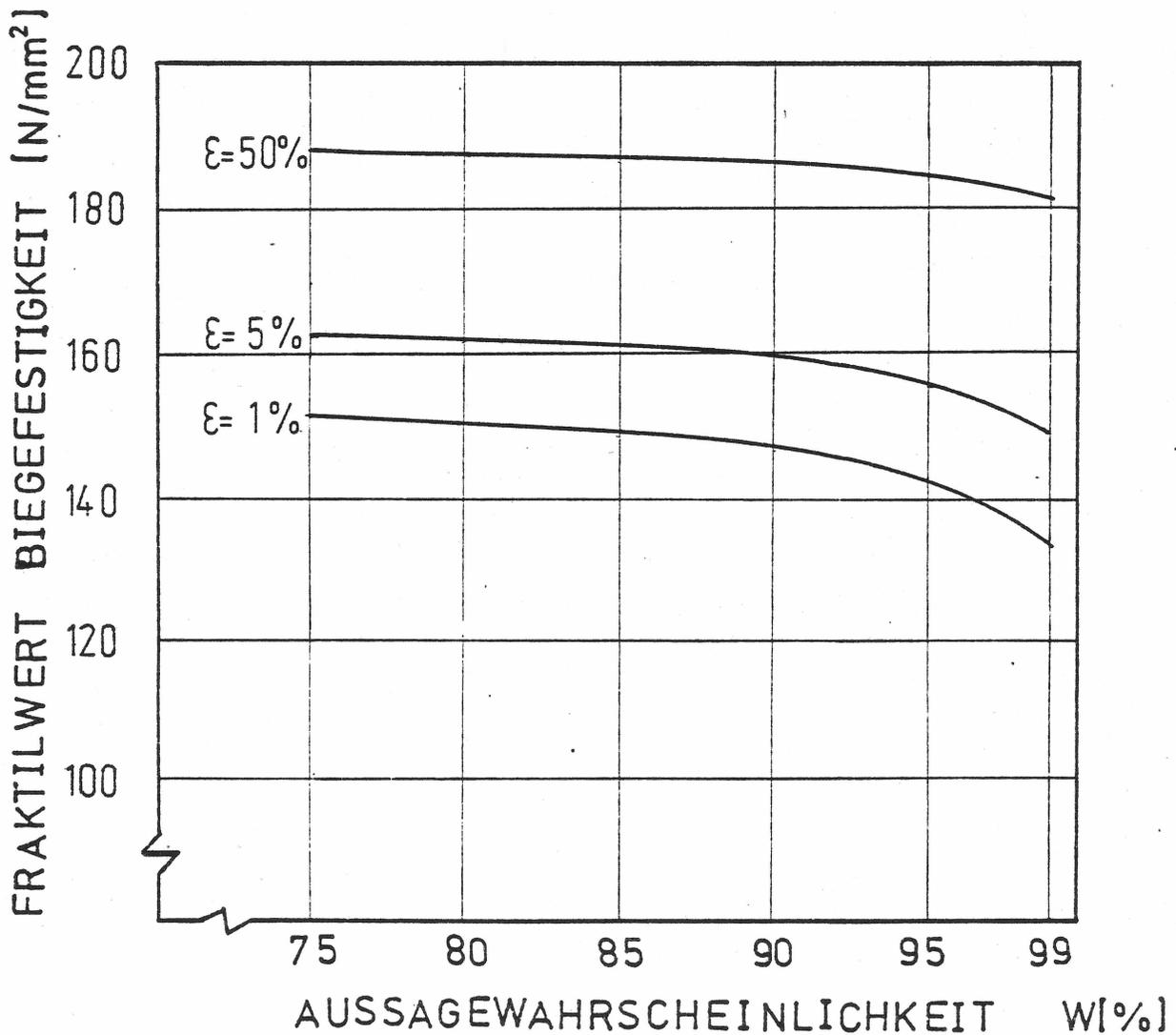


Bild 110

WERKSTOFF:

GF-UP 36,5 Gew.-%

Mischlaminat

Elastizitätsmodul

$\bar{x} = 12,31 \text{ kN/mm}^2$

$s = 0,38 \text{ kN/mm}^2$

$n = 20$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	11,285	11,250	11,208	11,150	11,058	10,854
	5 %	11,576	11,548	11,515	11,471	11,400	11,243
	10 %	11,729	11,706	11,677	11,639	11,578	11,445
	20 %	11,913	11,894	11,870	11,838	11,789	11,682
	30 %	12,043	12,026	12,005	11,978	11,935	11,845
	40 %	12,152	12,136	12,117	12,093	12,056	11,978
	50 %	12,251	12,237	12,220	12,197	12,163	12,094

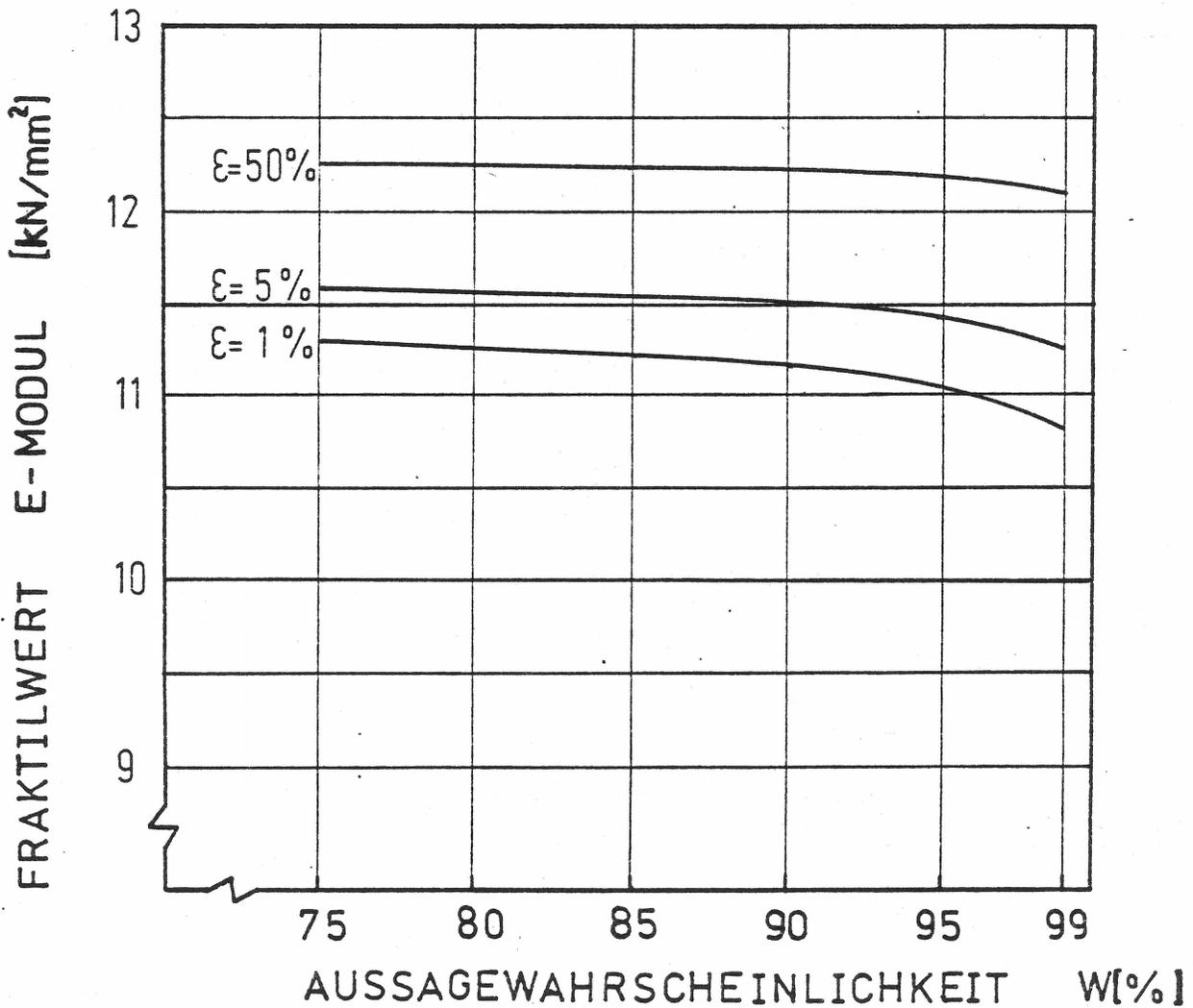


Bild 111

WERKSTOFF:

GF-UP 36,5 Gew.-%  
Mischlamirat  
Zugfestigkeit

$\bar{x} = 122 \text{ N/mm}^2$

$s = 6 \text{ N/mm}^2$

$n = 16$

AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT

		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	105,464	104,828	104,036	102,968	101,216	97,262
	5 %	110,144	109,646	109,034	108,206	106,856	103,832
	10 %	112,610	112,178	111,656	110,948	109,802	107,246
	20 %	115,556	116,202	114,770	114,194	113,270	111,230
	30 %	117,638	117,326	116,948	116,456	115,664	113,960
	40 %	119,372	119,096	118,760	118,316	117,626	116,168
	50 %	120,962	120,698	120,392	119,990	119,372	118,094

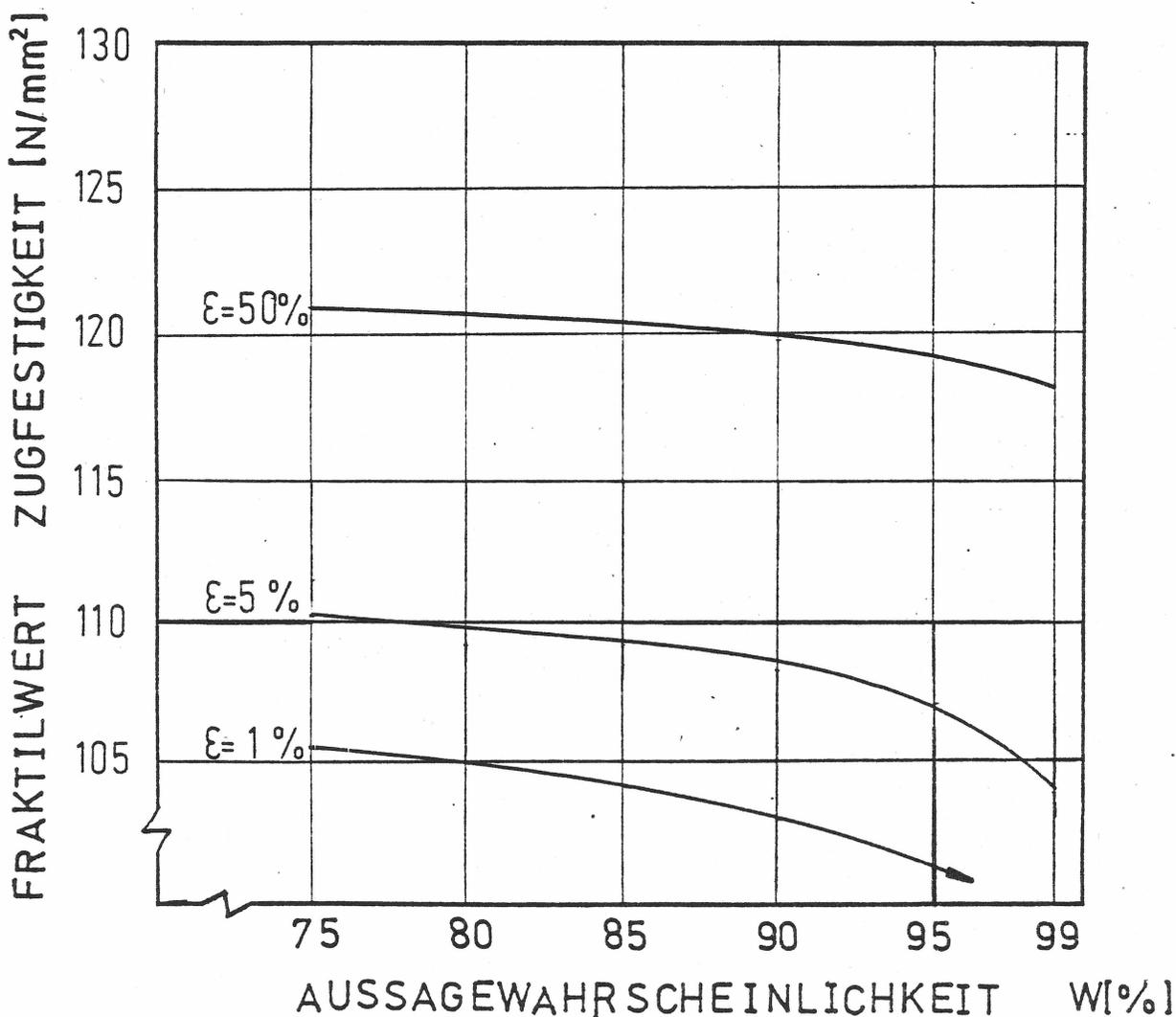


Bild 112

WERKSTOFF:

GF-UP 34,2 Gew.-%

Mischlaminat

Elastizitätsmodul

$\bar{x}_i = 10,16 \text{ KN/mm}^2$

$s = 0,70 \text{ KN/mm}^2$

$n = 20$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	8,272	8,208	8,129	8,024	7,854	7,478
	5 %	8,808	8,757	8,691	8,614	8,483	8,194
	10 %	9,090	9,047	8,995	8,925	8,812	8,567
	20 %	9,429	9,303	9,349	9,201	9,200	9,004
	30 %	9,668	9,636	9,599	9,548	9,470	9,304
	40 %	9,869	9,839	9,805	9,761	9,692	9,548
	50 %	10,052	10,026	9,993	9,952	9,889	9,762

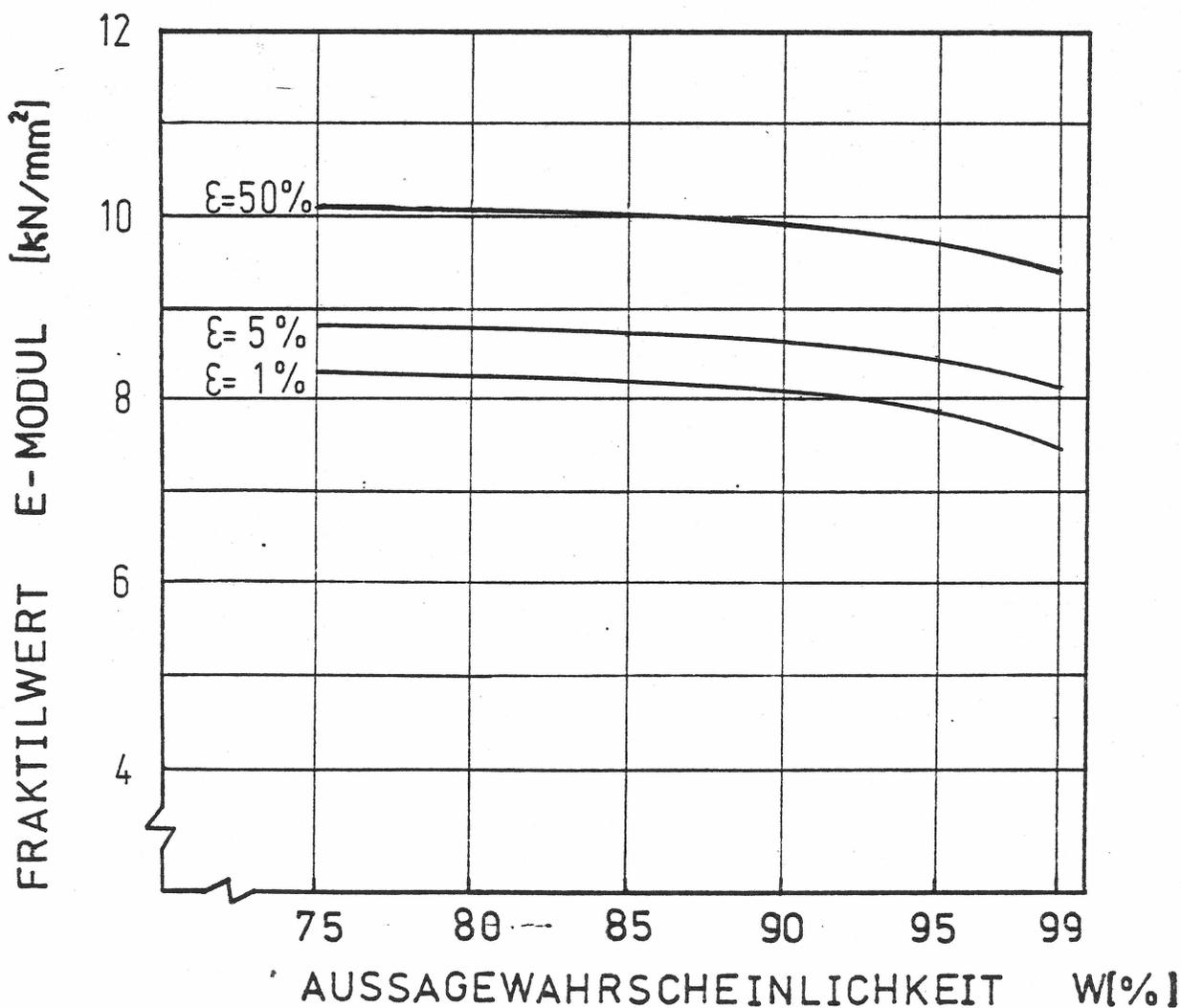


Bild 113

WERKSTOFF:

GF-UP 34,2 Gew.-%  
Mischlaminat  
Zugfestigkeit

$X^I = 101 \text{ N/mm}^2$

$S = 4 \text{ N/mm}^2$

$n = 20$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTIWERT	1 %	90,212	89,844	89,396	88,792	87,820	85,672
	5 %	93,272	92,984	92,636	92,168	91,416	89,768
	10 %	94,888	94,640	94,340	93,940	93,296	91,896
	20 %	96,820	96,616	96,368	96,036	95,516	94,392
	30 %	98,188	98,008	97,792	97,504	97,056	96,108
	40 %	99,336	99,168	98,972	98,720	98,324	97,500
	50 %	100,384	100,232	100,048	99,812	99,452	98,728

