

Korrelation zwischen
Zugbeanspruchung und
Biegespannung bei GF-UP-Laminaten

T 2336

T 2336

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

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

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Forschungsbericht

(März 1990)

Korrelation zwischen Zugbeanspruchung und Biegespannung bei GF-UP-Laminaten

Auftraggeber : Institut für Bautechnik
Reichspietschufer 72-76
1000 Berlin 30,

im Auftrag der Länder der
Bundesrepublik Deutschland

Auftragnehmer : Prof. Dr.-Ing. G.Nonhoff

Bearbeiter : Prof. Dr.-Ing. G.Nonhoff

Dipl.-Ing. H.Mücke

Dipl.-Ing. U.Raßweiler

Wir danken dem Laborleiter G.Toric für seine Unterstützung und den hilfswissenschaftlichen Mitarbeitern T.Kunkel, U.Lang, L.Prager und U. Wortmann für Ihre Mitwirkung bei dem Sägen und Messen von 1798 Proben, sowie bei der Vorbereitung, Ausführung und Auswertung von insgesamt 2690 Versuchen.

	<u>Seite</u>	
0.	Verwendete Abkürzungen	4
1.	Einleitung	9
2.	Vorüberlegungen	10
2.1	Versuchsrandbedingungen	16
2.1.1	Vorschubgeschwindigkeit	16
2.1.2	Probenbreiten	16
2.1.3	Faservolumenbezogene Spannung	17
2.1.4	Ermittlung des Vorkrümmungsradius	18
2.1.5	Feuchtigkeit, Temperatur	18
3.	<u>Versuchsarten</u>	
3.1	"Reine Biegung"/Biegeprüfvorrichtung	19
3.2	Dreipunktbiegung	26
3.3	3-Punkt-Pendelvorrichtung	34
3.4	4-Punkt-Biegung	36
3.5	Zugversuch	41
3.6	Druckversuch	42
3.7	Versuche mit DMS-Ketten	43
3.8	Ermittlung des interlaminaren Schubmoduls	44
4.1	<u>Theoretische Grundlagen</u>	45
4.2	Elastizitätskennwerte der Einzelschichten	48
4.2.1	UD-Lagen, Schichthälften der Kreuz-,Gewebelagen	48
4.2.2	Wirrfaserlagen (Matten)	50

	<u>Seite</u>	
4.3	Elastizitätsgrößen des Laminates	51
4.3.1	Steifigkeitsmatrix vom Laminat	51
4.3.2	Technische Elastizitätsgrößen des Laminates	52
4.4	Mechanische Laminatbelastung	53
4.4.1	Berechnung der Verzerrung und Krümmung vom Laminat	53
4.4.2	Belastungen der Einzelschichten	54
5.	<u>Theoretische Maximallastberechnung</u>	55
5.1	Einleitung	55
5.2	Lineare Berechnung der Maximallasten / 1. Ansatz	60
5.3	Maximallastberechnung unter Berücksichtigung der Nichtlinearität / 2. Ansatz	63
5.3.1	Abminderung der UD-Lagen / Schichthälften	67
5.3.2	Abminderung der Wirrfaserlage (Matte)	71
6.0	<u>Experimentelle und theoretische Ergebnisse</u>	73
6.i.j	i-tes Laminat j-te Richtung 1=X-Richtung 2=Y-Richtung	
6.i.j.1	Diagramme	
6.i.j.2	Diskussion der Ergebnisse	
7.	Vergleich der Versuchs- und Auswertungsarten	205
8.	Vergleich : Theorie - Praxis	212
9.	Auswertungsvorschläge	214
10.	Ausblick	216
11.	Statistik - Grundlagen	217
12.	Verwendete Geräte	218
13.	Literaturverzeichnis	220

Anhang

- 1.i Theoretische, experimentelle Daten des i-ten Laminates
 - .1 Laminatbeschreibung
 - .2 Laminatplan
 - .3 Schichtkennwerte
 - .4 Elastizitätswerte des Laminates
 - .5 Maximallasten
 - .5.1 - unter linearem Verhalten
 - .5.2 - mit Abminderung und Nichtlinearität
 - .j Versuchsergebnisse, Histogramme für j=6 : X-Richtung / j=7 : Y-Richtung
 - .j.1 Biegeprüfvorrichtung
 - .j.2 3-Punkt-Biegung
 - .j.3 4-Punkt-Biegung
 - .j.4 Zugversuch
 - .j.5 3-Punkt-Pendelvorrichtung
 - .j.6 Druckversuche
 - .8 Histogramm der mittleren Probendicken
- 2. Biegeprüfvorrichtung

Verwendete Abkürzungen

<u>Symbol</u>	<u>Bedeutung</u>
α_k	Winkel der Faserlängsrichtung der k-ten Schicht zur X-Richtung
α_0	Winkel der Probe am Auflager durch Vorkrümmung
α''	Winkel der Probe am Auflager nach Verformung
b	Probenbreite
b_{akt}	Schnittlast, -moment bei der iterativen Maximallastberechnung
B_{ij}	Elemente der Plattenmatrix
C_{ijk}	Elemente der globalen Steifigkeitsmatrix der k-ten Schicht
\underline{C}_{Gk}	Globale Steifigkeitsmatrix der k-ten Schicht
\underline{C}_{Lk}	Lokale Steifigkeitsmatrix der k-ten Schicht
$C_{\parallel k}, C_{\perp k},$ $C_{\parallel \perp k}, C_{\#K}$	Elemente der lokalen Steifigkeitsmatrix der k-ten Schicht
D_{ij}	Elemente der Scheibenmatrix
e_{ij}, f_{ij}, g_{ij}	Elemente der Nachgiebigkeitsmatrix
E	Elastizitätsmodul
E_{bB}	Sekanten-Biegemodul bei Bruch
E_{b0}	E-Modul der Biegung
$E_{b\tilde{0}}$	Biegemodul der Vierpunktbiegung, ermittelt über den Weg der inneren Auflager, also mit Querkraftanteil der Verformung.
EF	E-Modul der Faser
EM	E-Modul der Matrix
EX / Y	E-Modul des Laminates in X- oder Y-Richtung

<u>Symbol</u>	<u>Bedeutung</u>
E_{Xb} / Yb	E-Modul der Biegung des Laminates in X- oder Y-Richtung
$E_{\parallel k} / \perp k$	E-Modul der k-ten Schicht parallel / senkrecht zur Faserlängsrichtung
$\varepsilon_x / y / xy$	Dehnung im globalen Koordinatensystem
$\varepsilon_{\parallel k} / \perp k / \#k$	Dehnung der k-ten Schicht im lokalen Koordinatensystem
EP	Epoxidharz
FGV	Gewichtskraft des Vertikalschlittens von der Biegeprüfvorrichtung
ϕ_{Fk}	Faservolumengehalt der k-ten Schicht
ϕ_{mF}	Mittlerer Faservolumengehalt des Laminates
G	Schubmodul
G_{Ak}	Glasflächengewicht der k-ten Lage
G_{Ages}	Glasflächengewicht des Laminates
G_M	Schubmodul der Matrix
G_{XY}	Schubmodul des Laminates
$G_{\#k}$	Schubmodul der k-ten Schicht
I	Trägheitsmoment
k	Index für Werte der k-ten Schicht
K	Querschnittsfaktor
K_{ij}	Elemente der Koppelmatrix
L	Länge zwischen den Auflagern (Dreipunkt-Biegung)
l, L''	Auflagerabstand nach der Verformung (im Bruchzustand)

<u>Symbol</u>	<u>Bedeutung</u>
$l_{a,i}$	Länge zwischen den inneren, äußeren Auflagern (Vierpunkt-Biegung)
l_m	Länge des Bezugsbalken für Krümmungsmessung
κ	Krümmung
$\kappa_x / y / xy$	Krümmungen des Laminates
M	Moment
$m_x / y / xy$	Schnittmomente
m.R.	Auflager mit Reibung
m'	Schnittmoment der Dreipunktbiegung, Auswertung des Versuchs unter Berücksichtigung des Weges nach DIN EN 63 (Gl.3.2.5)
m^{\wedge}	Schnittmoment der Vierpunktbiegung, bei einseitiger Krafteinleitung, (zum Abschätzen, nach Gleichung 3.4.13)
<u>N</u>	Nachgiebigkeitsmatrix des Laminates
n	a) Schichtanzahl des Laminates b) Probenanzahl der Versuchsserie
n_{ger}	Anzahl der gerissenen Schichten bei der iterativen Maximallastberechnung
$n_x / y / xy$	Schnittlasten
$n_{xk/yk/xyk}$	Globale mechanische Belastung der k-ten Schicht
ν_F / M	Querkontraktionszahl Faser / Matrix
$\nu_{xy/xyB}$	Querkontraktionszahl im globalen Koordinatensystem
o.R.	Auflager ohne Reibung (Kugellager)
OS	Oberseite des Laminates bei Biegung auf Druck belastet

<u>Symbol</u>	<u>Bedeutung</u>
$R_{a/i}$	Radius des äußeren / inneren Auflagers (3-Punkt-,4-Punkt-Biegung)
R.B.	"Reine Biegung" / Versuch mit der Biegeprüfvorrichtung
ρ_F / M	Spez. Gewicht der Faser / Matrix
<u>S</u>	Steifigkeitsmatrix des Verbundes
σ_{bB}	Biegebruchspannung
$\sigma_{bB\phi}$	Faservolumenbezogene Biegebruchspannung
σ_x / y	Spannungen im globalen Koordinatensystem
$\sigma_{\parallel} / \perp$	Spannungen im lokalen Koordinatensystem
$\sigma_{\parallel B} / \perp B$	Bruchspannungen im lokalen Koordinatensystem
σ_{zB}	Zugbruchspannung
$\sigma_{zB\phi}$	Faservolumenbezogene Zugbruchspannung
t	Dicke
t-Differenz	Differenz der gemessenen, minimalen und maximalen Dicke innerhalb einer Probe
$\tau_{xyk} / \#k$	Schubspannung der k-ten Schicht im glob./lok. Koordinatensystem
τ_B	Bruchschubspannung
UP	Ungesättigter Polyester
US	Unterseite des Laminates (Schichtnr. 1) bei Biegung auf Druck belastet
Var.-Koeff.	Variationskoeffizient
V_i	Versuch Nr. i
w	Wegänderung der Maschine gegenüber dem Anfangszustand

<u>Symbol</u>	<u>Bedeutung</u>
W	Widerstandsmoment
WG	Anteil der Verformung durch Schubbelastung
wm	Wegänderung relativ zum Bezugsbalken am Krümmungsmeßgerät.
Z _k	Abstand der Mittellinie der k-ten Schicht zur Bezugmittellinie des Laminates
ZSU	Abstand der Referenzfläche des Laminates zur Unterseite
ZU _k	Abstand der Mittellinie der k-ten Schicht zur Unterseite
3-Pkt	Ergebnisse aus der Dreipunktbiegung
4-Pkt	Ergebnisse aus der Vierpunktbiegung

1. Einleitung

Bei der Ermittlung der Festigkeitskennwerte ergeben sich bei der Prüfung der Lamineigenschaften relativ große, ungeklärte Differenzen. So wurden bei den Biegebruchspannungen, ermittelt mit der Dreipunkt-Biegung nach DIN EN 63, teilweise mehr als doppelt so hohe Werte erzielt, wie bei den Zugversuchen nach DIN EN 61. Diese schlechte Korrelation wurde ebenso von den elastischen Kennwerten berichtet.

Es stellte sich also die Frage, inwiefern diese Differenzen durch die Prüfmethode, die Auswertungsregeln oder durch die Lamineigenschaften, z.B. viskoelastische, plastische Effekte, Stützwirkung des Harzes im Druckbereich, entstehen.

Zur Ermittlung des Einflusses der Prüfmethode mußten umfangreiche Versuchsserien mit verschiedenen Versuchsarten, unter Variation der Randbedingungen und mit unterschiedlichen Laminaten durchgeführt werden.

Es erfolgten Prüfungen mit den Versuchsarten

- Dreipunktbiegung (Mit und ohne Reibungseinfluß)
- Vierpunktbiegung (Mit und ohne Reibung, sowie mit festem und beweglichen Druckstempel)
- "Reine Biegung"
- Dreipunktpendelbiegung
- Zugversuche

Außerdem war es nötig, für die theoretischen Berechnung der Bruchlasten und -momente die Nichtlinearität und die Abminderung nach Schädigung der Schichten näherungsweise zu erfassen.

Desweiteren wurden Versuche mit DMS-Ketten durchgeführt, um eventuelle Änderungen von der Lage des Elastischen Schwerpunktes bei der Biegung zu erfassen.

2. Vorüberlegungen

Insbesondere bei den Mattenlaminaten und Gewebelaminaten existieren zwischen der Zugfestigkeit und der Biegefestigkeit große Differenzen, die je nach verwendetem Harz und Faservolumengehalt unterschiedlich hoch ausfallen.

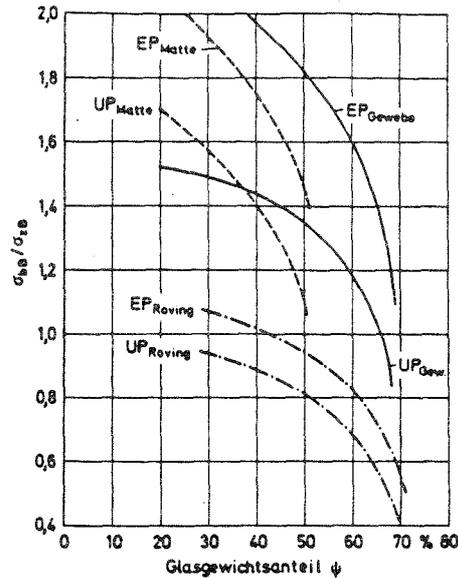


Diagramm 2.1
Zusammenhang zwischen
Biege- und Zugfestigkeit
für GF-UP und GF-EP /5/

Von der theoretischen Seite lassen sich bei den quasihomogenen Laminaten, also in erster Linie Wirrfaserlaminaten, in Anlehnung an die Plastizitätstheorie, Spannungsumlagerungen denken, die bis zu einem Verhältnis von $\sigma_{bB} : \sigma_{zB} = 1.5$ führen können (Fließgelenk, Skizze 2.1.c).

Ein weiterer Punkt ist, daß bei den Faserverbundwerkstoffen eine Abhängigkeit der Festigkeiten von der Belastungsrichtung besteht, so ist die Druckfestigkeit bei den Mattenlaminaten höher als die Zugfestigkeit.

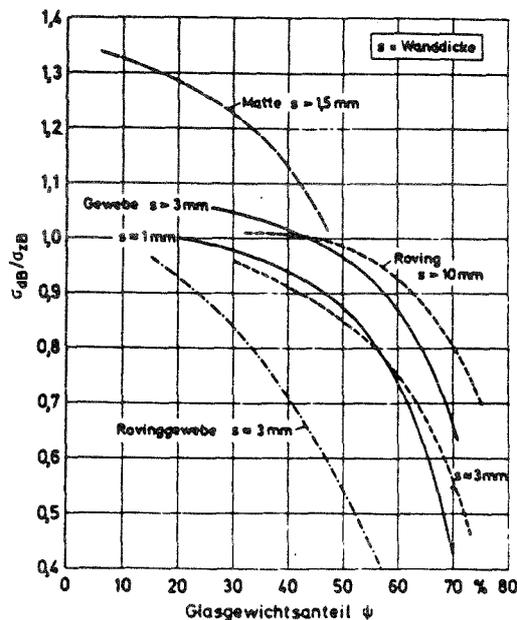
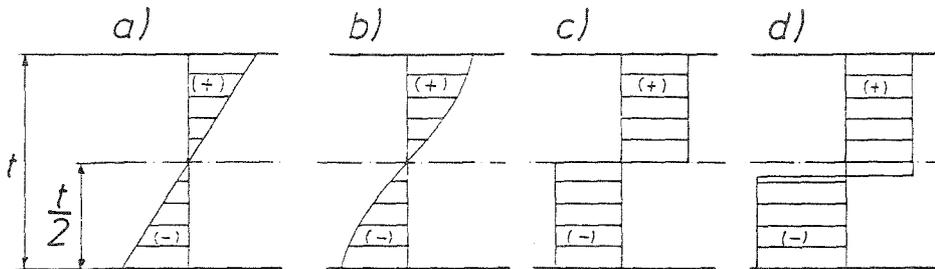


Diagramm 2.2
Zusammenhang zwischen
Druck- und Zugfestigkeit
für GF-UP /5/

Unter der Annahme, daß die maximale Druckspannung und Zugspannung erreicht wird, eine vollständige Spannungsumlagerung und somit eine Verschiebung der neutralen Faser stattfindet, läßt so sich ein Verhältnis $\sigma_{bB} : \sigma_{zB}$ von ca. 1.6 bis ca. 1.7 erklären (Skizze 2.1.d).

Als Randbedingung ergibt sich bei der reinen Momentenbelastung keine Normalkraft, d.h.:

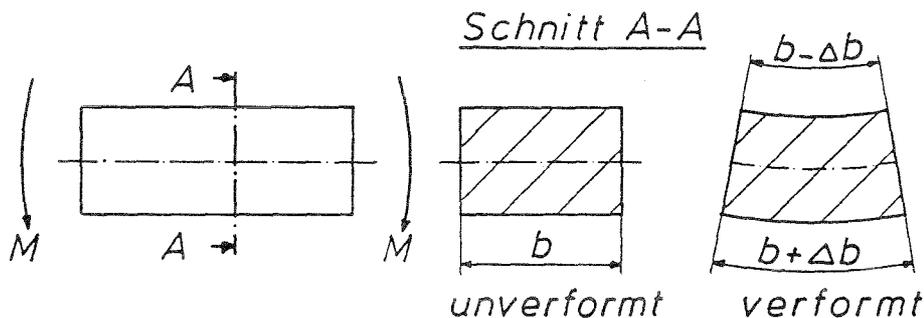
$$N = \int_0^t \sigma(y) \cdot dy \stackrel{!}{=} 0$$



Skizze 2.1 Spannungsverteilungen unter Momentenbelastung

Als letzter Punkt, der von der theoretischen Seite eine weitere Vergrößerung des Verhältnisses der Biege- zur Zugspannung erklären könnte, ist die Querkontraktionsbehinderung zu nennen.

Bei reiner Biegung muß im Zugbereich quer zur Belastungsrichtung eine Einschnürung, im Druckbereich eine Aufstauchung und somit eine Querkrümmung entstehen, die nur bei kleinen Verformungen vernachlässigbar ist.



Skizze 2.2 Querkrümmung unter Momentenbelastung

Je nach Verhältnis der Probendicke zur Probenbreite und Versuchsanordnung existiert durch eine Querkrümmungsbehinderung eine Momentenüberlagerung.

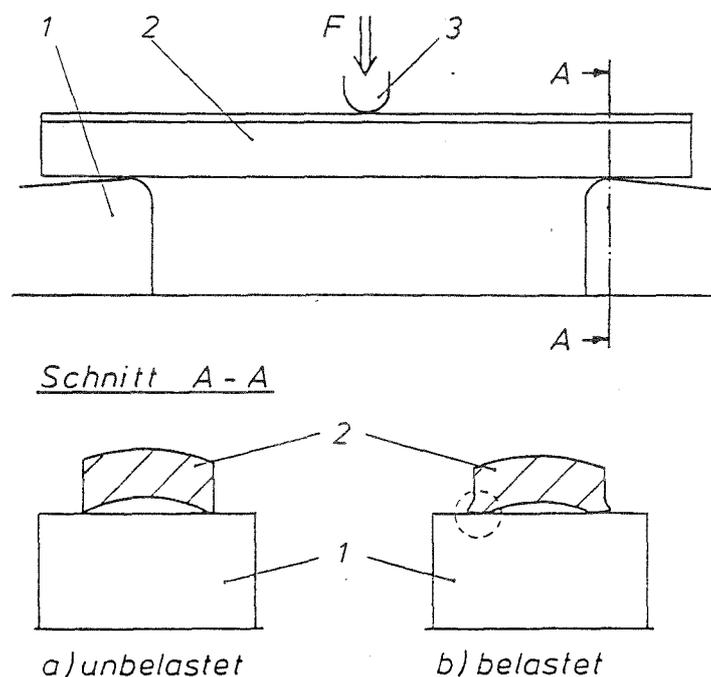
So entsteht z.B. bei der Dreipunktbiegung das maximale Moment nur in einem Punkt, während an den Auflagern kein Moment und keine Querkrümmung vorhanden ist.

Da die Versuche jedoch nach DIN EN 61/63 mit dem relativ geringen Verhältnis von $b/t \approx 3$ gefahren werden, erhebt sich selbst unter diesen idealisierten Annahmen immer noch die Frage, wie es zu Versuchsergebnissen kommt, die bei den quasihomogenen Laminaten zum Verhältnis σ_{bB}/σ_{zB} von 3 führen.

Eine Möglichkeit ist, daß bei den Zugversuchen aufgrund von Vorkrümmungen außer der Zugspannung durch die Exzentrizität der Probenmitte zur Einspannung auch Biegespannungen entstehen, welche zu vorzeitigem Versagen führen. Hier ist zu bedenken, daß sich gekrümmte Proben i.a. bei den herkömmlichen Prüfmaschinen nicht einspannen lassen, so daß nur die Exzentrizität durch die Krafteinleitung und Unsymmetrie des Laminataufbaus in Betrag kommt.

Andererseits besteht die Möglichkeit, daß bei den Dreipunkt-Versuchen durch Reibungseinflüsse zu hohe Momente und somit Biegebruchspannungen vorgetäuscht werden. Insbesondere bei Proben, die senkrecht zur Belastungsrichtung eine Krümmung aufweisen, ist an den Auflagepunkten mit örtlichen Verformungen zu rechnen, die bei den Bruchversuchen zur erhöhten Reibung führen.

Durch diese örtliche Verformung sind bei der Ermittlung der E_B -Module, im Fall der Querkrümmung, je nach Probenbreite und Krümmungsradius, zu geringe Meßergebnisse zu erwarten.



Skizze 2.3 Örtliche Verformung an den Auflagern bei einer Probe mit Querkrümmung, 1) Auflager, 2) Probe, 3) Druckstempel

Hinzu kommt das Problem der Krafeinleitung, welches sich leider nie ganz eliminieren läßt.

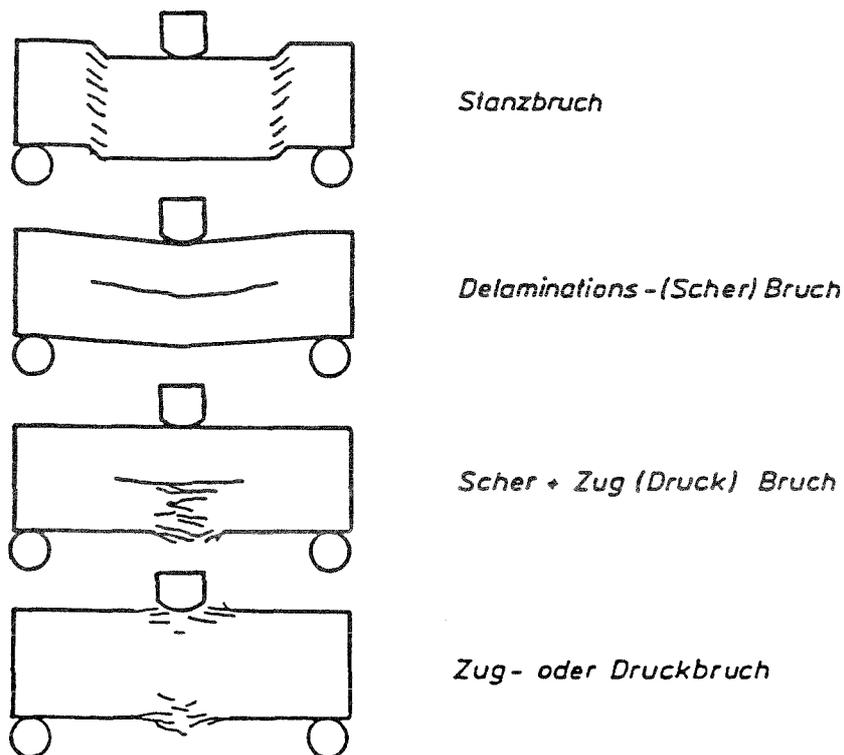
So kann z.B. bei der Dreipunktbiegung am Punkt des maximalen Momentes die „Druckrinne“ einen Bruch auslösen, aber unter Umständen den Druckbereich auch stützen, so daß sowohl eine Über- als auch Unterschätzung des Tragvermögens möglich ist.

Außerdem wird die Dreipunktbiegung auch als Kurzbiegeversuch (DIN 29 971) zur Ermittlung der interlaminaren Schubfestigkeit eingesetzt, woraus ersichtlich wird, daß der Wahl des Auflagerabstandes L eine bedeutende Rolle zukommt.

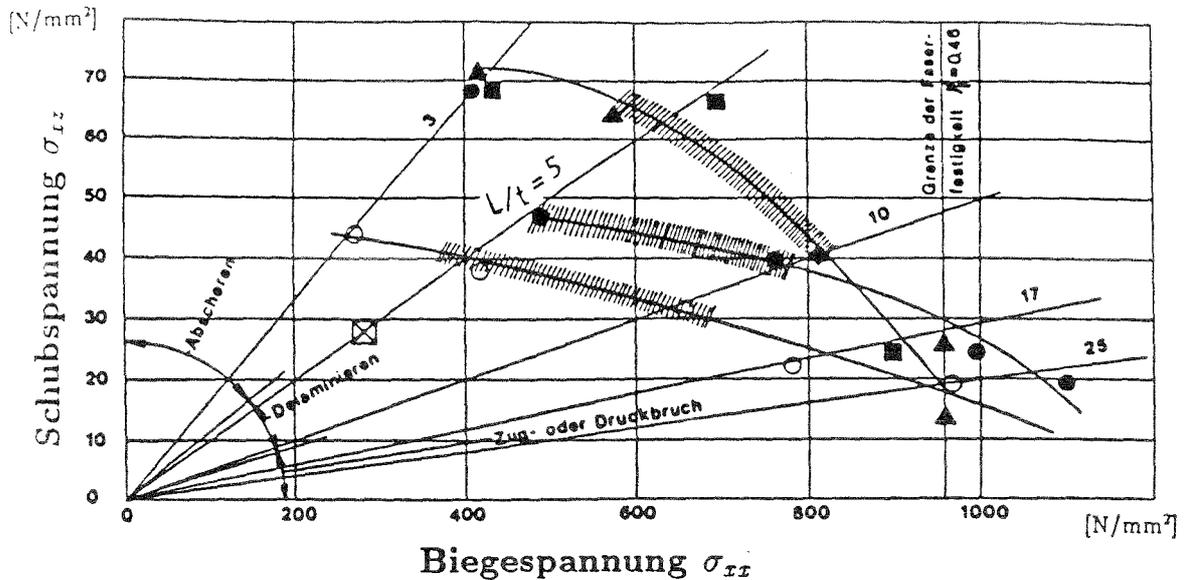
Bei einem zu geringem Verhältnis der Länge L zur Probendicke t tritt ein Versagen durch die hohen Schubspannungen ein, dieses wird im Diagramm 2.3 deutlich.

Nach Untersuchungen zur Ermittlung der interlaminaren Scherfestigkeit von CFK-Laminaten /13/ und GFK-Laminaten /25/ erfolgte für

- L/t bis 6 : Stanzbruch
 6 bis 20 : Scherbruch
 ab 20 : Zug-oder/und Druckbruch



Skizze 2.4 Typische Versagensformen von Kurzbiegeproben /13/



☒ RHV/LN 29 971 ○ GSR/EP $\varphi_F=0,58$ ▲ GSR/EP $\varphi_F=0,46$ ■ GSF/EP ● GSR/UP

GSR/EP: Glasseidenroving (Gevetex)/ Rütapox L02

GSF/EP: Glasseidenspinnfaden 40 tex (Gevetex)/ Rütapox L02

GSR/UP: Glasseidenroving/ Palatal P6 (BASF)

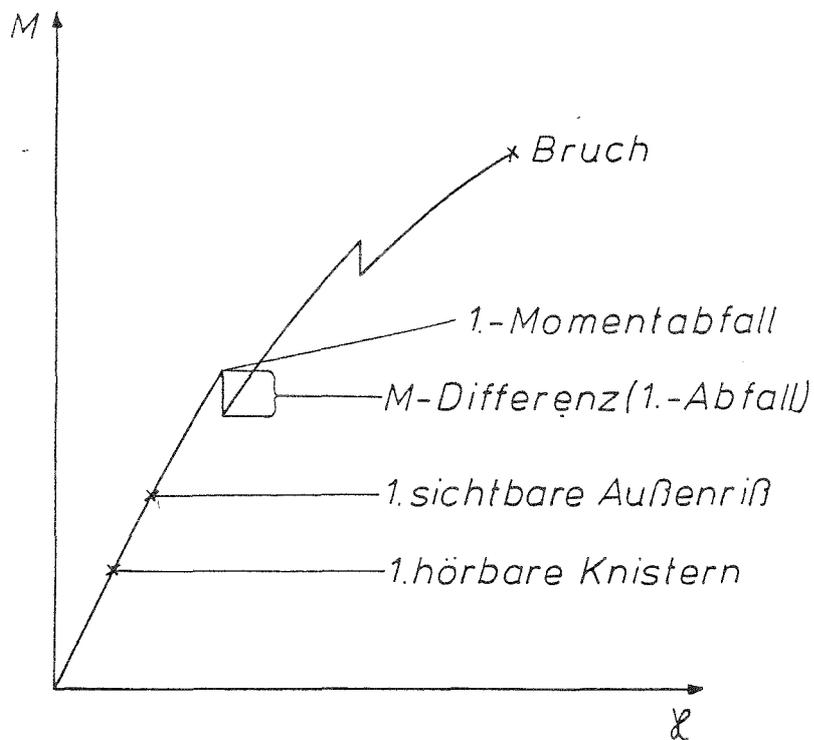
Diagramm 2.3 Einfluß des Auflagerabstandes auf die Versagensart, sowie auf die Höhe der jeweiligen Biege- und Schubspannung bei der Dreipunktbiegung /25/

Das Verhältnis für $L/t > 20$ muß bei der Vierpunktbiegung ebenfalls gewahrt bleiben, wobei statt L die Differenz zwischen den äußeren und inneren Auflagern einzusetzen ist, dies führt wiederum zu relativ großen Wegen bei den Bruchversuchen. Deshalb muß der Abstand zwischen den inneren Auflagern relativ klein gewählt werden. Anderenfalls ist es oft nicht möglich, den Bruchzustand zu erreichen. Außerdem wird bei der Vierpunktbiegung der Reibungseinfluß noch schwieriger abschätzbar.

Bei der "Reinen Biegung" (siehe Kapitel 3.1) werden die Proben an den Enden eingespannt und ein Auflager kann der Verformung der Probe, unabhängig von der Probenoberfläche, weitgehend reibungsfrei folgen.

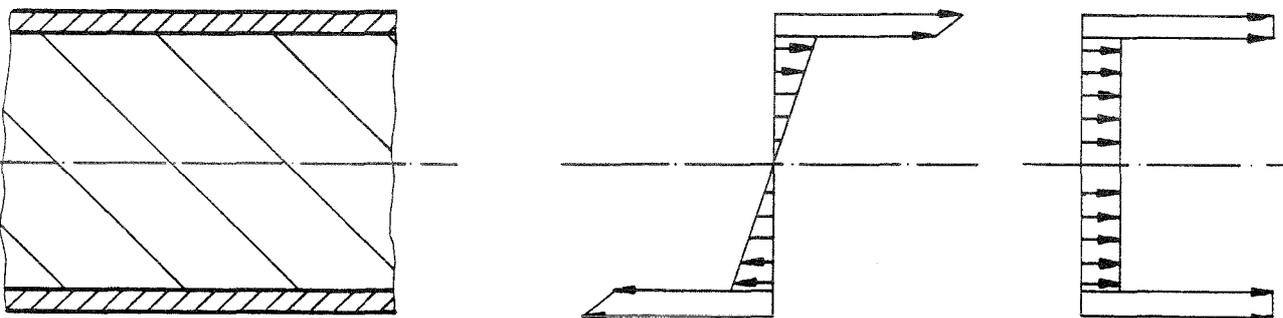
Bei den Biegebruchversuchen erfolgt eine Auswertung der charakteristischen Eckpunkte, wie z.B. die Momente beim 1.hörbaren Knistern, 1.sichtbaren Riß an der Oberfläche und bei Kraftabfällen durch Schädigung, wenn möglich incl. der zugehörigen Krümmungen, um einen Vergleich mit den theoretische Berechnungen zu haben.

Diese Eckpunkte sind, je nach Laminataufbau und Versagensart, nicht immer ausgeprägt, auch nicht zwingend in der aufgezeichneten Reihenfolge, vorhanden.



Skizze 2.5 Eckpunkte bei den Biegebruchversuchen in einem
Moment (M) - Krümmung (κ) - Diagramm

Abschließend sei erwähnt, daß bei einigen Laminataufbauten Unterschiede zwischen der Biege- und Zugbruchspannung bestehen müssen. Als Extremfall ist die Sandwichplatte mit zwei hochfesten Deckschichten und einem Kern mit geringer Festigkeit anzusehen (Skizze 2.6). In diesem Fall ist die Zugfestigkeit wesentlich kleiner als die Biegebruchspannung.



Skizze 2.6 Sandwichplatte

2.1 Versuchsrandbedingungen

2.1.1 Vorschubgeschwindigkeit

Nach DIN EN 63 ist für die Vorschubgeschwindigkeit der Druckfinne $v = t/2$, bzw. für Routineprüfungen $v = 10 \text{ mm/min}$ vorgesehen. Für die Zugversuche mit Rechteckproben wird in DIN EN 61 eine Geschwindigkeit von $v = 5 \text{ mm/min}$, für Kennwertprüfungen und Elastizitätsmodulermittlungen $v = 2 \text{ mm/min}$ vorgeschrieben.

Da bei den Versuchen u.a. die Auflagerlängen variiert werden und in erster Linie der Einfluß der Versuchsart auf die erzielten Maximallasten untersucht wird, erfolgen die Bruchversuche bei konstanter Geschwindigkeit innerhalb des Versuchs, jedoch wird diese so eingestellt, daß die Zeit von Belastungsbeginn bis zum Bruch ca. eine Minute beträgt. Hierdurch soll sichergestellt werden, daß bei den unterschiedlichen Versuchsanordnungen innerhalb der Lamine die gleichen viskoelastischen Effekte vorhanden sind.

2.1.2 Probenbreiten

Bei der Wahl der Probenbreite soll nach DIN EN 61 vorzugsweise $b = 25 \text{ mm}$, oder für schwächere Materialien $b = 50 \text{ mm}$, eingesetzt werden (ausgehend von Probendicken $t = 2 - 10 \text{ mm}$).

Nach DIN EN 63 sind in Abhängigkeit von der Dicke folgende Breiten vorgesehen :

Dicke t in mm	Breite b
über 1 bis 10	15 mm
über 10 bis 20	30 mm
über 20 bis 35	50 mm
über 35 bis 50	80 mm

Tabelle 2.1 Maße der Probekörper nach DIN EN 63

Da die untersuchten Lamine i.a. Dicken im Bereich $t = 6 - 20 \text{ mm}$ besitzen, wurden für alle Versuchsarten und Lamine eine Breite von 30 mm favorisiert. Damit ergeben sich gleiche Bedingungen für den Randeinfluß, außerdem war die Festlegung einer konstanten Breite für einige Konstruktionen, insbesondere der Biegeprüfvorrichtung, nötig. Um den Breiteneinfluß abschätzen zu können, erfolgten bei einigen Laminen, schwerpunktmäßig bei gekrümmten Platten, zusätzlich Versuche mit $b = (20) / 50 / 70 \text{ mm}$. Die Versuchsergebnisse im Anhang sind, innerhalb der Versuchsarten, nach steigender Breite sortiert.

2.1.3 Faservolumenbezogene Spannungen

Zur Eliminierung der Dickendifferenzen innerhalb der Lamine werden die Bruchspannungen durch den jeweiligen Faservolumengehalt der Probe geteilt, hierbei wird das theoretische Flächengewicht G_{Ages} als konstant angesehen. (t : Dicke der Probe)

$$\sigma_B \phi = \frac{\sigma_B}{\phi_{mF}} = \frac{\sigma_B \cdot t \cdot \rho_F}{G_{Ages}} \quad (2.1.1)$$

Der aktuelle Laminataufbau läßt sich durch Veraschung und anschließender Teilung in die Schichten ermitteln.

Hierfür wird ein Laminatstück ausgesägt, gewogen und vermessen. Anschließend wird dieses Stück bei 650 °C eine Stunde im Ofen erhitzt bis nur noch der Glasanteil vorhanden ist. Beim erneuten Wiegen erhält man das Fasergewicht m_F und damit das Faserflächengewicht.

$$G_{Ages} = \frac{m_F}{b \cdot l} \quad (2.1.2)$$

Gewichtsanteil

$$\psi = \frac{m_F}{m_{ges}} \quad (2.1.3)$$

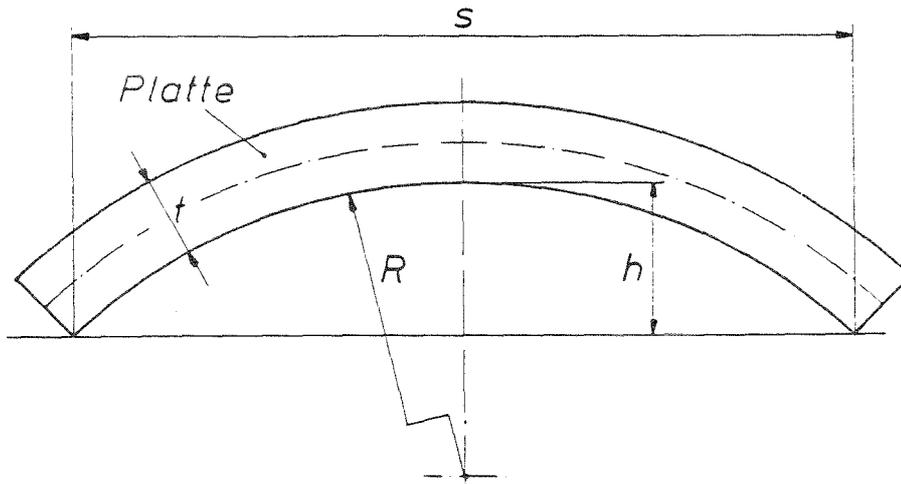
Faservolumenanteil ($\rho_F = 2500 \text{ kg/dm}^3$, $\rho_H = 1200 \text{ kg/dm}^3$)

$$\phi = \frac{1}{1 + \frac{1-\psi}{\psi} \cdot \frac{\rho_F}{\rho_H}} \quad (2.1.4)$$

Nach der Veraschung lassen sich jetzt die einzelnen Lagen abheben, wiegen und der Laminataufbau ist eindeutig zu bestimmen.

2.1.4 Ermittlung des Vorkrümmungsradius

Bei der Lieferung von gekrümmten Platten wird der Radius oft nicht angegeben und muß aus der Geometrie ermittelt werden :



Skizze 2.7 Krümmungsdefinition

Krümmungsradius der Laminatunterseite

$$R = \frac{s^2 + 4 \cdot h^2}{8 \cdot h} \quad (2.1.5)$$

Bei den ungekrümmten Platten wurde die "glatte" Seite als Unterseite definiert, dies entspricht der ersten laminierten Schicht.

Die Biegeversuche sind in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung differenziert, da

- bei gekrümmten Platten mit anderen Auflagerabständen zu rechnen ist
- der Laminataufbau nicht immer symmetrisch ist
- der Faservolumengehalt herstellungsbedingt zwischen der Ober- und Unterseite schwanken kann
- teilweise die Oberflächenbeschaffenheit unterschiedlich ist, somit bei der Ribbildung und bei der Reibung einen Einfluß hat.

2.1.5 Feuchtigkeit, Temperatur

Die Proben wurden mit einer diamantstaubbesetzten Scheibe unter Wasserkühlung ausgesägt. Nach dem Aussägen wurden die Proben vor den Versuchen mind. eine Woche unter Laborbedingungen ausgelagert.

Die Versuche erfolgten bei Normalklima.

(Temperatur 23 ± 2 °C, Rel. Luftfeuchte $50 \pm 5\%$)

3.1 "Reine Biegung" / Biegeprüfvorrichtung

Bei der Ermittlung der Maximalmomente existiert im allgemeinen das Problem, daß aufgrund von Vorkrümmungen, Reibungseinflüssen und großen Verformungen das wirklich aufgebrachte Moment als unbekannt anzusehen ist.

Als Grundforderungen für die Ermittlung des Maximalmoments ergeben sich an eine Prüfvorrichtung

1. Keine Normal-, oder Querkräfte
2. Bekanntes Biegemoment, unabhängig von der Probenvorkrümmung und den Verformungen während des Versuches
3. Aufbringen des Maximalmomentes über eine gewisse Länge, so daß sich die Krümmungen bei Bruch und anderen Randwerten, z.B. 1.Knistern, 1.Oberflächenriß erfassen lassen.

Gesucht ist vom Prinzip eine Versuchsanordnung, die der reinen Biegung entspricht.



Skizze 3.1.1 Reine Momentbelastung

Es würde sich hier eine Vorrichtung anbieten, bei welcher die Momente an den Probenenden durch zwei Motoren (hydraulisch oder elektrisch) aufgebracht werden, wobei zwischen der Momenteinleitung und den Motoren ein Momentengeber eingebaut wird, so daß durch eine Regeleinrichtung gewährleistet ist, daß die Momente an beiden Seiten gleich groß sind, also auch z.B. Proben mit unsymmetrischer Vorkrümmung gefahren werden können. Einer der Motoren muß horizontal beweglich angebracht sein.

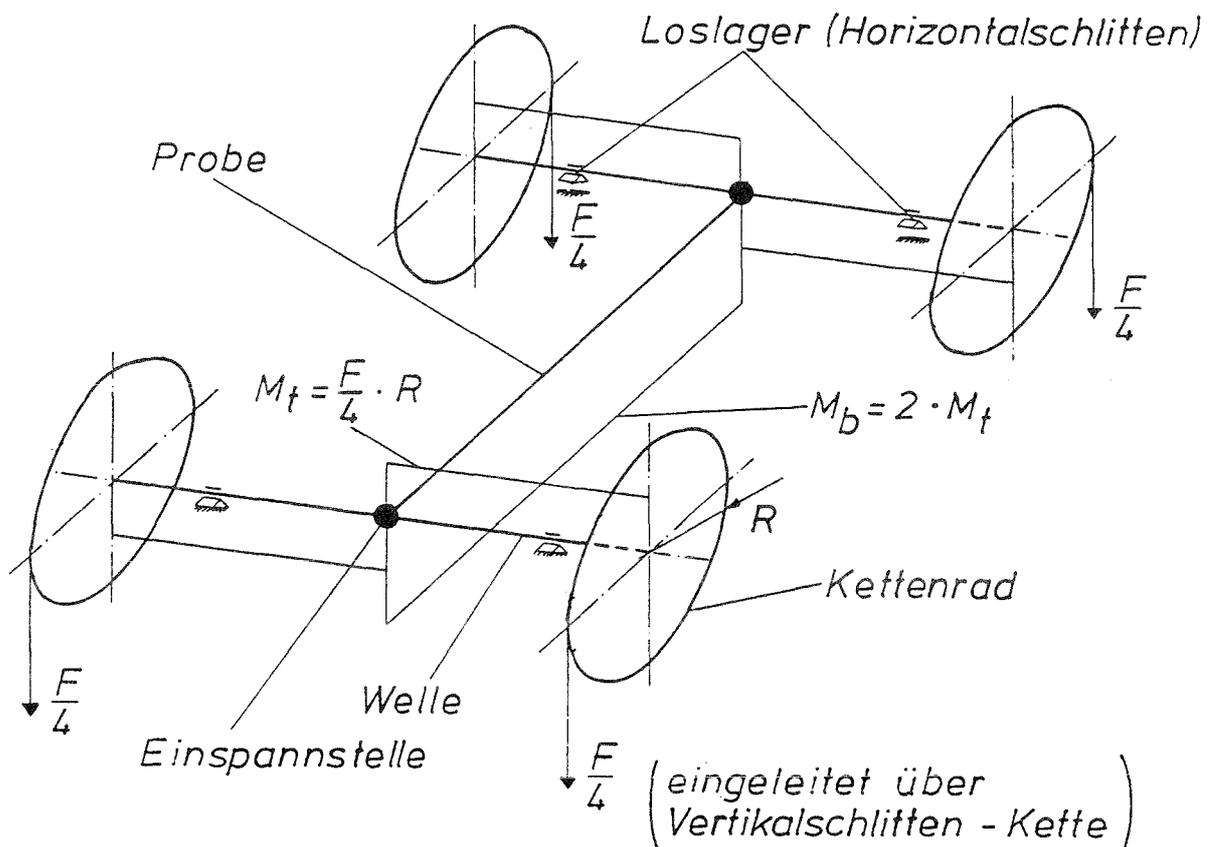
Da auch in diesem Fall eine Verfälschung durch Einspanneffekte nicht auszuschliessen ist, wurde aus Kostengründen von diesem Gedanken Abstand genommen.

So ergab sich die Zusatzforderung, daß die Prüfvorrichtung in die vorhandene Hydropulsmaschine integrierbar sein sollte.

Als Lösung wurde folgender Weg gewählt :

1. Umwandlung der vertikalen Kraft und Vertikalbewegung in ein Torsionsmoment und eine Drehbewegung.
2. Das Torsionsmoment wird durch eine feste Einspannung in die Probe als Biegemoment eingeleitet (Momenteinleitung an beiden Probenenden).
3. Ein Lager ist ein Loslager, d.h. dieses Lager kann quasi reibungsfrei der Längenänderung der Probe folgen. (Das Auflager bewegt sich mit Stützrollen über eine gehärtete, geschliffene Führungsschiene.)
4. Das aktuelle Moment in der Probe läßt sich vorkrümmungs-, verformungsunabhängig berechnen, da der Hebelarm (Radius des Kettenrades) für die Momenterzeugung fast konstant ist.

(Gesamtzeichnung siehe Anhang, Kapitel 2.)

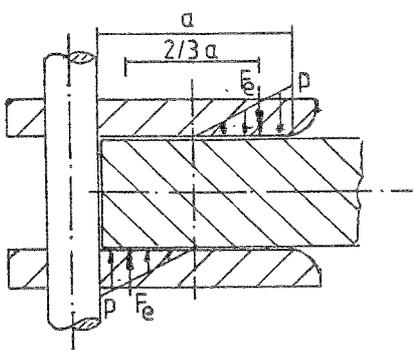


Skizze 3.1.2 Prinzip der Biegeprüfvorrichtung

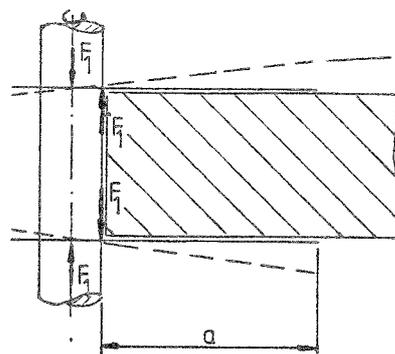
Die Einspannung der Probe erfolgt nach einem Vorschlag von M.Pauly, M.Lentzen /11/, wobei die Probe an den Enden durch zwei Einspannbacken gehalten wird.

Die Einspannbacken lassen sich durch eine Spindel mit einem Links- und Rechtsgewinde bewegen. Nach dem Klemmen der Probe (Skizze 3.1.4) werden die Backen durch zwei Spannschrauben in eine parallele Lage gebracht und der vordere Probeteil in der Einspannung zusammengedrückt (Skizze 3.1.5).

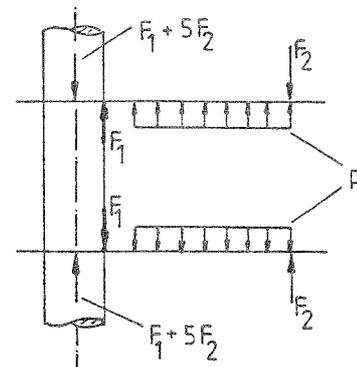
(Die Versuche erfolgten ohne große Vorkraft.)



Skizze 3.1.3



Skizze 3.1.4



Skizze 3.1.5

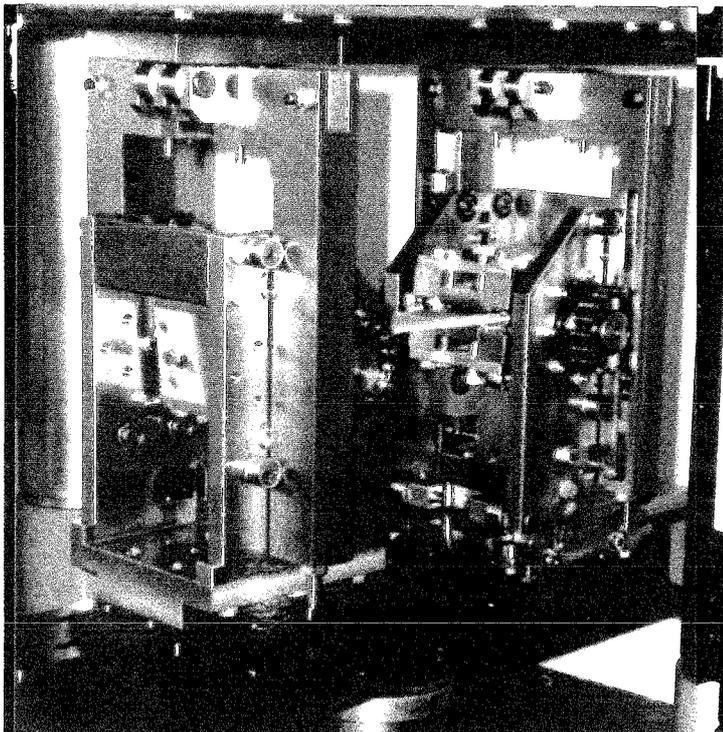


Bild 3.1.1 Biegeprüfvorrichtung

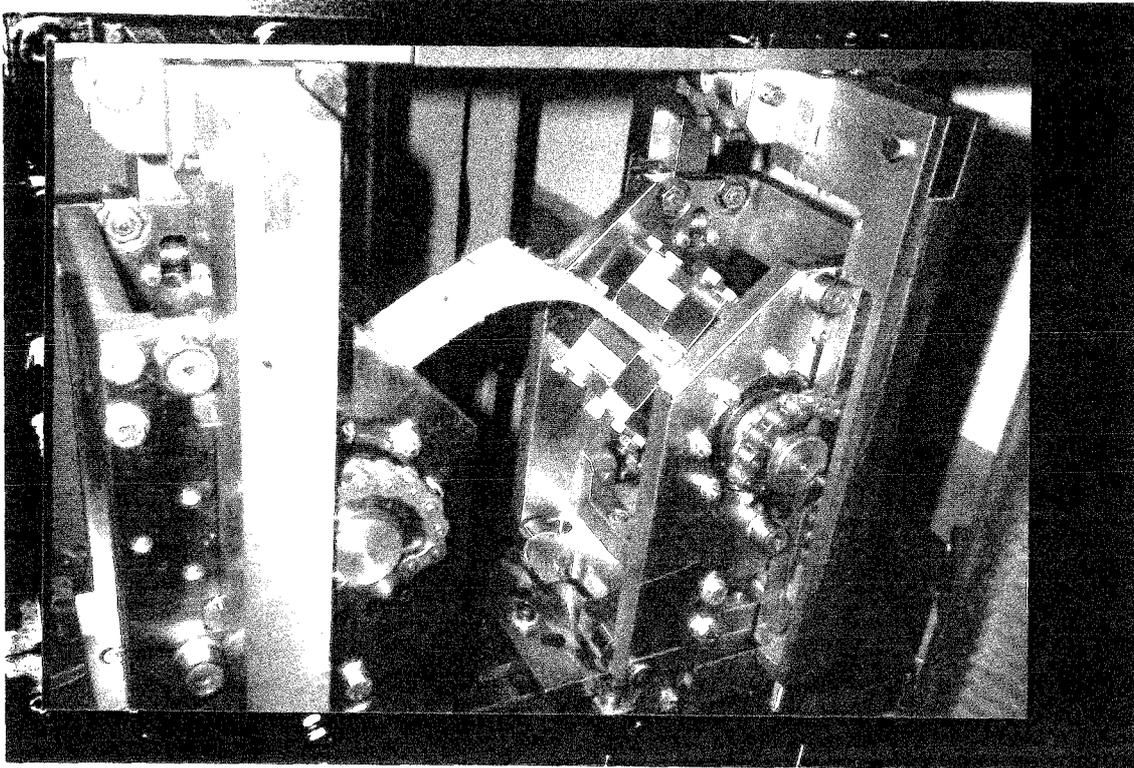


Bild 3.1.2 Bruch einer Probe in der Biegeprüfvorrichtung

Verbesserungsvorschlag

Eigentlich waren zwei Loslager vorgesehen, denn durch die aktuelle Version ergibt sich je nach Lageänderung des Horizontalschlittens ein Moment auf den Arbeitskolben der Hydropulsmaschine, so daß in Vorversuchen die zu erwartende Verformung ermittelt werden muß, damit im Bruchzustand dieses Moment nur gering ist.

Diese beiden Vertikalschlitten müßten durch eine, in der Kolbenlängsachse geführte, Schere verbunden werden.

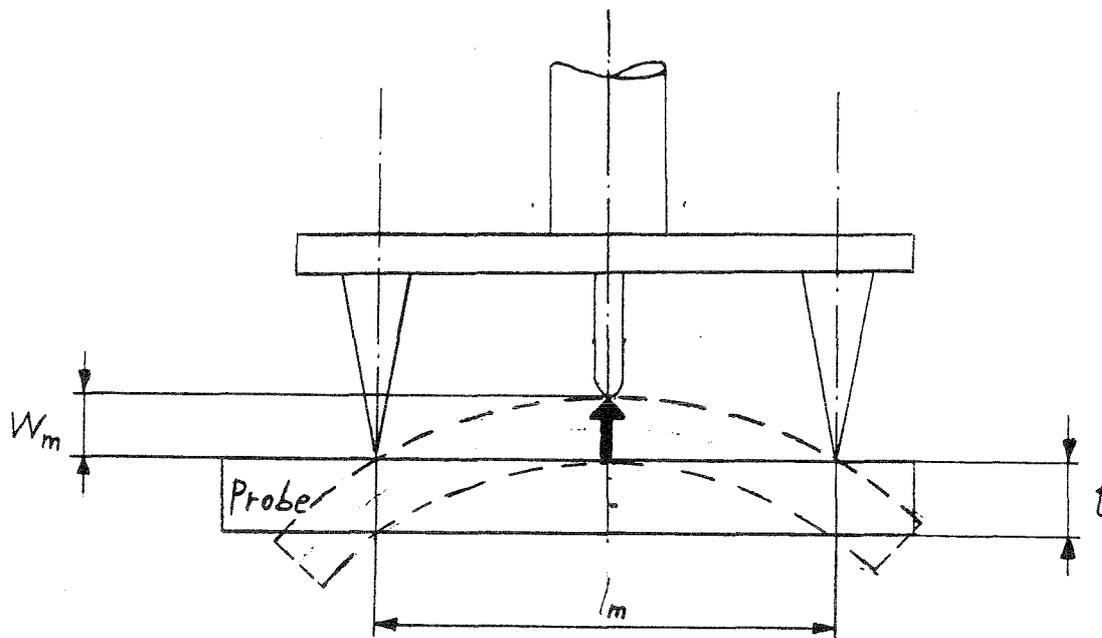
Durch diese Anordnung entsteht der weitere Vorteil, daß für die Einspannarbeiten mehr Platz zur Verfügung steht.

Ermittlung der Krümmung

Einer der Vorteile der Biegeprüfvorrichtung ist, daß man außer den Momenten auch die zugehörigen Krümmungen erhalten kann und somit weitere Vergleichsmöglichkeiten für die theoretischen Maximallastberechnung, insbesondere die Nichtlinearität, erhält.

Für die Ermittlung der Krümmung wurde ein Bezugsbalken gewählt, der an drei Punkten auf der Probe liegt und durch zwei Klammern leicht angeklemt wird, so daß Unebenheiten und Krümmungen quer zur Probenlängsrichtung kompensiert werden. Aus der Abstandsänderung in der Bezugslängenmitte zum Ursprungsabstand im unbelasteten Zustand läßt sich die Krümmungsänderung berechnen.

Die Wegänderung wurde mit einem Induktivaufnehmer (HBM TK5A) ermittelt.



Skizze 3.1.6 Krümmungsaufnehmer

Berechnung der Versuchsergebnisse

Bei den Versuchen mit der Biegeprüfvorrichtung wurden außer den Maximallasten unter anderem auch die Randwerte : 1. Knistern, 1. sichtbare Außenriß im Zugbereich ausgewertet.

Das aktuell eingeleitete Moment ergibt sich aus der aufgebrachten Kraft F und der Gewichtskraft vom Vertikalschlitten FGV (98 N).

Der Radius der Kettenräder R_K beträgt 34.55 mm .

Moment

$$M = \left(\frac{1}{2} \cdot F + F_{GV} \right) \cdot R_K \quad (3.1.1)$$

Schnittmoment

$$m = \frac{M}{b} \quad (3.1.2)$$

Krümmung

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{8 \cdot w_m}{l_m^2 + 4 \cdot w_m^2} \quad (3.1.3)$$

Berechnung des Biegemoduls

$$E_{bo} = \frac{\Delta F \cdot R_K \cdot L_m^2}{16 \cdot w_m \cdot I} \quad (3.1.4)$$

Probenformen für die Biegeprüfvorrichtung

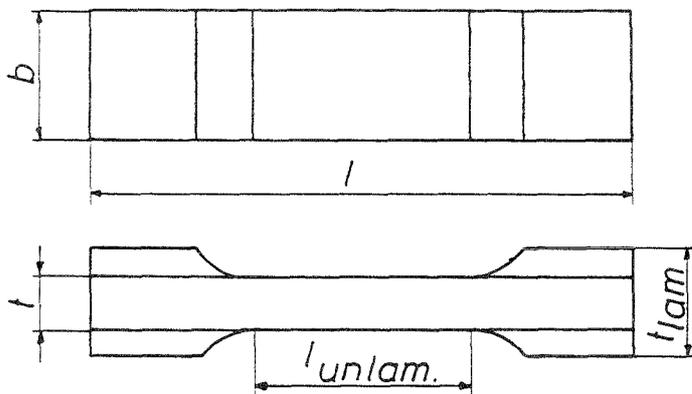
Für die ersten Versuche an der Prüfvorrichtung sind die Prüfplatten an den einzu-
spannenden Enden auflaminiert, und als Rechteckprobe abgesägt worden (Probenform I).

Nachdem sich zeigte, daß teilweise Risse am Auslauf der Auflaminierung auftraten,
sind ausgesägte Schulterproben (Probenform II) zum Einsatz gekommen.

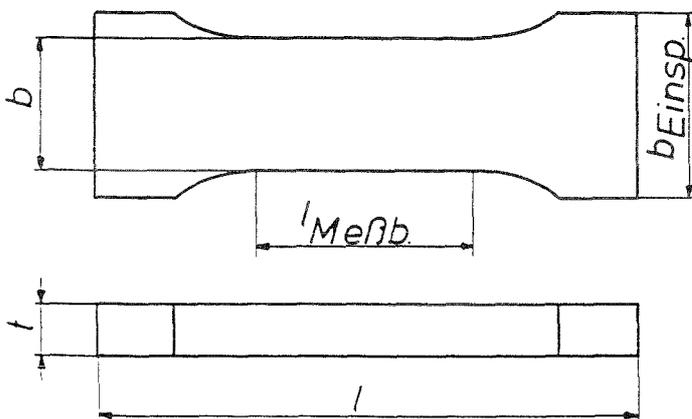
Die Länge des Meßbereichs ($l_{unlam.}$, bzw. $l_{Meßb.}$) beträgt ca. 100 mm, die Gesamt-
länge l 300 - 350 mm. Bei der Probenform I ist die Dicke t_{lam} bis auf ca. dem Zwei-
fachen der Probendicke t auflaminiert worden.

Die Breiten sind durch die Vorrichtung auf 50 mm beschränkt.

Probenform I



Probenform II



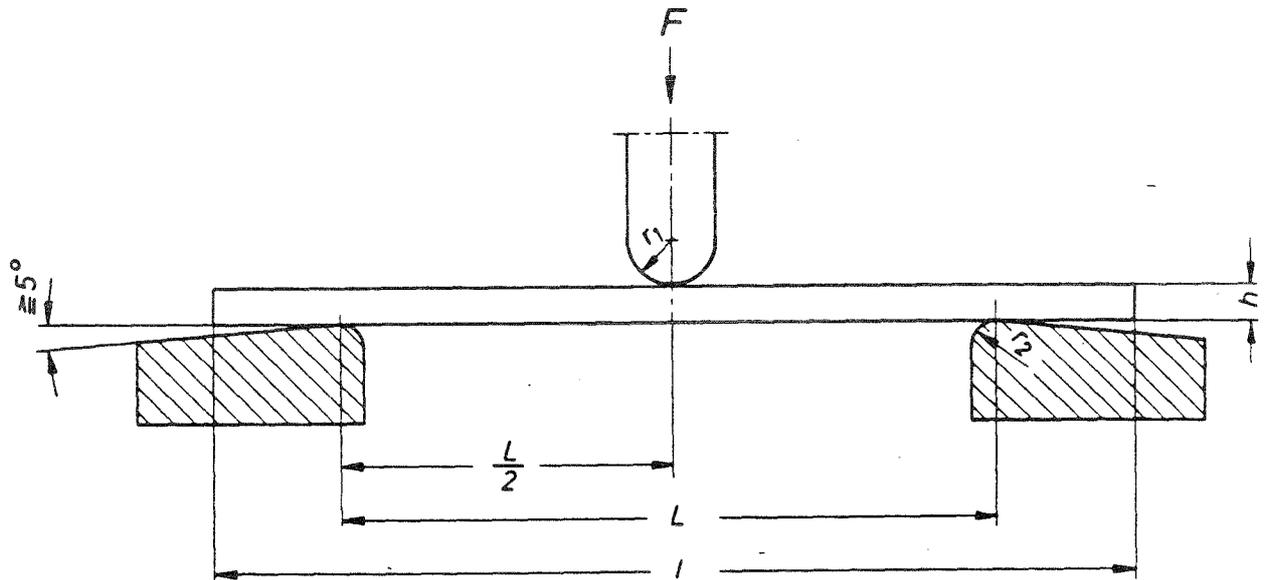
Skizze 3.1.7 Probenformen für die Biegeprüfvorrichtung

3.2 Dreipunkt - Biegung

Die Drei-Punkt-Biegungsversuche erfolgten in Anlehnung an DIN EN 63 /4/ ,also mit reibungsbehafteten Auflagern, außerdem wurden "reibungsfreie" Auflagern mit gleichem Radius verwendet.

Bei dieser Versuchsart wird das Moment durch eine Kraft, die eine Druckrinne hervorruft, erzeugt.

Die Proben werden rechteckig aus den Platten ausgesägt.



Skizze 3.2.1 (aus /4/)

Nach DIN EN 63 ist folgender Auflagerabstand vorgesehen :

$$L = (16 \pm 1) \cdot t \quad (3.2.1)$$

Der Abstand wurde teilweise variiert.

Für Dreipunktversuchsserien bei unterschiedlichen Randbedingungen erfolgten die Versuche i.a. bei einem Abstand von 20 bis 25 mal der Probendicke zur Verringerung des Querkrafteinflusses. Bei Angaben "L/t" ist die mittlere Laminatdicke t zugrunde gelegt worden.