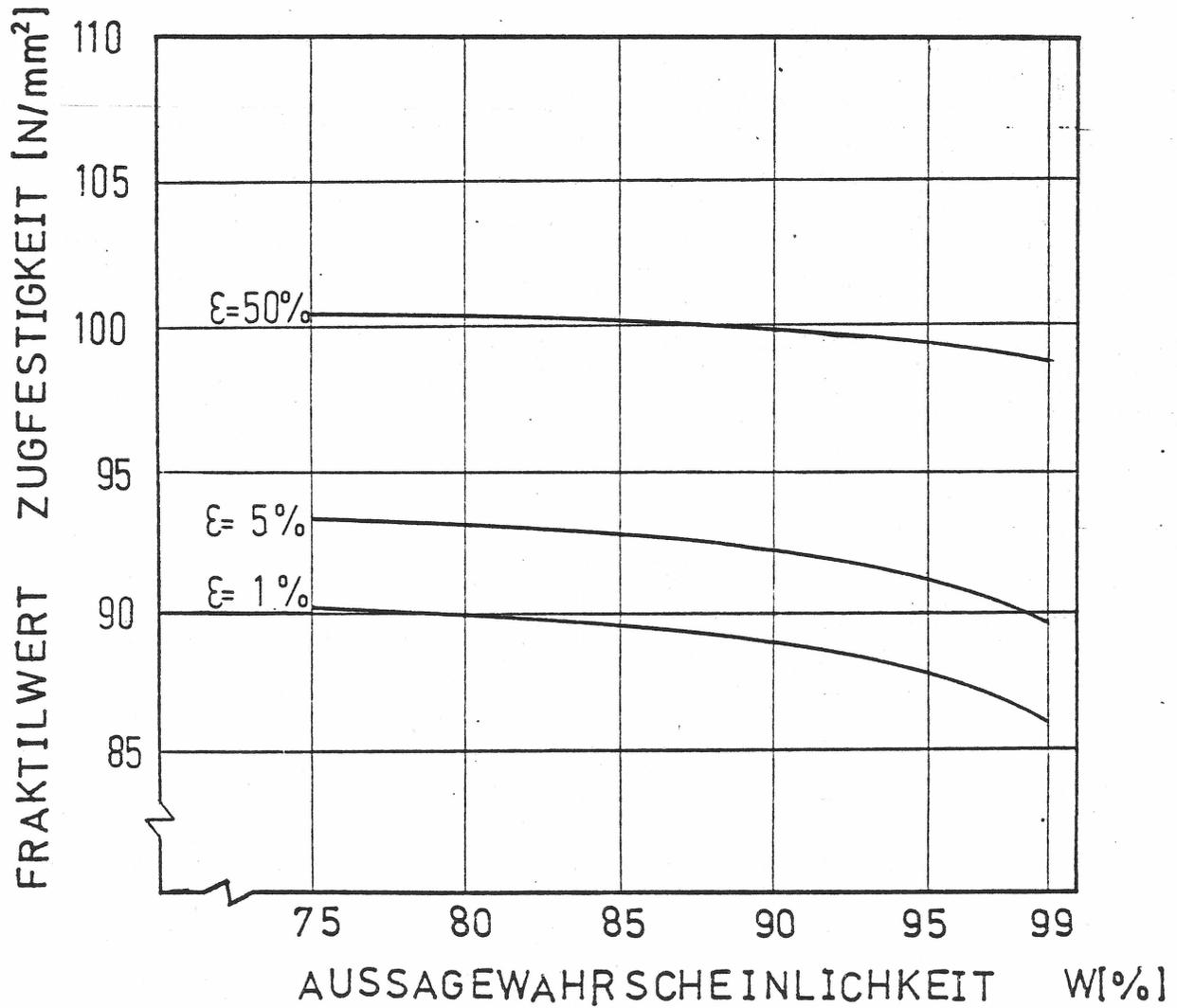


Bild 114

WERKSTOFF:

GF-UP 34,4 Gew.-%  
Mischlaminat  
Elastizitätsmodul

$\bar{x} = 16,73 \text{ KN/mm}^2$

$s = 0,78 \text{ KN/mm}^2$

$n = 30$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	14,691	14,636	14,569	14,480	14,340	14,042
	5 %	15,272	15,229	15,177	15,108	14,998	14,768
	10 %	15,580	15,542	15,497	15,438	15,344	15,147
	20 %	15,948	15,916	15,879	15,830	15,753	15,593
	30 %	16,210	16,182	16,149	16,105	16,039	15,902
	40 %	16,430	16,405	16,374	16,335	16,275	16,154
	50 %	16,633	16,608	16,579	16,544	16,488	16,380

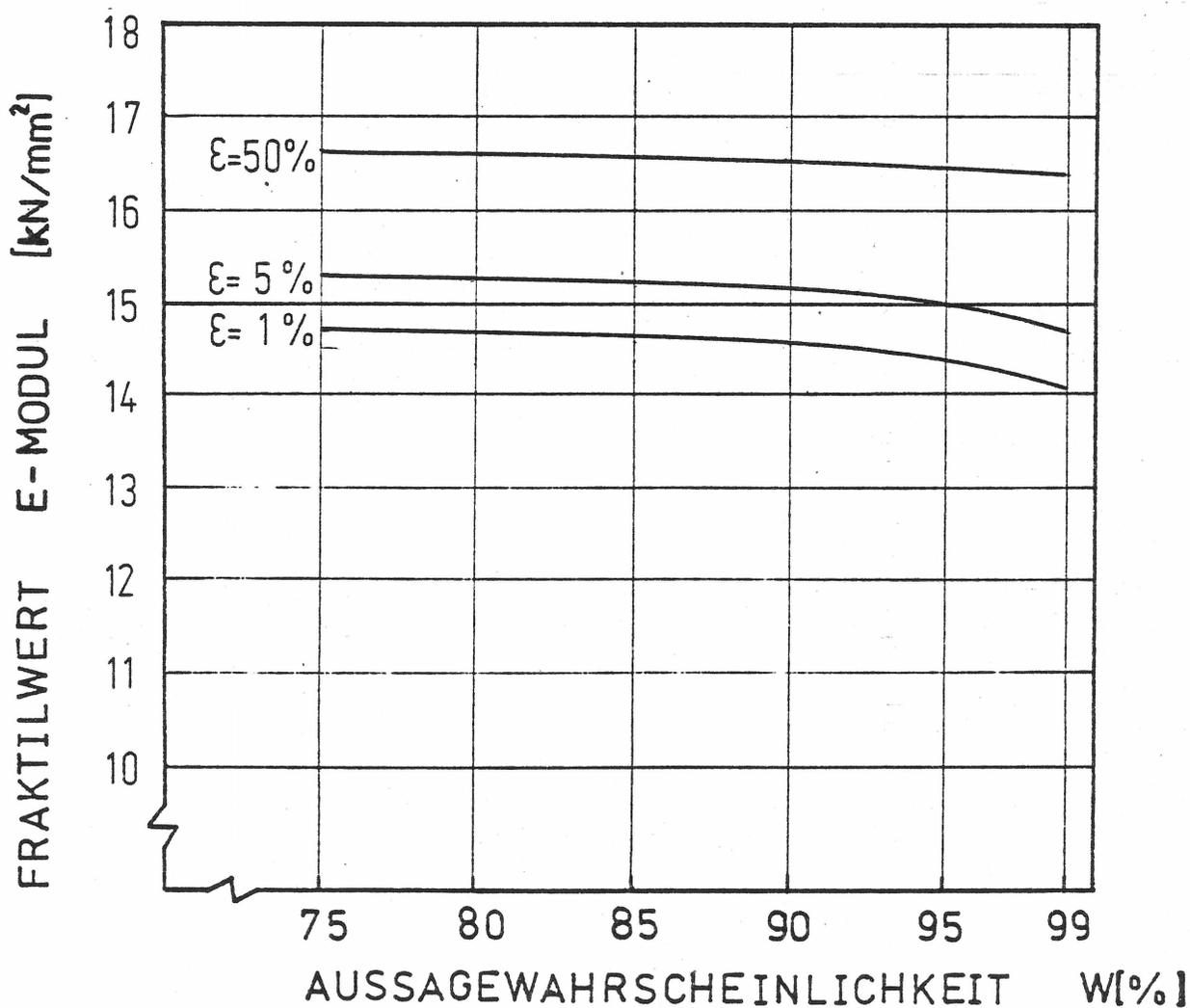


Bild 115

WERKSTOFF:

GF-UP 34,4 Gew.-%  
Mischlaminat  
Biegefestigkeit

$\bar{x} = 194 \text{ N/mm}^2$

$s = 13 \text{ N/mm}^2$

$n = 30$

AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT

		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	160,018	159,108	157,990	156,508	154,168	149,202
	5 %	169,703	168,988	168,117	166,960	165,140	161,305
	10 %	174,825	174,201	173,447	172,459	170,899	167,610
	20 %	180,974	180,441	179,817	178,998	177,711	175,046
	30 %	185,329	184,861	184,315	183,587	182,482	180,194
	40 %	189,008	188,579	188,072	187,422	186,421	184,406
	50 %	192,375	191,972	191,491	190,893	189,970	188,163

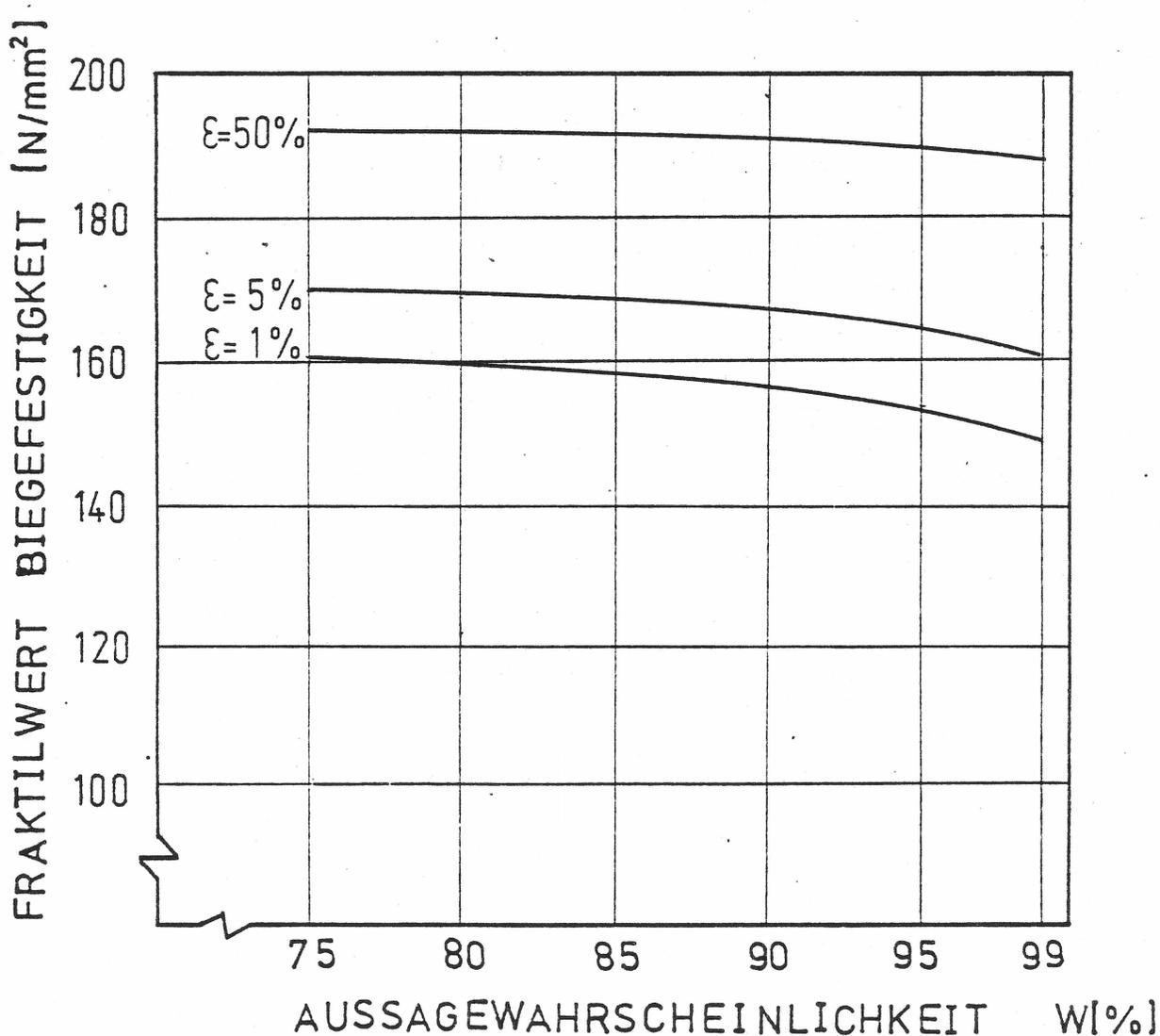


Bild 116

WERKSTOFF:

GF-UP 34,4 Gew.-%  
Mischlaminat  
Elastizitätsmodul

$\bar{x} = 10,92 \text{ KN/mm}^2$

$s = 0,45 \text{ KN/mm}^2$

$n = 25$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	9,728	9,693	9,649	9,592	9,499	9,300
	5 %	10,067	10,039	10,006	9,961	9,889	9,735
	10 %	10,246	10,223	10,193	10,154	10,093	9,962
	20 %	10,461	10,441	10,416	10,385	10,334	10,228
	30 %	10,613	10,595	10,574	10,546	10,502	10,412
	40 %	10,741	10,725	10,705	10,680	10,641	10,563
	50 %	10,858	10,843	10,825	10,801	10,766	10,696

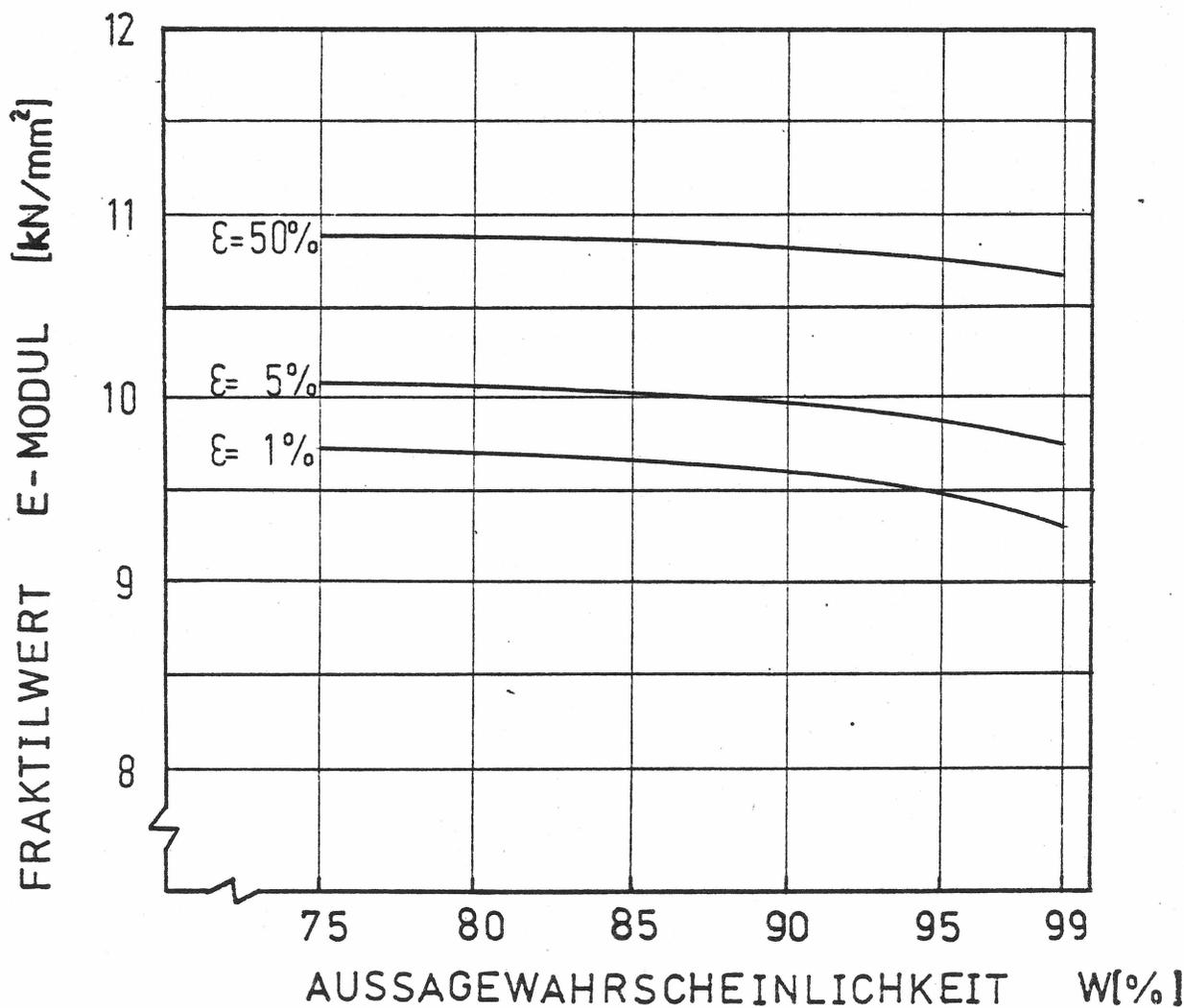


Bild 117

WERKSTOFF:

GF-UP 30,8 Gew.-%

Mattenlaminat

Zugfestigkeit

$\bar{x}_i = 116 \text{ N/mm}^2$

$s = 9 \text{ N/mm}^2$

$n = 16$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	91,196	90,242	89,054	87,452	84,824	78,893
	5 %	98,216	97,469	96,551	95,309	93,284	88,748
	10 %	101,915	101,267	100,484	99,422	97,703	93,869
	20 %	106,334	105,803	105,155	104,291	102,905	99,845
	30 %	109,457	108,989	108,422	107,684	106,496	103,940
	40 %	112,058	111,644	111,140	110,474	109,439	107,252
	50 %	114,443	114,047	113,588	112,985	112,058	110,141