Auswertung der Ergebnisse nach DIN EN 63

(I,W für Rechteckprobe)

Biegemoment $M = \frac{F \cdot L}{4} \quad (3.2.2)$

$$\text{Schnittmoment} \quad m = \frac{M}{b} \quad (3.2.3)$$

$$\text{Biegespannung} \quad \sigma_b = \frac{M}{W} = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot t^2} \quad (3.2.4)$$

Zur Berücksichtigung der Durchbiegung w (Probenmitte) ist folgender Auswertungsansatz vorgesehen.

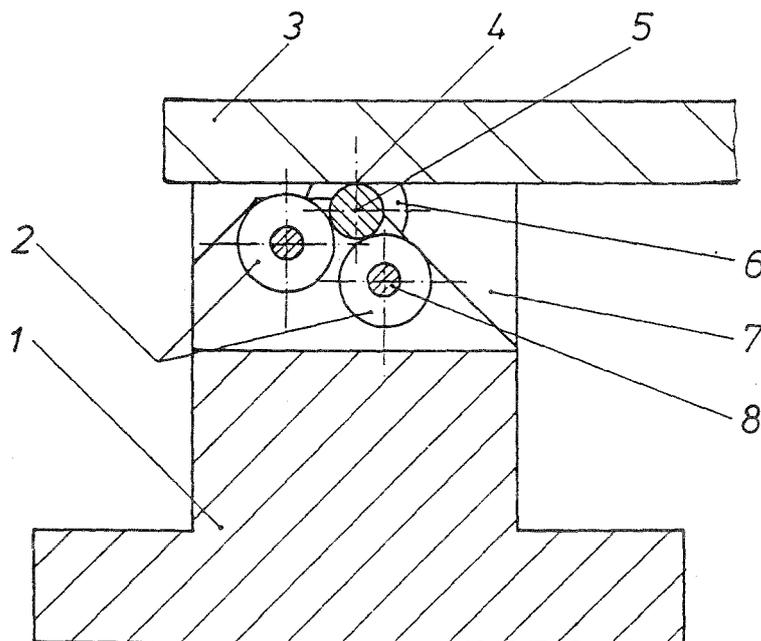
$$\text{Biegemoment} \quad M' = \frac{F \cdot L}{4} \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot w^2}{L^2} \right) \quad (3.2.5)$$

Analog zu m , σ_b erfolgt die Berechnung von m' und σ_b' .

$$\text{Elastizitätsmodul} \quad E_b = \frac{L^3}{4 \cdot b \cdot h^3} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta w} \quad (3.2.6)$$

"Reibungsfreie" Auflager

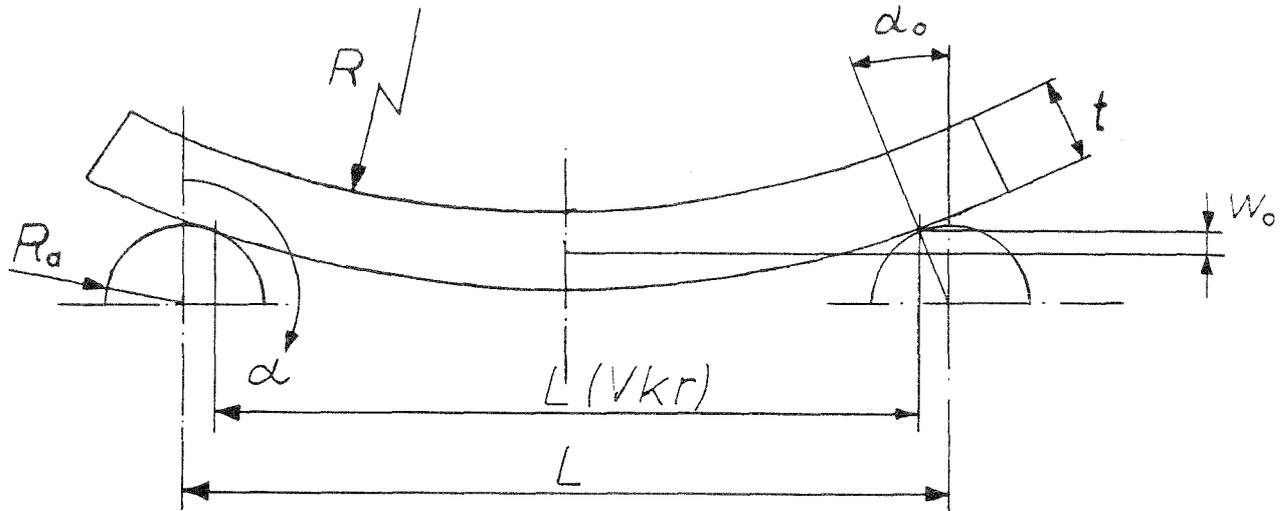
Zur Verringerung und Abschätzung des Reibungseinflusses bei der Dreipunktbiegung sind Lagerblöcke verwendet worden, bei denen die Probe über eine gestützte Welle ($R=5\text{mm}$) abrollen konnte.



Skizze 3.2.2 "Reibungsfreier" Auflagerblock (1=Lagerblock, 2=Stützrollen, 3=Probe, 4=Auflagepunkt der Probe, 5=Auflagewelle, 6=Lager für die Auflagewelle, 7=Lagerblock für 6, 8=Welle für die Stützrollen)

Berechnung der vorkrümmungsabhängigen Werte

Sind Proben in Längsrichtung vorgekrümmt, so ändern sich die Abstände der Auflagepunkte in Abhängigkeit vom Krümmungsradius und der Belastungsrichtung.



Skizze 3.2.3 Auflagerabstand bei Vorkrümmung der Probe

Ungekrümmte Probe

$$\alpha_0 = 0^\circ$$

$$w_0 = -\frac{t}{2}$$

Probe wird in die vorgekrümmte Richtung verformt ($\alpha_0 > 0^\circ$)

$$\alpha_0 = \arcsin \left(\frac{L}{2 \cdot (R + t + R_a)} \right) \quad (3.2.7)$$

$$w_0 = -\frac{t}{2} + (R + t) \cdot (1 - \cos \alpha_0) \quad (3.2.8)$$

Probe wird gegen die vorgekrümmte Richtung verformt ($\alpha_0 < 0^\circ$)

$$\alpha_0 = -\arcsin \left(\frac{L}{2 \cdot (R - R_a)} \right) \quad (3.2.9)$$

$$w_0 = -\frac{t}{2} - R \cdot (1 - \cos \alpha_0) \quad (3.2.10)$$

Auflageabstand bei Versuchsbeginn durch Vorkrümmung

$$L (Vkr) = L - 2 \cdot R_a \cdot \sin \alpha_0 \quad (3.2.11)$$

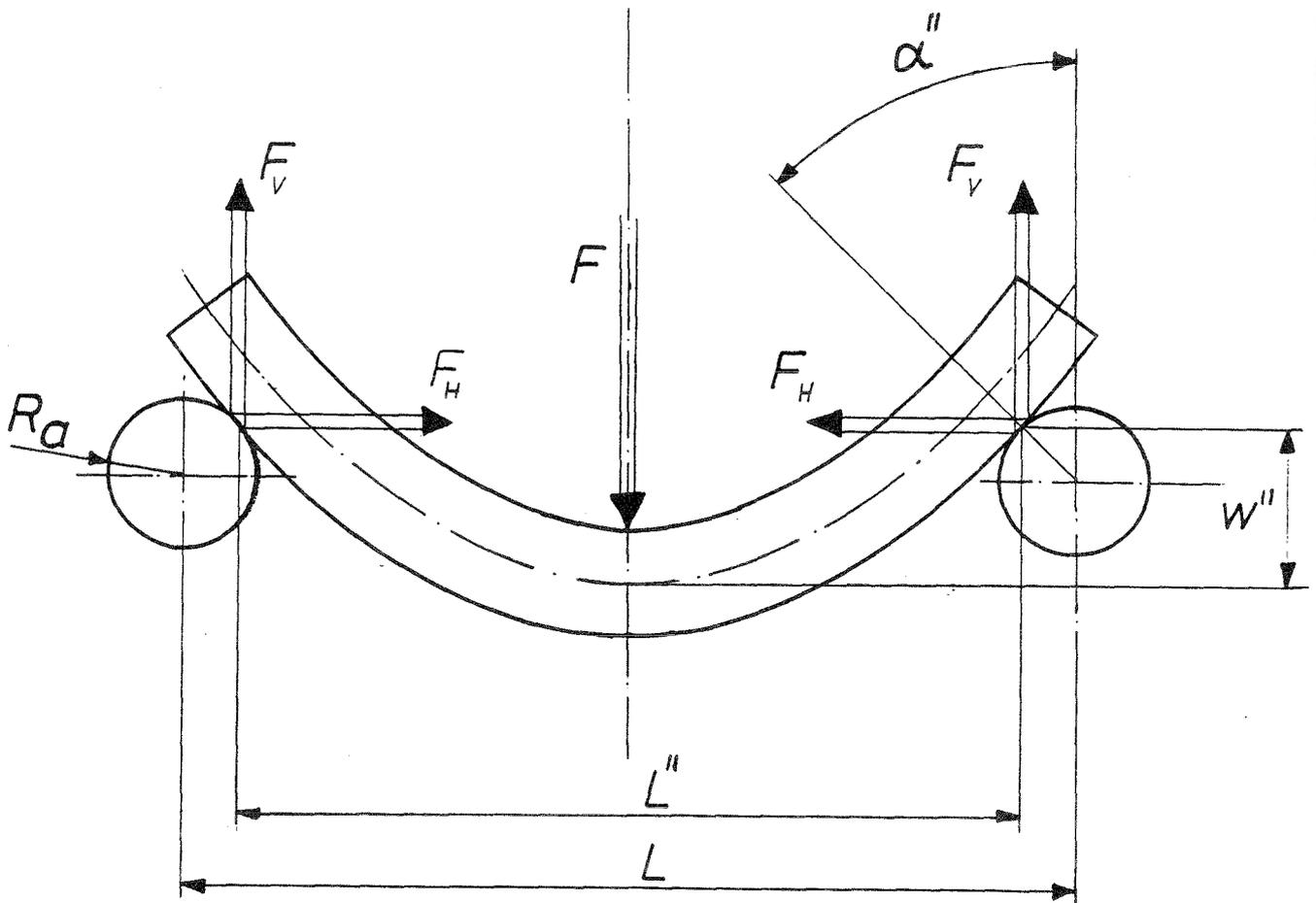
Mit dieser korrigierten Länge sind die Versuche mit vorgekrümmten Proben zusätzlich ausgewertet worden, d.h. in den Gleichungen (3.2.2), (3.2.3), (3.2.4) und (3.2.6) wird statt der Länge L mit $L (Vkr)$ gerechnet.

Aus diesen Berechnungen ergeben sich die Werte $m (Vkr)$, $\sigma_b (Vkr)$ und $E_b (Vkr)$.

Berücksichtigung der Verformung, Vorkrümmung und Auflagerreibung (2. Ansatz für Dreipunktbiegung)

Bei dem Ansatz zur Berücksichtigung der Durchbiegung nach DIN EN 63 wird von ungekrümmten Proben und Reibungsfreiheit, also einer Vergrößerung des wirklich vorhandenen Momentes durch die Verformung, ausgegangen.

Je nach Oberflächenbeschaffenheit, z.B. Rauigkeit, Krümmung quer zur Probenlängsrichtung, Chemieschutzschicht, usw. unterscheiden sich jedoch die Reibungsbeiwerte. Außerdem muß der Einfluß der Vorkrümmung auf die Horizontalkomponente berücksichtigt werden, da diese teilweise die gleiche Größenordnung wie die Durchbiegung hat. Im Bruchzustand ergibt sich folgende Kräftebilanz :



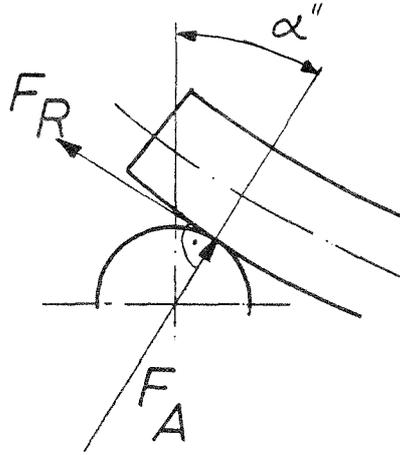
Skizze 3.2.4

Das Bruchmoment ergibt sich damit aus :

$$M''_{\max} = F_V \cdot \frac{L''}{2} + F_H \cdot w'' \quad (3.2.12)$$

Die Kräfte an den Auflagern lassen sich aufteilen in die Normalkraft F_A und die Reibkraft F_R .

Linkes Auflager :



Skizze 3.2.5

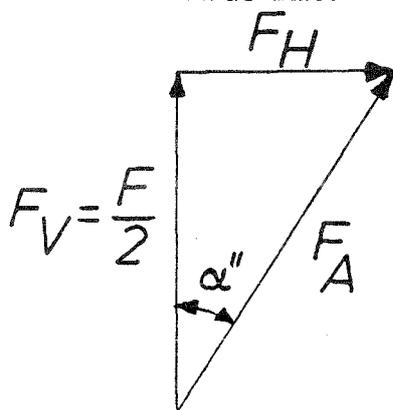
$$F_A = \frac{F}{2 \cdot (\cos \alpha'' + \mu \cdot \sin \alpha'')} \quad (3.2.13)$$

$$F_R = F_A \cdot \mu \quad (3.2.14)$$

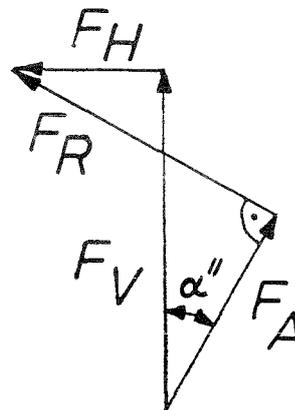
Aufgrund der Auflagerform (Skizze 3.2.1) sind Versuche mit Verformung entgegen der Vorkrümmung auf Proben mit geringem Radius beschränkt, so daß bei der weiteren Berechnung von einem Bruchwinkel $\alpha'' > 0^\circ$ ausgegangen wird.

In Abhängigkeit von der Reibungszahl ist das tatsächliche Bruchmoment in der Probe entweder größer als nach der Gleichung 3.2.2, also bei geringer Reibung, oder es wird bei hohen Reibungszahlen ein zu großes Moment vorgetäuscht.

Ohne Reibung :



Mit Reibung :



Skizze 3.2.6

Aus der Geometrie ergibt sich für $\alpha'' > 0^\circ$:

$$F_H = \frac{F}{2} \cdot \frac{\sin \alpha'' - \mu \cdot \cos \alpha''}{\cos \alpha'' + \mu \cdot \sin \alpha''} \quad (3.2.15)$$

$$F_V = \frac{F}{2} \quad (3.2.16)$$

Winkel am Auflager im Bruchzustand

Die Winkeländerung am Auflager läßt sich unter Annahme der Biegelinie eines geraden Balkens mit hinreichender Genauigkeit berechnen.

$$\alpha = \arctan \left(\frac{3 \cdot w}{L} \right) \quad (3.2.17)$$

Eine Berücksichtigung der Vorkrümmung in die Verformung erscheint nicht als sinnvoll, da der Elastizitätsmodul als unbekannte Funktion des Momentes anzusehen ist, also insbesondere im Bruchzustand über die Länge L'' nicht konstant ist.

Unter Berücksichtigung des Winkels α_0 (Gl. 3.2.7, 3.2.9) durch die Vorkrümmung ergibt sich der Winkel am Auflager bei Bruch :

$$\alpha'' = \alpha_0 + \alpha \quad (3.2.18)$$

($0^\circ < \alpha'' < 90^\circ$!)

Auflageabstand im Bruchzustand

$$L'' = L - 2 \cdot R_a \cdot \sin \alpha'' \quad (3.2.19)$$

Änderung der Auflagehöhe durch das "Abrollen" am Auflager

$$\Delta w_R = R_a \cdot (\cos \alpha_0 - \cos \alpha'') \quad (3.2.20)$$

Horizontaler Abstand der Probenmitte zum Auflagepunkt

$$w'' = w + w_0 + \Delta w_R \quad (3.2.21)$$

Schnittmoment

$$m'' = \frac{M}{b} = \frac{F}{b} \cdot \left(\frac{L''}{4} + \frac{w'' \cdot (\sin \alpha'' - \mu \cdot \cos \alpha'')}{2 \cdot (\cos \alpha'' + \mu \cdot \sin \alpha'')} \right) \quad (3.2.22)$$

Schnittlast durch die Horizontalkraft F_H

$$n'' = \frac{F_H}{b} = \frac{F}{2 \cdot b} \cdot \frac{(\sin \alpha'' - \mu \cdot \cos \alpha'')}{(\cos \alpha'' + \mu \cdot \sin \alpha'')} \quad (3.2.23)$$

Sekantenmodul bei Bruch

$$E_{bB} = \frac{F_{\max} \cdot L^3}{48 \cdot w \cdot I} \quad (3.2.24)$$

Vereinfachung vom 2. Ansatz für die Dreipunktbiegung

Die Vernachlässigung der Vorkrümmung ist nicht möglich, da sich hieraus horizontale Abstände ergeben, welche in der Größenordnung der Durchbiegung liegen.

Die Auflagerradien sind relativ klein, so daß die Abrolldifferenz Δw_R des Horizontalabstandes und die Längenänderung, d.h. $L = \text{const.}$ nicht berücksichtigt wird.

Ferner kann bei der Berechnung vom Anfangswinkel außer dem Auflagerradius auch die Probendicke entfallen, welche i.a. relativ klein gegenüber dem Vorkrümmungsradius ist.

Hieraus folgt in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung aus (3.2.7), (3.2.9) :

(Für die ungekrümmte Probe ist $\alpha_0^* = 0^0$, $w_0^* = -\frac{t}{2}$)

Probe wird in die vorgekrümmte Richtung verformt ($\alpha_0 > 0^0$)

$$\alpha_0^* = \arcsin \left(\frac{L}{2 \cdot R} \right) \quad (3.2.25)$$

$$w_0^* = -\frac{t}{2} + R \cdot (1 - \cos \alpha_0^*) \quad (3.2.26)$$

Probe wird gegen die vorgekrümmte Richtung verformt ($\alpha_0 < 0^0$)

$$\alpha_0^* = -\arcsin \left(\frac{L}{2 \cdot R} \right) \quad (3.2.27)$$

$$w_0^* = -\frac{t}{2} - R \cdot (1 - \cos \alpha_0^*) \quad (3.2.28)$$

Winkel bei Bruch (α nach 3.2.17)

$$\alpha^* = \alpha_0^* + \alpha \quad (3.2.29)$$

Horizontale Abstand bei Bruch (statt (3.2.21))

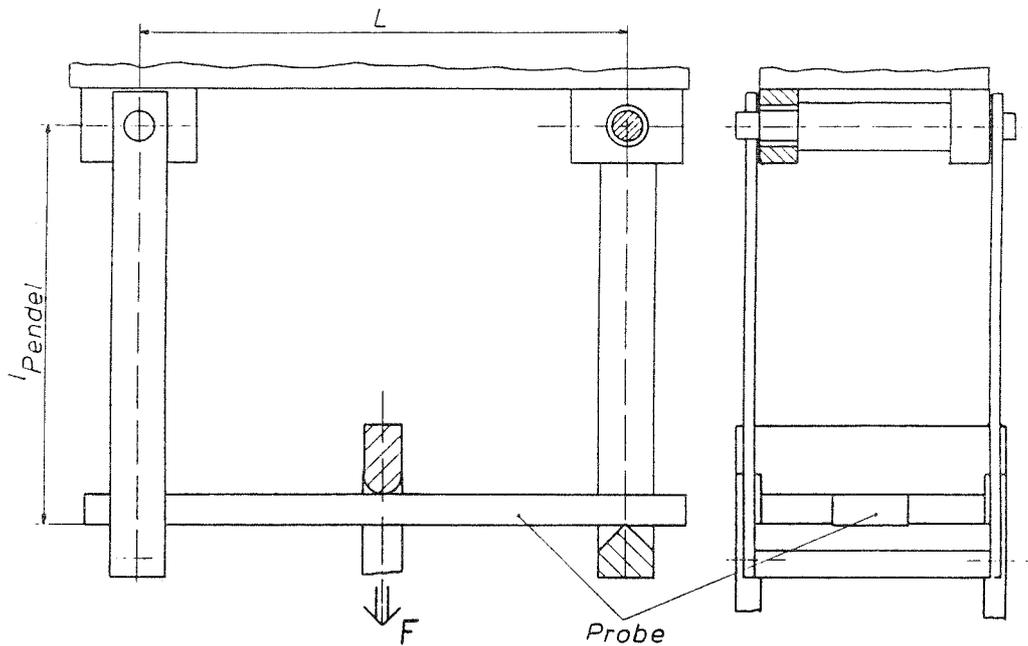
$$w^* = w_0^* + w \quad (3.2.30)$$

Schnittmoment

$$m^* = \frac{M}{b} = \frac{F}{b} \cdot \left(\frac{L}{4} + \frac{w^* \cdot (\sin \alpha^* - \mu \cdot \cos \alpha^*)}{2 \cdot (\cos \alpha^* + \mu \cdot \sin \alpha^*)} \right) \quad (3.2.31)$$

3.3 Dreipunkt-Pendel-Biegung

Als weitere Version der Dreipunktbiegung ist ein Versuchsaufbau zu verstehen, bei welchem die beiden Auflager durch schwenkbare Pendel ersetzt werden und der Stempel in der Probenmitte gezogen wird.



Skizze 3.3.1 Aufbauskiizze der Dreipunkt-Pendelvorrichtung

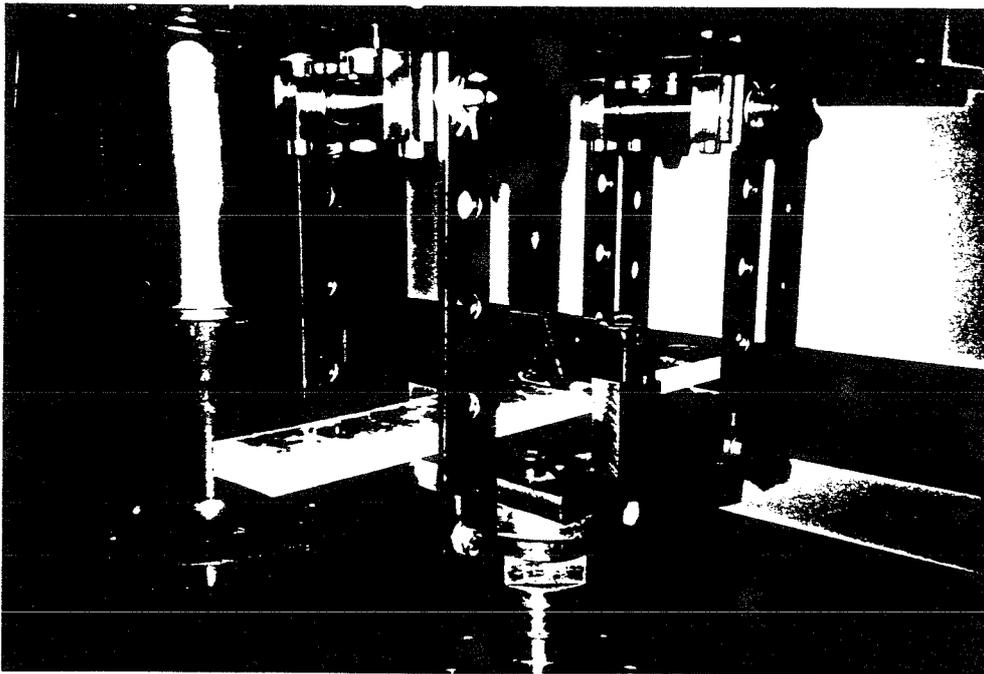
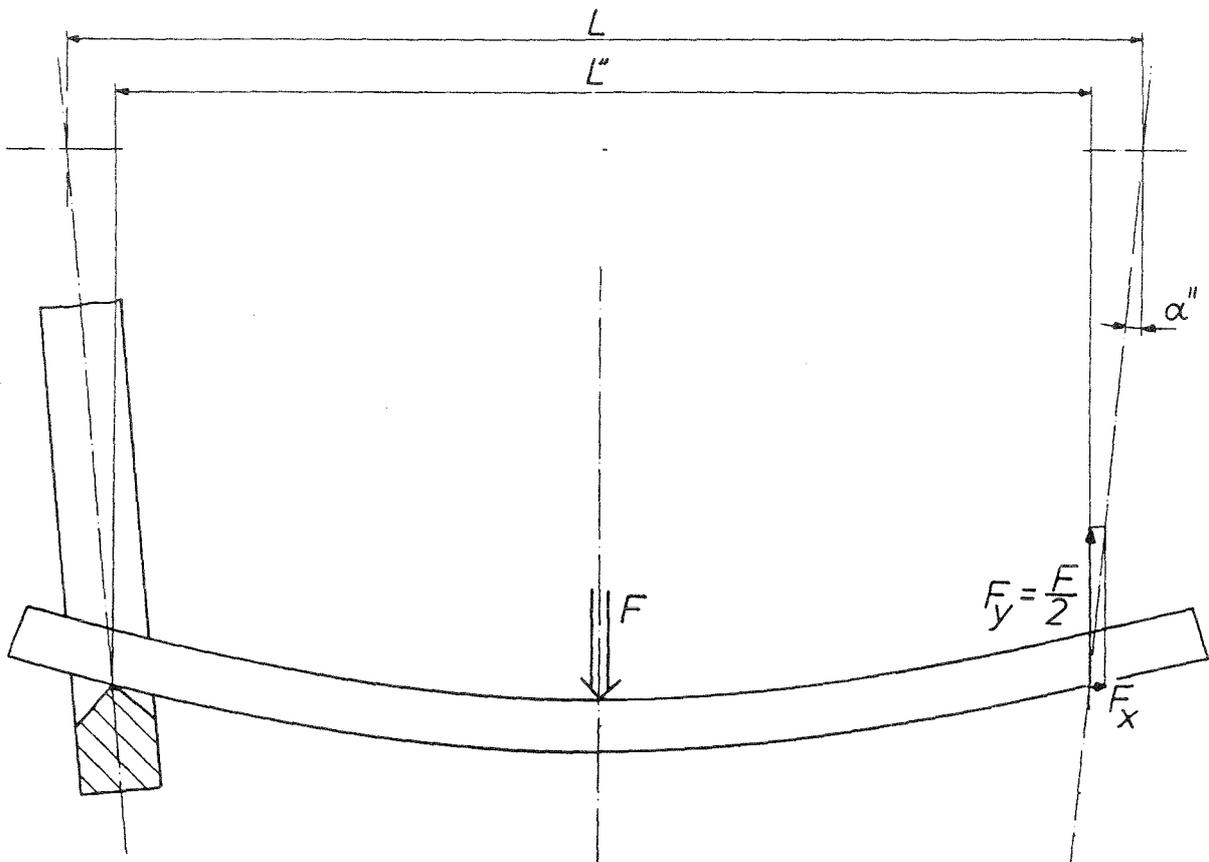


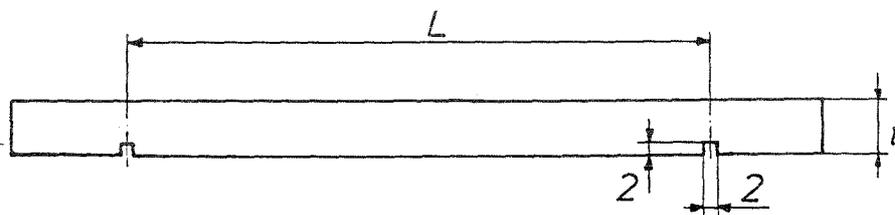
Bild 3.3.1 Dreipunkt-Pendelvorrichtung

Bei dieser Versuchsanordnung ist gewährleistet, daß das tatsächliche Moment in der Probe kleiner oder maximal gleich dem Wert nach Gl. (3.2.2) ist, sofern es sich um eine ungekrümmte Probe handelt oder die Verformung in Vorkrümmungsrichtung erfolgt. Denn durch die Verformung wird der Auflagerabstand kürzer ($L'' < L$), durch die Vertikalkraft ($F_x = F_y \cdot \tan \alpha''$) stellt sich bei dem Weg $w > t/2$ ein rückdrehendes Moment ein (Skizze 3.3.2).



Skizze 3.3.2 Dreipunkt-Pendelversuch unter Belastung

Um ein Abrutschen der Proben zu verhindern, werden die Proben auf der Unterseite im Abstand der vorgesehenen Auflagerlänge eingesägt.



Skizze 3.3.3 Proben für den Dreipunkt-Pendelversuch

Die Berechnung, ohne Verformungsberücksichtigung, erfolgt analog zu der Auswertung der Dreipunktbiegung (Gleichungen 3.2.2 - 3.2.4).

3.4 Vierpunktbiegung

In der DIN EN 63 /4/ wurde der Vorschlag gemacht, die Vierpunktbiegung für die Ermittlung der maximalen Biegespannungen zu verwenden.

Als Vorteil ist zu nennen, daß z.B. die Belastung über das Mittelfeld quasi konstant ist (geringe Verformungen und symmetrische Krafteinleitung vorausgesetzt).

Außerdem kann der E_{b0} -Modul ohne Querkraftanteil ermittelt werden und aus der Differenz zwischen den E_{b0} -Modulen aus den Drei- und Vierpunktbiegung läßt sich der interlaminare Schubmodul ermitteln.

Nach DIN 53 457 /7/ ist folgender Aufbau zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls vorgesehen.

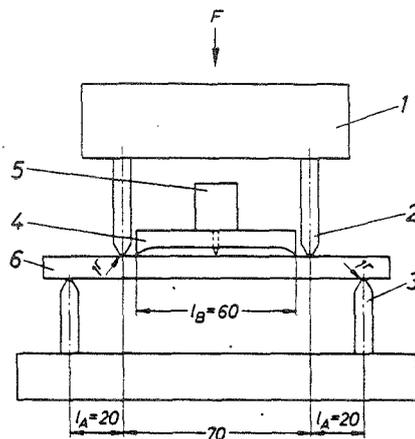


Bild 1. Schematische Darstellung eines Beispiels einer Prüf-anordnung für den Biegeversuch.

Erklärung zu Bild 1

- | | |
|----------------|--------------------------|
| 1 Biegestempel | 4 Bezugsbalken |
| 2 Auflager | 5 Durchbiegungs-Meßgerät |
| 3 Auflager | 6 Probekörper |

Skizze 3.4.1 (aus /7/)

Da die GFK-Proben aus der industriellen Herstellung i.a. relativ große Dicken-differenzen aufweisen, erfolgten Versuche sowohl mit festem, als auch mit beweglich angebrachtem Biegestempel ("Wippe"), um den Einfluß dieser Differenzen zu eliminieren bzw. abzuschätzen.

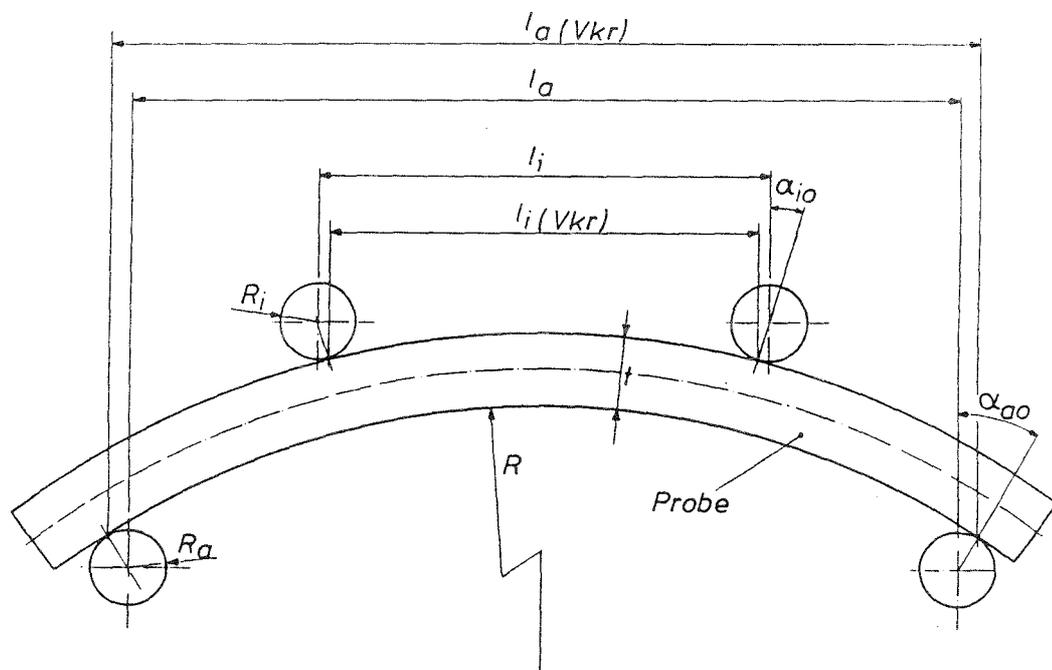
Für den Abstand der äußeren Auflager wurde für die Bruchversuche zur weiteren Verringerung des Einflusses der Krafteinleitung der gleiche Abstand wie bei den

Dreipunkt-Versuchen plus dem Abstand des inneren Auflager gewählt.