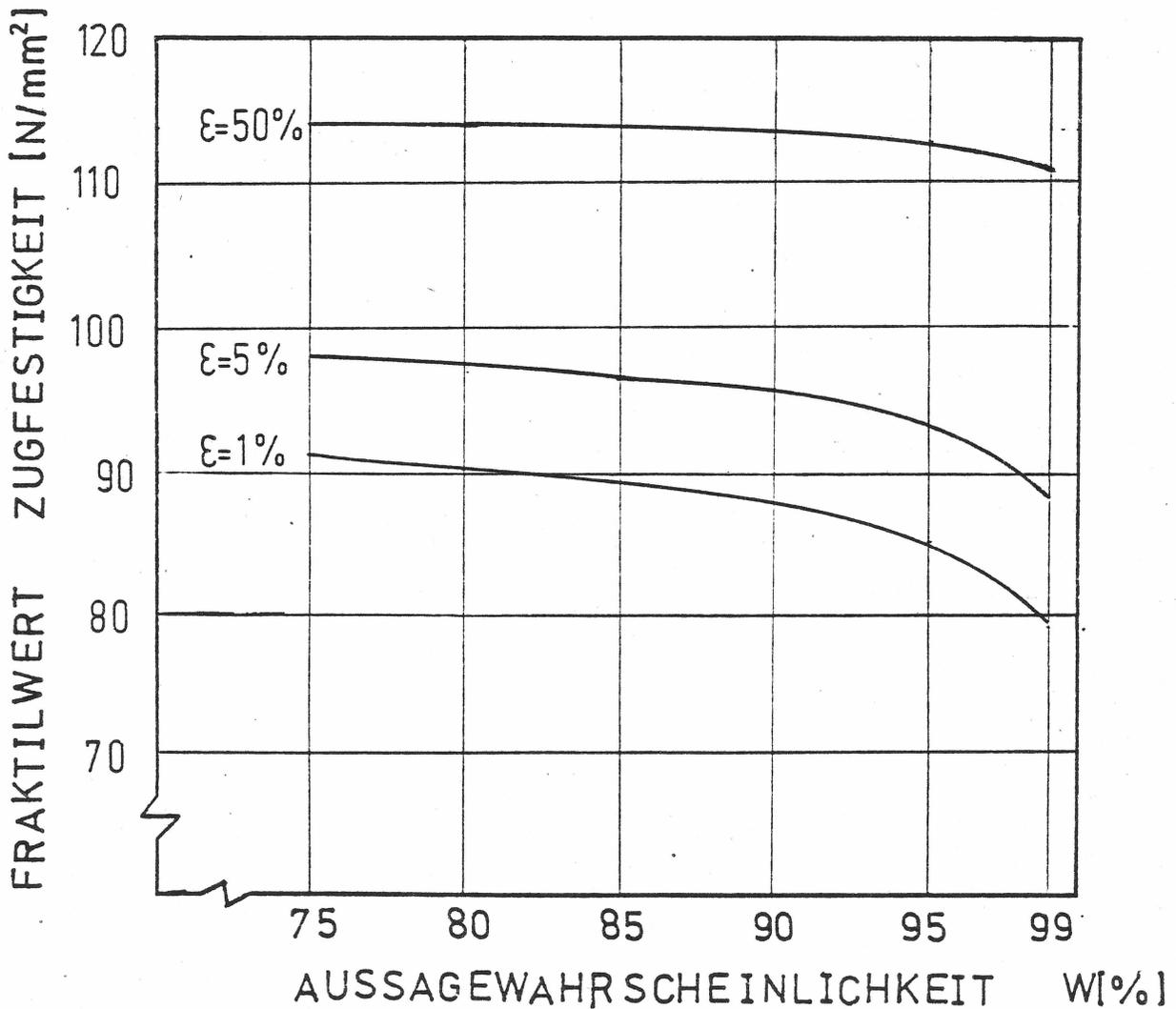


Bild 118

WERKSTOFF:

GF-UP 30,8 Gew.-%  
Mattenlaminat  
Elastizitätsmodul

$\chi_i = 9,54 \text{ kN/mm}^2$

$S = 0,37 \text{ kN/mm}^2$

$n = 16$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	8,520	8,481	8,432	8,366	8,258	8,014
	5 %	8,809	8,778	8,740	8,689	8,606	8,420
	10 %	8,961	8,934	8,902	8,858	8,788	8,630
	20 %	9,143	9,121	9,094	9,059	9,002	8,876
	30 %	9,271	9,252	9,228	9,198	9,149	9,044
	40 %	9,378	9,361	9,340	9,313	9,270	9,180
	50 %	9,476	9,460	9,441	9,416	9,378	9,299

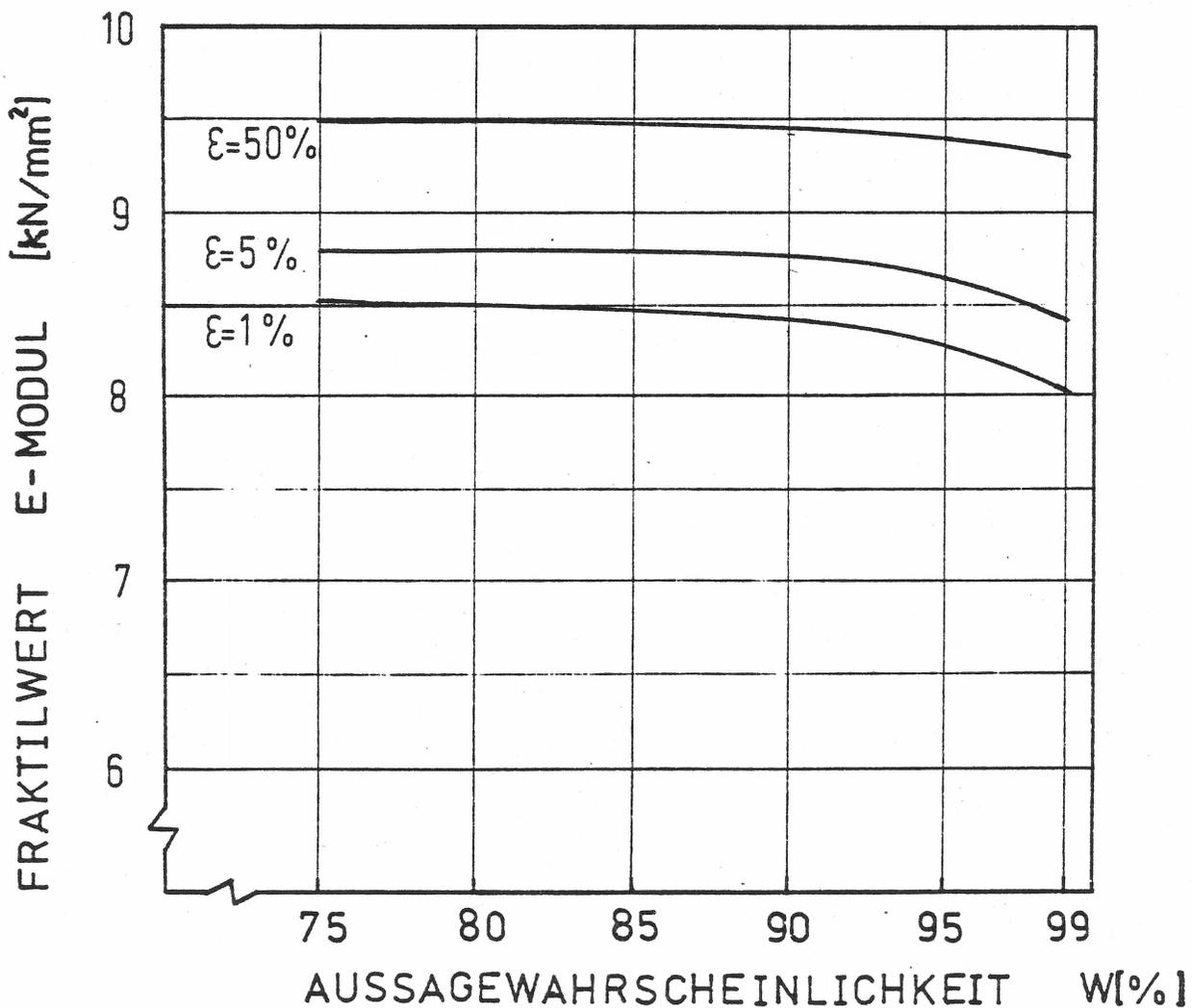


Bild 119

WERKSTOFF:

GF-UP 30,8 Gew.-%  
Mattenlaminat  
Zugfestigkeit

$\bar{x} = 98 \text{ N/mm}^2$

$s = 17 \text{ N/mm}^2$

$n = 8$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	46,285	43,192	39,248	33,689	23,982	-0,804
	5 %	60,804	58,424	55,415	51,182	43,821	25,155
	10 %	68,420	66,397	63,847	60,277	54,106	38,551
	20 %	77,464	75,832	73,792	70,970	66,115	54,072
	30 %	83,788	82,411	80,677	78,316	74,319	64,408
	40 %	89,024	87,800	86,287	84,264	80,898	72,874
	50 %	93,733	92,611	91,269	89,500	86,610	79,980

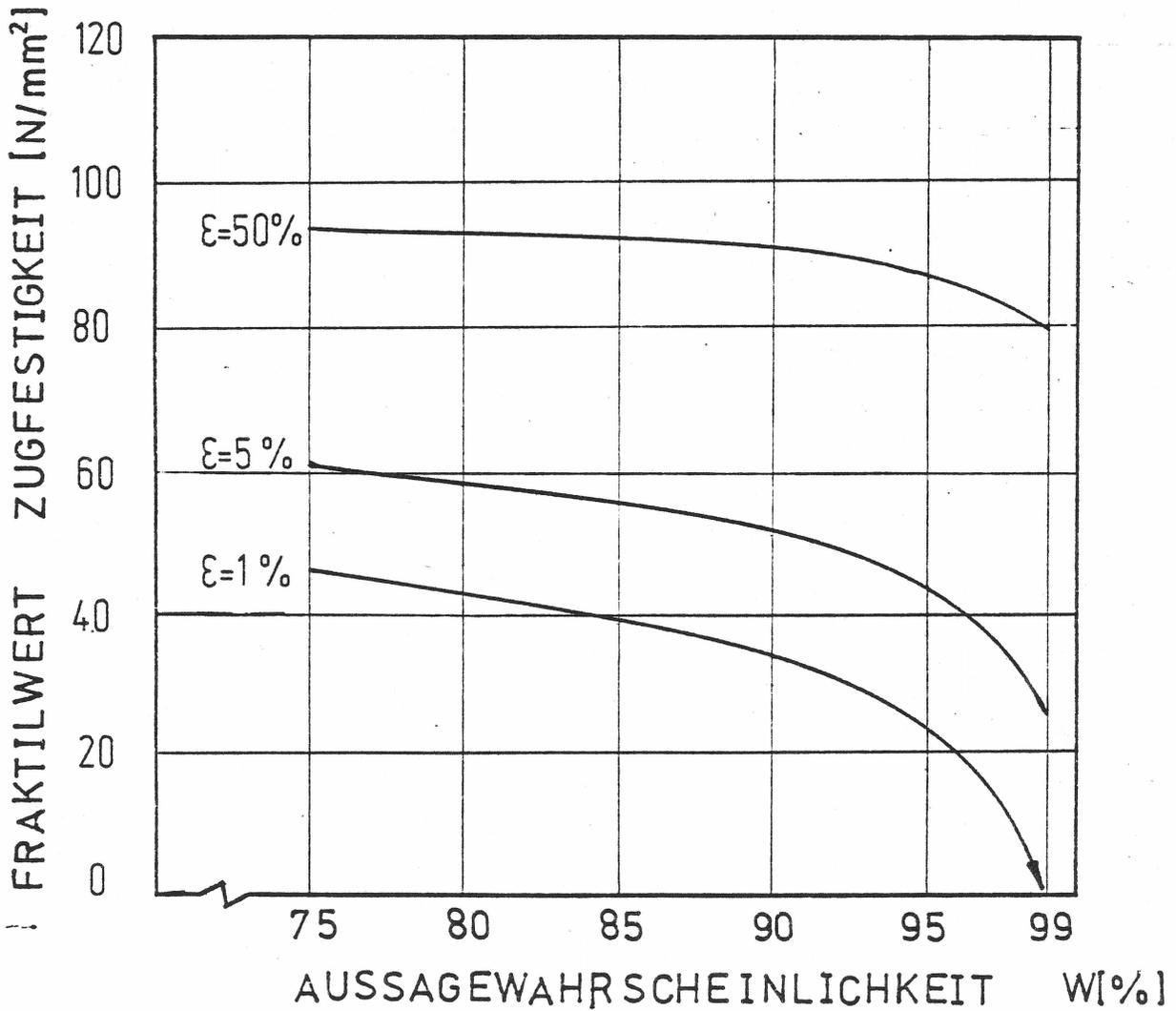


Bild 120

WERKSTOFF:

GF-UP 30,8 Gew.-%  
Mattenlaminat  
Elastizitätsmodul

$\bar{X} = 8,68 \text{ KN/mm}^2$

$S = 0,56 \text{ KN/mm}^2$

$n = 8$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	6,976	6,875	6,745	6,562	6,242	5,425
	5 %	7,455	7,376	7,277	7,138	6,895	6,280
	10 %	7,706	7,639	7,555	7,437	7,234	6,722
	20 %	8,004	7,950	7,883	7,750	7,630	7,233
	30 %	8,212	8,166	8,109	8,032	7,900	7,578
	40 %	8,384	8,344	8,294	8,228	8,117	7,852
	50 %	8,539	8,502	8,458	8,400	8,305	8,086

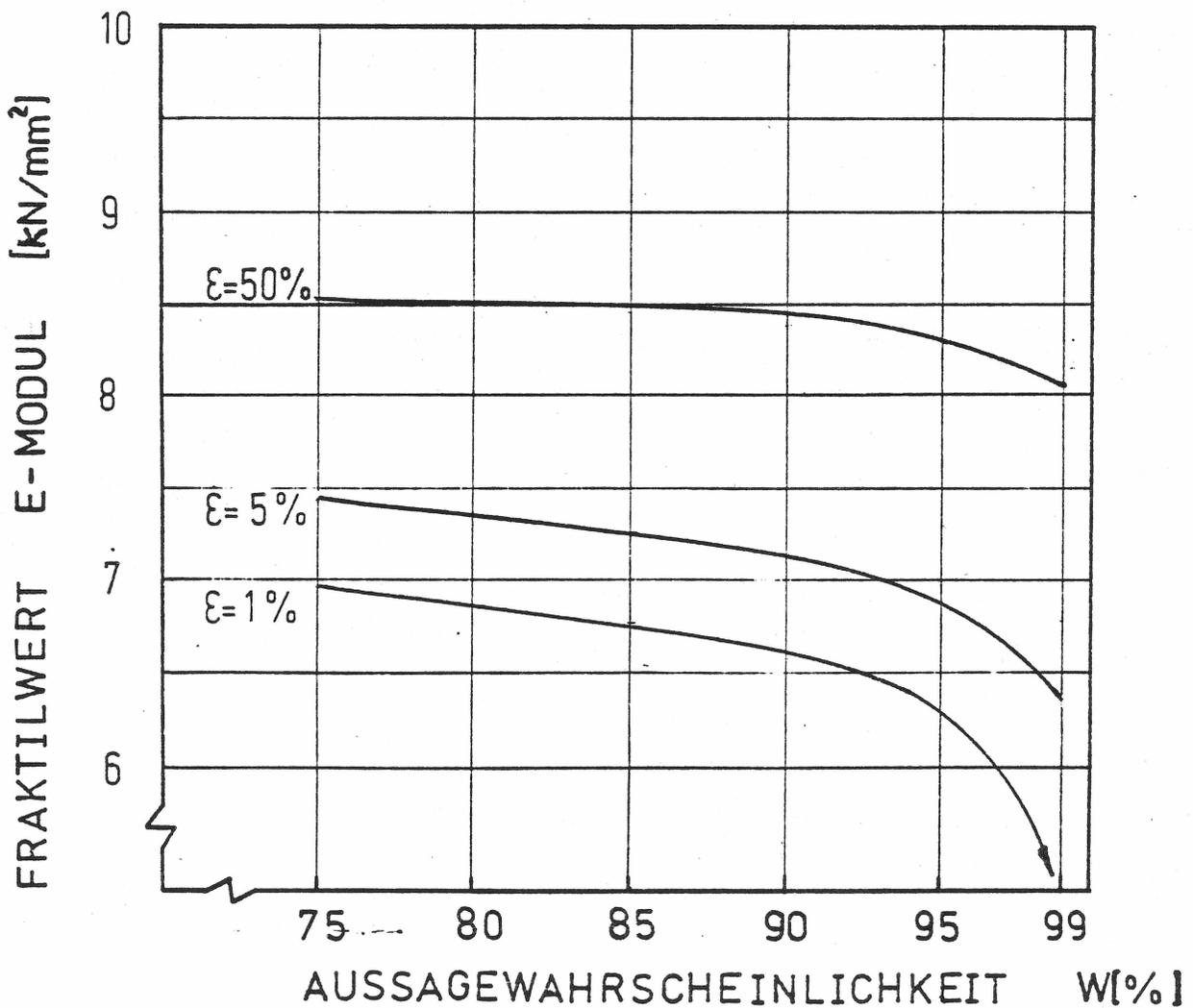


Bild 121

WERKSTOFF:

GF-UP 32,5 Gew.-%  
Mattenlaminat  
Biegefestigkeit

$\bar{x} = 190 \text{ N/mm}^2$

$s = 13 \text{ N/mm}^2$

$n = 45$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	156,824	156,109	155,238	154,107	152,326	148,660
	5 %	166,327	165,755	165,079	164,182	162,804	159,944
	10 %	171,358	170,864	170,266	169,499	168,303	165,859
	20 %	177,390	176,974	176,480	175,843	174,855	172,840
	30 %	181,693	181,329	180,887	180,315	179,444	177,715
	40 %	185,333	184,982	184,579	184,059	183,279	181,719
	50 %	188,687	188,344	187,972	187,478	186,750	185,320

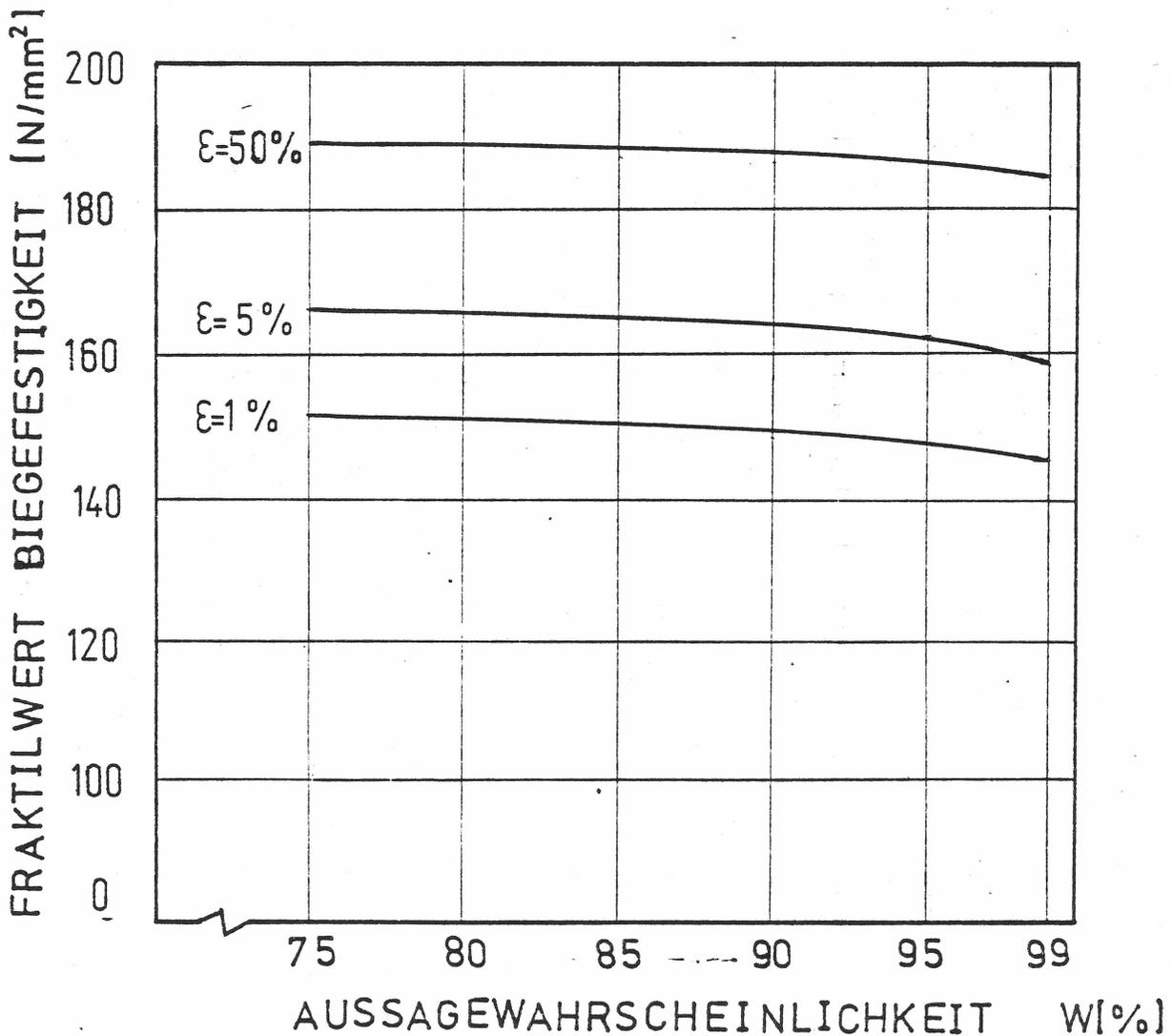


Bild 122

WERKSTOFF:

GF-UP 32,5 Gew.-%  
Mattenlaminat  
Elastizitätsmodul

$\bar{x} = 9,32 \text{ kN/mm}^2$

$s = 0,46 \text{ kN/mm}^2$

$n = 45$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	8,146	8,121	8,090	8,050	7,987	7,857
	5 %	8,482	8,462	8,438	8,406	8,358	8,280
	10 %	8,660	8,643	8,622	8,595	8,552	8,466
	20 %	8,874	8,859	8,842	8,819	8,784	8,713
	30 %	9,026	9,013	8,998	8,977	8,946	8,885
	40 %	9,155	9,142	9,128	9,110	9,082	9,027
	50 %	9,274	9,262	9,248	9,231	9,205	9,154

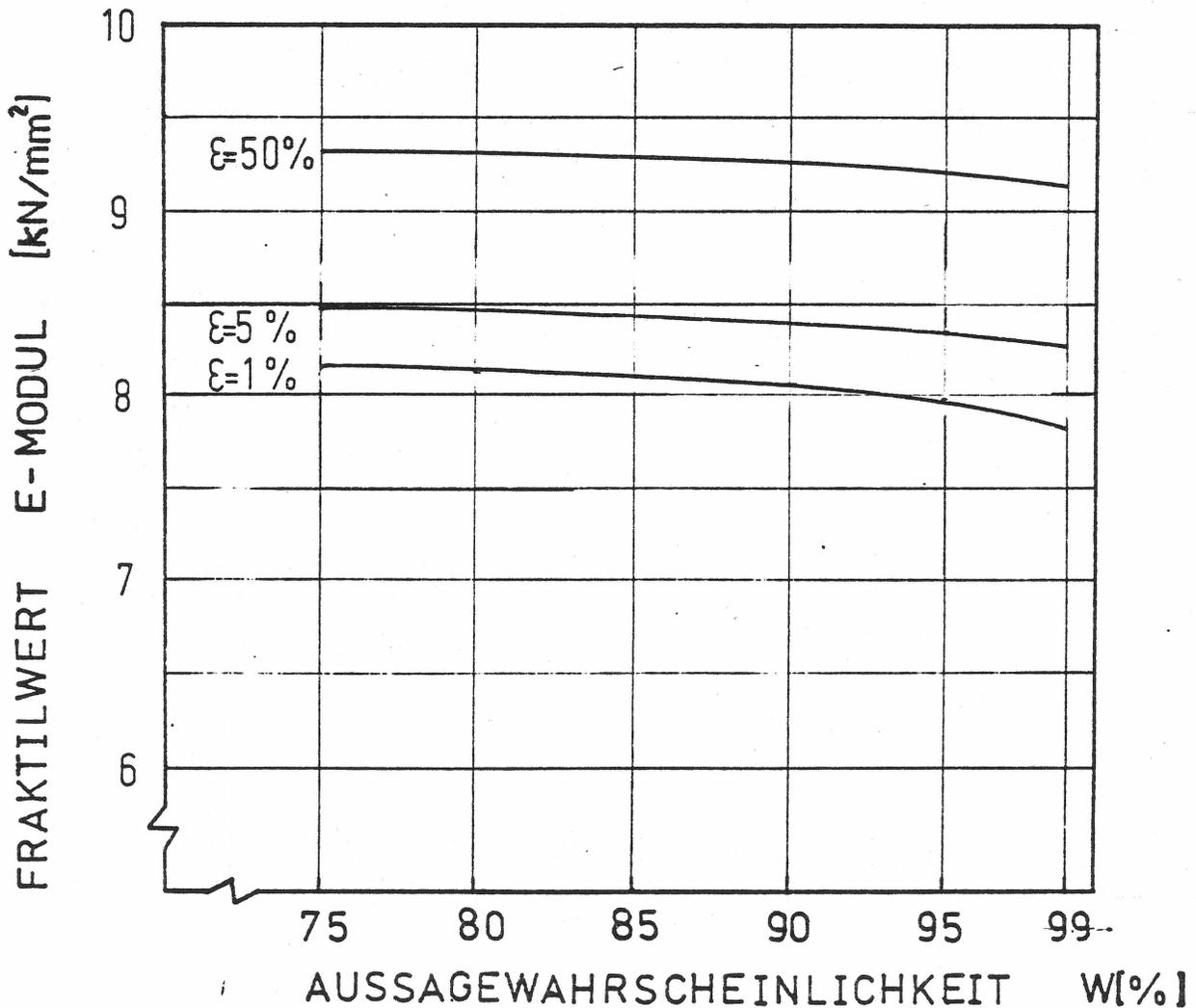


Bild 123

WERKSTOFF:

GF-UP 32,5 Gew.-%

Mattenlaminat

Biegefestigkeit

$\bar{X} = 199 \text{ N/mm}^2$

$S = 12 \text{ N/mm}^2$

$n = 9$

AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT

		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	163,276	161,296	158,800	155,308	149,284	134,332
	5 %	173,308	171,784	169,864	167,200	162,628	151,336
	10 %	178,588	177,292	175,660	173,404	169,552	160,120
	20 %	184,852	183,808	182,500	180,700	177,652	170,308
	30 %	189,244	188,344	189,228	185,716	183,196	177,208
	40 %	192,892	192,088	191,116	189,808	187,660	182,704
	50 %	196,180	195,448	194,572	193,408	191,560	187,420

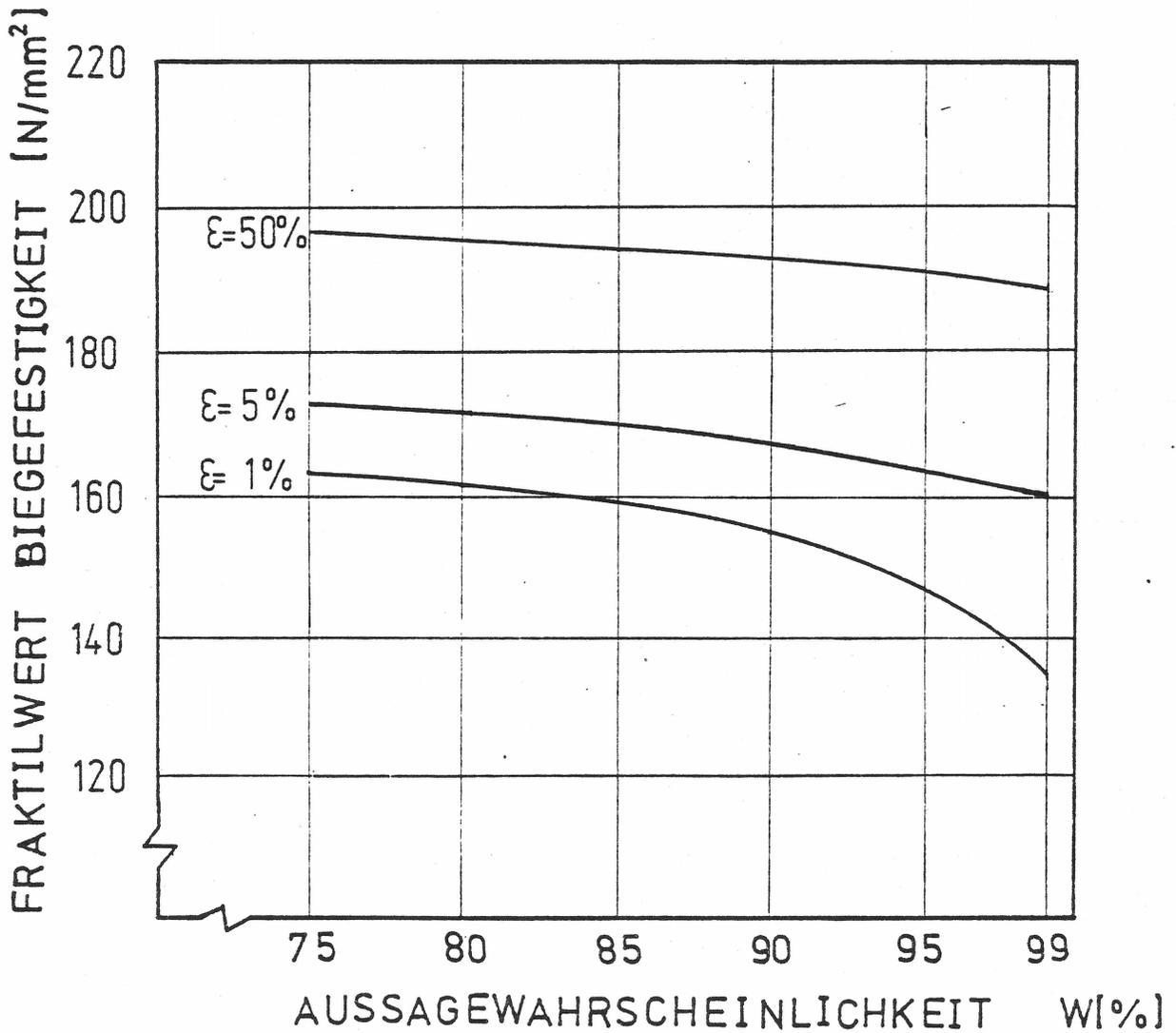


Bild 124

WERKSTOFF:

GF-UP 32,5 Gew.-%

Mattenlaminat

Elastizitätsmodul

$\bar{x} = 9,55 \text{ KN/mm}^2$

$s = 0,54 \text{ KN/mm}^2$

$n = 9$

AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT

		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	7,942	7,853	7,741	7,584	7,319	6,640
	5 %	8,394	8,325	8,239	8,119	7,913	7,405
	10 %	8,631	8,573	8,500	8,398	8,225	7,800
	20 %	8,913	8,866	8,808	8,729	8,589	8,259
	30 %	9,111	9,070	9,020	8,952	8,839	8,569
	40 %	9,275	9,239	9,195	9,136	9,040	8,817
	50 %	9,423	9,390	9,351	9,298	9,215	9,029

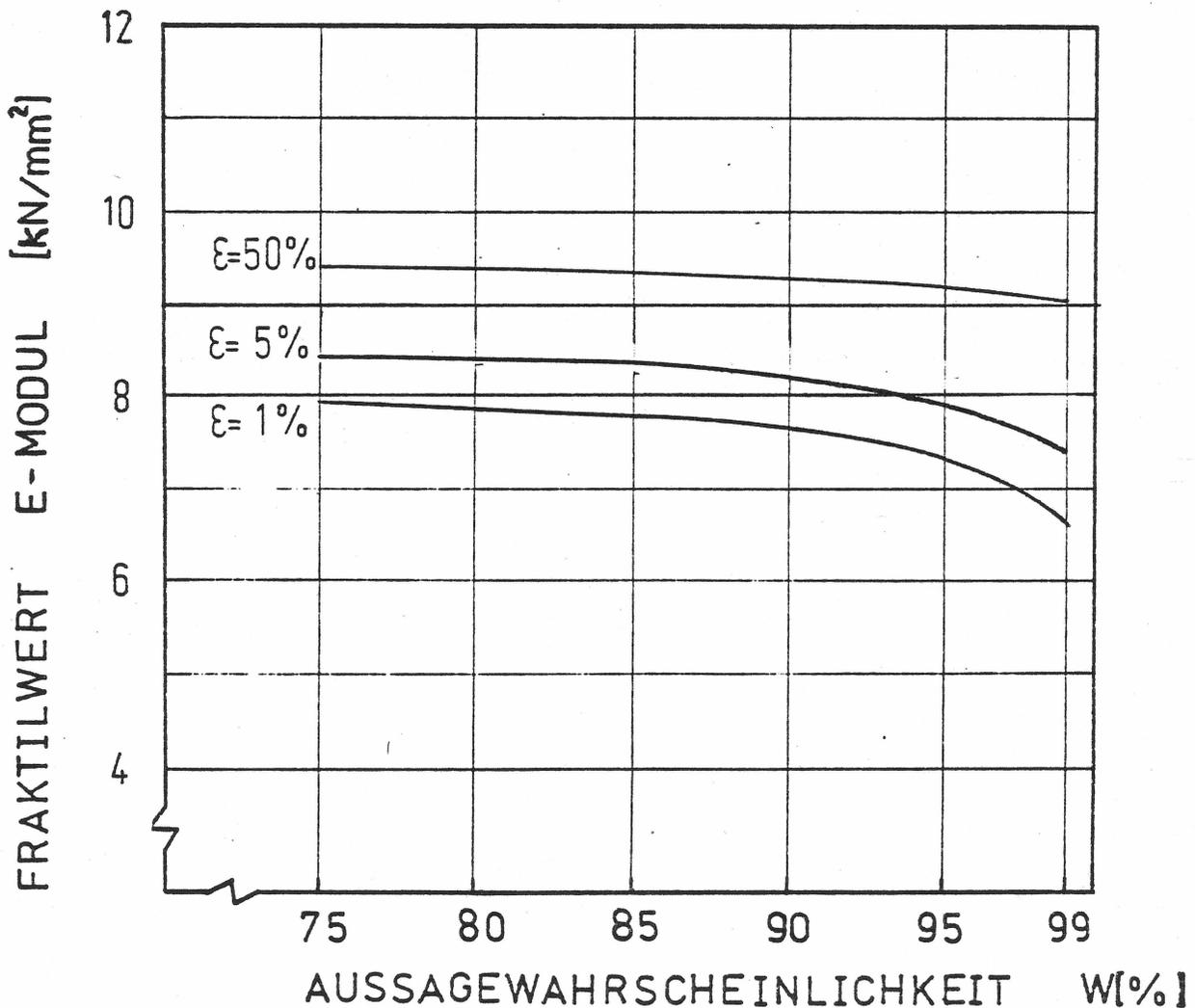


Bild 125

WERKSTOFF:

GF-UP 44,8 Gew.-%  
Gewebelaminat  
Biegefestigkeit

$\bar{X} = 525 \text{ N/mm}^2$

$s = 34 \text{ N/mm}^2$

$n = 25$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	434,968	432,282	428,984	424,632	417,628	402,566
	5 %	460,570	458,462	455,912	452,512	447,072	435,478
	10 %	474,102	472,300	470,056	467,132	462,508	452,614
	20 %	490,320	488,790	486,954	484,540	480,732	472,742
	30 %	501,812	500,452	498,854	496,746	493,448	486,648
	40 %	511,468	510,244	508,782	506,878	503,954	498,004
	50 %	520,342	519,186	517,792	516,024	513,372	508,068

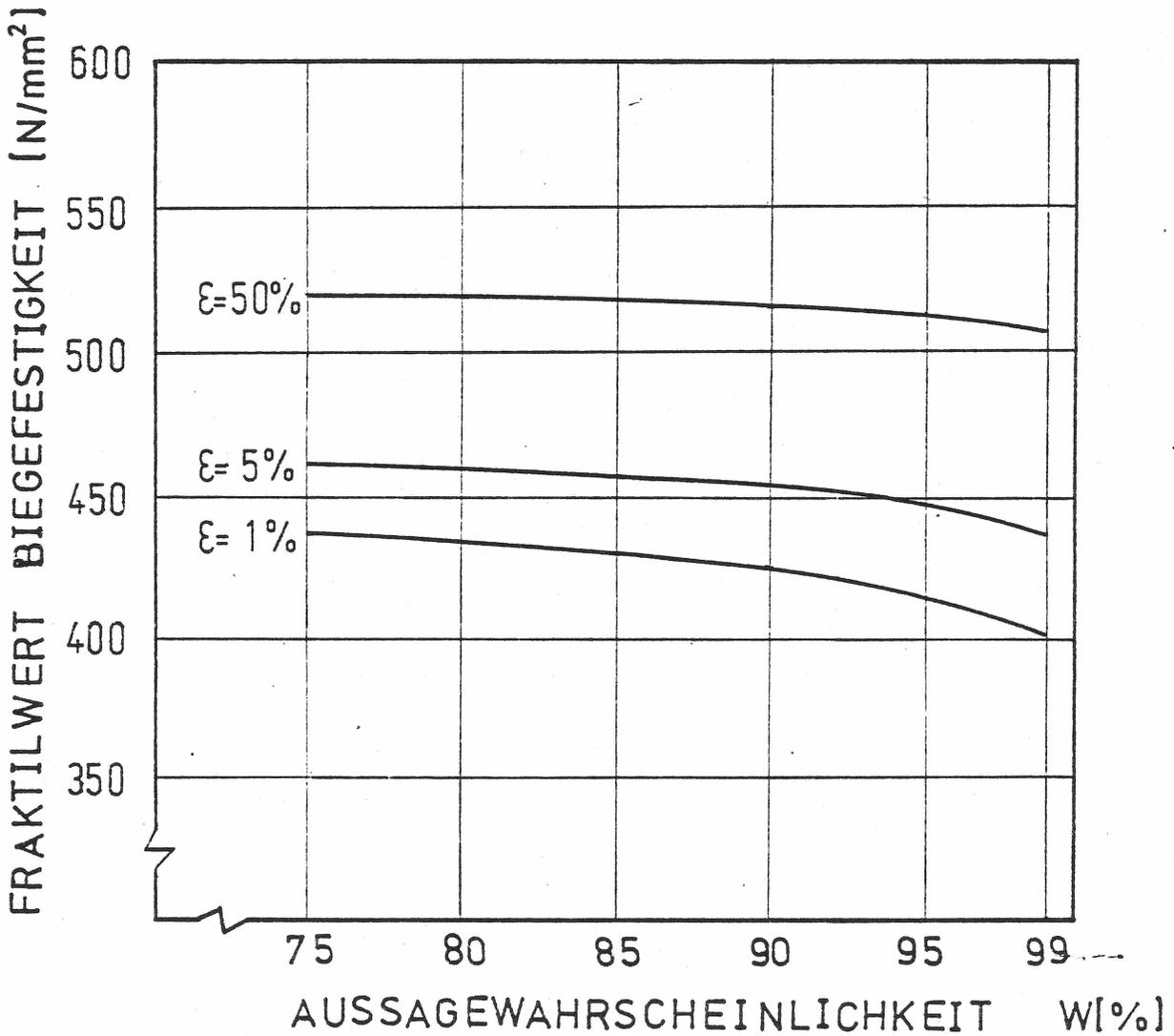


Bild 126

WERKSTOFF:

GF-UP 44,8 Gew.-%

Gewebelaminat

Elastizitätsmodul

$$\bar{x} = 13,46 \text{ kN/mm}^2$$

$$s = 0,90 \text{ kN/mm}^2$$

$$n = 25$$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	11,077	11,006	10,918	10,803	10,618	10,219
	5 %	11,755	11,699	11,631	11,541	11,397	11,090
	10 %	12,113	12,065	12,006	11,928	11,806	11,544
	20 %	12,542	12,502	12,453	12,389	12,288	12,077
	30 %	12,846	12,810	12,768	12,712	12,625	12,445
	40 %	13,102	13,069	13,031	12,980	12,903	12,745
	50 %	13,337	13,306	13,269	13,222	13,152	13,012

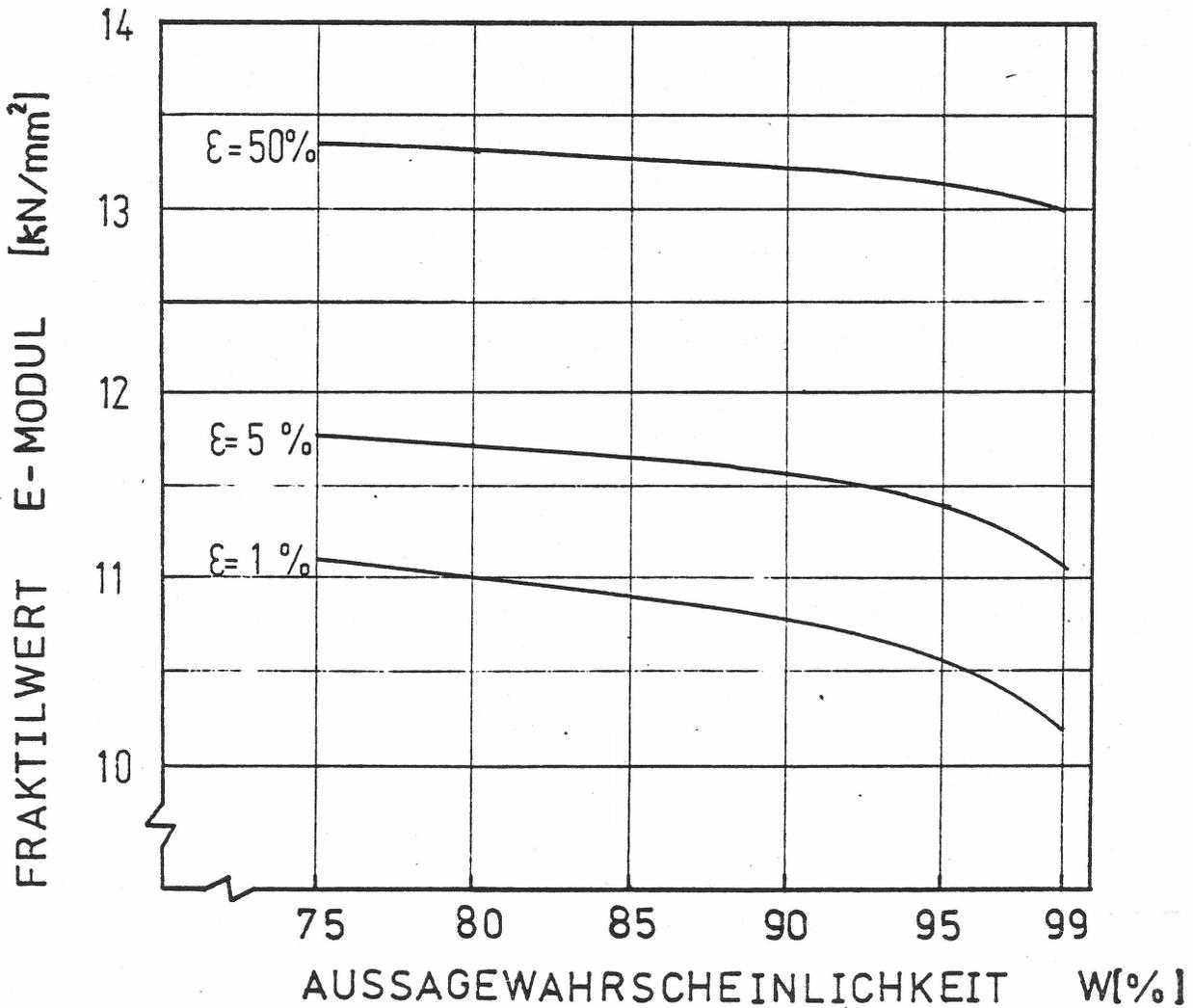


Bild 127

WERKSTOFF:

GF-UP 45 Gew.-%  
Gewebe laminat  
Zugfestigkeit

$\bar{X} = 200 \text{ N/mm}^2$

$S = 38 \text{ N/mm}^2$

$n = 12$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	91,662	86,684	80,452	71,902	57,614	23,946
	5 %	122,176	118,338	113,512	106,976	96,032	70,420
	10 %	138,288	134,982	130,878	125,292	116,020	94,474
	20 %	157,440	154,704	151,398	146,876	139,466	122,518
	30 %	170,930	168,574	165,686	161,848	155,616	141,594
	40 %	182,140	180,050	177,466	174,122	168,726	156,908
	50 %	192,362	190,386	188,068	185,028	180,316	170,170

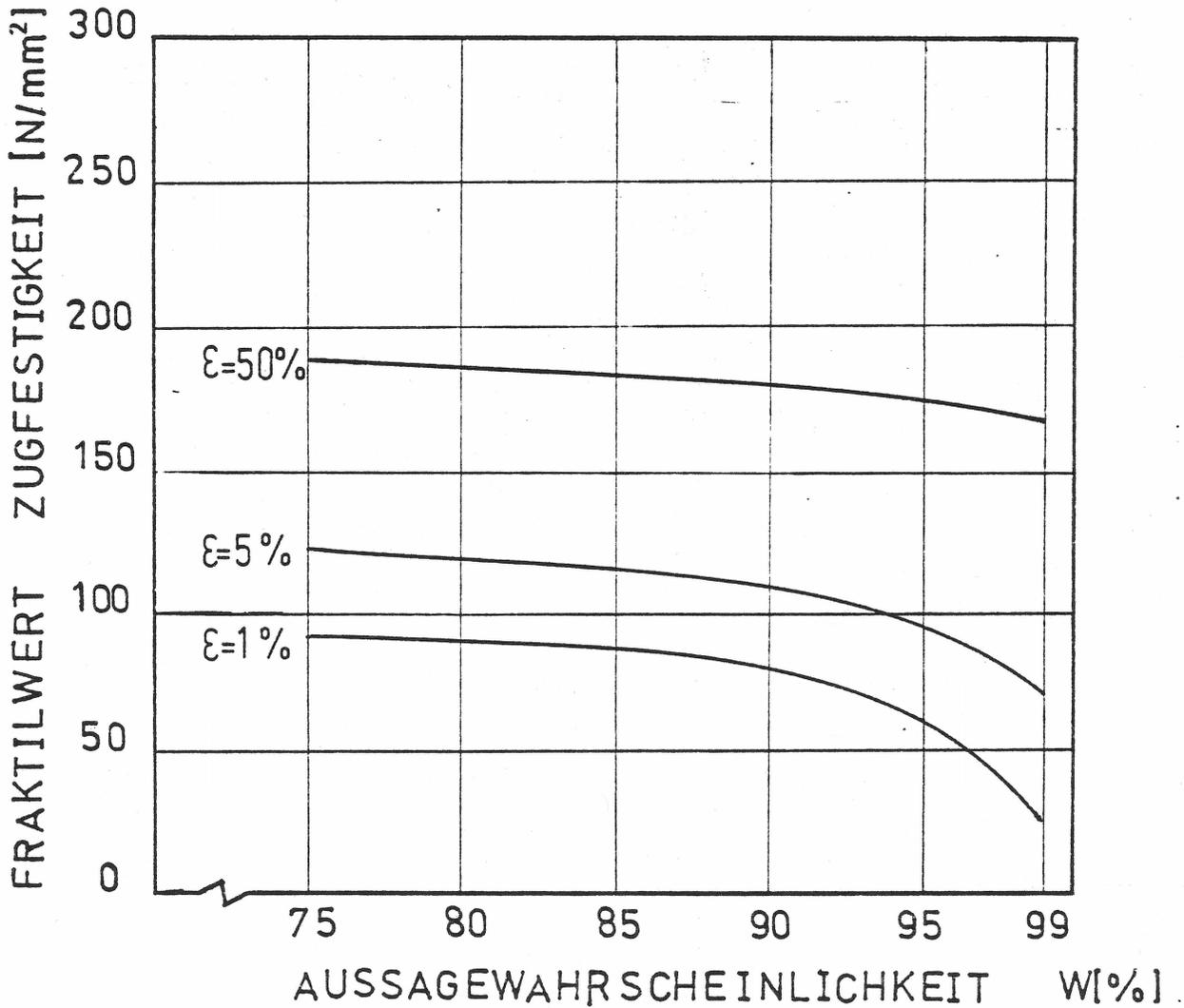


Bild 128

WERKSTOFF:

GF-UP 45 Gew.-%  
Gewebe laminat  
Elastizitätsmodul

$\bar{x} = 14,61 \text{ kN/mm}^2$

$s = 2,52 \text{ kN/mm}^2$

$n = 12$

AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT

		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	7,425	7,095	6,682	6,116	5,168	2,995
	5 %	9,449	9,195	8,874	8,441	7,715	6,017
	10 %	10,518	10,298	10,026	9,656	9,041	7,612
	20 %	11,788	11,606	11,387	11,087	10,596	9,472
	30 %	12,682	12,526	12,334	12,080	11,667	10,737
	40 %	13,426	13,287	13,116	12,894	12,536	11,752
	50 %	14,103	13,972	13,819	13,617	13,305	12,632

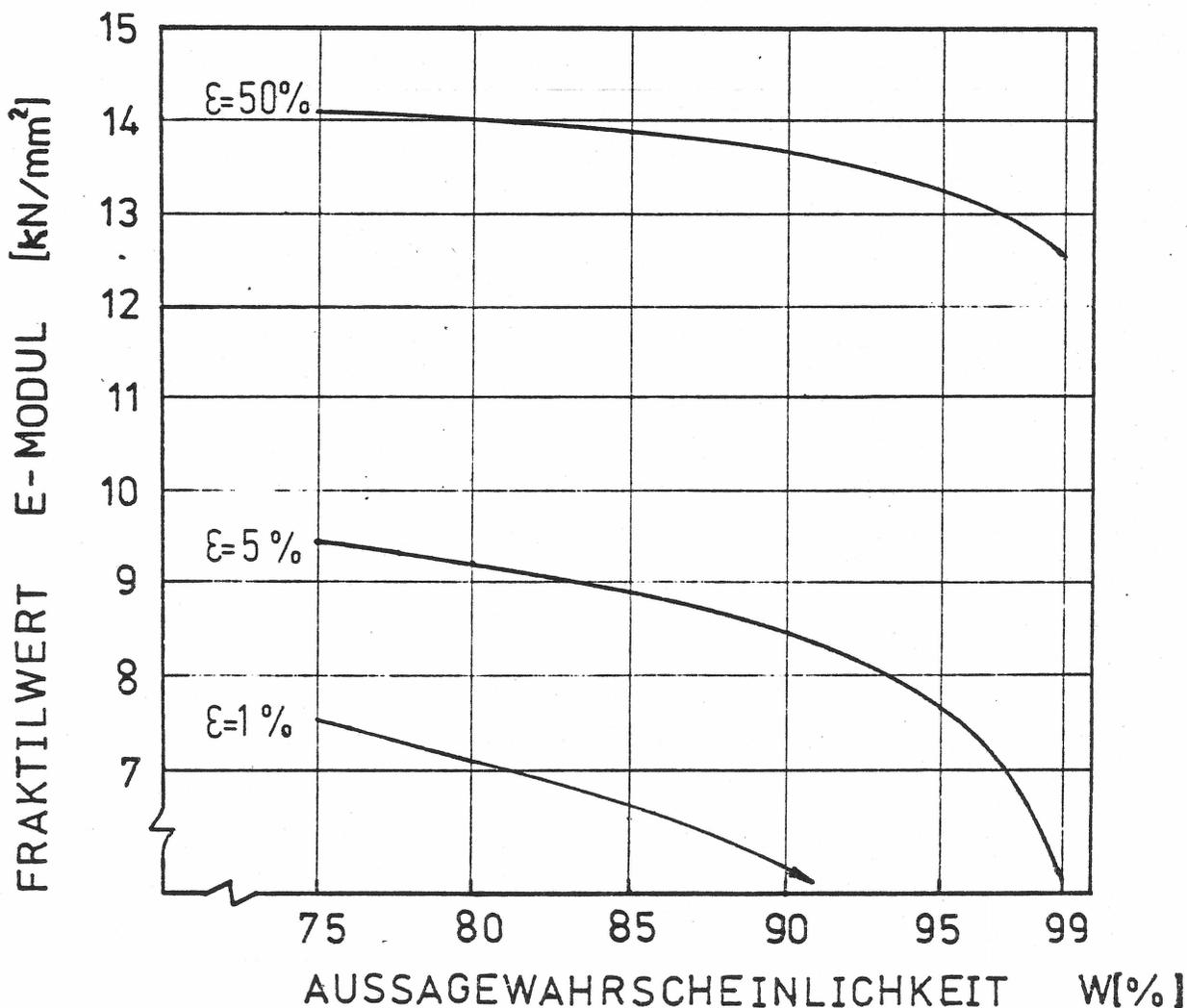


Bild 129

WERKSTOFF:

GF-UP. 45,0 Gew.-%

Gewebelaminat

Zugfestigkeit

$\bar{x} = 225 \text{ N/mm}^2$

$s = 13 \text{ N/mm}^2$

$n = 18$

AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT

		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	189,601	188,314	186,741	184,635	181,190	173,520
	5 %	199,624	198,623	197,401	195,763	193,111	187,235
	10 %	204,915	204,057	203,004	201,613	199,338	194,359
	20 %	211,246	210,531	209,660	208,516	206,683	202,705
	30 %	215,718	215,094	214,340	213,352	211,779	208,425
	40 %	219,462	218,890	218,214	217,330	215,952	213,066
	50 %	222,894	222,361	221,724	220,918	219,670	217,135

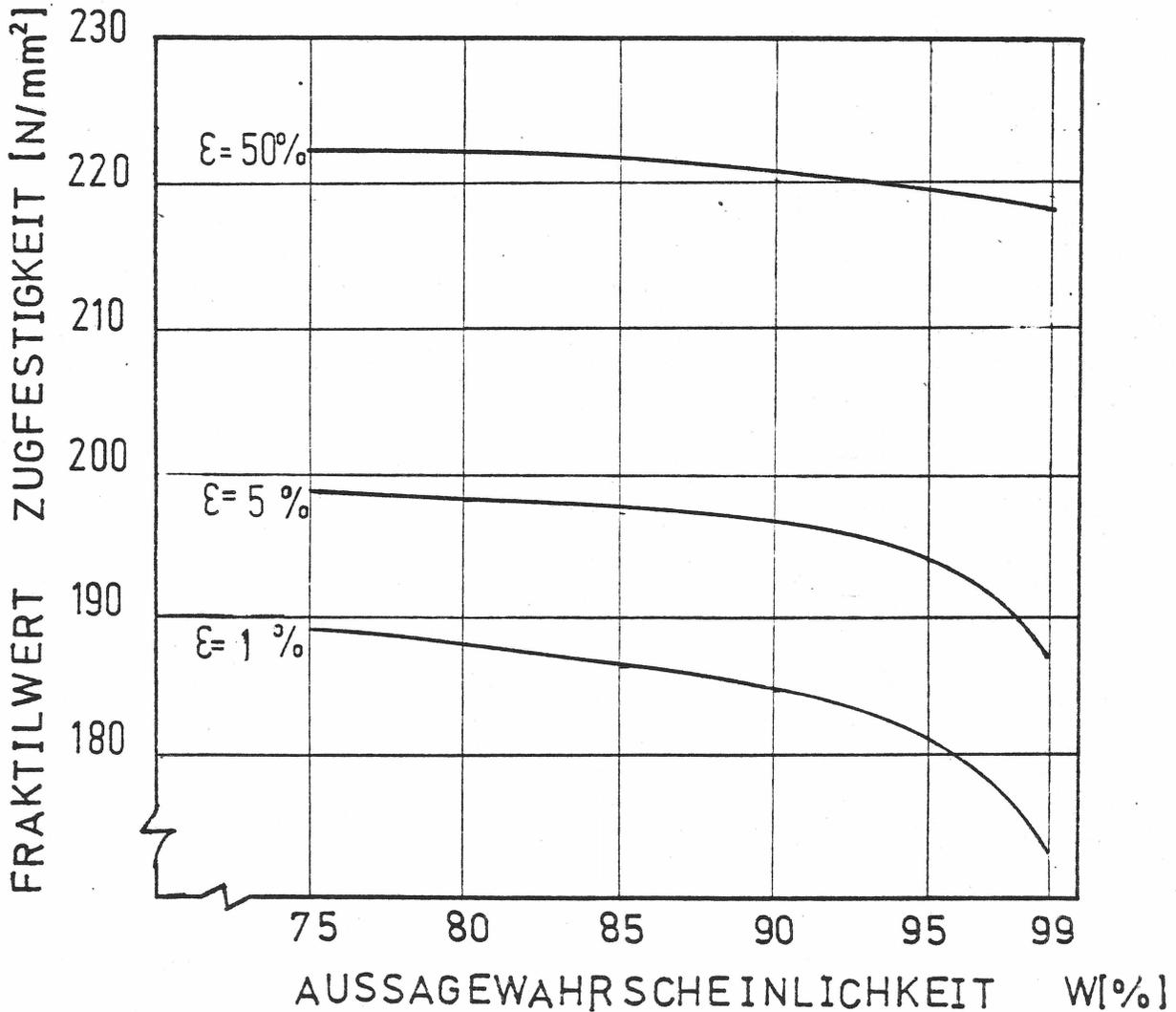


Bild 130

WERKSTOFF:

GF-UP 45,0 Gew.-%

Gewebelaminat

Elastizitätsmodul

$\bar{x} = 16,33 \text{ kN/mm}^2$

$s = 1,02 \text{ kN/mm}^2$

$n = 18$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRÄKTILWERT	1 %	13,553	13,452	13,328	13,163	12,893	12,291
	5 %	14,339	14,260	14,165	14,036	13,828	13,367
	10 %	14,754	14,687	14,604	14,495	14,317	13,926
	20 %	15,251	15,195	15,126	15,037	14,893	14,581
	30 %	15,602	15,553	15,494	15,416	15,293	15,030
	40 %	15,895	15,851	15,798	15,728	15,620	15,394
	50 %	16,165	16,123	16,073	16,010	15,912	15,713

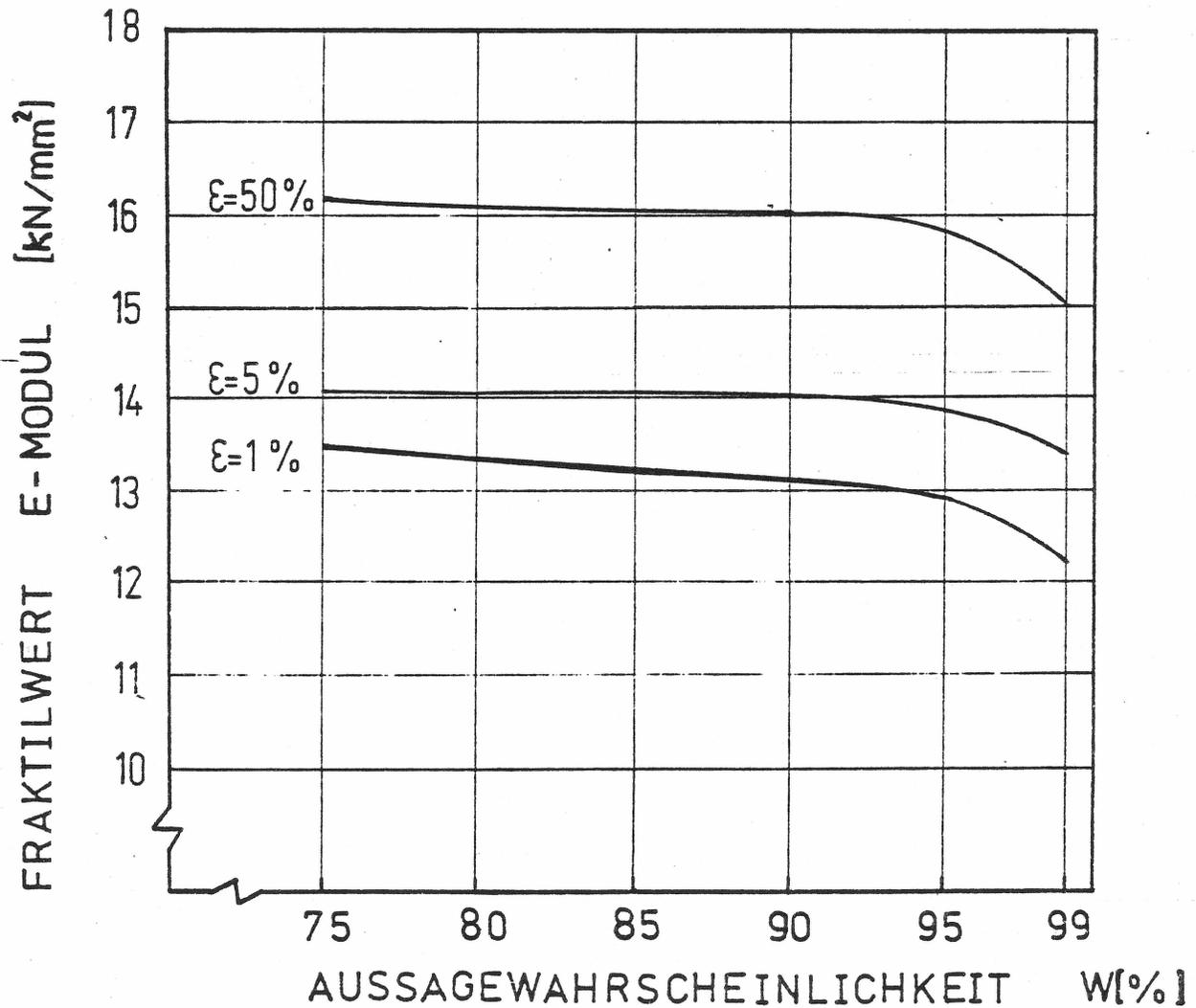


Bild 131

WERKSTOFF:

GF-UP 44,8 Gew.-%  
Gewebelaminat  
Biegefestigkeit

$\bar{x}' = 435 \text{ N/mm}^2$

$s = 32 \text{ N/mm}^2$

$n = 15$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	346,200	342,616	338,200	332,216	322,360	299,896
	5 %	371,268	368,504	365,080	360,472	352,888	335,736
	10 %	384,536	382,136	379,224	375,256	368,824	354,328
	20 %	400,312	398,360	395,960	392,728	387,544	376,024
	30 %	411,480	409,752	407,672	404,920	400,504	390,872
	40 %	420,792	419,224	417,368	414,904	411,064	402,840
	50 %	429,272	427,832	426,104	423,896	420,440	413,304

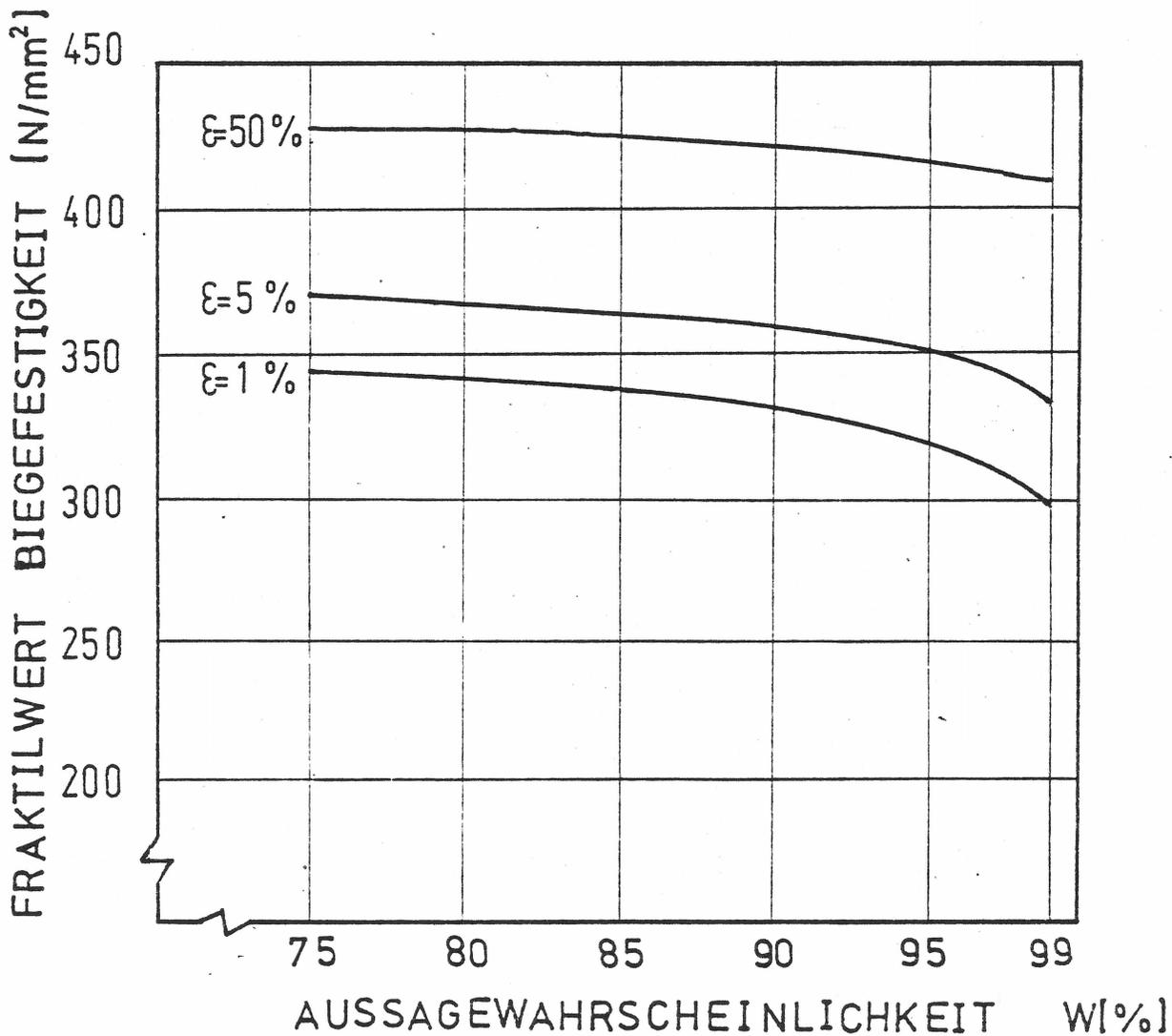


Bild 132

WERKSTOFF:

GF-UP 44,8 Gew.-%

Gewebelaminat

Elastizitätsmodul

$$\bar{x} = 10,27 \text{ kN/mm}^2$$

$$s = 0,91 \text{ kN/mm}^2$$

$$n = 15$$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	7,745	7,643	7,517	7,347	7,067	6,428
	5 %	8,458	8,379	8,282	8,151	7,935	7,447
	10 %	8,835	8,767	8,684	8,571	8,388	7,976
	20 %	9,284	9,228	9,160	9,068	8,920	8,593
	30 %	9,601	9,552	9,493	9,415	9,289	9,015
	40 %	9,866	9,821	9,769	9,699	9,589	9,355
	50 %	10,107	10,066	10,017	9,954	9,856	9,653

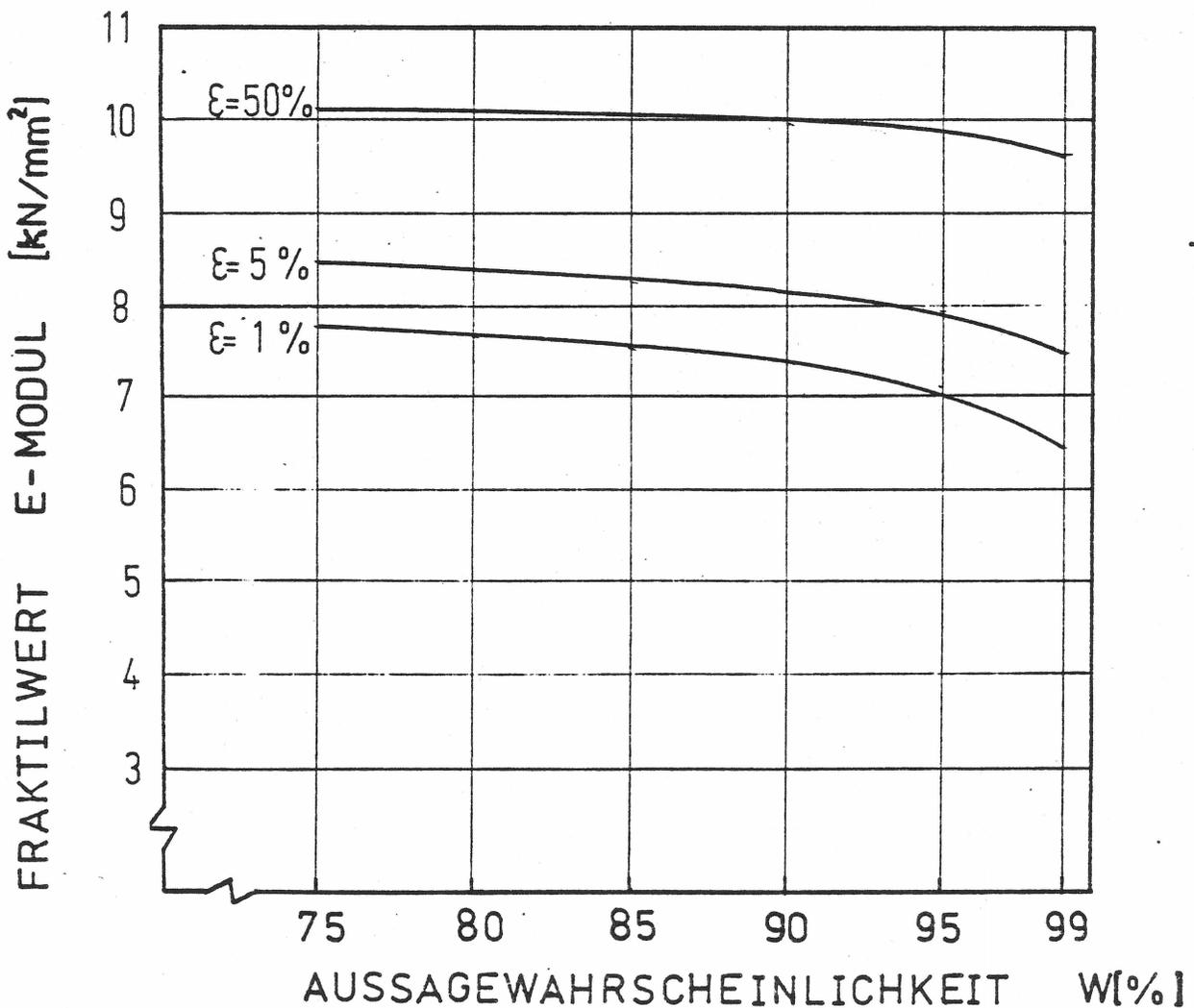


Bild 133

WERKSTOFF:

GF-UP 44,8 Gew.-%

Gewebelaminat

Biegefestigkeit

$v_M = 7,5 \text{ mm/min}$

$\bar{X} = 504 \text{ N/mm}^2$

$S = 50 \text{ N/mm}^2$

$n = 15$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	365,250	359,650	352,750	343,400	328,000	292,900
	5 %	404,450	400,100	394,750	387,550	375,700	348,900
	10 %	425,150	421,400	416,850	410,650	400,600	377,950
	20 %	449,800	446,750	443,000	437,950	429,850	411,850
	30 %	467,250	464,550	461,300	457,000	450,100	435,050
	40 %	481,800	479,350	476,450	472,600	466,600	453,750
	50 %	495,050	492,800	490,100	486,650	481,250	470,100

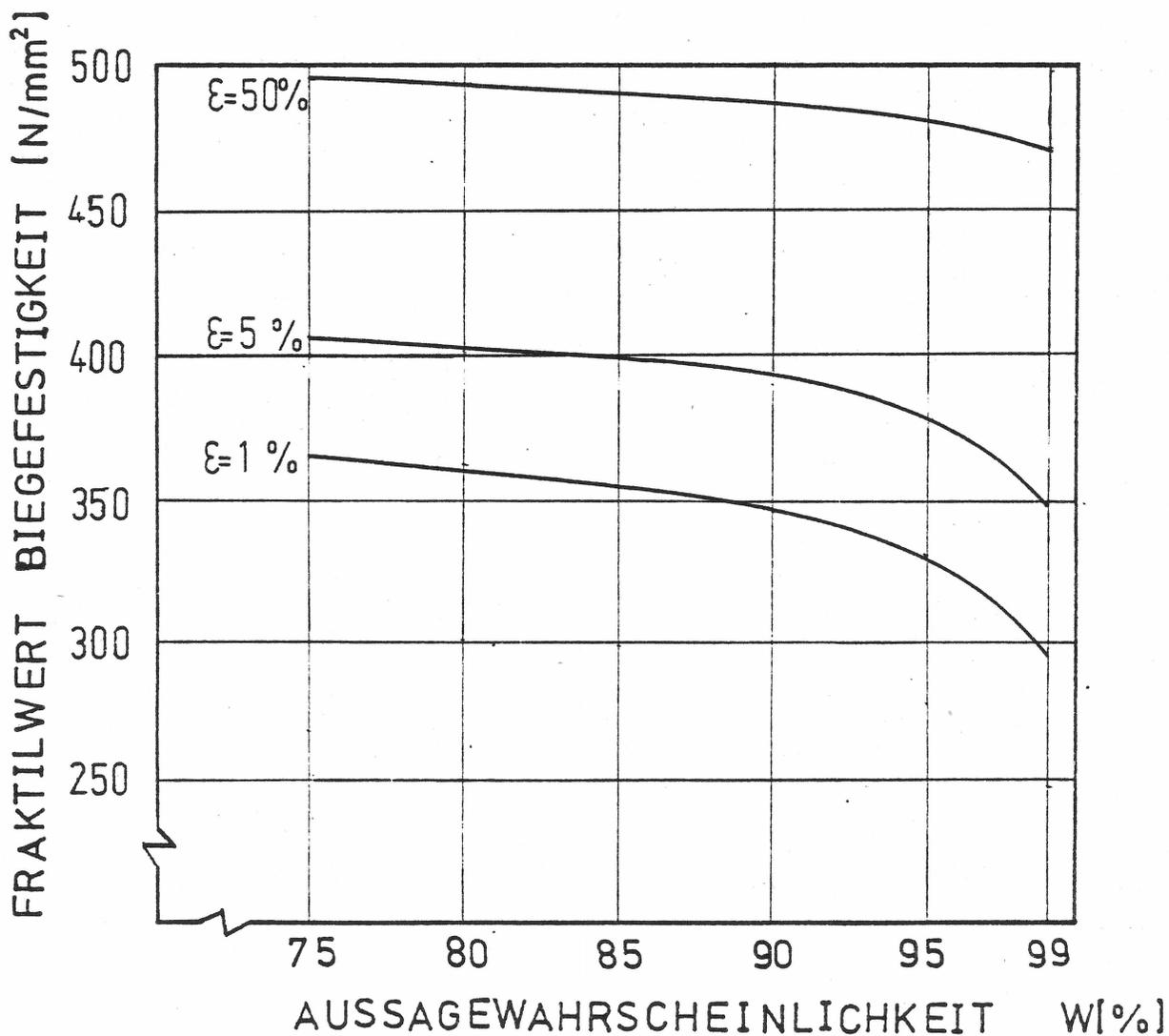


Bild 134

WERKSTOFF:

GF-UP 44,8 Gew.-%

Gewebelaminat

Elastizitätsmodul

$\bar{x} = 12,65 \text{ kN/mm}^2$

$s = 1,06 \text{ kN/mm}^2$

$n = 15$

AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT

		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	9,709	9,590	9,444	9,245	8,919	8,175
	5 %	10,540	10,447	10,334	10,334	10,181	9,930
	10 %	10,978	10,899	10,802	10,671	10,458	9,978
	20 %	11,501	11,436	11,357	11,250	11,078	10,696
	30 %	11,871	11,814	11,745	11,654	11,507	11,188
	40 %	12,179	12,127	12,066	11,984	11,857	11,585
	50 %	12,460	12,413	12,355	12,282	12,168	11,931

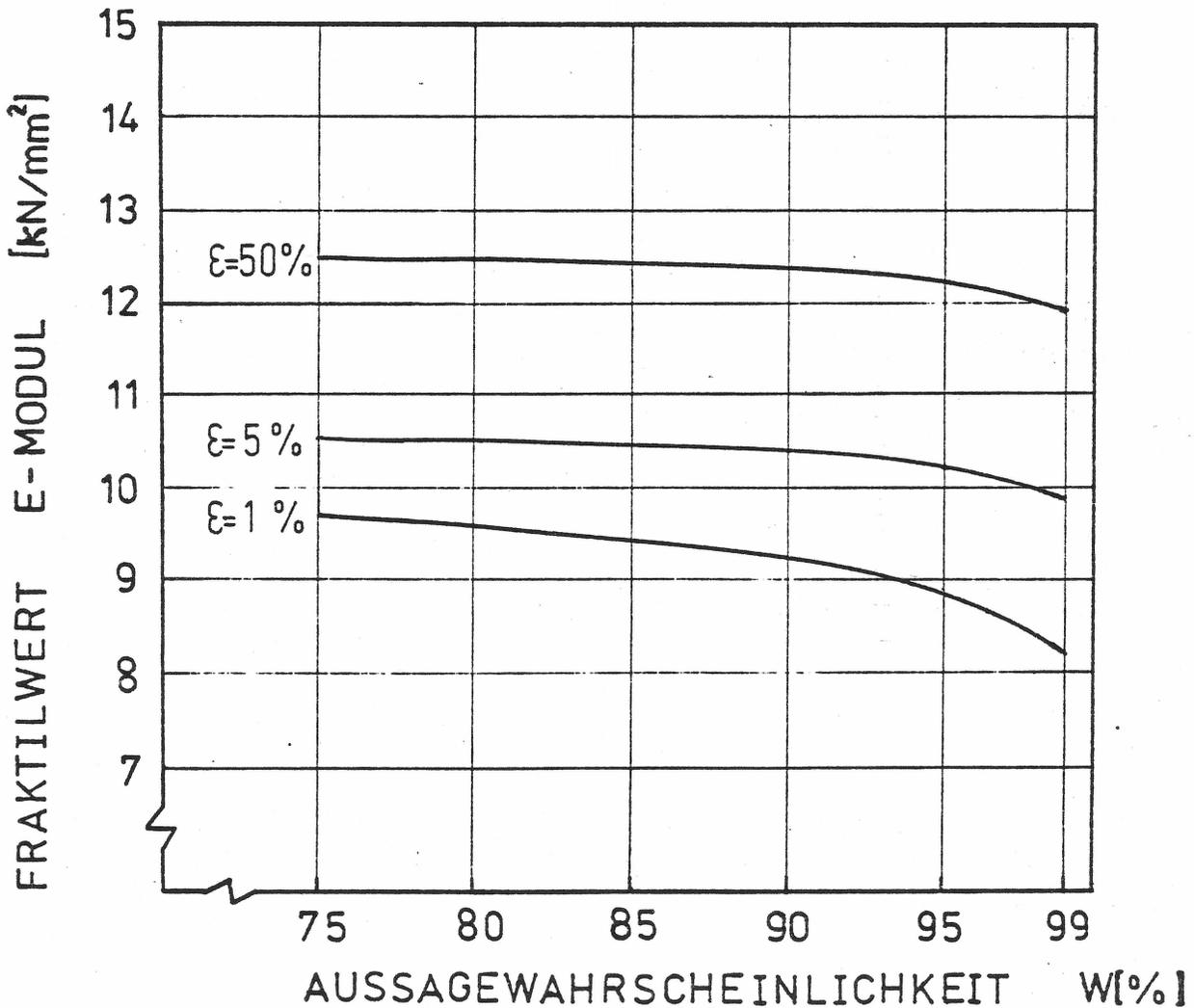


Bild 135

WERKSTOFF:

GF-UP 44,8 Gew.-%

Gewebelaminat

Biegefestigkeit

$v_M = 10 \text{ mm/min}$

$\bar{X} = 503 \text{ N/mm}^2$

$s = 27 \text{ N/mm}^2$

$n = 15$

AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT

		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	428,075	425,051	421,325	416,276	407,960	389,006
	5 %	449,243	446,894	444,005	440,117	433,718	419,246
	10 %	460,421	458,346	455,325	452,591	447,164	434,933
	20 %	473,732	492,085	470,060	467,333	462,959	453,239
	30 %	483,155	481,697	499,942	477,620	473,894	465,767
	40 %	491,012	489,689	488,123	486,044	482,804	475,865
	50 %	498,167	496,952	495,494	493,631	490,715	484,694

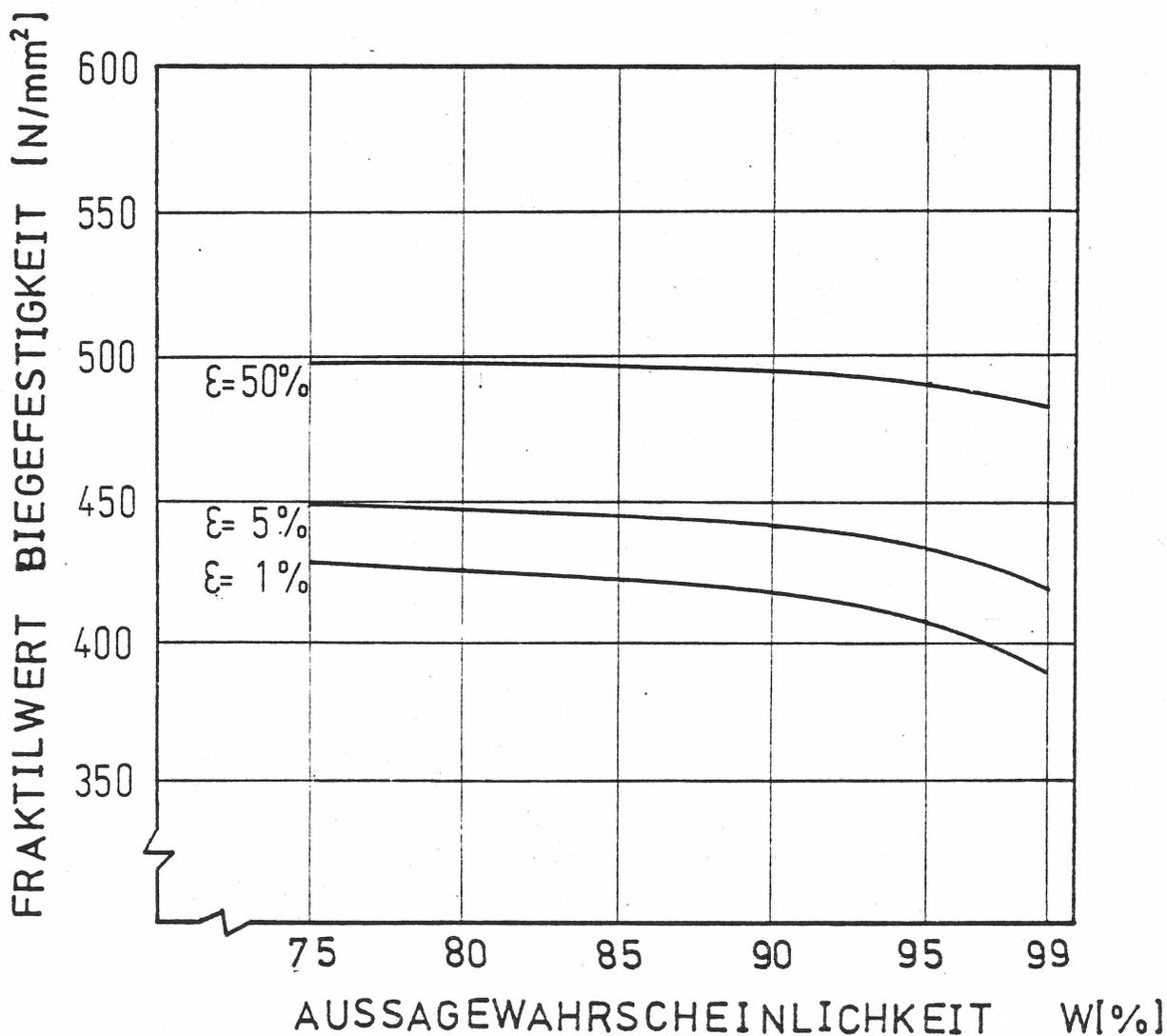


Bild 136

WERKSTOFF:

GF-UP 44,8 Gew.-%

Gewebelaminat

Elastizitätsmodul

$v_M = 10 \text{ mm/min}$

$\bar{x} = 12,45 \text{ kN/mm}^2$

$s = 0,70 \text{ kN/mm}^2$

$n = 15$

AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT

		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	10,508	10,429	10,333	10,202	9,986	9,495
	5 %	11,056	10,995	10,921	10,820	10,654	10,279
	10 %	11,346	11,294	11,230	11,143	11,002	10,685
	20 %	11,691	11,649	11,596	11,525	11,412	11,160
	30 %	11,936	11,898	11,852	11,792	11,695	11,485
	40 %	12,139	12,105	12,064	12,010	11,926	11,797
	50 %	12,325	12,293	12,255	12,207	12,132	11,975

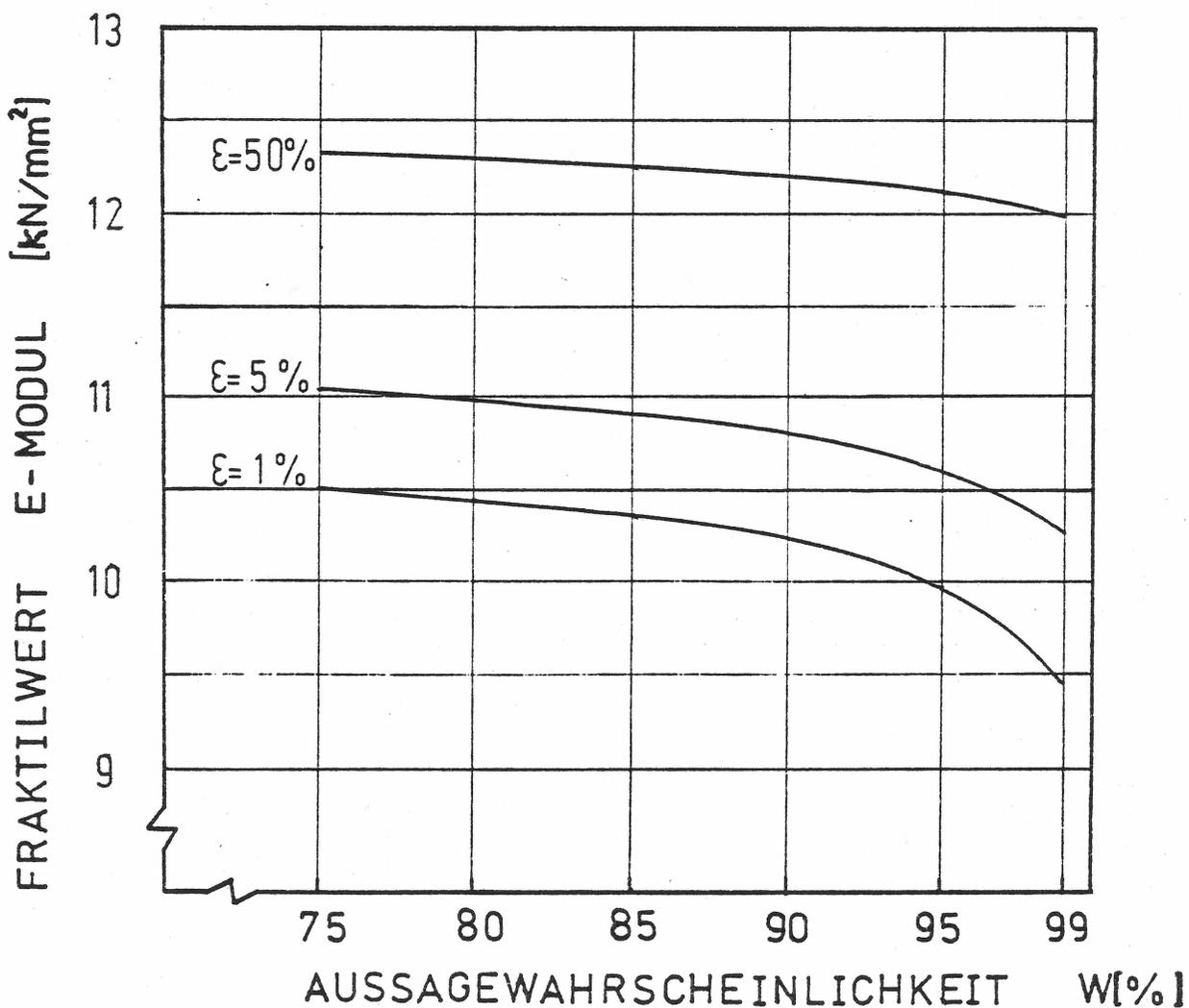


Bild 137

WERKSTOFF:

GF-UP 44,8 Gew.-%

Gewebelaminat

Biegefestigkeit

$v_M = 12,5 \text{ mm/min}$

$\bar{X} = 469 \text{ N/mm}^2$

$S = 37 \text{ N/mm}^2$

$n = 15$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	366,325	362,181	357,075	350,156	338,760	312,786
	5 %	395,333	392,114	388,155	382,827	374,058	354,226
	10 %	410,651	407,876	404,507	399,921	392,484	375,723
	20 %	428,892	426,635	423,860	420,123	414,129	400,809
	30 %	441,305	439,807	437,402	434,220	429,114	417,977
	40 %	452,572	450,759	448,619	445,764	441,324	431,815
	50 %	462,377	460,712	458,714	455,161	452,165	443,914

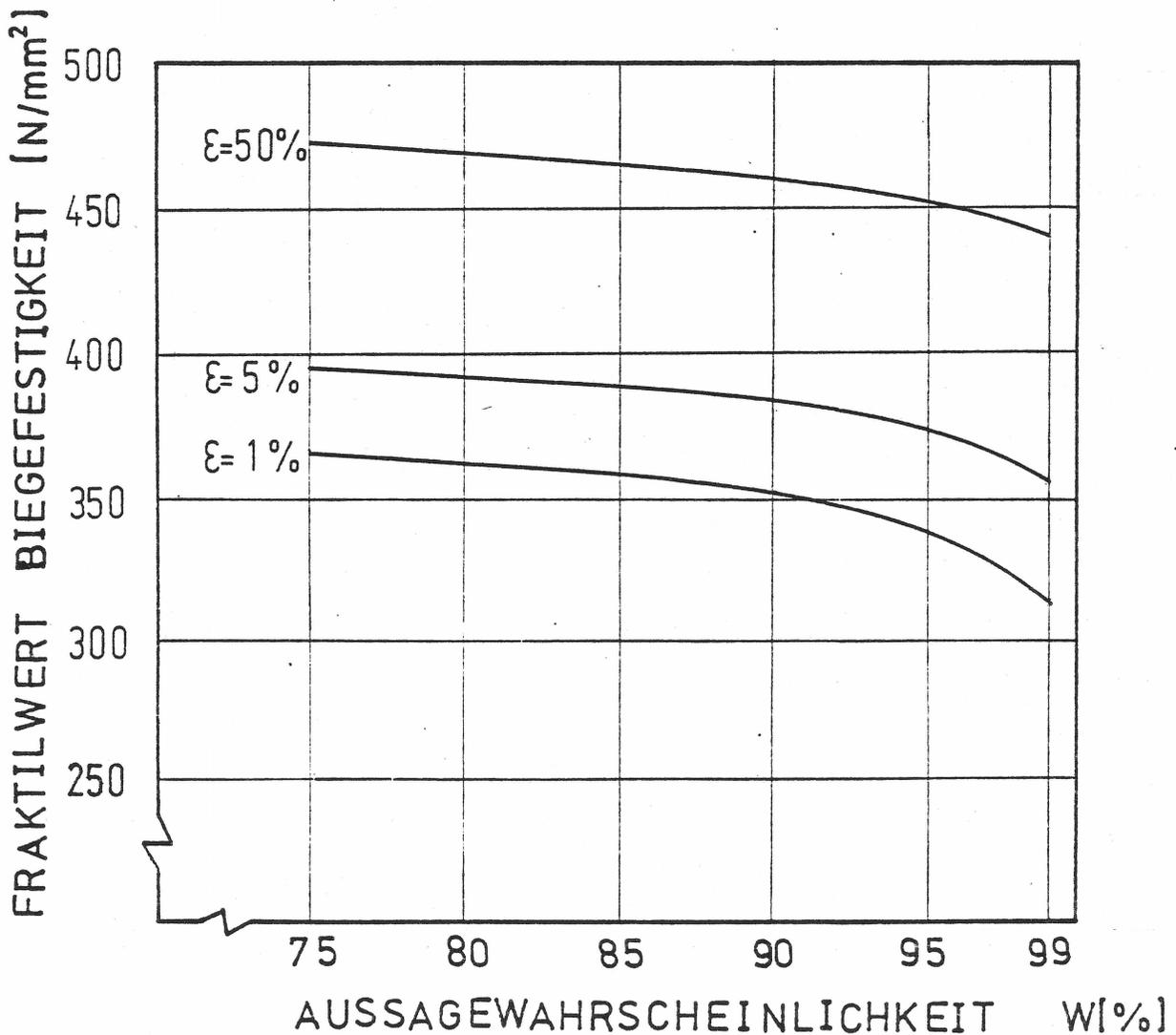


Bild 138

WERKSTOFF:

GF-UP 44,8 Gew.-%

Gewebelaminat

Elastizitätsmodul

$v_M = 12,5 \text{ mm/min}$

$\bar{x} = 10,97 \text{ kN/mm}^2$

$s = 0,85 \text{ kN/mm}^2$

$n = 15$

		AUSSAGEWAHRSCHEINLICHKEIT					
		75%	80%	85%	90%	95%	99%
FRAKTILWERT	1 %	8,611	8,516	8,399	8,240	7,978	7,381
	5 %	9,278	9,204	9,113	8,990	8,789	8,333
	10 %	9,630	9,566	9,488	9,383	9,212	8,827
	20 %	10,049	9,997	9,933	9,847	9,709	9,403
	30 %	10,345	10,299	10,244	10,171	10,054	9,798
	40 %	10,593	10,551	10,502	10,436	10,334	10,116
	50 %	10,818	10,780	10,734	10,675	10,583	10,394