Die Länge zwischen den inneren Auflagern mußte jedoch bei den Bruchversuche aufgrund der großen Durchbiegung auf ein Minimum beschränkt werden, da sonst der maximale Maschinenweg überschritten wurde.

Die Auflager sind im Radius und Reibungsfreiheit variiert worden, d.h. es kamen unter anderem die "reibungsfreien" Lagerblöcke der Dreipunktbiegung (Skizze 3.2.2) zum Einsatz, Kugellager mit einem Durchmesser $d=47$ mm, sowie reibungsbehaftete Auflager.

Die Messung der Verformung für die Berechnung des E_{b0} -Moduls erfolgt mit dem gleichen Krümmungsmeßgerät, wie bei der Biegeprüfvorrichtung (Skizze 3.1.6).



Skizze 3.4.2 Aufbaudefinitionen für die Vierpunktbiegung

Berechnung der vorkrümmungsabhängigen WerteOhne Vorkrümmung

$$\alpha_{i0} = 0 \quad , \quad \alpha_{a0} = 0$$

Belastung in Richtung der Vorkrümmung

$$\alpha_{i0} = \arcsin \left(\frac{l_i}{2 \cdot (R - R_i)} \right) \quad (3.4.1)$$

$$\alpha_{a0} = \arcsin \left(\frac{l_a}{2 \cdot (R + t + R_a)} \right) \quad (3.4.2)$$

Belastung entgegen der Vorkrümmung

$$\alpha_{i0} = - \arcsin \left(\frac{l_i}{2 \cdot (R + t + R_i)} \right) \quad (3.4.3)$$

$$\alpha_{a0} = - \arcsin \left(\frac{l_a}{2 \cdot (R - R_a)} \right) \quad (3.4.4)$$

Auflagerabstände unter Vorkrümmungsberücksichtigung

$$l_i (\text{Vkr}) = l_i + R_i \cdot \sin \alpha_{i0} \quad (3.4.5)$$

$$l_a (\text{Vkr}) = l_a - R_a \cdot \sin \alpha_{a0} \quad (3.4.6)$$

Auswertung der ErgebnisseElastizitätsmodul ermittelt über die Krümmungsmessung

(l_m = Bezugsbalkenlänge, w_m = Durchbiegung in Bezugsbalkenmitte)

$$E_{b0} = \frac{\Delta F}{\Delta w_m} \cdot \frac{(l_a - l_i) \cdot l_m^2}{I \cdot 32} \quad (3.4.7)$$

Elastizitätsmodul mit Querkraftanteil ermittelt über den Maschinenweg w

$$E_{\tilde{b}0} = \frac{\Delta F}{\Delta w} \cdot \frac{1}{I} \cdot \left(\frac{(l_a - l_i)^2 \cdot l_a}{16} - \frac{(l_a - l_i)^3}{24} \right) \quad (3.4.8)$$

Moment

$$M = \frac{F}{4} \cdot (l_a - l_i) \quad (3.4.9)$$

Schnittmoment (bei Bruch)

$$m_B = \frac{F_{\max} \cdot (l_a - l_i)}{4 \cdot b} \quad (3.4.10)$$

Biegebruchspannung (nach M/W, W für Rechteckprobe)

$$\sigma_{bB} = \frac{F_{\max} \cdot (l_a - l_i) \cdot 3}{2 \cdot b \cdot t^2} \quad (3.4.11)$$

Faservolumenbezogene Biegebruchspannung

(Unter Annahme eines konstanten Faserflächengewichtes, Rechteckprobe)

$$\sigma_{bB\phi} = \frac{F_{\max} \cdot (l_a - l_i) \cdot 3 \cdot \rho_f}{2 \cdot b \cdot t \cdot G_{Ages}} \quad (3.4.12)$$

Bei Versuchen mit starr angebrachtem Biegestempel ist nicht gewährleistet, daß die Kraft F gleichmäßig über beide Druckfinnen eingeleitet wird. Im Extremfall erfolgt die Krafteinleitung nur über ein inneres Auflager, so daß bei den Ergebnissen, zum Abschätzen dieses Maximums, das Bruchschnittmoment, bzw. der Biegespannung unter diese Annahme ausgegeben wurde.

$$m_B^{\wedge} = \frac{F_{\max} \cdot (l_a - l_i) \cdot (l_a + l_i)}{4 \cdot l_a \cdot b} \quad (3.4.13)$$

Bei vorgekrümmten Proben wurden die Auflagerabstände, welche aus diesem Radius resultieren, in die Gleichungen (3.4.7 - 3.4.10) eingesetzt. Diese Ergebnisse sind mit "(Vkr)" gekennzeichnet.

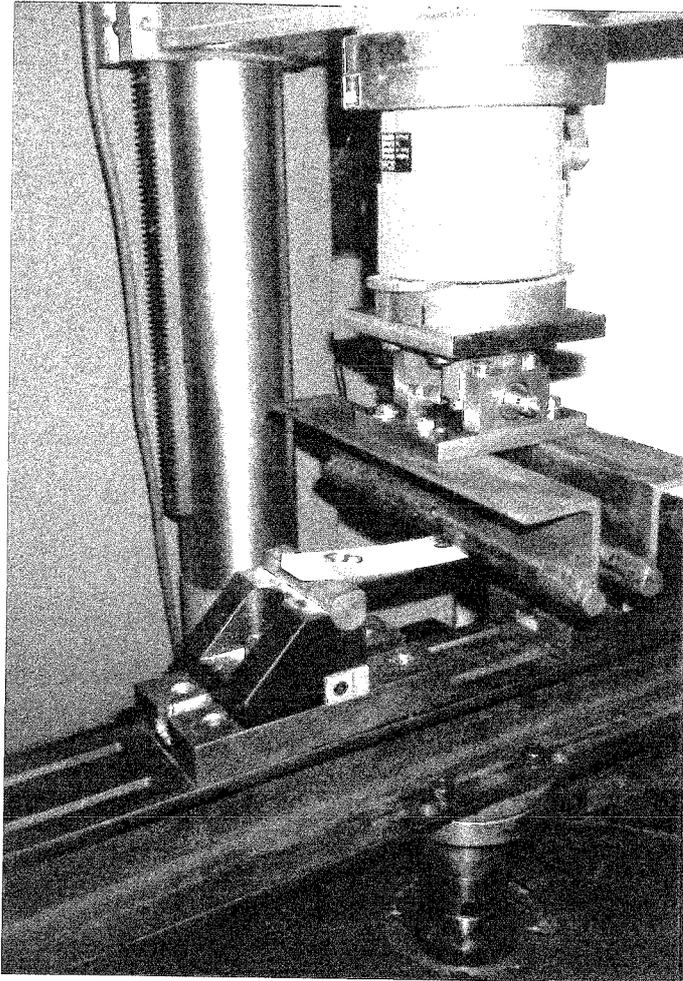


Bild 3.4.1 Reibungsbehaftete Vierpunktbiegung mit
schwenkbarem Druckstempel ("Wippe")

3.5 Zugversuch

Auswertung der Ergebnisse

Elastizitätstangentenmodul

$$E_0 = \frac{\Delta F}{\Delta \varepsilon \cdot t \cdot b} \quad (3.5.1)$$

Bruchschnittlast

$$n_B = \frac{F_{\max}}{b} \quad (3.5.2)$$

Bruchspannung

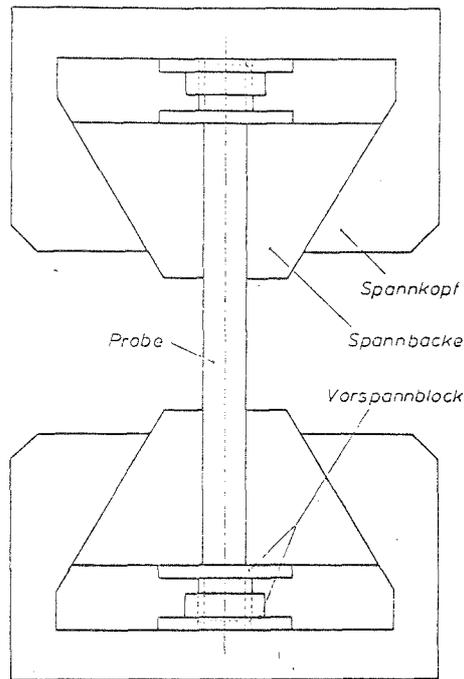
$$\sigma_{zB} = \frac{F_{\max}}{b \cdot t} \quad (3.5.3)$$

Faservolumenbezogene Zugbruchspannung

$$\sigma_{zB\phi} = \frac{F_{\max} \cdot \rho F}{b \cdot G_{Ages}} \quad (3.5.4)$$

3.6 Druckversuch

Bei den Druckversuchen können wegen der Knickgefahr nur Untersuchungen an Proben mit größeren Dicken bei einer kleinen ungestützten Länge durchgeführt werden.



Skizze 3.6.1 Druckversuchaufbau

Auswertung der Ergebnisse

Elastizitätstangentenmodul

$$E_0 = \frac{\Delta F}{\Delta \varepsilon \cdot t \cdot b} \quad (3.6.1)$$

Bruchschnittlast

$$n_B = \frac{F_{\max}}{b} \quad (3.6.2)$$

Bruchspannung

$$\sigma_{dB} = \frac{F_{\max}}{b \cdot t} \quad (3.6.3)$$

Faservolumenbezogene Druckbruchspannung

$$\sigma_{dB\phi} = \frac{F_{\max} \cdot \rho F}{b \cdot G_{Ages}} \quad (3.6.4)$$

3.7 Dehnungsverteilungen

Zur genaueren Untersuchung der Wanderung der neutralen Faser wurden DMS-Ketten (HBM KY 21) verwendet, bei denen die Abstände zwischen den einzelnen Meßgittern ein Millimeter betragen. Die Meßgitterlänge beträgt 0.8 mm.

Die DMS-Ketten werden mit auf die Probenquerseite, längs zur Biegerichtung, aufgeklebt und an Anschlußstellen angelötet.

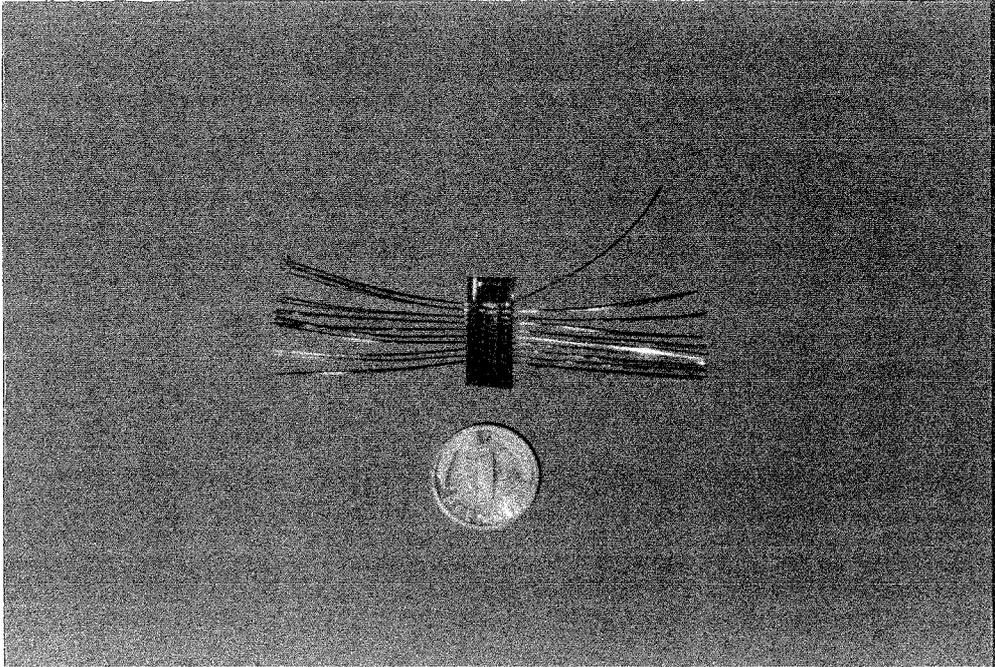


Bild 3.8.1

Gegenüber dem einfachen Anbringen von zwei DMS auf der Ober- und Unterseite hat diese Anordnung den Vorteil, daß auch dann noch die Dehnungsänderung gemessen werden kann, wenn die Oberfläche und die äußeren Schichten bereits Schäden aufweisen, somit ein Messen über die Oberfläche nicht mehr möglich ist, während im Bereich der Nullinie bei der Biegebelastung nur geringe Dehnungen vorliegen.

Für die Aufnahme der Dehnungen werden die Versuche in gewissen Abständen angehalten und die Dehnungen bei dieser Belastung mit dem Vielfachmeßgerät gemessen.

3.8 Ermittlung des interlaminaren Schubmoduls

Bei der Berechnung des Biegeelastizitätsmoduls aus der Dreipunktbiegung (3.2.6) ist nicht berücksichtigt, daß sich die Verformung aus einem Querkraftanteil und einem Momentenanteil zusammensetzt. Ist der Biegemodul bekannt, z.B. aus Versuchen mit der Vierpunktbiegung, so läßt sich hiermit der Schubmodul ermitteln.

Schubverformungsanteil W_G bei der Dreipunktbiegung

(aus der Gesamtverformung W und dem Biegemodul aus der Vierpunktbiegung E_b)

$$W_G = W - \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E_b \cdot I} = K \cdot \frac{F \cdot L}{4 \cdot G \cdot A} \quad (3.8.1)$$

Hieraus folgt der Schubmodul

$$G = \frac{F \cdot L \cdot K}{4 \cdot A \cdot W_G} \quad (3.8.2)$$

Für den Rechteckquerschnitt ist der Querschnittsfaktor $K=1.2$ und die Fläche $A=b \cdot t$. Die Berechnung erfolgt aus Versuchsergebnissen einer Probe, mit welcher beide Versuche durchgeführt werden, wobei die Vierpunktergebnisse aus den Aufbauten mit beweglichem Druckstempel ("Wippe") genutzt und der Schubmodul bei den Dreipunktergebnissen ausgegeben wird.

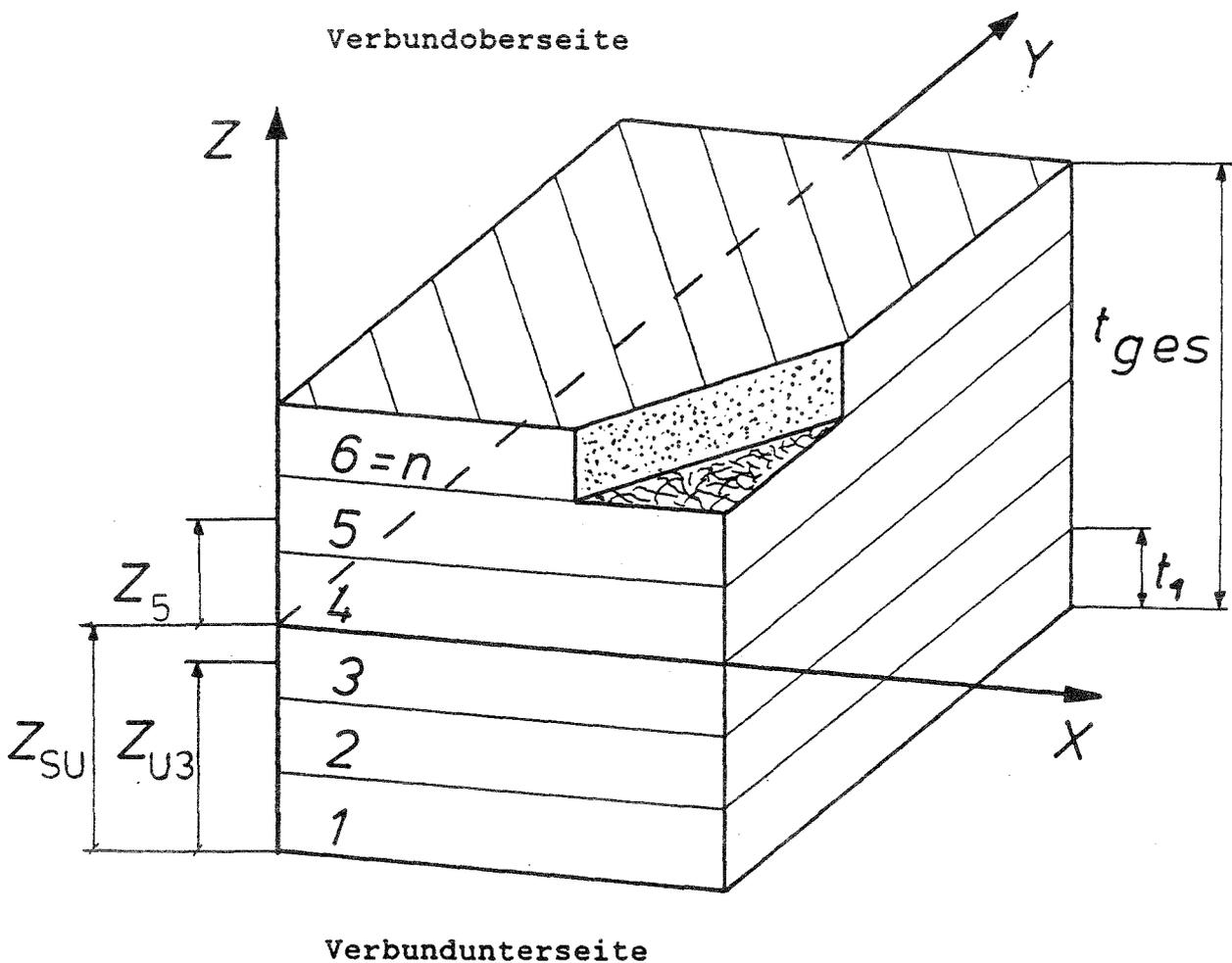
4.1 Theoretische Grundlagen

Die Berechnung der theoretischen Laminatkennwerte erfolgt nach der Kontinuumstheorie, das Mittragen des Harzes wird im Gegensatz zur Netztheorie berücksichtigt.

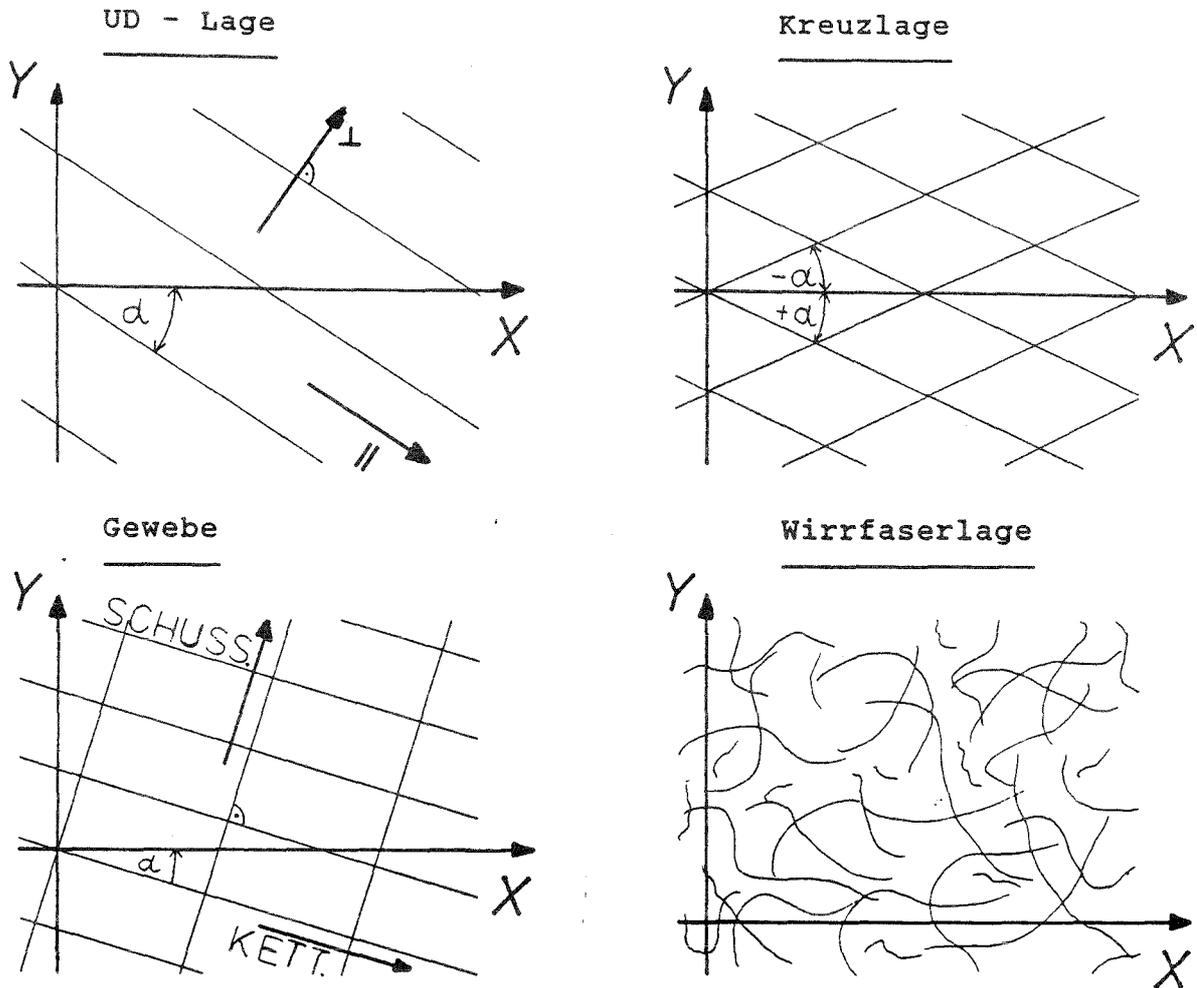
Es erfolgt eine Unterteilung des Laminates in die Einzelschichten, also UD-, Kreuz-, Gewebe-, Wirrfaserlagen (Matten) und Sonderschichten, wie z.B. Chemieschutzschichten, Schnitzzellagen.

Aus den Grundelastizitätsgrößen der Einzelschichten ergeben sich durch Superposition die Elastizitätskennwerte des Laminates.

Mittels einer iterativen Berechnungen, d.h. schichtweisen Analyse nach einer vorgegebenen Belastung, lassen sich die Verformungen, Maximallasten oder Schädigung des Laminates ermitteln.



Skizze 4.1 Laminataufbau



Skizze 4.2 Schichtarten

Die Gewebe und Kreuzlagen werden bei der Berechnung in zwei unidirektionale Einzelschicht unterteilt, welche den gleichen Abstand Z_k zur neutralen Faser besitzen.

Die Aufteilung erfolgt bei den Kreuzlagen im Verhältnis 1 : 1, die 1. Schichthälfte hat den positiven Winkel zur X-Achse, die 2. Schichthälfte den negativen Winkel.

Bei den Gewebelagen entspricht die 1. Schichthälfte dem Kettanteil $\left(\frac{K}{K+S}\right)$ und die 2. Schichthälfte dem Schußanteil $\left(\frac{S}{K+S}\right)$, wobei der Winkel der Schußrichtung um 90° zum Winkel α versetzt ist.

Außerdem sind bei der schichtweisen Analyse andere Festigkeitskennwerte als für die UD-Lage anzusetzen (Näheres im Kapitel 5.1).

Aus dem Faserflächengewicht der einzelnen Schichten G_{Ak} , der Faserdichte ρ_F und der Faservolumengehalt der einzelnen Schichten ϕ_{Fk} ergibt sich :

$$\text{Schichtdicke} \quad t_k = \frac{G_{Ak}}{\rho_F \cdot \phi_{Fk}} \quad (4.1)$$

$$\text{Laminatdicke} \quad t_{\text{ges}} = \sum_{k=1}^n t_k \quad (4.2)$$

$$\text{Flächengewicht vom Laminat} \quad G_{A_{\text{ges}}} = \sum_{k=1}^n G_{Ak} \quad (4.3)$$

$$\text{Mittlerer Faservolumengehalt} \quad \phi_{mF} = \frac{G_{A_{\text{ges}}}}{\rho_F \cdot t_{\text{ges}}} \quad (4.4)$$

Aus den Elastizitätsgrößen der Matrix und der Fasern lassen sich die Elastizitätswerte der einzelnen Schichten berechnen, wobei jedoch Fehlstellen im Laminat, Lufteinschlüsse, Faser-Matrix-Bindung, Temperung, Winkelabweichungen der Lagen, usw. nicht mit erfaßt werden können. Die benutzten Formeln stammen aus Modellvorstellungen und experimentellen Annäherungen.

4.2 Elastizitätskennwerte der Einzelschichten

4.2.1 UD-Lagen, Schichthälften der Kreuz-,Gewebelagen

Technische Elastizitätsgrößen einer Schicht

$$E_{\parallel k} = E_M + \phi_{Fk} \cdot (E_F - E_M) \quad (4.5)$$

$$E_{\perp k} \approx \frac{E_M}{(1 - \phi_{Fk})^{1.45}} \quad (4.6)$$

$$G_{\#k} = \frac{G_M \cdot (1 + 0.4 \cdot \sqrt{\phi_{Fk}})}{\phi_{Fk} \cdot \frac{G_M}{G_F} + (1 + \phi_{Fk})^{1.45}} \quad (4.7)$$

Querkontraktionszahlen

$$\nu_{\perp \parallel} = \phi_F \cdot \nu_F + (1 - \phi_{Fk}) \cdot \nu_M \quad (4.8)$$

$$\nu_{\parallel \perp} = \nu_{\perp \parallel} \cdot \frac{E_{\perp k}}{E_{\parallel k}} \quad (4.9)$$

Elemente der lokalen Steifigkeitsmatrix

$$C_{\parallel k} = \frac{E_{\parallel k}}{1 - \nu_{\parallel \perp k} \cdot \nu_{\perp \parallel k}} \quad (4.10)$$

$$C_{\perp k} = \frac{E_{\perp k}}{1 - \nu_{\parallel \perp k} \cdot \nu_{\perp \parallel k}} \quad (4.11)$$

$$C_{\perp \parallel k} = C_{\parallel \perp k} = \nu_{\perp \parallel k} \cdot C_{\perp k} \quad (4.12)$$

$$C_{\#k} = G_{\#k} \quad (4.13)$$

Lokale Steifigkeitsmatrix

$$\underline{\underline{C}}_{Lk} = \begin{bmatrix} C_{\parallel k} & C_{\parallel \perp k} & 0 \\ C_{\perp \parallel k} & C_{\perp k} & 0 \\ 0 & 0 & C_{\#k} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Die lokalen Steifigkeiten müssen nun in das globale Koordinatensystem überführt werden,

$$C_{11k} = C_{\parallel k} \cdot \cos^4 \alpha_k + C_{\perp k} \cdot \sin^4 \alpha_k + 0.5 \cdot C_{H1k} \cdot \sin^2 (2 \cdot \alpha_k) \quad (4.15)$$

$$C_{12k} = C_{21k} = C_{\perp \parallel k} + 0.25 \cdot C_{H2k} \cdot \sin^2 (2 \cdot \alpha_k) \quad (4.16)$$

$$C_{13k} = C_{31k} = 0.5 \cdot (C_{2k} \cdot \sin^2 \alpha_k - (C_{\parallel k} - C_{H1k})) \cdot \sin (2 \cdot \alpha_k) \quad (4.17)$$

$$C_{22k} = C_{\parallel k} \cdot \sin^4 \alpha_k + C_{\perp k} \cdot \cos^4 \alpha_k + 0.5 \cdot C_{H1k} \cdot \sin^2 (2 \cdot \alpha_k) \quad (4.18)$$

$$C_{23k} = C_{32k} = 0.5 \cdot ((C_{\perp k} - C_{H1k}) - C_{H2k} \cdot \sin \alpha_k) \cdot \sin (2 \cdot \alpha_k) \quad (4.19)$$

$$C_{33k} = C_{\#k} + C_{H2k} \cdot \sin^2 (2 \cdot \alpha_k) \quad (4.20)$$

Mit den Hilfsgrößen :

$$C_{H1k} = C_{\perp \parallel k} + 2 \cdot C_{\#k}, \quad C_{H2k} = C_{\parallel k} + C_{\perp k} - 2 \cdot C_{H1k}$$

Globale Steifigkeitsmatrix

$$\underline{\underline{C}}_{Gk} = \begin{bmatrix} C_{11k} & C_{12k} & C_{13k} \\ C_{21k} & C_{22k} & C_{23k} \\ C_{31k} & C_{32k} & C_{33k} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

4.2.2 Wirrfaserlagen (Matten)

Elastizitätsgrößen

$$E_k = 0.4 \cdot E_F \cdot \phi_{Fk} + E_M \cdot (1 - 0.4 \cdot \phi_{Fk}) \quad (4.22)$$

$$G_{\#k} = 10800 \cdot \phi_{Fk} + 1400 \quad (4.23)$$

Querkontraktionszahl

$$\nu_k = 0.34 - 0.075 \cdot \phi_{Fk} \quad (4.24)$$

Eine Transformation der globalen in die lokale Koordinaten entfällt bei dieser quasi homogenen Schichtart, d.h. die lokale Steifigkeitsmatrix entspricht der globalen.

$$C_{11k} = C_{22k} = \frac{E_k}{1 - \nu_k^2} \quad (4.25)$$

$$C_{12k} = C_{21k} = \nu_k \cdot C_{11k} \quad (4.26)$$

$$C_{33k} = G_{\#k} \quad (4.27)$$

Lokale / Globale Steifigkeitsmatrix

$$\underline{\underline{C}}_{Lk} = \underline{\underline{C}}_{Gk} = \begin{bmatrix} C_{11k} & C_{12k} & 0 \\ C_{21k} & C_{22k} & 0 \\ 0 & 0 & C_{33k} \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

4.3 Elastizitätsgrößen des Laminates

4.3.1 Steifigkeitsmatrix vom Laminat

Abstand der Einzelschicht k zur "Schwerlinie" : $Z_k = Z_{Uk} - Z_{SU}$ (4.29)

Elemente der Scheibenmatrix

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^n C_{ijk} \cdot t_k \quad (4.30)$$

Elemente der Plattenmatrix

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^n C_{ijk} \cdot \left(\frac{t_k^3}{12} + Z_k^2 \cdot t_k \right) \quad (4.31)$$

Elemente der Koppelmatrix

$$K_{ij} = \sum_{k=1}^n C_{ijk} \cdot Z_k \cdot t_k \quad (4.32)$$

Steifigkeitsmatrix des Laminates

$$S = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & \cdot & K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & \cdot & K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & \cdot & K_{31} & K_{32} & K_{33} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdot & B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ K_{21} & D_{22} & D_{23} & \cdot & B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ K_{31} & D_{32} & D_{33} & \cdot & B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

Nachgiebigkeitsmatrix (Inverse der Steifigkeitsmatrix)

$$N = S^{-1} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & \cdot & e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & \cdot & e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & \cdot & e_{31} & e_{32} & e_{33} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ e_{11} & e_{12} & e_{13} & \cdot & g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & \cdot & g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & \cdot & g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