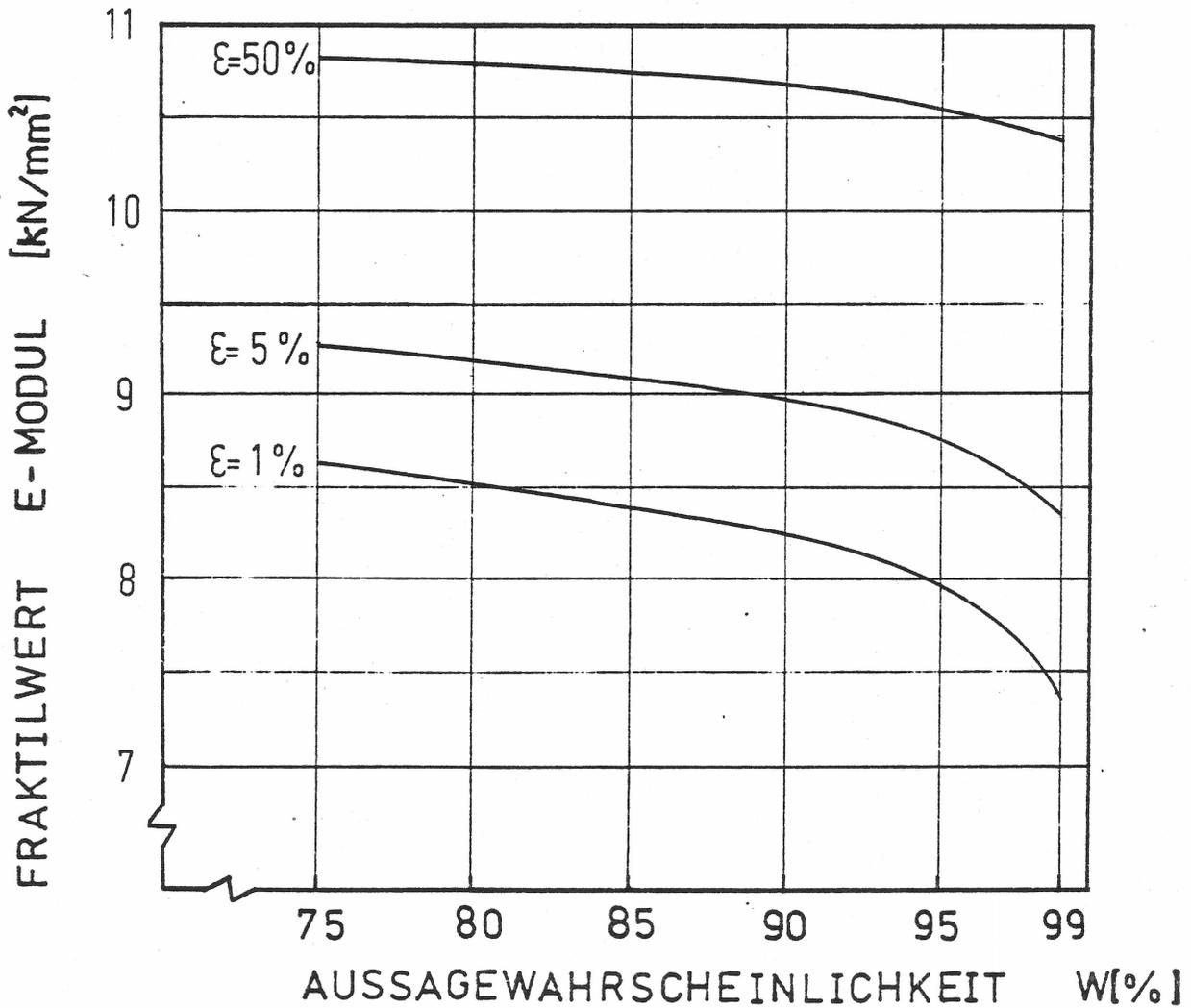


Bild 139

8.2.3 Faktoren zur Berechnung von Fraktilwerten  
bei logarithmischer Normalverteilung

Für die Berechnung der Fraktilwerte bei logarithmisch normalverteilten Meßwerten können die  $k^*$ -Faktoren aus den Bildern 140 - 143 entnommen werden. Die Bilder zeigen die Abhängigkeit der  $k^*$ -Faktoren vom Stichprobenumfang  $n$  der unteren Grenze  $\epsilon$  und der Aussagewahrscheinlichkeit  $W$ . Im Bild 141 sind im oberen Teil die  $k^*$ -Faktoren für den 5%-Fraktilwert aufgetragen, im unteren Teil sind die  $k^*$ -Faktoren für den 95%-Fraktilwert aufgetragen. Basislinie ist die Linie bei  $k = 0$ .

Aufgrund der linksseitigen Verschiebung von Meßwerten sind die  $k^*$ -Faktoren zur Bestimmung unterer Grenzwerte stärker vom Stichprobenumfang abhängig als die  $k^*$ -Faktoren zur Bestimmung oberer Grenzwerte. Dieses gilt besonders für den Bereich bis zu  $n = 20$ .

Man kann sich zur Fraktilwertbestimmung eine untere Grenze  $\epsilon$  vorgeben, z. B.  $\epsilon = 5\%$ , dann lassen sich die Fraktilwerte für bestimmte Aussagewahrscheinlichkeiten mit den in Tabelle 7 angegebenen Formeln für  $k^*$  berechnen. Hat man sich zusätzlich zu einer unteren Grenze  $\epsilon$  noch eine bestimmte Aussagewahrscheinlichkeit  $W$  vorgegeben, dann hängt der Fraktilwert nur noch vom Stichprobenumfang  $n$  ab.

$$F_{\epsilon\%} = \bar{x} \pm k^*(n, \epsilon, W) \cdot s \quad (\epsilon = 5\%)$$

W = 75%	$k^* = \frac{3,90}{n} + 1,73$
W = 80%	$k^* = \frac{5,22}{n} + 1,74$
W = 85%	$k^* = \frac{6,93}{n} + 1,76$
W = 90%	$k^* = \frac{8,70}{n} + 1,79$
W = 95%	$k^* = \frac{11,70}{n} + 1,83$
W = 99%	$k^* = \frac{18,75}{n} + 1,89$

für alle Aussagewahrscheinlichkeiten gilt

$$5 \leq n$$

Tabelle 7: Gleichungen zur Berechnung unterer Fraktilwerte.

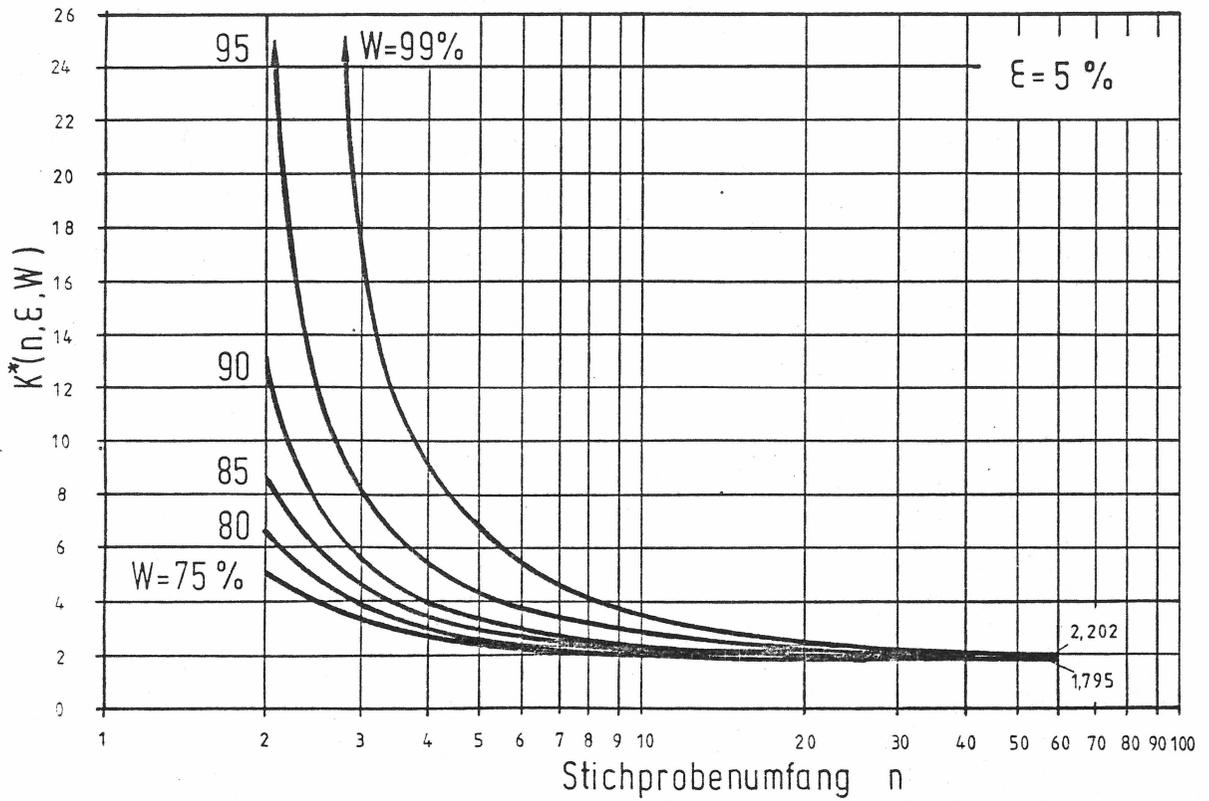


Bild 140:  $k^*$ -Faktoren aus nichtzentraler t-Verteilung für einen unteren 5%-Fraktilwert

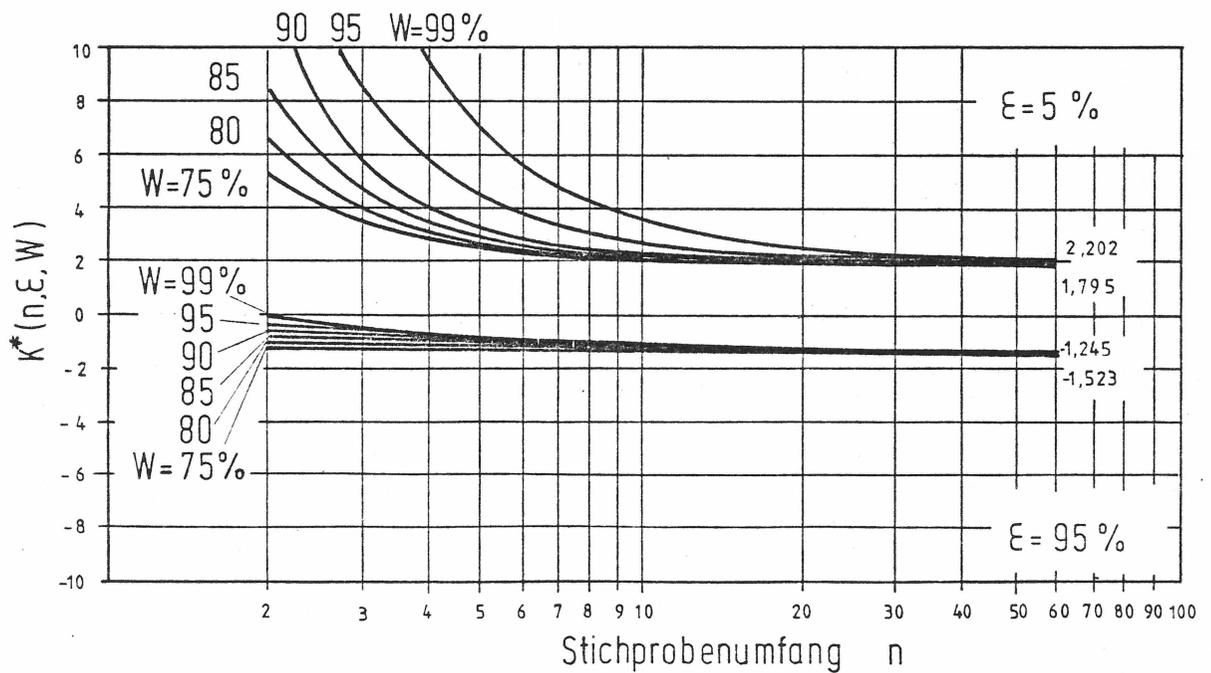


Bild 141:  $k^*$ -Faktoren aus nichtzentraler t-Verteilung zur Bestimmung eines unteren (5%) und eines oberen 95%-Fraktilwertes

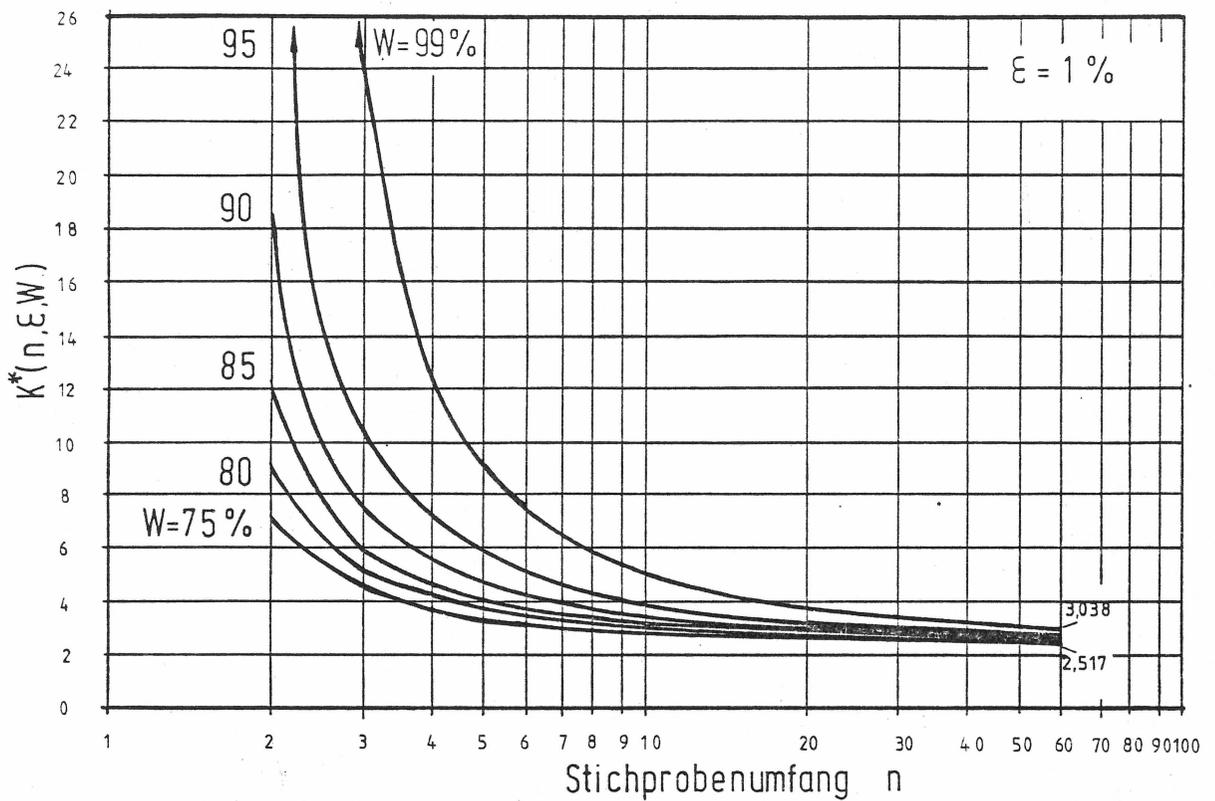


Bild 142:  $k^*$ -Faktoren aus nichtzentraler t-Verteilung für einen 1%-Fraktilewert

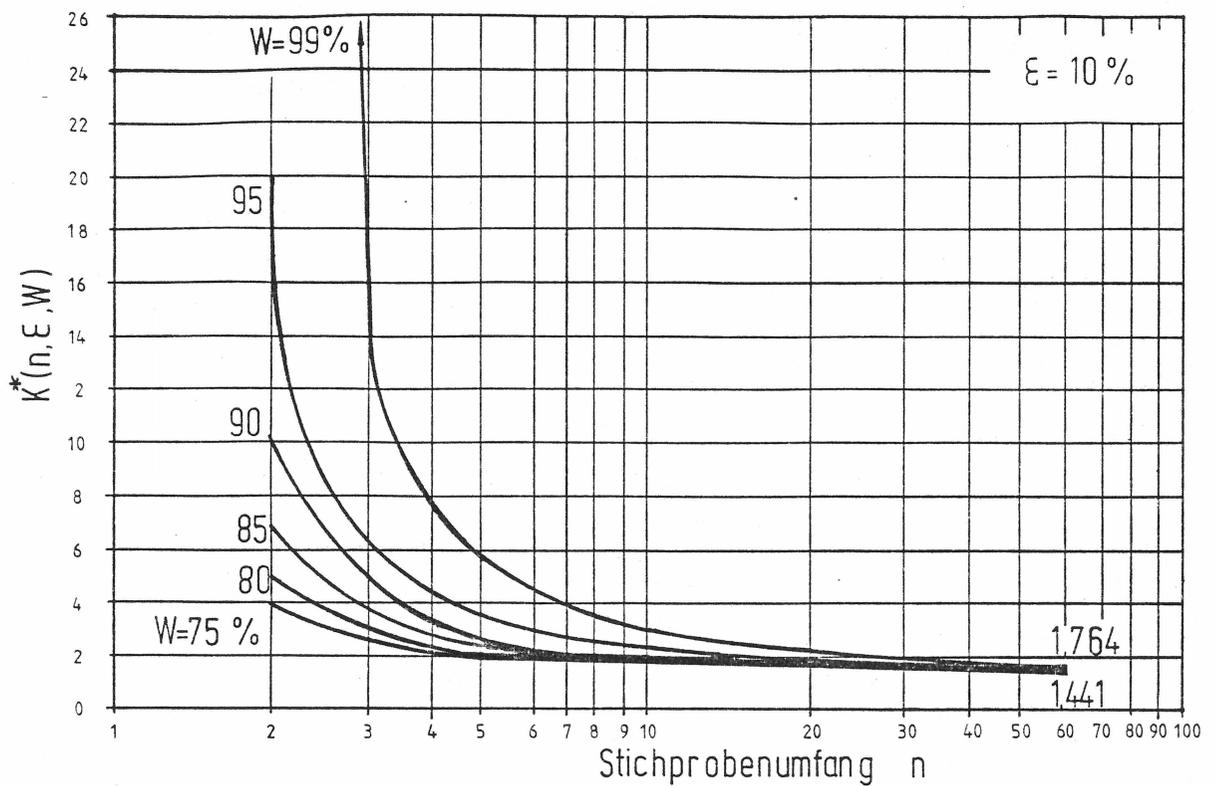


Bild 143:  $k^*$ -Faktoren aus nichtzentraler t-Verteilung für einen 10%-Fraktilewert