4.3.2 Technische Elastizitätsgrößen des Laminates

E-Module ohne Querkontraktionsbehinderung

$$E_x = \frac{1}{t_{\text{ges}} \cdot f_{11}}, \quad E_y = \frac{1}{t_{\text{ges}} \cdot f_{22}}, \quad G_{xy} = \frac{1}{t_{\text{ges}} \cdot f_{33}} \quad (4.35 - 4.37)$$

$$E_{xb} = \frac{12}{t_{\text{ges}}^3 \cdot f_{11}}, \quad E_{yb} = \frac{12}{t_{\text{ges}}^3 \cdot f_{22}}, \quad G_{xyb} = \frac{12}{t_{\text{ges}}^3 \cdot f_{33}} \quad (4.38 - 4.40)$$

E-Module mit Querkontraktionsbehinderung

$$E_x = \frac{D_{11}}{t_{\text{ges}}}, \quad E_y = \frac{D_{22}}{t_{\text{ges}}}, \quad G_{xy} = \frac{D_{33}}{t_{\text{ges}}} \quad (4.41 - 4.43)$$

$$E_{xb} = \frac{B_{11} \cdot 12}{t_{\text{ges}}^3}, \quad E_{yb} = \frac{B_{22} \cdot 12}{t_{\text{ges}}^3}, \quad G_{xyb} = \frac{B_{33} \cdot 12}{t_{\text{ges}}^3} \quad (4.44 - 4.46)$$

Querkontraktionszahlen

$$\nu_{yx} = -\frac{f_{12}}{f_{11}}, \quad \nu_{xy} = -\frac{f_{12}}{f_{22}}, \quad \nu_{yxb} = -\frac{g_{12}}{g_{11}}, \quad \nu_{xyb} = -\frac{g_{12}}{g_{22}} \quad (4.47 - 4.48)$$

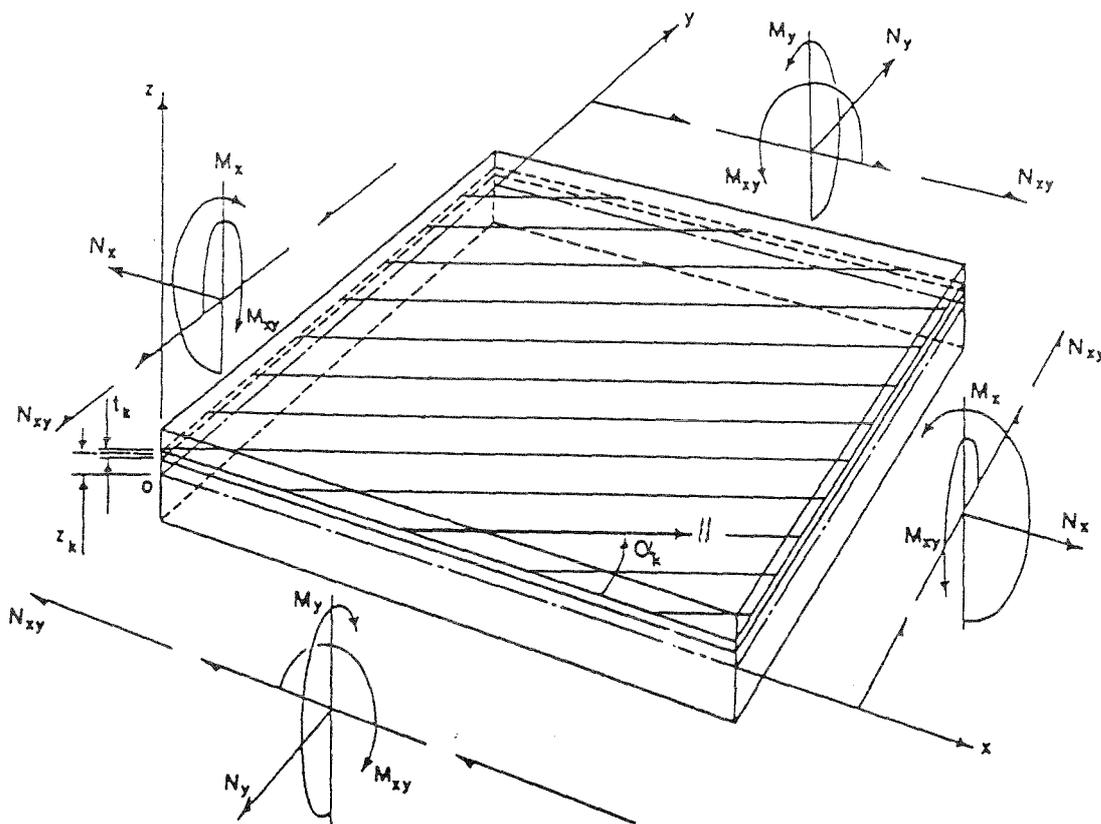
Bei unsymmetrischen Laminaten erfolgen drei Ansätze für die Berechnung der Schwerlinie Z_{SU} (bei Abweichungen über 0.05 mm) und somit der E-Module.

1. Schwerlinie in Laminatmitte : $Z_{SU} = \frac{t_{\text{ges}}}{2} \quad (4.49)$

2. Mittlerer elastischer Schwerpunkt : $Z_{SU} = \frac{\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^3 C_{iik} \cdot Z_{Uk} \cdot t_k}{\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^3 C_{iik} \cdot t_k} \quad (4.50)$

3. Schwerpunkt des Faserflächengewicht : $Z_{SU} = \frac{\sum_{k=1}^n G_{Ak} \cdot Z_{Uk}}{\sum_{k=1}^n G_{Ak}} \quad (4.51)$

4.4 Mechanische Laminatbelastung



Skizze 4.3 Laminatbelastung

4.4.1 Berechnung der Verzerrung und Krümmung vom Laminat

Unter Annahme eines linear elastischem Verhalten, lassen sich die Verformungen des Laminates aufgrund der Schnittlasten und -momente in 1. Näherung wie folgt ermitteln :

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} = \mathbf{N} \cdot \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_{xy} \\ m_x \\ m_y \\ m_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

Für exaktere Berechnungen muß die Nachgiebigkeitsmatrix als Funktion von der Belastungsdauer, -höhe, Temperatur, Feuchtigkeit usw. angesehen werden, so daß auch hier eine iterative Berechnung nötig wäre.

4.4.2 Belastung der Einzelschichten

Die Dehnungen in den Einzelschichten ergeben sich durch die Dehnung des Laminates und in Abhängigkeit vom Abstand zur "Neutralen Faser" durch die Krümmung.

$$\varepsilon_{xk} = \varepsilon_x + \kappa_x \cdot Z_k \quad (4.53)$$

$$\varepsilon_{yk} = \varepsilon_y + \kappa_y \cdot Z_k \quad (4.54)$$

$$\gamma_{xy} = \varepsilon_{xy} + \kappa_{xy} \cdot Z_k \quad (4.55)$$

Aus den globalen Dehnungen der Einzelschichten lassen sich mit der globalen Steifigkeitsmatrix die Spannungen ermitteln.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \underset{=}{CGk} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{xk} \\ \varepsilon_{yk} \\ \gamma_{xk} \end{bmatrix} \quad (4.56)$$

Da im allgemeinen Festigkeitskennwerte aus dem lokalen Koordinatensystem vorhanden sind, werden die Spannungen in dieses System transformiert :

$$\sigma_{\parallel k} = \sigma_{xk} \cdot \cos^2 \alpha_k + \sigma_{yk} \cdot \sin^2 \alpha_k - \tau_{xyk} \cdot \sin (2 \cdot \alpha_k) \quad (4.57)$$

$$\sigma_{\perp k} = \sigma_{xk} \cdot \sin^2 \alpha_k + \sigma_{yk} \cdot \cos^2 \alpha_k + \tau_{xyk} \cdot \sin (2 \cdot \alpha_k) \quad (4.58)$$

$$\tau_{\#k} = 0.5 \cdot (\sigma_{xk} - \sigma_{yk}) \cdot \sin (2 \cdot \alpha_k) + \tau_{xyk} \cdot \cos (2 \cdot \alpha_k) \quad (4.59)$$

Mit diesen lokalen Spannungen folgt dann mit der Inversen lokalen Steifigkeitsmatrix die Berechnung der zugehörigen Dehnungen :

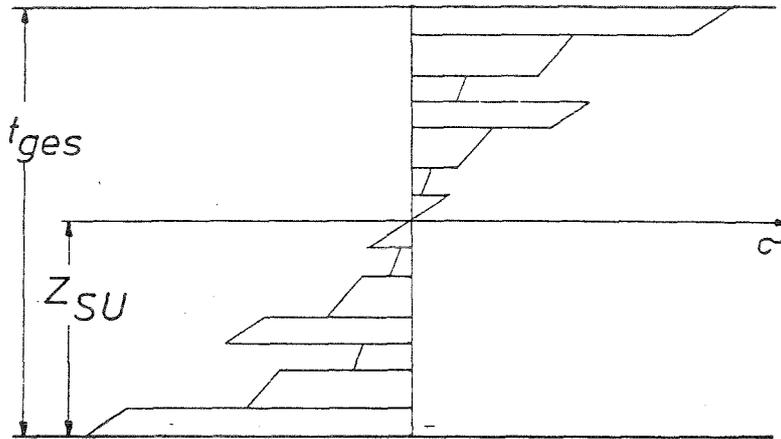
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{\parallel k} \\ \varepsilon_{\perp k} \\ \gamma_{\#k} \end{bmatrix} = \underset{=}{CLk}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{xk} \\ \sigma_{yk} \\ \tau_{xk} \end{bmatrix} \quad (4.60)$$

5. Theoretische Maximallastberechnung

5.1 Einleitung

Die mittlere Zugspannung, sowie die ermittelte Biegespannung nach der Balkentheorie sind nur als Hilfsgrößen für den Konstrukteur zu verstehen, der das Arbeiten mit homogenen Werkstoff gewöhnt ist.

Bei den Verbundwerkstoffen stellen sich jedoch Sprünge in dem Spannungsverlauf ein.



Skizze 5.1 Spannungen in einem biegebelasteten Laminat

Dieser Sachverhalt schließt eine Spannungsumlagerung nach der Plastizitätstheorie aus, da z.B. einige Schichten noch im linearen Bereich sind, während andere bei der Belastung bereits Schäden aufweisen können, wobei es durch das unterschiedliche Schichtverhalten bei Druck- oder Zugbelastung selbst bei symmetrischen Laminaten zur Verschiebung der neutralen Faser, eigentlich der Referenzfläche, kommt.

Selbst die iterative, schichtweise Analyse ist bei den Maximallastberechnungen als Näherung zu verstehen. So wird z.B. mit den mittleren Dehnungen, damit auch mit den mittleren Spannungen, der einzelnen Lagen gerechnet, hieraus resultieren z.B. bei der auch bei der linearen Maximalmomentberechnung der quasihomogenen Wirrfaserlaminat eine größere Biegebruchspannung, als Zugbruchspannungen bei der Berechnung der Schnittlast.

Negative Einflüsse, wie z.B. schlechte Tränkung, schlechte Faser-Matrix-Bindung, teilweise durch Lagerschäden der Schichte verursacht, Verschmutzung, etc. können selbst-

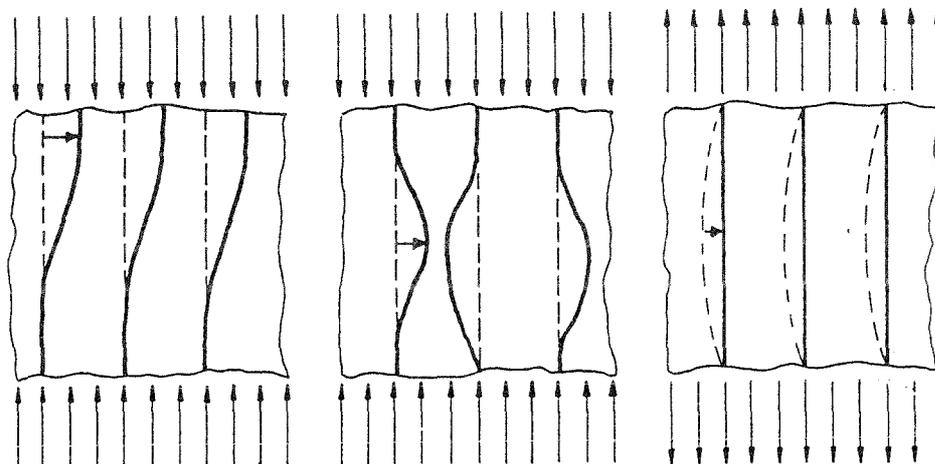
verständlich nicht erfaßt werden.

Um das reale Verhalten der Laminare exakter zu erfassen, wäre eine überregionale Datenbank für die Werkstoffkennwerte notwendig, welche u.a. die Nichtlinearitäten, Maximaldehnungen, -spannungen, viskoelastisches Verhalten in Abhängigkeit vom Harz, Härter, Beschleuniger, Schlichte, Temperatur, Feuchtigkeit, Temperung, Umgebungsmedium, usw. beinhalten müßte. Dies läßt sich jedoch nur bewerkstelligen, wenn alle Prüfanstalten ihre Daten, unter Angabe aller Randbedingungen, direkt in die Datenbank eingeben.

Im Grunde stellt sich die Maximallastberechnung, insbesondere im Druckbereich, als mikromechanisches, aber auch als interlaminares Stabilitätsproblem dar.

Im Fall der longitudinalen Druckbelastung der Fasern unterscheidet man danach, ob das Ausbeulen der Fasern (*fibre microbuckling*) in die gleiche Richtung (*In-phase*) oder unsymmetrisch (*Out-of-phase*) geschieht.

Auf der anderen Seite tritt bei der Zugbelastung, durch das Strecken der Fasern, ebenfalls eine Festigkeitsminderung ein.



Skizze 5.2 a) In-phase

b) Out-of-phase

c) Strecken



Spannungen in einem biegsamen Verbundwerkstoff aus gewellten Kohlenstoff-Fasern, die in eine Epoxid-Matrix eingebettet sind. Die Materialprobe wurde unter Zugspannung gesetzt und durch gekreuzte Polarisationsprismen photographiert. Die Spannungen verändern die optischen Eigenschaften der Matrix und erzeugen im polarisierten Licht farbige Interferenzmuster. Wie in allen Verbundwerkstoffen sorgt das Zusammenspiel von Fasern und Matrix für ein mechanisches Verhalten, das gegenüber dem jeweiligen der Einzelkomponenten neu ist. Bei niedriger Zugspannung ist der abgebildete Verbundwerkstoff leicht dehnbar. Sobald sich aber seine Fasern gerade ausrichten (wobei sie die Ränder der Matrix bogenförmig verformen), wird er viel steifer. Das Material ist nicht für den praktischen Einsatz gedacht, sondern ein experimentelles System, an dem sich der Einfluß gewellter Fasern auf die Eigenschaften von Verbundwerkstoffen erforschen läßt. Die spannungsoptische Aufnahme stammt von einem der Autoren (Chou) und seinen Kollegen Chen-Ming Kuo, Shen-Yi Luo und Kai-Wen Xianyu.

Bild 5.1 Spannungen in gewellten Fasern bei einer Zugbelastung /16/

Zusätzlich stellt sich bei einer schichtweisen Analyse im Druckbereich die Frage, welche Stützwirkung durch die Schichtfolge entsteht. So wäre es vorstellbar, daß bei der Biegebelastung der Zugbereich eine Auswirkung auf die Festigkeit der Druckzone besitzt, solange eine Kraftübertragung senkrecht zu den Schichten stattfinden kann.

Auf der anderen Seite kann z.B. eine senkrecht zur Faserrichtung auf Druck belastete UD-Lage durch Aufstauchung, insbesondere nach der Überanstrengung, ein Ausbeulen einer longitudinal druckbelasteten Schicht bewirken.

Diese Stabilitätsprobleme werden bei den folgenden Ansätzen vernachlässigt.

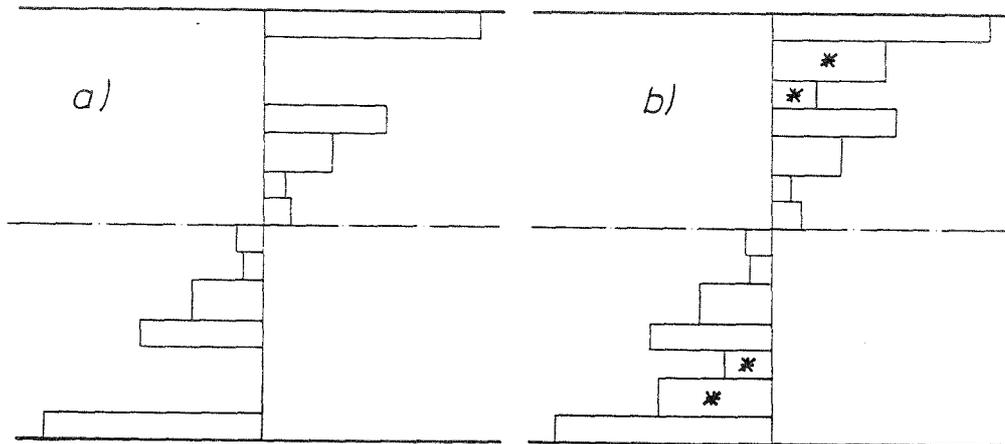
Für die theoretische Berechnung der Bruchlasten wurden zwei iterative Rechenmodelle genutzt.

Im 1. Ansatz wird mit linearem Werkstoffverhalten gerechnet, d.h. nach dem Erreichen der Bruchspannungen wird die Steifigkeit dieser Schicht vernachlässigt, während der 2. Ansatz die Nichtlinearität, sowie eine weitere Abminderung nach Zwischenfaserbruch näherungsweise erfaßt.

Unter Abminderung ist eine Verringerung der Schichtsteifigkeiten in Abhängigkeit von der Dehnung zu verstehen. Die zulässigen Spannungen werden durch die Nichtlinearität erst bei höheren Dehnungen erreicht und nach dem Zwischenfaserbruch wird die

Steifigkeit nicht schlagartig vernachlässigt, sondern in Abhängigkeit von der Überlastung immer weiter herabgesetzt, so daß die Spannungen in der Schicht trotz steigender Dehnungen abnehmen.

Durch die Abminderung ergibt sich im Bruchzustand ein "fülligeres" Spannungsprofil, eine andere Lage der neutralen Faser und eine andere Krümmung als bei dem linearen Ansatz.



Skizze 5.3 Spannungen bei der Biegebelastung im Bruchzustand

a) linearer Ansatz b) nichtlinearer, abgeminderter Ansatz

* : Lage wurde nach Überschreitung der Maximalspannung nicht als gerissen angesehen, sondern die Steifigkeit abgemindert

Aufgrund der unterschiedlichen Festigkeiten bei der Druck- und Zugbelastung versagen die Schichten auch bei symmetrischen Laminaten nicht gleichmäßig zum elastischen Schwerpunkt (ES), woraus eine Wanderung des ES bei der Momentbelastung resultiert, diese Tatsache wird bei beiden theoretischen Ansätzen berücksichtigt.

Im zweiten Ansatz kommt noch eine Verschiebung des ES durch die verschiedenen Abminderungskurven für die Schub-, Druck- und Zugbelastung hinzu.

In der Berechnung ist in beiden Ansätzen und bei allen Laminaten mit den gleichen Festigkeitskennwerten gerechnet worden, jedoch waren im zweiten Ansatz andere Abbruchbedingungen notwendig (Kapitel 5.3).

Es wurden die folgenden Bruchspannungen und Bruchdehnungen zugrunde gelegt.

UD-Lagen, Schichthälften der Kreuzlagen

Zugbelastung : $\sigma_{\parallel zBk} = \phi F_k \cdot 1600 \text{ [N/mm}^2\text{]}$
 $\sigma_{\perp zBk} = 40 \text{ [N/mm}^2\text{]}, \quad \epsilon_{\perp zB} = 2 \%$

Druckbelastung : $\sigma_{\parallel dBk} = 0.75 \cdot \sigma_{\parallel zBk} = \phi F_k \cdot 1200 \text{ [N/mm}^2\text{]}$
 $\sigma_{\perp dBk} = 140 \text{ [N/mm}^2\text{]}, \quad \epsilon_{\perp dB} = 3 \%$

Schubbelastung : $\tau_{\#Bk} = 60 \text{ [N/mm}^2\text{]}, \quad \gamma_{\#} = 5\%$

Gewebeschichthälften

Zugbelastung : $\sigma_{\parallel zBk} = \phi F_k \cdot 1200 \text{ [N/mm}^2\text{]}$
 $\sigma_{\perp zBk} = 40 \text{ [N/mm}^2\text{]}, \quad \epsilon_{\perp zB} = 2 \%$

Druckbelastung : $\sigma_{\parallel dBk} = 0.75 \cdot \sigma_{\parallel zBk} = \phi F_k \cdot 900 \text{ [N/mm}^2\text{]}$
 $\sigma_{\perp dBk} = 140 \text{ [N/mm}^2\text{]}, \quad \epsilon_{\perp dB} = 3\%$

Schubbelastung $\tau_{\#Bk} = 60 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad \gamma_{\#} = 5\%$

Wirrfaserlagen

Zugbelastung : $\sigma_{zBk} = \phi F_k \cdot 730 \text{ [N/mm}^2\text{]}, \quad \epsilon_{zB} = 2 \%$

Druckbelastung : $\sigma_{dBk} = \phi F_k \cdot 1000 \text{ [N/mm}^2\text{]}, \quad \epsilon_{dB} = 3 \%$

Schubbelastung $\tau_{\#Bk} = 100 \text{ [N/mm}^2\text{]}$

5.2 Lineare Berechnung der Maximallasten (1. Ansatz)

Der Vorteil von diesem linearen Rechenmodell liegt in der kurzen Rechenzeit, da nach jeder Belastungssteigerung direkt eine Lasterhöhung bis zur nächsten Schädigungsgrenze der am stärksten beanspruchten Schicht möglich ist.

Reihenfolge der iterativen Berechnung

1. Anfangsbedingungen herstellen

Anzahl der vorhandenen Schichten zählen, d.h. bei Gewebe- oder Kreuzlagen wird durch die Aufteilung in zwei Schichthälften die Anzahl um 2 erhöht.

→ Zähler für Schichtanzahl : n_{ges}

Zähler für gerissene Schichten : $n_{ger} = 0$

Alle Lagen als ungerissen deklarieren : $g_k = 1, k=1,(1),n_{ges}$

($g_k=0 \rightarrow$ Gerissen)

Berechnung der lokalen und globalen Steifigkeitsmatrizen und deren Inversen für die einzelnen Schichten. (Nach Kapitel 4.2)

Gegebenenfalls Flaggen für Extraausgaben auf "0" setzen, also für Ausgabe der Last und Verformungen bei dem ersten Zwischenfaserbruch, Oberflächenschaden und Schichtversagen, usw..

2. Geringe Belastungsvorgabe B ($n_x, n_y, n_{xy}, m_x, m_y$ oder m_{xy})

Positive Belastung \rightarrow Schnittlast n entspricht Zugbelastung

\rightarrow Schnittmoment, Unterseite (Lage Nr.1) ist druckbelastet (US)

3. Berechnung der Lage des elastischen Schwerpunktes (Referenzfläche) für die aktuelle Belastungsrichtung (X-, Y-, XY- Rtg.) mit den zugehörigen Schichtsteifigkeiten (X : $E_k=C_{11k}$, Y : $E_k=C_{22k}$, XY : $E_k=C_{33k}$).

$$Z_{SU} = \frac{\sum_{k=1}^{n_{ges}} E_k \cdot Z_{Uk} \cdot t_k \cdot g_k}{\sum_{k=1}^{n_{ges}} E_k \cdot t_k \cdot g_k} \quad (5.2.1)$$

Abstände der einzelnen Schichten zum aktuellen elastischen Schwerpunkt

$$Z_k = Z_{Uk} - Z_{SU} \quad , \quad k = 1, (1), n_{ges}$$

Berechnung der aktuellen Steifigkeitsmatrix unter Vernachlässigung der bereits gerissenen Schichten ($g_k = 0$) mit der aktuellen Lage der Referenzfläche, ansonsten wie im Kapitel 4.3.1 beschrieben.

Zähler für die neuen Schichtversagen nach letzter Berechnung der Steifigkeitsmatrix auf Null setzen (\rightarrow Rechenzeit reduzieren) $n_n = 0$

4. Berechnung der Verformung des Laminates und der hieraus resultierenden lokalen Spannungen der einzelnen Schichten unter der aktuellen Belastung. (Kapitel 4.4)
Maximales Verhältnis von aktueller Belastung zum nächsten Schaden neu ermitteln
 $\rightarrow X_{Bel} = 0$
5. Alle einzelnen, noch nicht gerissenen, Schicht(-hälft)en auf Versagen oder Schädigung überprüfen ($k = 1, (1), n$) :

Schicht auf Versagen überprüfen mit

$$X_k = \text{Max} \left(\frac{\sigma_{\parallel k}}{\sigma_{\parallel Bk}}, \frac{\sigma_{\perp k}}{\sigma_{\perp Bk}}, \frac{\tau_{\#k}}{\tau_{\#Bk}} \right)$$

Die Bruchspannungen sind vorzeichengerecht, und in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung einzusetzen. (Druck : negativ / Zug : positiv)

$$X_k > X_{Bel} \rightarrow X_{Bel} = X_k$$

$$X_k \geq 1 \rightarrow \text{Schicht hat versagt : } g_k = 0, \quad n_{ger} := n_{ger} + 1, \quad n_n := n_n + 1$$

Überprüfung auf Zwischenfaserbruch ZFB (nur bei Bedarf) :

$$\left(\frac{\sigma_{\parallel k}}{\sigma_{\parallel Bk}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\perp k}}{\sigma_{\perp Bk}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{\#k}}{\tau_{\#Bk}} \right)^2 > 1 \rightarrow \text{ZFB} \quad (5.2.2)$$

6. Überprüfen, ob z.B. erster ZFB eingetreten ist

\rightarrow Ausgabe der aktuellen Last, Verformung

Als erster Oberflächenschaden wird der Wert angegeben, bei dem in einer der äußeren Schichten (Nr.1 oder Nr. n_{ges}) Schichtversagen oder ZFB auftritt.

7. Abbruchbedingung checken

a) Schnittlasten : $n_{ger} = n_{ges}$

Schnittmomente : $n_{ger} \geq n_{ges} - 2$

(für den Fall, das zwei Schichthälften in der neutralen Faser liegen.)

→ aktuelle Last \cong Maximallast

→ Ausgabe und Ende der Iteration

b) $n_{\Pi} > 0 \rightarrow$ Es haben bei der aktuellen Belastung weitere Schichten versagt,
→ Neue Berechnung der aktuellen Steifigkeitsmatrix,
d.h. Rücksprung zu 3.

8. Belastungserhöhung bis zur Schädigungsgrenze der am meisten belasteten Schicht

Neue Belastung $B_{neu} = \frac{B_{akt}}{X_{Bel}}$

(Für den Fall, daß $X_{Bel} \approx 1$ ist, eine minimale Belastungshöhe vorgeben.)

Steifigkeitsmatrix übernehmen, d.h. Rücksprung zu 4.

5.3 Maximallastberechnung unter Berücksichtigung der Nichtlinearität (2. Ansatz)

Der prinzipielle Ablauf erfolgt analog zum linearen Rechenmodell, aber es wird in Abhängigkeit von der Belastungsart, -höhe und Schichtart mit geänderten Elastizitätskennwerte, damit der Schichtsteifigkeiten und der Laminatsteifigkeit, gerechnet.

Bei den UD-Lagen, Gewebe- und Kreuzschichthälften wird bis zum Erreichen des Zwischenfaserbruchs (Bruchkriterium nach Schneider /24/) mit einer Abminderung der Schichtkennwerte $E_{\perp k}$, $G_{\#k}$ und $\nu_{\perp\parallel k}$ durch die Nichtlinearität des Harzes gerechnet, $E_{\parallel k}$ wird als konstant angesehen.

Nach dem Auftreten des Zwischenfaserbruchs (ZFB) werden die Abminderungskurven für die Nichtlinearität mit einer weiteren Abminderungskurve überlagert, welche das Verhalten nach dieser Schädigungsgrenze näherungsweise erfaßt.

Eine Schicht(-hälfte) wird erst als gerissen deklariert, also die gesamte Schicht nicht mehr berücksichtigt, wenn

- a) Faserbruch eingetreten ist
- b) eine Abminderung von $E_{\perp\parallel k}$ oder $G_{\#k}$ bis auf Null erfolgte
- c) die maximal zulässigen Dehnungen überschritten wurden.

Das Verhalten der Wirrfaserlagen wird durch einen quadratischen Ansatz angenähert, der sich aus den Eckpunkten der Bruchspannung, Bruchdehnung und Tangentenmodul, in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung, Druck oder Zug, ergibt.

Vor einer Belastungserhöhung werden die aktuellen Abminderungen abgespeichert, und in der weiteren Berechnung als Extrema für die Schichten angesehen, da von einer zusätzlichen Abminderung auszugehen ist, aber durch die Abminderung niedrigere Schichtspannungen als bei dem Zwischenfaserbruch eintreten.

Das Maß der "relativen Überanstrengung" wird über die lokalen Spannungen berechnet, die sich aus der Berechnung mit den aktuellen Dehnungen der weiter abgeminderten Laminatsteifigkeitsmatrix und der abgespeicherten Schichtsteifigkeitsmatrix vor dem Zwischenfaserbruch ergeben.

Es wird also im Grunde in Abhängigkeit von der relativen Überdehnung gerechnet.

Das Abbruchkriterium für das Erreichen der maximalen Schnittlasten unterscheidet sich

von den maximalen Schnittmomenten. Bei den Schnittlasten wird ein Versagen vorausgesetzt, wenn in allen Schichten Faserbruch oder Zwischenfaserbruch existiert, während bei den Schnittmomenten der Maximalwert erst als erreicht gilt, wenn alle Schichten (bis auf 2, für den Fall, daß diese in der neutralen Faser liegen) als gerissen deklariert sind.

Interlaminares Versagen, also insbesondere Delamination im Druckbereich, wird bei diesem Modell nicht berücksichtigt.

Reihenfolge der iterativen Berechnung

1. Anfangsbedingungen herstellen

Zähler für Schicht(-hälften) : n_{ges}

Zähler für gerissene Schichten : $n_{ger} = 0$

Zähler für Zwischenfaserbrüche : $n_{ZFB} = 0$

Alle Lagen als ungerissen deklarieren : $g_k = 1, \quad k=1,(1),n_{ges}$

($g_k=0 \rightarrow$ Gerissen)

Zwischenfaserbruchmarkierung auf "ungeschädigt" setzen : $ZFB_k=0$

($ZFB_k=1 \rightarrow$ Zwischenfaserbruch)

Berechnung der lokalen und globalen Steifigkeitsmatrizen und deren Inversen für die einzelnen Schichten. (Nach Kapitel 4.2 , diese Werte erhalten den Index "0")

Abspeichern der Anfangssteifigkeiten für die Berechnung der Überanstrengung nach dem Zwischenfaserbruch, für die hieraus resultierende Abminderung.

Gegebenenfalls Flaggen für Extraausgaben auf "0" setzen.

2. Geringe Belastungsvorgabe B_{akt} ($n_x, n_y, n_{xy}, m_x, m_y$ oder m_{xy})

3. Berechnung der Lage des elastischen Schwerpunktes (Referenzfläche) für die aktuelle Belastungsrichtung (X-, Y-, XY- Rtg.) mit den zugehörigen, aktuellen, also unter Umständen abgeminderten, Schichtsteifigkeiten.

(X : $E_k=C_{11k}$, Y : $E_k=C_{22k}$, XY : $E_k=C_{33k}$)

$$Z_{SU} = \frac{\sum_{k=1}^{n_{ges}} E_k \cdot Z_{Uk} \cdot t_k \cdot g_k}{\sum_{k=1}^{n_{ges}} E_k \cdot t_k \cdot g_k} \quad (5.3.1)$$

Abstände der einzelnen Schichten zum aktuellen elastischen Schwerpunkt

$$Z_k = Z_{Uk} - Z_{SU}, \quad k = 1, (1), n_{ges}$$

Berechnung der aktuellen Steifigkeitsmatrix unter Vernachlässigung der bereits gerissenen Schichten ($g_k = 0$) mit der aktuellen Lage der Referenzfläche, ansonsten wie im Kapitel 4.3.1 beschrieben.

Zähler für erneut abgeminderte Schichten : $n_{abg} = 0$

Zähler für die neuen Schichtversagen : $n_n = 0$

4. Berechnung der Verformung des Laminates mit der aktuellen, abgeminderten Steifigkeitsmatrix und der hieraus resultierenden lokale Schichtspannungen, ebenfalls mit den aktuellen Kennwerten, unter der aktuellen Belastung. (Nach Kapitel 4.4)
5. Alle einzelnen, noch nicht gerissenen, Schicht(-hälft)en auf Versagen, Schädigung und weitere Abminderung überprüfen ($k = 1, (1), n$), siehe Kapitel 5.3.1, 5.3.2 .

→ Schicht hat versagt : $g_k = 0$, $n_{ger} := n_{ger} + 1$, $n_n := n_n + 1$

Schicht hatte bereits Zwischenfaserbruch ($ZFB_k = 1$) : $n_{ZFB} = n_{ZFB} - 1$

→ Schicht erleidet Zwischenfaserbruch, d.h. bis zur momentanen Belastung ungeschädigt ($ZFB_k = 0$) : $n_{ZFB} = n_{ZFB} + 1$, $ZFB_k = 1$

→ Berechnung der Abminderungsfaktoren für die

a) Nichtlinearität für E_{\perp} , $G_{\#}$: η_{E-Nil} , η_{G-Nil}

b) Überanstrengung nach Zwischenfaserbruch $\eta_{\dot{U}ZFB}$ ($= 1$, vor ZFB)

6. Überprüfen, ob die aktuellen Abminderungsfaktoren kleiner sind als vor der letzten Belastungserhöhung, sonst die alten Werte übernehmen.

Vergleich mit den Abminderungsfaktoren des letzten Durchlaufs

→ Bei Überschreitung einer vorgegebenen Fehlerschranke :

$$E_{\perp k} = E_{\perp k0} \cdot \eta_{E-Nil} \cdot \eta_{\dot{U}ZFB} \quad (5.3.2)$$

$$G_{\# k} = G_{\# k0} \cdot \eta_{G-Nil} \cdot \eta_{\dot{U}ZFB} \quad (5.3.3)$$

$$\nu_{\perp \parallel k} = \nu_{\perp \parallel k0} \cdot \eta_{\dot{U}ZFB} \quad (5.3.4)$$

$$n_{abg} = n_{abg} + 1$$

Berechnung der aktuellen lokalen und globalen Steifigkeitsmatrix mit den neuen abgeminderten Kennwerten.

7. Erster Zwischenfaserbruch, erstes Schichtversagen, erster Oberflächenschaden, usw.

→ Ausgabe der aktuellen Last, Verformung

8. Abbruchbedingung checken

a)

$$\text{Schnittlasten} \quad : \quad n_{ger} = n_{ger} + n_{ZFB}$$

$$\text{Schnittmomente} \quad : \quad n_{ger} \geq n_{ges} - 2 \quad (\text{für den Fall, das zwei Schichthälften in der neutralen Faser liegen.})$$

→ aktuelle Last $\hat{=}$ Maximallast

→ Ausgabe und Ende der Iteration

b) $n_{abg} > 0$: Erneute Berechnung wegen aufgetretener Abminderung

$n_n > 0$: Es haben bei der aktuellen Belastung weitere Schichten versagt

→ Neue Berechnung der aktuellen Lage der Referenzfläche und der Laminatsteifigkeitsmatrix, d.h. Rücksprung zu 3.

9. Belastungserhöhung bis zur Schädigungsgrenze der am meisten belasteten Schicht

Belastung für den neuen Durchgang $B_{neu} = B_{akt} + \Delta B$

Um die Nichtlinearität, die hieraus resultierende Spannungsumlagerung und Wanderung der neutralen Faser richtig zu erfassen, muß ΔB relativ klein gewählt werden, was zu längerer Rechenzeit führt.

Abspeichern der aktuellen Schichtabminderungen für Vergleichszwecke (6.).

Übernahme der Laminatsteifigkeitsmatrix , d.h. Rücksprung zu 4.

5.3.1 Abminderung der UD-Lagen / Schichthälften

Der E-Modul parallel zur Faser E_{\parallel} wird bis zum Faserbruch als konstant angenommen, nach dem Faserbruch wird die Schicht insgesamt als gerissen angesehen.

$$\text{Faserbruch : } \frac{\sigma_{\parallel}}{\sigma_{\parallel B}} = 1$$

Unterhalb des Zwischenfaserbruchs erfolgt bereits eine Abminderung der Festigkeitskennwerte durch die Nichtlinearität des Harzes, welche als Funktion des Harzes, des Faservolumengehaltes, Temperatur, Temperung, usw. anzusehen ist.

Diese einfließenden Parameter konnten, ebenso wie in der Abminderung nach Zwischenfaserbruch und die Festigkeitskennwerte, nicht berücksichtigt werden, d.h. es wurden die gleichen Abminderungskurven für alle Lamine verwendet.

In der Diplomarbeit von T.Kunkel und U.Raßweiler /9/ wurden die Abminderungskurven folgenderweise angenähert :

Abminderungsfaktor η_{E-Nil} für das nichtlineare Verhalten von $E_{\perp k}$

- Zugbelastung ($\sigma_{\perp k} > 0$), mit der relativen Anstrengung $A = \frac{\sigma_{\perp k}}{\sigma_{\perp zBk}}$

$$A \leq 0.35$$

$$\rightarrow \eta_{E-Nil} = 1$$

$$0.35 < A \leq 1$$

$$\rightarrow \eta_{E-Nil} = 0.888741 + 0.784178 \cdot A - 1.45080 \cdot A^2 + 0.329454 \cdot A^3$$

$$A > 1$$

$$\rightarrow \eta_{E-Nil} = 0.55157 \text{ (Weitere Abminderung durch Überanstrengung)}$$

- Druckbelastung ($\sigma_{\perp k} < 0$), mit der relativen Anstrengung $A = \left| \frac{\sigma_{\perp k}}{\sigma_{\perp dBk}} \right|$

$$A \leq 0.4$$

$$\rightarrow \eta_{E-Nil} = 1$$

$$0.4 < A \leq 1$$

$$\rightarrow \eta_{E-Nil} = 0.949085 + 0.310633 \cdot A - 0.504428 \cdot A^2 + 0.115063 \cdot A^3$$

$$A > 1$$

$$\rightarrow \eta_{E-Nil} = 0.87035 \text{ (Weitere Abminderung durch Überanstrengung)}$$

Abminderungsfaktor $\eta_{G\text{-Nil}}$ für das nichtlineare Verhalten von $G_{\#k}$

- relativen Anstrengung $A = \left| \frac{\tau_{\#k}}{\tau_{\#Bk}} \right|$

$A \leq 0.25 \quad \rightarrow \quad \eta_{E\text{-Nil}} = 1$

$0.25 < A \leq 0.54$

$\rightarrow \eta_{G\text{-Nil}} = 0.800659 + 2.030531 \cdot A - 5.938021 \cdot A^2 + 4.028822 \cdot A^3$

$0.54 < A \leq 1$

$\rightarrow \eta_{G\text{-Nil}} = 1.386957 - 1.086957 \cdot A$

$A > 1$

$\rightarrow \eta_{G\text{-Nil}} = 0.3$ (Weitere Abminderung durch Überanstrengung)

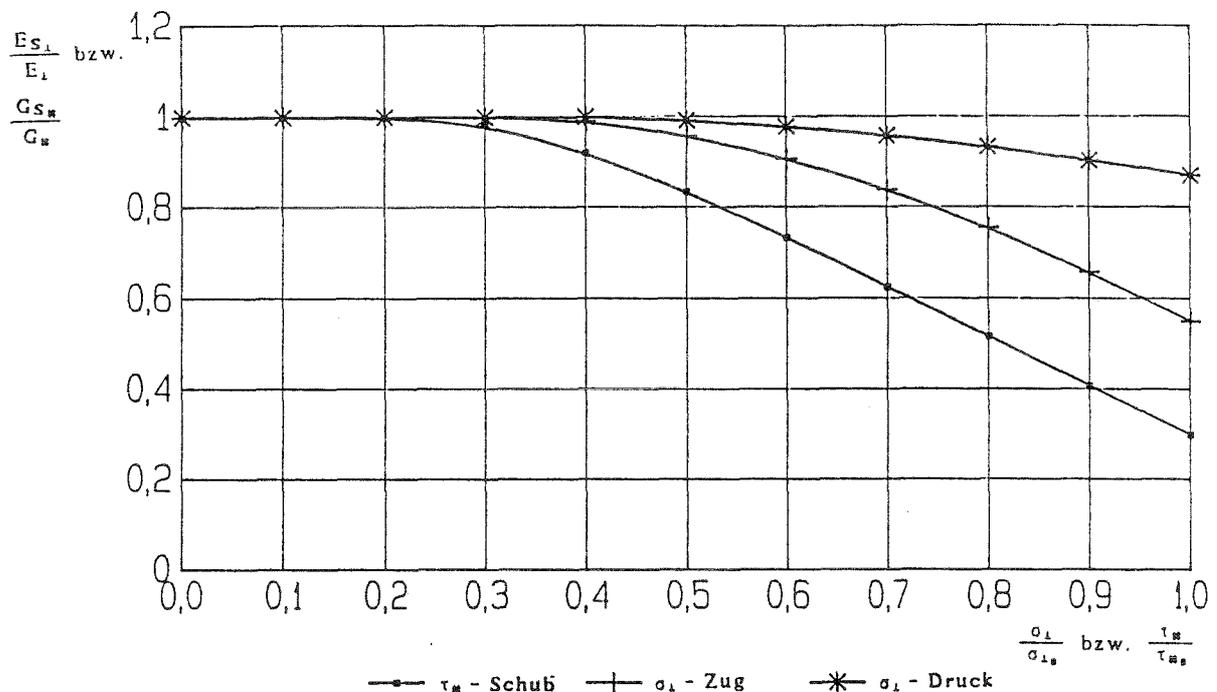


Diagramm 5.3.1 /9/ Verhältnis von Sekantenmoduln $E_{S_{\perp k}}$ und $G_{S_{\#k}}$ zu den Tangentenmoduln $E_{\perp k}$ und $G_{\#k}$ in Abhängigkeit zu der jeweiligen relativen Anstrengung (Kurzzeitversuche $t \sim 1 \text{ min}$, $\phi \sim 45\%$)

Nach dem berechneten Zwischenfaserbruch erfolgt eine weitere Abminderung für die bereits abgeminderten Werte $E_{\perp k}$, $G_{\#k}$ und für $\nu_{\perp \parallel k}$ in Abhängigkeit von der relativen Überanstrengung "ÜZFB" und der Belastungsrichtung.

Als Zwischenfaserbruchkriterium, sowie zur Ermittlung der relativen Überanstrengung, wird ein Ansatz von Schneider genutzt, wobei die Festigkeiten absolut und die Spannungen vorzeichengerecht eingesetzt werden

Relative Anstrengung zum Zwischenfaserbruch AZFB :

$$AZFB = \frac{R1 + \sqrt{R1^2 + 4 \cdot R2}}{2}$$

Mit

$$R1 = 3 \cdot \sigma_{\parallel} \cdot \left(\frac{1}{\sigma_{\parallel zB}} - \frac{1}{\sigma_{\parallel dB}} \right) + \sigma_{\perp} \cdot \left(\frac{1}{\sigma_{\perp zB}} - \frac{1}{\sigma_{\perp dB}} \right)$$

und

$$R2 = \frac{3 \cdot \sigma_{\parallel}^2}{\sigma_{\parallel zB} \cdot \sigma_{\parallel dB}} + \frac{\sigma_{\perp}^2}{\sigma_{\perp zB} \cdot \sigma_{\perp dB}} + \left(\frac{\tau_{\#}}{\tau_{\#B}} \right)^2$$

AZFB = 1 → Zwischenfaserbruch

Nach Zwischenfaserbruch → Überanstrengung $\bar{U}ZFB = AZFB - 1$

Für die Berechnung der Überanstrengung nach dem Zwischenfaserbruch werden anstelle der tatsächlichen vorhandenen Spannungen, die Spannungen in die Gleichung eingesetzt, welche sich ergeben, wenn mit den aktuellen Dehnungen und der alten, d.h. vor dem Zwischenfaserbruch abgespeicherten, Steifigkeitsmatrix gerechnet wird.

Die Näherungsfunktion des Abminderungsfaktors η in Abhängigkeit von der Überanstrengung \bar{U} als Polynomansatz für :

- $\bar{U} \leq 0 \rightarrow \eta = 1$ (Vor Zwischenfaserbruch)

- Zugbelastung ($\sigma_{\perp k} > 0$)

$$0 < \bar{U} \leq 0.94$$

$$\rightarrow \eta = 1 + 0.007406 \cdot \bar{U}^2 + 7.03601 \cdot \bar{U}^3 - 3.96507 \cdot \bar{U}^4 + 0.77395 \cdot \bar{U}^5$$

$$0.94 < \bar{U} \leq 1.4$$

$$\rightarrow \eta = 1.0033174 + 0.8257941 \cdot \bar{U} + 1.0612992 \cdot \bar{U}^2 + 1.735522 \cdot \bar{U}^3 - 0.81733847 \cdot \bar{U}^4 + 0.12789242 \cdot \bar{U}^5$$

$$1.4 < \bar{U} \leq 2.3$$

$$\rightarrow \eta = 0.27392 - 0.119094 \cdot \bar{U}$$

$$\bar{U} > 2.3$$

$$\rightarrow \eta = 0$$

- Druckbelastung ($\sigma_{\perp k} < 0$)

$$0 < \bar{U} \leq 3$$

$$\rightarrow \eta = 1 - 0.1219 \cdot \bar{U} + 0.0013026 \cdot \bar{U}^2 + 0.0037642 \cdot \bar{U}^3$$

$$3 < \bar{U} \leq 3.8125$$

$$\rightarrow \eta = 0.7477 - (\bar{U} - 3)^{1.4}$$

$$\bar{U} > 3.8125 \rightarrow \eta = 0$$

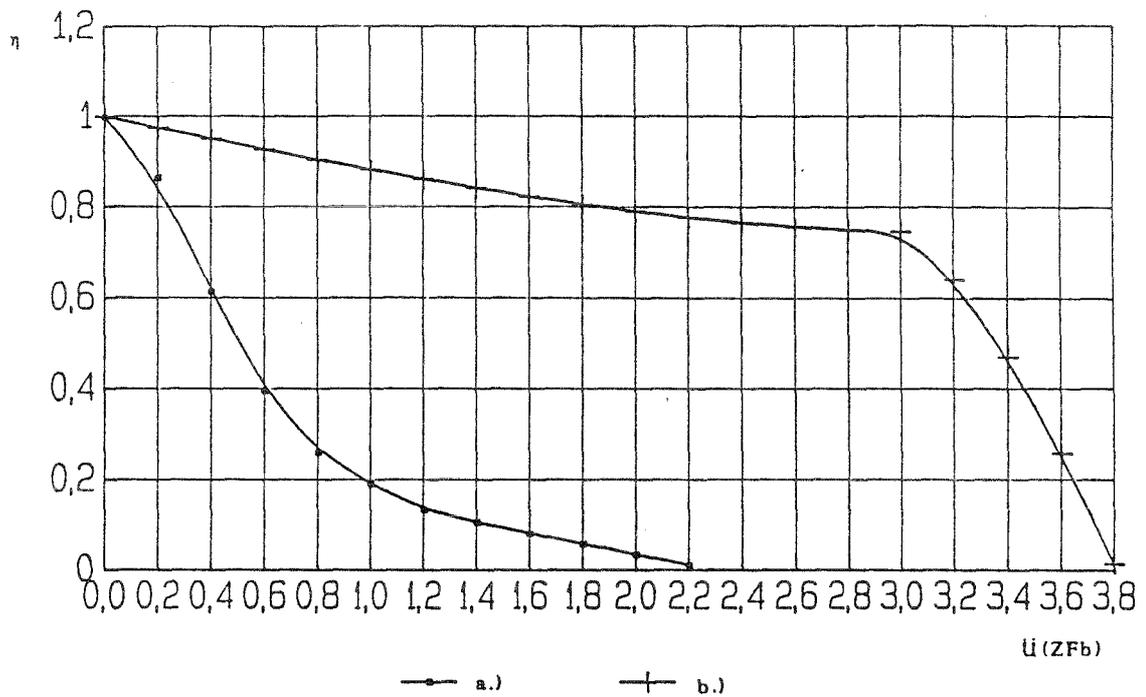


Diagramm 5.3.2 /9/ Abminderungsfaktor η als Funktion von \bar{U}_{ZFB}

a) $\sigma_{\perp k}$ = Zugspannung

b) $\sigma_{\perp k}$ = Druckspannung

5.3.2 Abminderung der Wirrfaserlage (Matte)

Für die Abminderung der Wirrfaserlagen durch die Nichtlinearität und Vorschädigung wurde ein einfacher quadratischer Ansatz gewählt, der sich auch für das Verhalten von anderen Schichttypen anbietet, sofern nur der Anfangsmodul E_0 , die Bruchdehnung ε_B , die Bruchspannung σ_B bekannt sind und die Spannungsdehnungskurve kein relatives Maximum aufweist.

Aus der vorgegebenen Bruchdehnung und der vom Faservolumengehalt abhängigen berechneten Bruchspannung läßt sich der Sekantenmodul E_{SB} im Bruchzustand ermitteln.

$$E_{SB} = \frac{\sigma_B}{\varepsilon_B}$$

Hieraus folgt der Abminderungsfaktor η in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung, d.h. es sind Zug- oder Druckbruchspannung, -bruchdehnung einzusetzen :

$$\eta = 1 - \frac{E_0 - E_{SB}}{E_0} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_B}$$

Es wird für E, G# und ν mit der gleichen Abminderung gerechnet.

Um zu Überprüfen, ob außer dieser Nichtlinearität weitere Spannungsumlagerungen stattfinden, wurden die Versuchsergebnisse aus den einachsigen Belastungen eingesetzt (Zeit von Belastungsbeginn bis Bruch ca. eine Minute) :

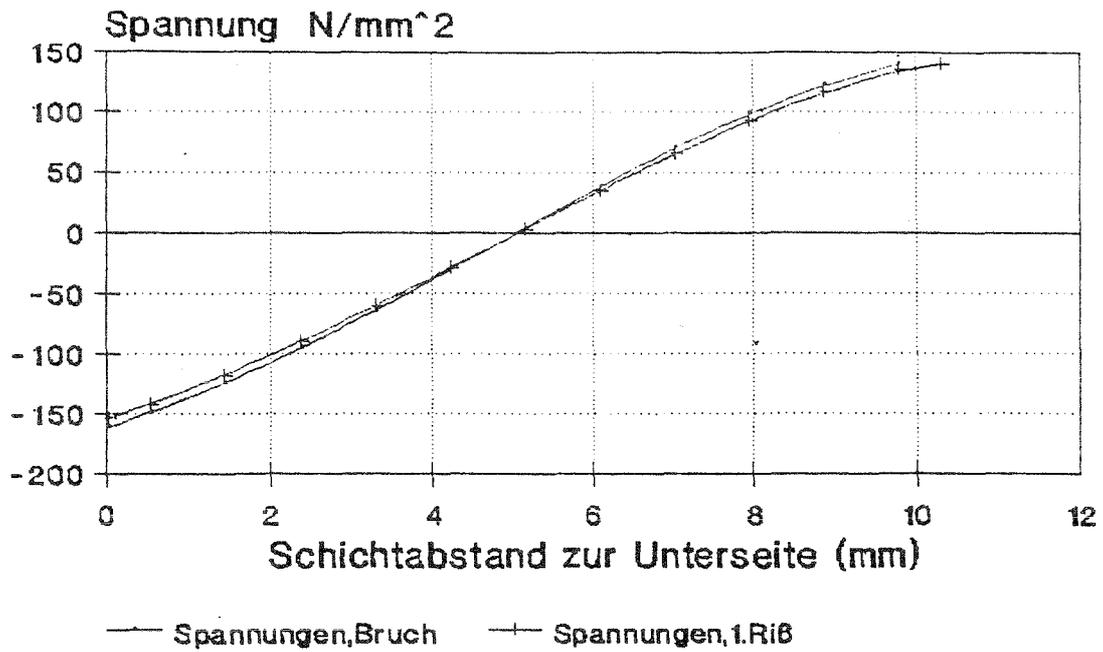
Zugbereich : $\sigma_{zB} = \phi_F \cdot 730 \text{ N/mm}^2$, $\varepsilon_{zB} = 2 \%$

Druckbereich : $\sigma_{dB} = \phi_F \cdot 1000 \text{ N/mm}^2$, $\varepsilon_{dB} = 3 \%$

Diese Werte wurden mit den Harzen Vestopal 150 (Laminat Nr.3, Nr.4) und Leguval W17 (Laminat Nr. 13, Nr.14) bei einem Faservolumengehalt von 15-20% ermitteln.

Aus Sicherheitsgründen sollte, insbesondere für Wirrfaserschicht, als Supremum für die Zugbruchspannung $\sigma_{zB} = \phi_F \cdot 500 \text{ N/mm}^2$ und für die Druckbruchspannung $\sigma_{dB} = 1,3 \cdot \sigma_{zB}$ angesetzt werden.

Theoretische Spannungsverteilung - Nichtlinearität / 2. Ansatz -



- **Laminat Nr.3** -

Diagramm 5.3.3 Berechnete Spannungsverteilung bei einer Momentbelastung eines Mattenlaminates im Bruchzustand (Druckbruchspannung ist nicht erreicht)

6. Experimentelle und theoretische Ergebnisse

In diesem Kapitel sind die experimentellen, theoretischen Versuchsergebnisse, nach Laminaten und Belastungsrichtung unterteilt, in Diagrammen dargestellt.

Dem Anhang kann die zugehörige Probenanzahl, Variationskoeffizient, Minimal-, Maximalwert, Konfidenzintervalle für eine statistische Sicherheit von $P=75\%$, $P=95\%$, sowie Breiten-, Dickendifferenzen und der Laminataufbau entnommen werden.

Zuerst werden in den Diagrammen "Schnittmomente", "Spannungen" die, mit den verschiedenen Versuchsarten erzielten, Bruchwerte vorgestellt. Hier wird auch ersichtlich, wie groß die Differenzen hinsichtlich der Belastungsrichtung, also Oberseite (OS) oder Unterseite (US) des Laminates druckbelastet, bei der Biegung sein können.

Die Schwankungen der Laminatdicke und des Flächengewichts machen die Beurteilung der Ergebnisse schwierig. Dies erkennt man an den teilweise unterschiedlichen Tendenzen bei den Schnittmomenten und den Biegebruchspannungen hinsichtlich des Einflusses der Prüfmethode. Durch die unterschiedlichen Dicken der einzelnen Proben und dem quadratischen Einfluß der Dicke bei der Umrechnung vom Schnittmoment auf die Biegebruchspannung ergeben sich diese Differenzen.

Die zugehörigen faservolumenbezogenen Spannungen sind dem Anhang zu entnehmen.

Bei den Ergebnissen der Dreipunkt-Versuchen mit Reibung sind zusätzlich die Werte eingetragen, wenn nach DIN EN 63 (Gl. 3.2.5) die Verformung eingerechnet wird, ($\rightarrow m', sig'$).

Da bei den Vierpunkt-Bruchversuchen mit festem Auflager nicht gewährleistet ist, daß die Kraft symmetrisch eingeleitet wird, sind zum Vergleich die Werte eingetragen, die sich bei einseitiger Krafteinleitung nach Gl.(3.4.13) ergeben ($\rightarrow m^{\wedge}, sig^{\wedge}$).

Die Berechnung der Bruchwerte für die 3-Punkt-Pendelbiegung erfolgte mit dem korrigierten Auflagerabstand, der sich näherungsweise aus der Verformung ergab und der Gleichung (3.2.2).

Anschließend sind in den Diagrammen "Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung" die Schnittmomente, Biegespannungen aufgetragen, die sich aus den Versuchen der Dreipunktbiegung rechnerisch ergeben, wenn die Auswertung mit dem 2. Ansatz

(Gl (3.2.22)), sowie dessen Vereinfachung (Gl. (3.2.31)), und unterschiedlichen Reibungszahlen μ erfolgt.

Außerdem ist das jeweilige Versuchsergebnis mit der Biegeprüfvorrichtung eingetragen. Aus den Schnittpunkten mit dieser Geraden lassen sich die Reibungszahlen entnehmen, die bei den Dreipunktbiegungsversuchen und der Auswertung nach dem 2. Ansatz auf das gleiche Resultat führen, wie die "Reine Biegung".

In den folgenden Diagrammen werden die theoretischen Schnittmomente und Krümmungen, berechnet mit und ohne Abminderung, mit den Versuchsergebnissen der Biegeprüfvorrichtung verglichen.

Hier sind außer den Bruchwerten auch die Werte vom ersten berechneten Zwischenfaserbruch (zum Vergleich das erste hörbare Knistern), und vom ersten sichtbaren Oberflächenschaden eingezeichnet.

Der Einfluß der Probenbreite auf die Bruchwerte kann den Diagrammen "Bruchlasten als Funktion der Breite" entnommen werden, hier sind sowohl das Schnittmoment, als auch die Biegebruchspannung eingetragen. Es ist zu bemerken, daß einige dieser Werte durch die örtlichen Verformungen bei der Dreipunktbiegung hergerufen werden (siehe Kapitel 2.), insbesondere bei Proben mit Querkrümmungen.

Ferner sind bei einigen Laminaten die erzielten Versuchsergebnisse bei einer Variation des Auflagerabstandes dargestellt.

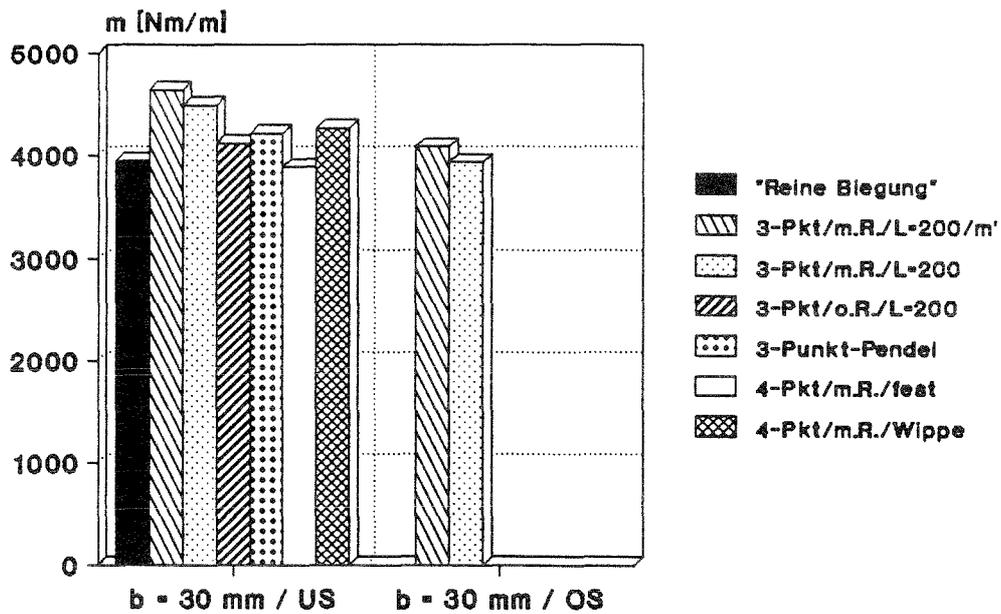
Als letztes Diagramm von der X- oder Y-Richtung pro Laminates folgt "Elastizitätsmodule" , hier sind die experimentellen und theoretischen E_0 - und E_{b0} -Module eingetragen. Die experimentellen Daten sind nach Versuchsart und Probenbreite unterteilt.

Im gleichem Diagramm sind die theoretischen Biegemodule "E_{b0} theor." und die theoretischen E-Module "E₀ theor." eingezeichnet, in beiden Fällen sowohl die Werte für behinderte, als auch für die unbehinderte Querkontraktion.

In den Fällen, wo die Lage der elastischen Schwerlinie (ES) (Gl.4.50) erheblich von der Laminatmitte ($t/2$) (Gl.4.49) abwich, sind die Elastizitätsgrößen mit beide Werten berechnet, eingetragen und mit den Kürzeln "ES" und " $t/2$ " kenntlich gemacht worden.

(Siehe Kapitel 4.3.2)

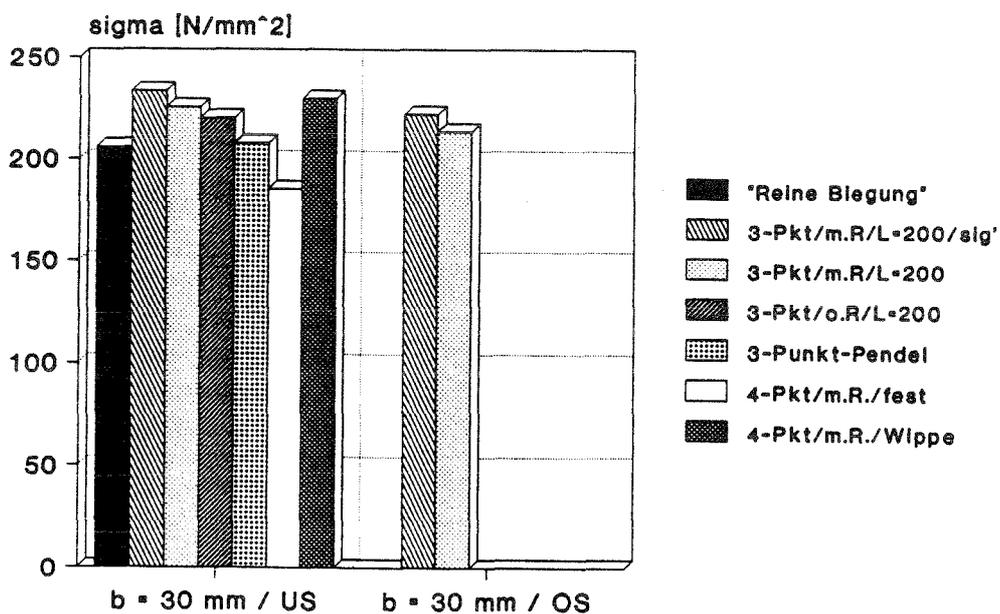
Laminat Nr.1 Schnittmomente



ungekrümmte Platte / X-Richtung

Diagramm 6.1.1

Laminat Nr.1 Spannungen



ungekrümmte Platte / X-Richtung

Diagramm 6.1.2

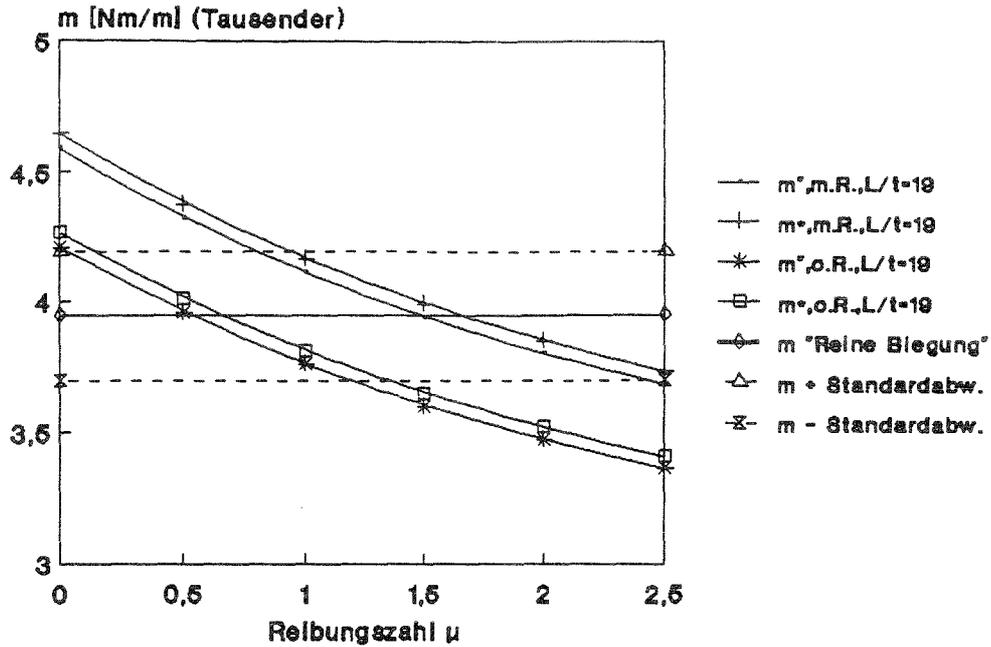
Laminat Nr.1 / X-Rtg. / US
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung

Diagramm 6.1.3

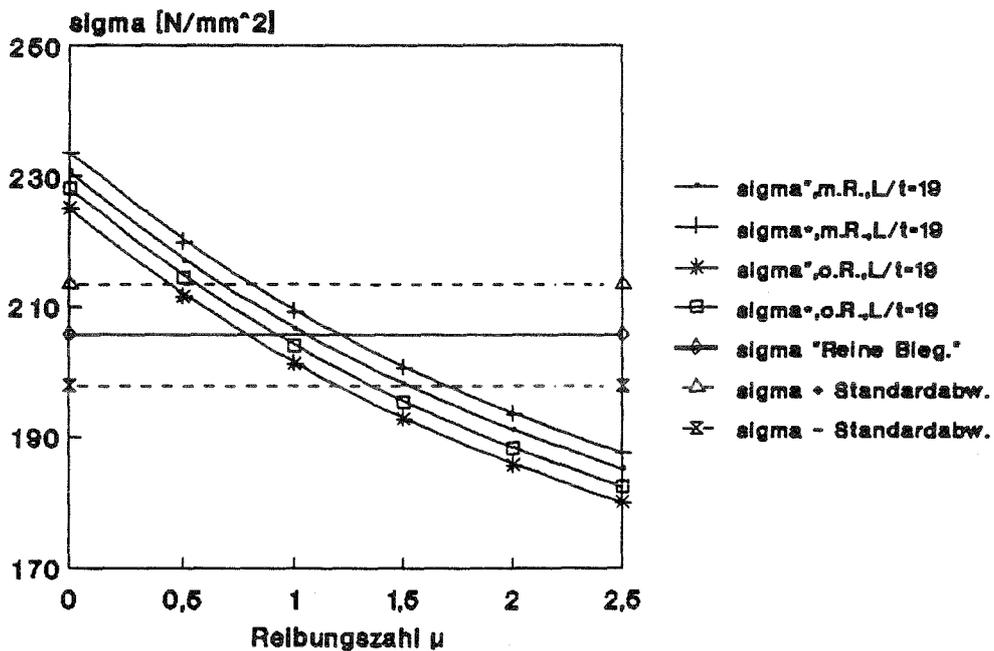
Laminat Nr.1 / X-Rtg. / US
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung

Diagramm 6.1.4

Laminat Nr. 1 / X-Rtg. / US

Schnittmomente : Theorie - Experimentell

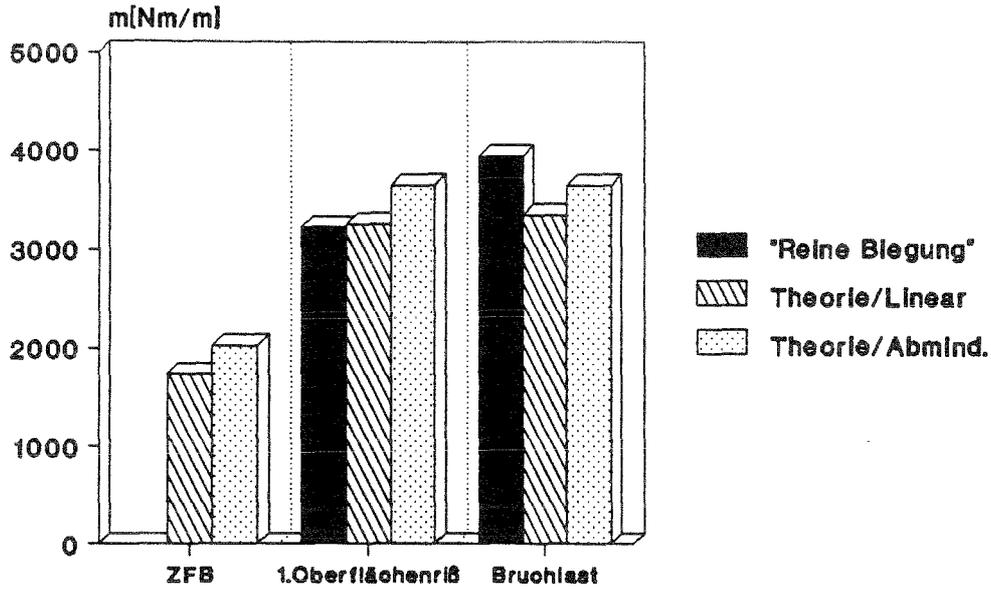


Diagramm 6.1.5

Laminat Nr. 1 / X-Rtg. / US

Krümmungen : Theorie - Experimentell

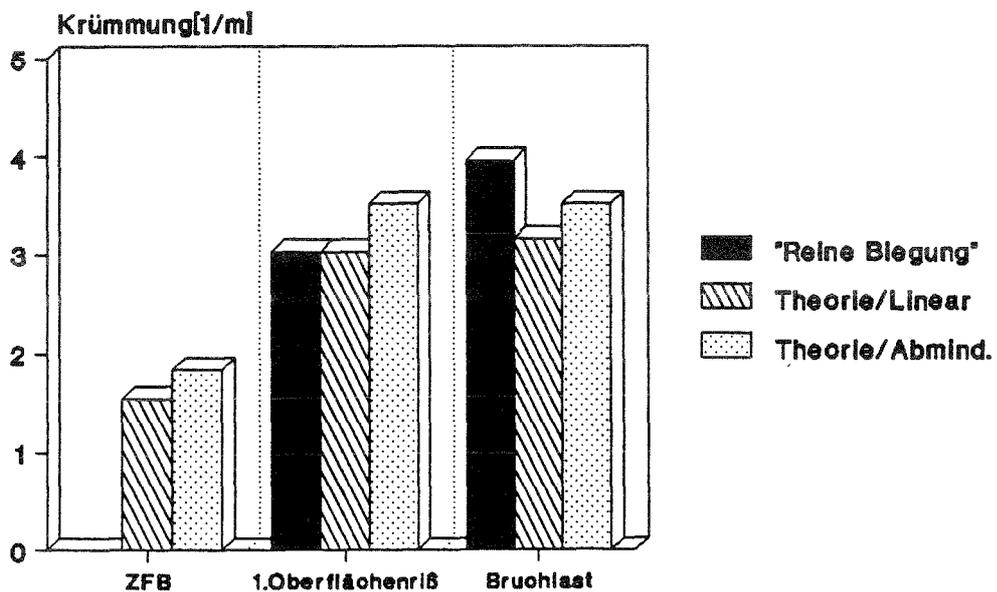
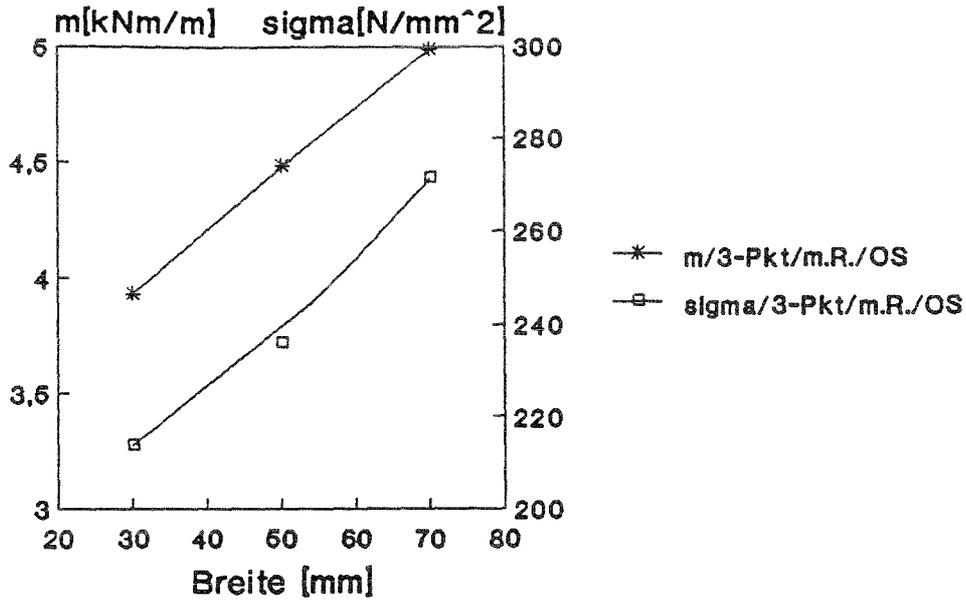


Diagramm 6.1.6

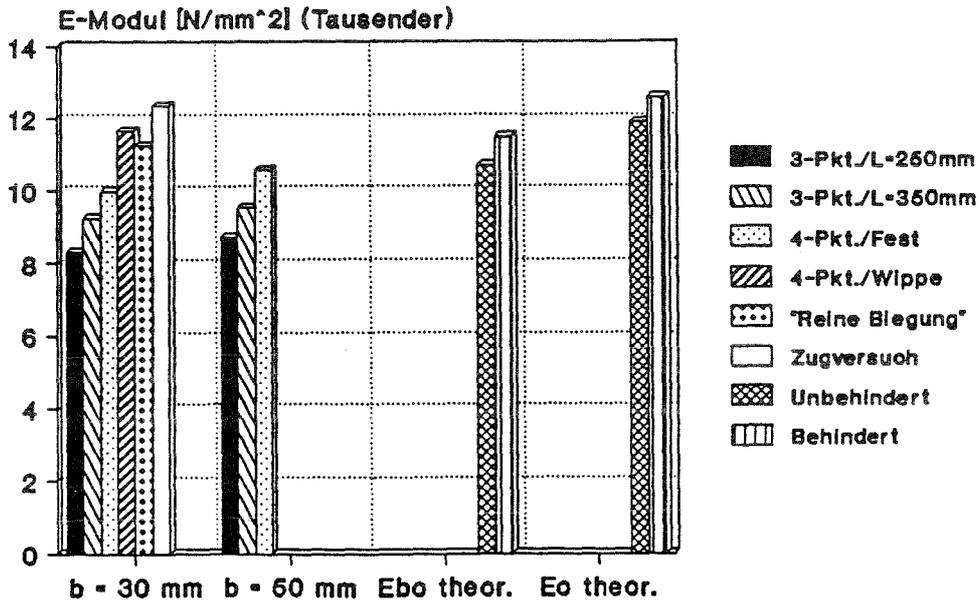
Laminat Nr.1 Bruchlasten als Funktion der Breite



Ungekrümmte Platte (X-Rtg.)

Diagramm 6.1.7 L=200 [mm]

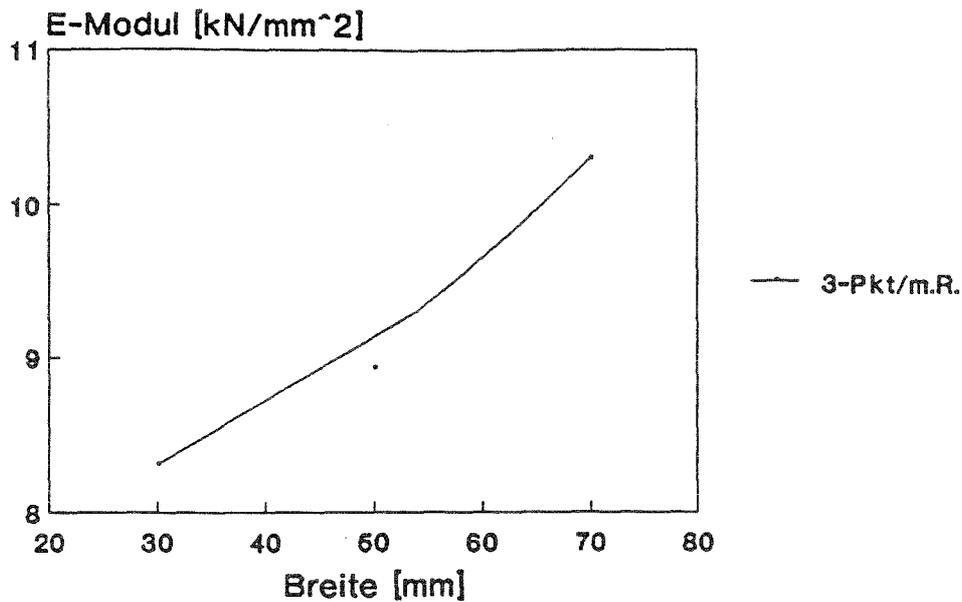
Laminat Nr. 1 Elastizitätsmodule



Ungekrümmte Platte / X-Richtung

Diagramm 6.1.8

Laminat Nr.1 E-Module als Funktion der Breite



Ungekrümmte Platte (X-Rtg.)

Diagramm 6.1.9

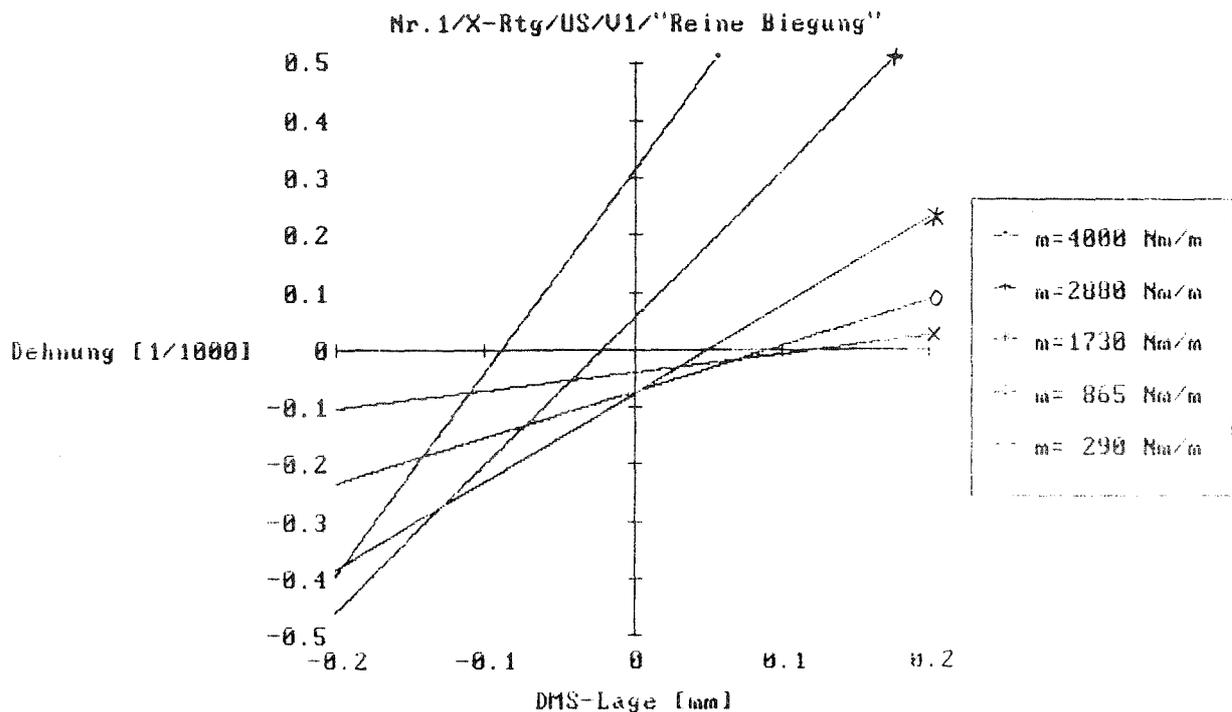


Diagramm 6.1.10

Einfluß der Prüfmethode auf die erzielten Maximallasten

(Diagramme 6.1.1, 6.1.2)

Wie bereits erwähnt, können die Ergebnisse der 3-Punkt-Pendelbiegung als obere Grenze für das wirklich vorhandene Momente im Bruchzustand angesehen werden, d.h. das wirkliche Moment ist KLEINER als dieser Wert. (Kapitel 3.3)

Bei den erzielten Biegebruchspannungen wird das Resultat der Pendelvorrichtung nur von der "reinen Biegung" und der festen Vierpunktbiegung unterschritten. Hieraus läßt sich schließen, daß bei der "reibungsfreien" Dreipunktbiegung ebenfalls noch eine Restreibung vorhanden sein mußte.

Hingegen ergibt sich bei der festen Vierpunktbiegung das Problem, daß eine symmetrische Krafteinleitung nicht gewährleistet ist, eine Umrechnung auf m^{\wedge} , σ_B^{\wedge} (Gleichung (3.4.13)) führt zu ähnlichen Ergebnissen wie die Dreipunktbiegung mit Reibung.

Die höchsten Werte wurden mit Dreipunktbiegung erzielt, wenn nach DIN EN 63 die Verformung eingerechnet wird (Gl.(3.2.5)).

Die Proben versagten bei der Biegebelastung im Zugbereich.

Reibungszahlen für die Dreipunktbiegung

(Diagramme 6.1.3, 6.1.4)

Es ist ersichtlich, daß die Ergebnisse mit dem vereinfachten 2. Ansatz für die Dreipunktbiegung (Gl.(3.2.25)-(3.2.31)) {*} etwas höher und parallel zu den Ergebnissen ohne Vereinfachung (Gl.(3.2.12)-(3.2.24)) {"} verlaufen. Dies ist die Folge der nicht berücksichtigten Änderung des Auflagerabstandes, also dem Einsetzen von L statt L^{\wedge} . Hieraus resultieren dann scheinbar "höhere" Reibungszahlen, die man aber auch als geänderte Abminderungsfaktoren für eine andere Auswertungsmethode interpretieren kann.

Sehr deutlich wird hier der Einfluß der Dickeschwankungen unter den Versuchsserien, während der Kurvenabstand bei den Schnittmomenten relativ groß ist, liegen die Kurven bei den Biegebruchspannungen zusammen.

Aus dem Vergleich mit dem Versuchsergebnis der Biegeprüfvorrichtung ergeben sich folgende Reibungszahlen

	Ansatz	L/t	Rtg.	Schnittmoment	Spannungen	Mittelwert
Mit Reibung	"	19	US	1.50	1.08	1.29
	*			1.69	1.22	1.46
"Ohne" Reibung	"	19	US	0.53	0.80	0.67
	*			0.66	0.94	0.80

Tabelle 6.1.1 Reibungszahlen

Vergleich der theoretischen und experimentellen Maximallasten

(Diagramme 6.1.5, 6.1.6)

Bei diesem Laminat konnte kein Knistern bei den Bruchversuchen wahrgenommen werden, so daß kein Vergleichswert für den ersten Zwischenfaserbruch zur Verfügung steht.

Der erste Oberflächenriß stimmt sowohl hinsichtlich des Schnittmoments, als auch der Krümmung sehr gut mit der linearen Berechnung überein, während der 2. Ansatz hier zu hohe Werte liefert. Hingegen liegen bei dem Bruchwert die Resultate der abgeminderten Berechnung dichter an den ermittelten Daten als die Ergebnisse des linearen Ansatzes, sind aber noch etwas zu niedrig.

Nach dem linearen Ansatz ergab sich bei der Berechnung eine Änderung der Lage des elastischen Schwerpunktes (Siehe theoretische Maximallastberechnung im Anhang) vom Anfangszustand $Z_{s0}=5.43\text{ mm}$ bis auf $Z_s=5.33\text{ mm}$ bei dem Erreichen des Bruchwertes (durch das Versagen der ersten Schichten vor dem Maximalwert), nach dem nichtlinearen Ansatz ergibt sich eine fast gleich große Änderung auf $Z_s=5.35\text{ mm}$.

In dem Diagramm 6.1.10 wurde die Nulllinienwanderung aufgezeichnet, die sich bei einem Versuch mit der Biegeprüfvorrichtung ergab und mit einer DMS-Kette aufgenommen wurde (Kapitel 3.7). Hier kann man eine Vergrößerung des Zugbereichs vom Belastungsbeginn bis kurz vor Bruch um 0.2 mm entnehmen, also eine größere Änderung als nach der theoretischen Berechnung.

Elastizitätsmodule

(Diagramm 6.1.9)

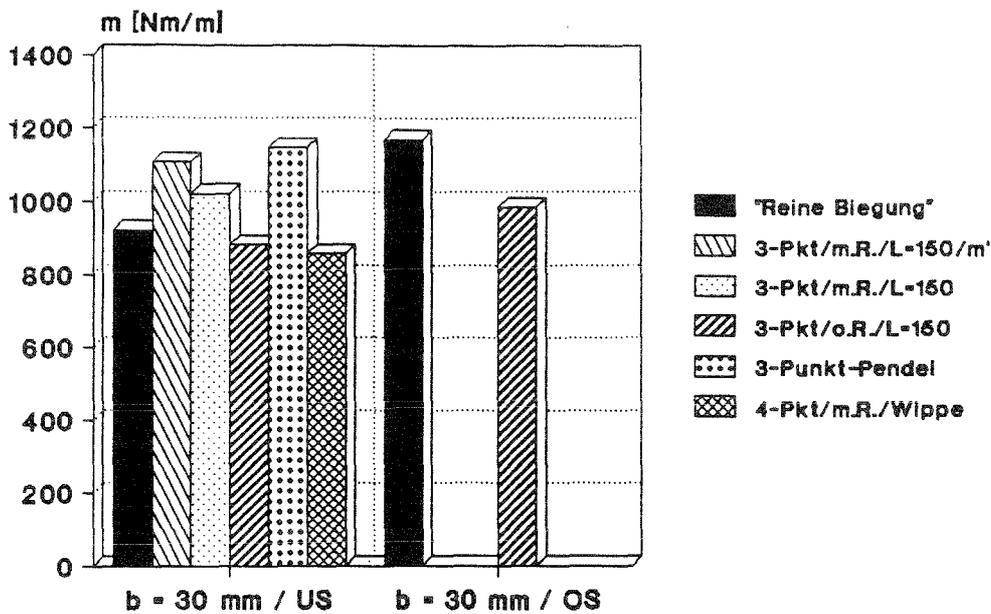
Hier liefert die Ermittlung mit der Dreipunktbiegung die geringsten Werte, da hier in der Berechnung noch ein vernachlässigter Querkraftanteil in der Verformung enthalten ist.

Deutlich wird auch die Differenz bei der Vierpunktbiegung mit festem und losem ("Wippe") Druckstempel, d.h. bei dem festem Druckstempel ist das Moment zwischen den inneren Auflagern nicht zwingend konstant und in diesem Fall größer als berechnet, so daß geringere E-Module ermittelt werden.

Der Biegemodul aus der Vierpunktbiegung und der Biegeprüfvorrichtung stimmen relativ gut überein, wobei der Wert von der "reinen Biegung" aus einem Bruchversuch stammt.

Der Vergleich zwischen dem theoretischem Biegemodul und dem Ergebnis von der Vierpunktbiegung mit Wippe liefert, ebenso wie der Vergleich vom E-Modul der Theorie und vom Zugversuch, gute Übereinstimmung.

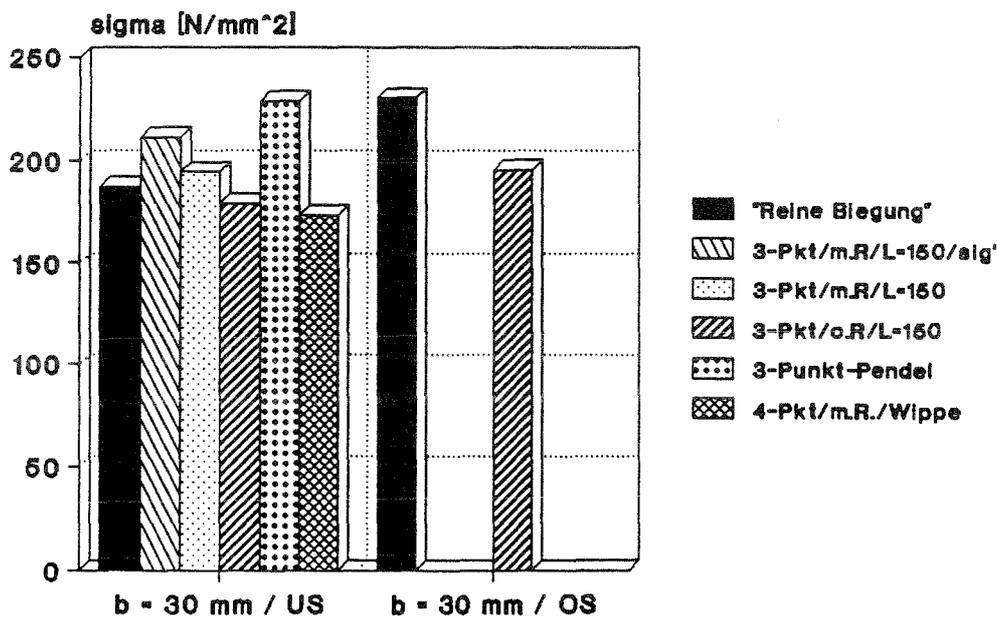
Laminat Nr.2 Schnittmomente



ungekrümmte Platte / X-Richtung

Diagramm 6.2.1

Laminat Nr.2 Spannungen



ungekrümmte Platte / X-Richtung

Diagramm 6.2.2

Laminat Nr.2 / X-Rtg. / US
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung
Maximale Schnittmomente

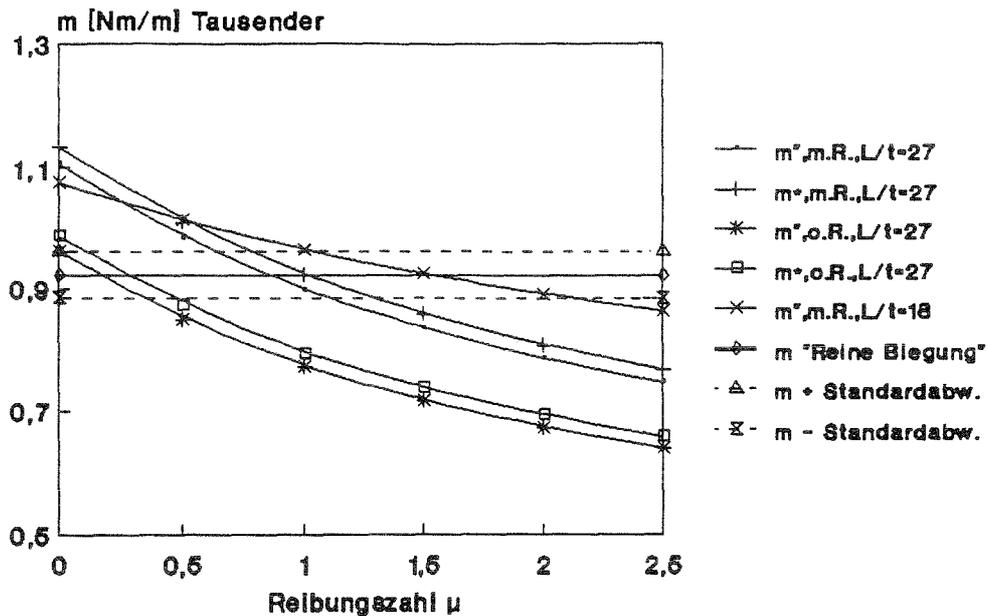


Diagramm 6.2.3

Laminat Nr.2 / X-Rtg. / US
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung
Biegebruchspannungen

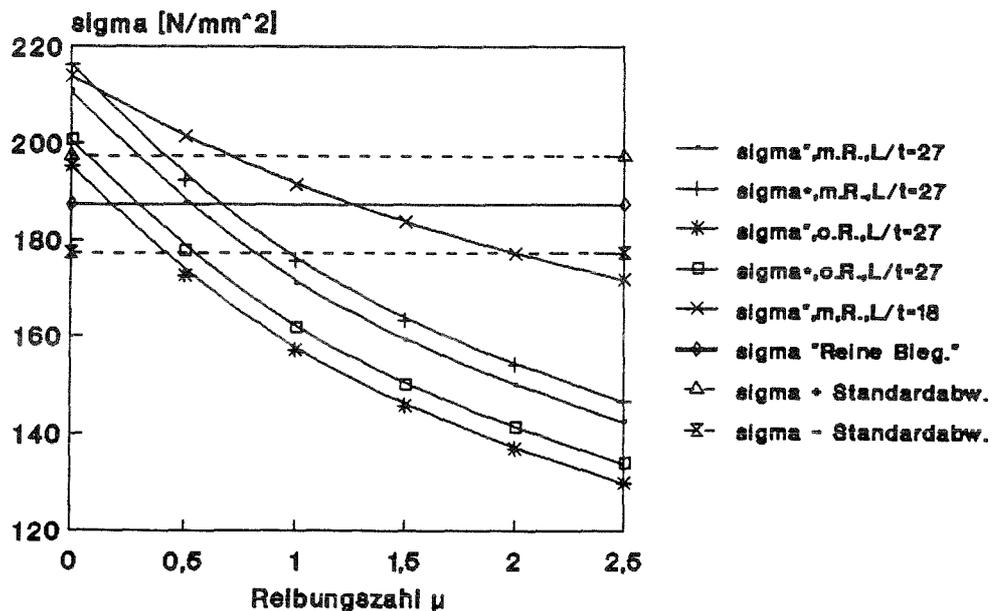


Diagramm 6.2.4

Laminat Nr. 2 / X-Rtg. / US

Schnittmomente : Theorie - Experimentell

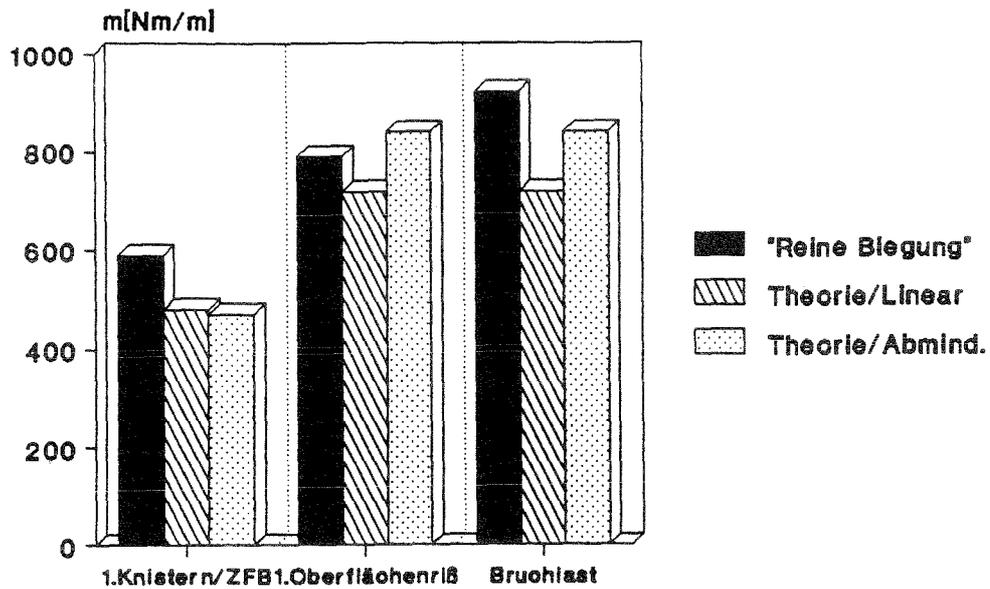


Diagramm 6.2.5

Laminat Nr. 2 / X-Rtg. / US

Krümmungen : Theorie - Experimentell

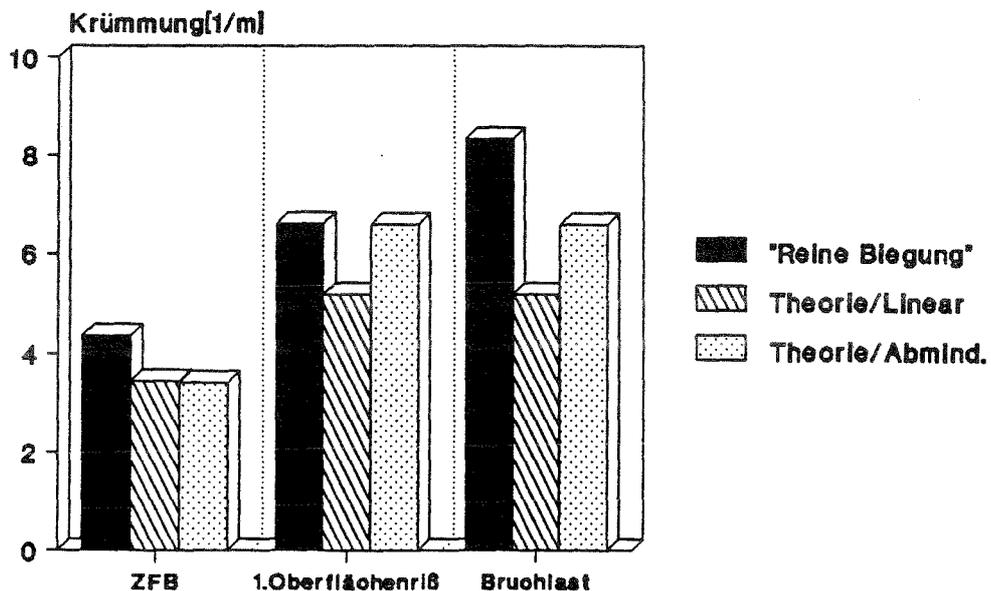
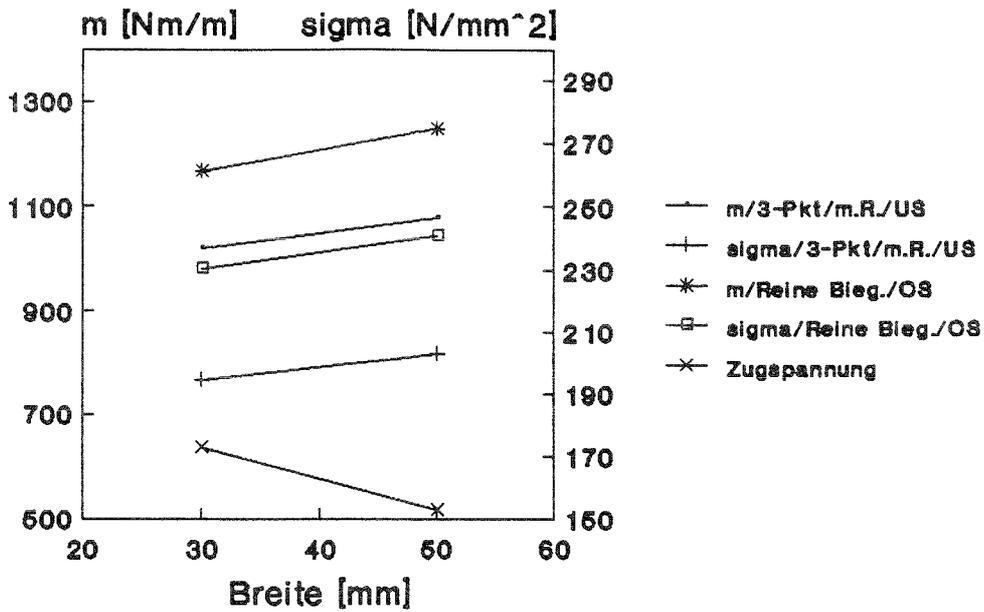


Diagramm 6.2.6

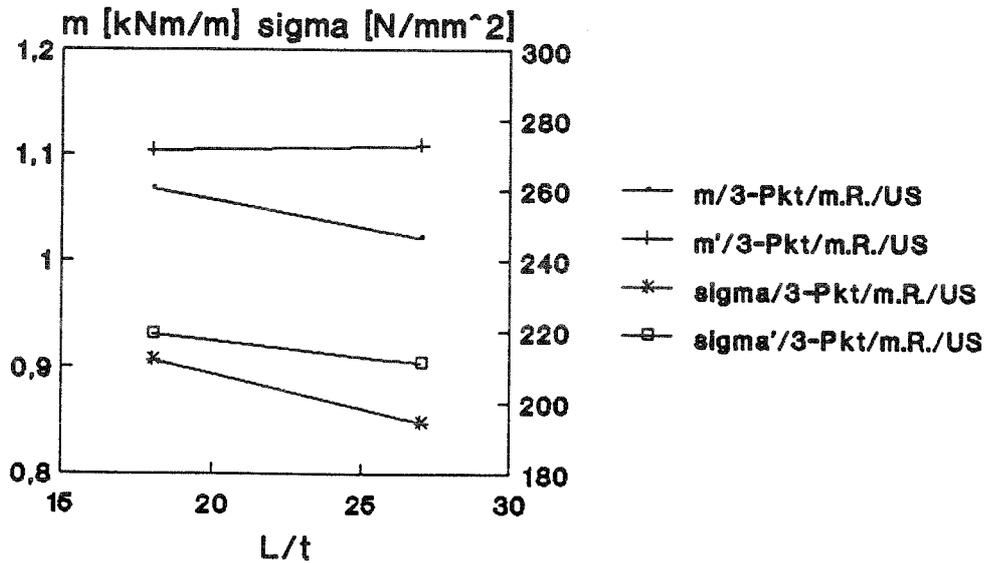
Laminat Nr.2 Bruchlasten als Funktion der Breite



Ungekrümmte Platte (X-Rtg.)

Diagramm 6.2.7

Laminat Nr.2 Bruchlasten der 3-Punkt-Biegung bei Variation des Auflagerabstandes



Ungekrümmte Platte (X-Rtg.)

Diagramm 6.2.8

Laminat Nr. 2 Elastizitätsmodule

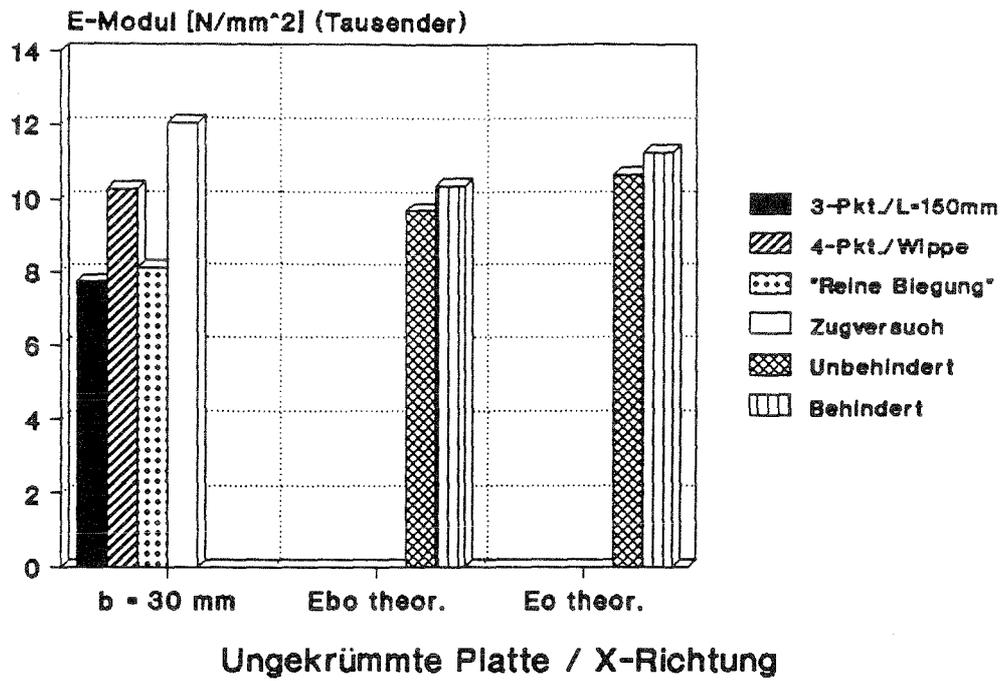


Diagramm 6.2.9

Einfluß der Prüfmethode auf die erzielten Maximallasten

(Diagramme 6.2.1, 6.2.2)

Im Gegensatz zu den Ergebnissen bei den meisten anderen Laminaten liegt hier das Resultat der Pendelvorrichtung deutlich über allen anderen Werten. Damit ist ebenfalls die Randbedingung erfüllt, daß die Ergebnisse der Drei-Punkt-Pendelbiegung wieder die obere Grenze liefern, jedoch liegt die Grenze bei diesem relativ großen Auflagerabstand ($L/t=27$) zu hoch.

Die Ergebnisse der reibungsfreien Dreipunktbiegung liegen hier etwas unter der Werten der "reinen" Biegung, so daß mit einer zusätzlichen Momentensteigerung durch die Verformung zu rechnen ist.

Es wird bei den Versuchen mit der Biegeprüfvorrichtung deutlich, daß die Differenzen bei den Belastungsrichtungen "OS"/"US" (Ober-/Unterseite auf Druck belastet) nicht nur aus unterschiedlichen Reibungszahlen resultieren, also aufgrund der unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheit. Denn bei der "reinen" Biegung ist dieser Einfluß nicht vorhanden, da das freie Auflager der Verformung auf Stützrollen folgt.

Reibungszahlen für die Dreipunktbiegung

(Diagramme 6.2.3, 6.2.4)

Hier ergeben sich bei den Versuchen mit kürzerem Auflagerabstand größere Reibungszahlen. Dies läßt sich mit der höheren Kraft und der damit verbundenen, größeren örtlichen Verformung erklären.

Die "reibungsfreien" Versuche liefern wieder deutlich geringere Reibungszahlen.

	Ansatz	L/t	Rtg.	Schnittmoment	Spannungen	Mittelwert
Mit Reibung	"	27	US	0.87	0.54	0.70
	*	27		1.03	0.68	0.85
	"	18		1.50	1.25	1.38
"Ohne" Reibung	"	27	US	0.17	0.17	0.17
	*	27		0.28	0.30	0.29

Tabelle 6.2.1 Ermittelte Reibungszahlen

Vergleich der theoretischen und experimentellen Maximallasten

(Diagramme 6.2.5, 6.2.6)

Das Resultat aus dem nichtlinearen, abgeminderten Ansatz liefert auch hier eine bessere Übereinstimmung mit den Ergebnissen der "reinen" Biegung als der lineare Ansatz, liegt aber unter den erzielten Daten. Bei den Versuchen mit der Belastungsrichtung "OS" wurden noch höhere Werte bei der maximalen Krümmung und dem maximalen Schnittmoment erreicht.

Elastizitätsmodule

(Diagramm 6.2.9)

Der berechnete Biegemodul deckt sich wieder mit dem Versuchsergebnis von der Vierpunktbiegung mit "Wippe", während der Biegemodul der Dreipunktbiegung erwartungsgemäß zu niedrig ausfällt.

Das geringere Resultat aus der "reinen" Biegung läßt sich dadurch erklären, daß ein Vergleichswert aus einem Bruchversuch herangezogen wurde und daß die Vorbelastung durch das Eigengewicht des Vertikal-schlittens, bei dieser relativ geringen Probendicke, für eine Verformung vor der Laststeigerung sorgte.

Laminat Nr.3 Schnittmomente

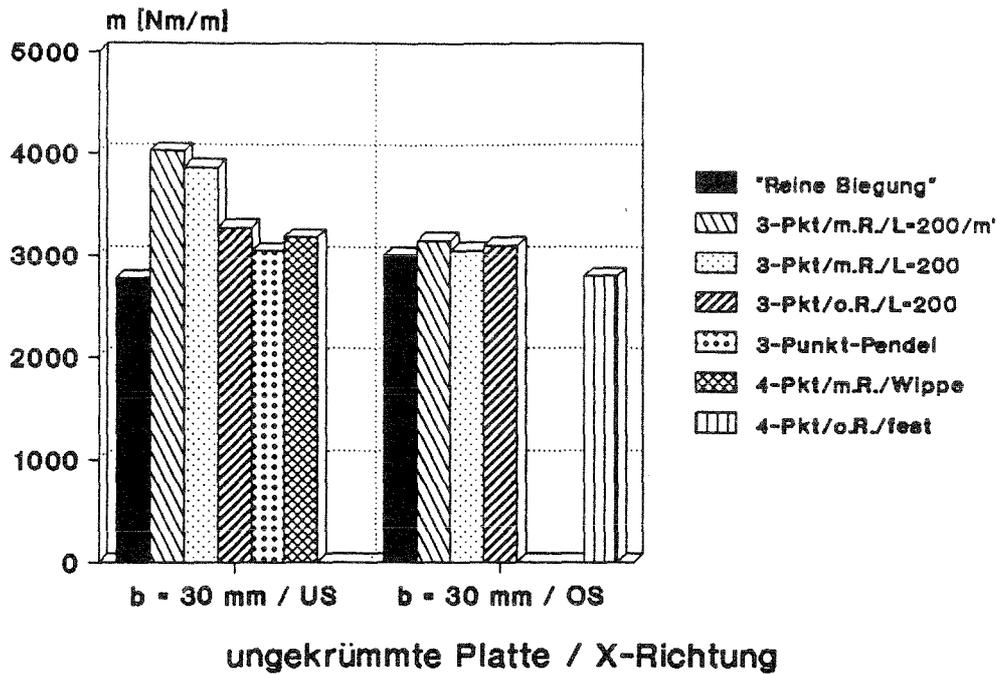


Diagramm 6.3.1

Laminat Nr.3 Spannungen

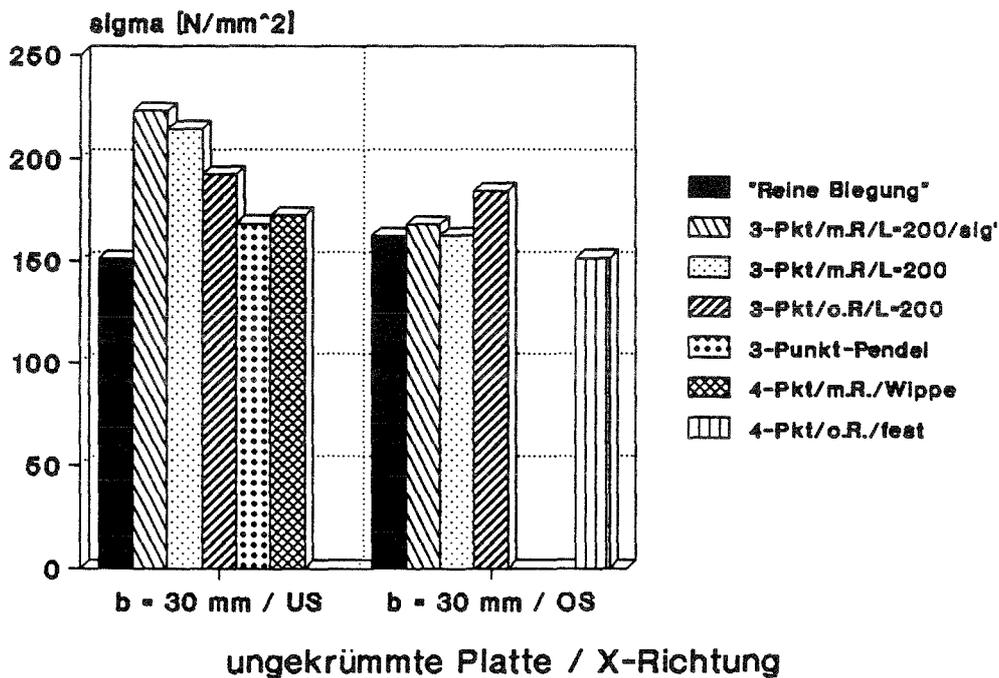


Diagramm 6.3.2

Laminat Nr.3 / X-Rtg. / US
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung
Maximale Schnittmomente

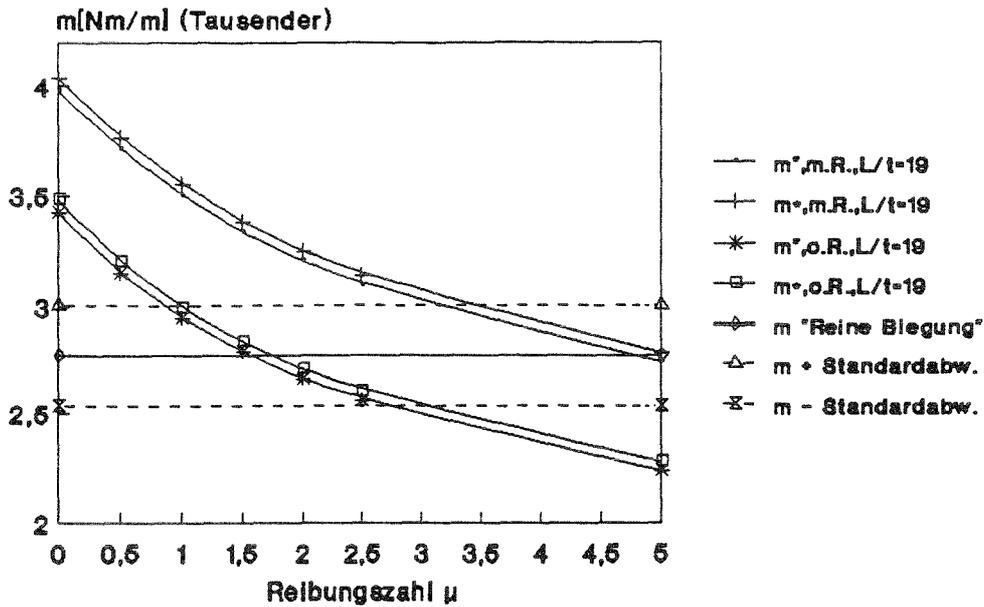


Diagramm 6.3.3

Laminat Nr.3 / X-Rtg. / US
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung
Biegebruchspannungen

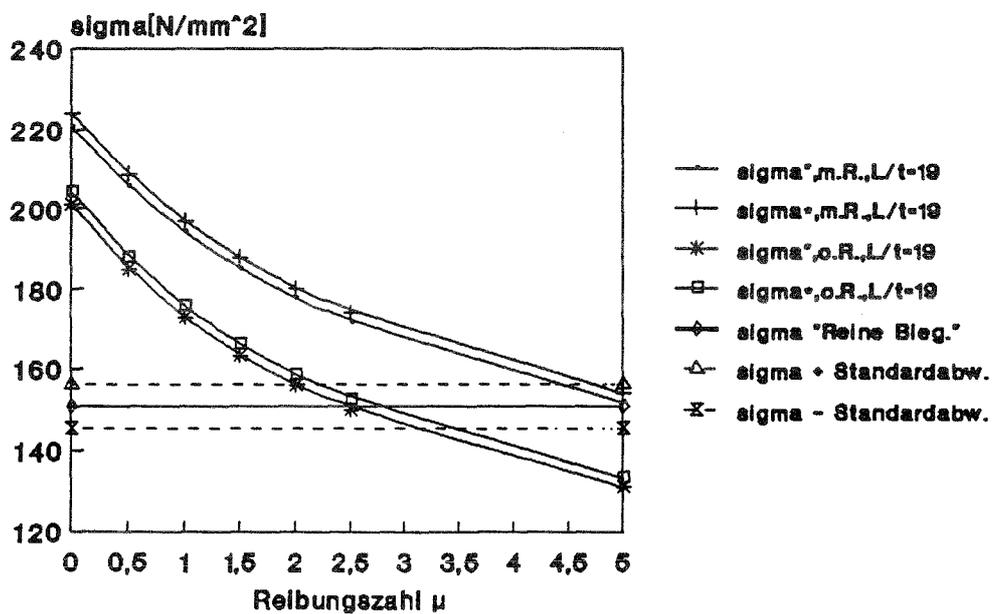


Diagramm 6.3.4

Laminat Nr.3 / X-Rtg. / OS
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung
Maximale Schnittmomente

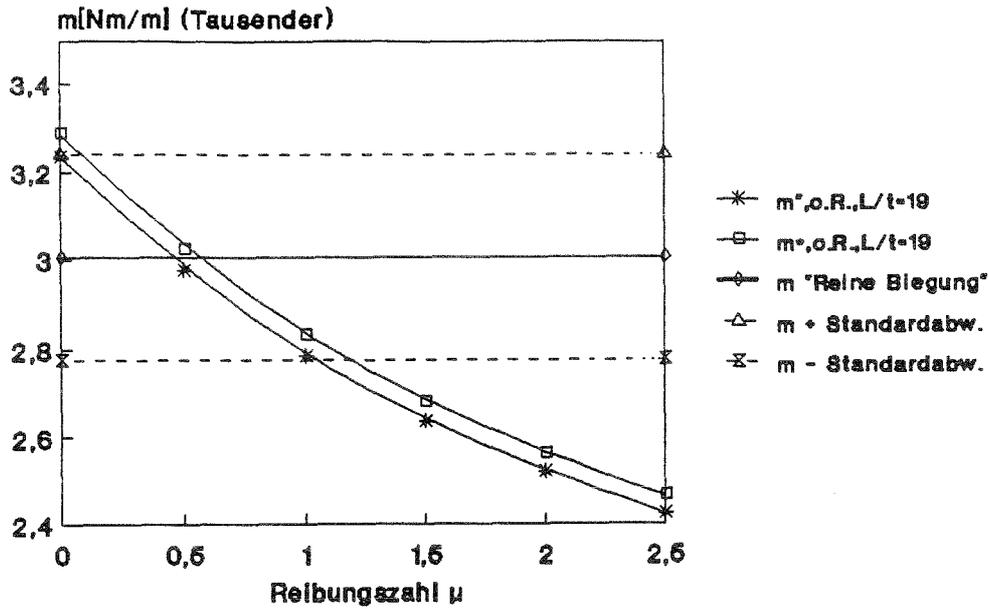


Diagramm 6.3.5

Laminat Nr.3 / X-Rtg. / OS
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung
Biegebruchspannungen

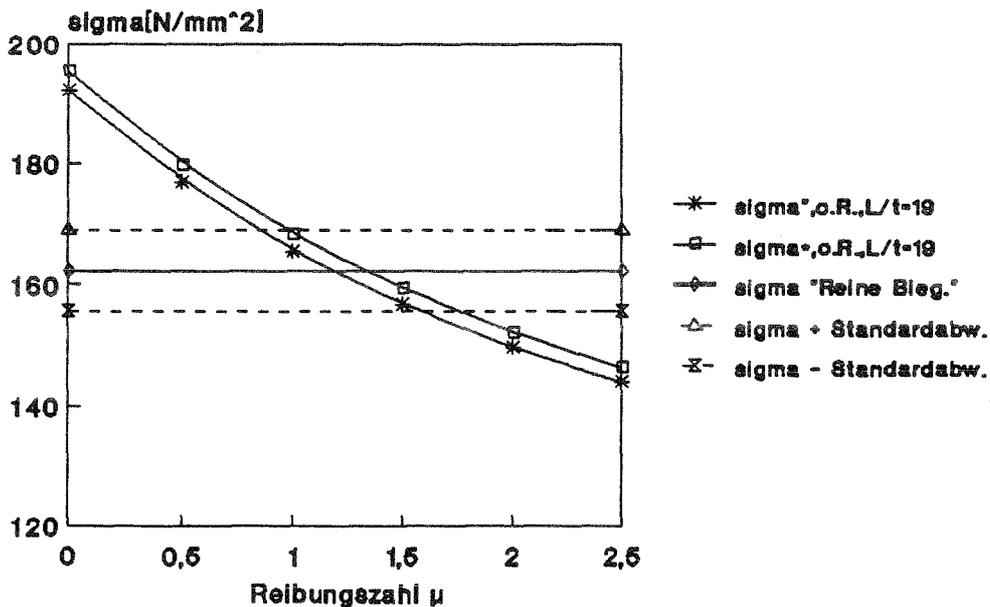


Diagramm 6.3.6

Laminat Nr. 3 / X-Rtg. / US

Schnittmomente : Theorie - Experimentell

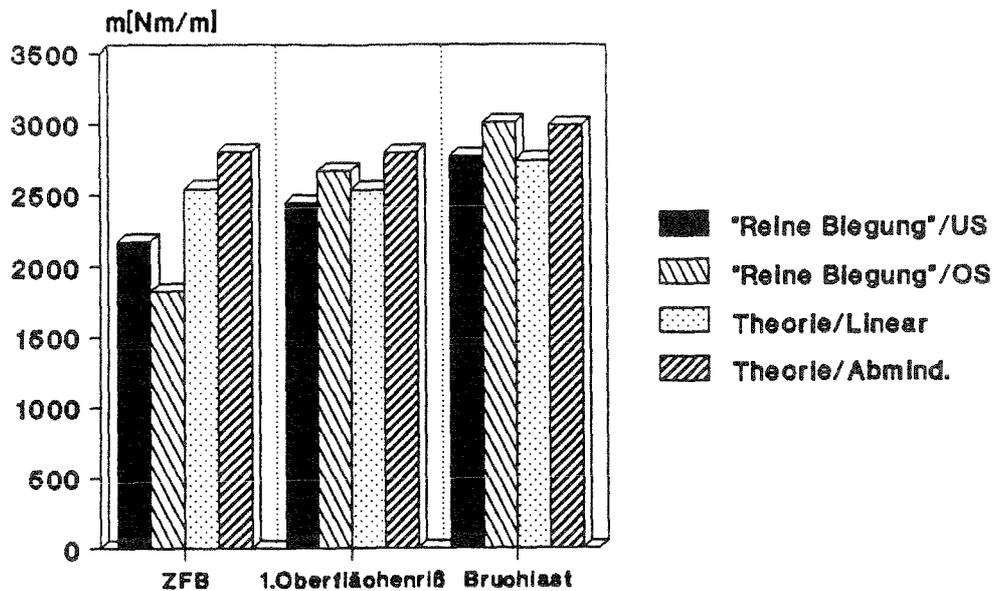


Diagramm 6.3.7

Laminat Nr. 3 / X-Rtg.

Krümmungen : Theorie - Experimentell

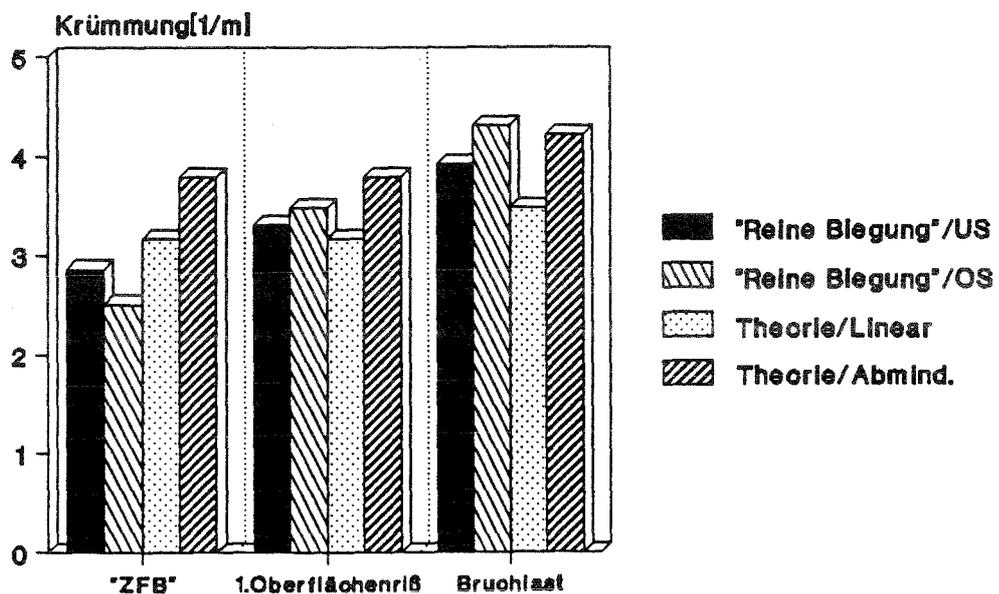
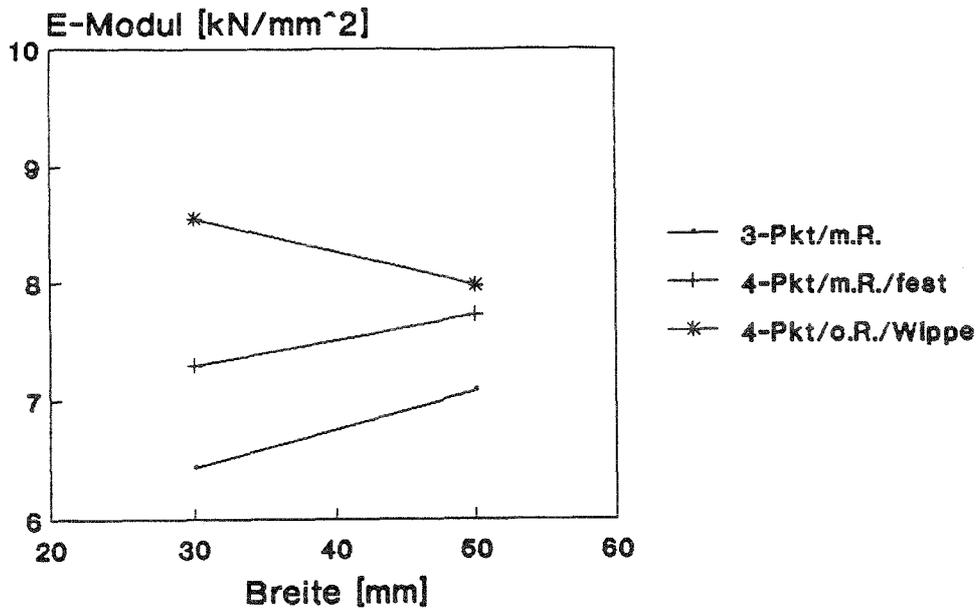


Diagramm 6.3.8

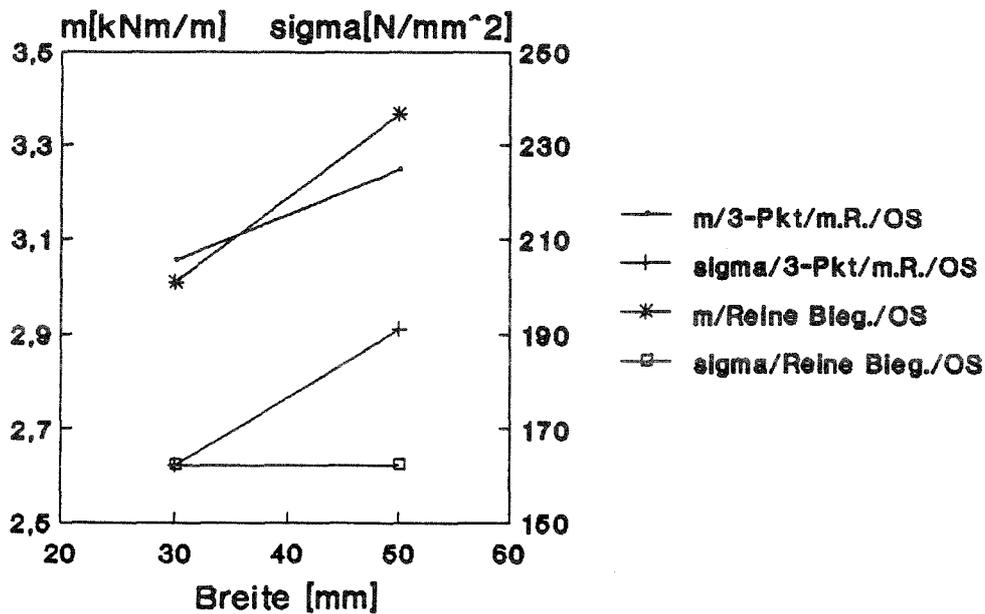
Laminat Nr.3 E-Module als Funktion der Breite



Ungekrümmte Platte (X-Rtg.)

Diagramm 6.3.9

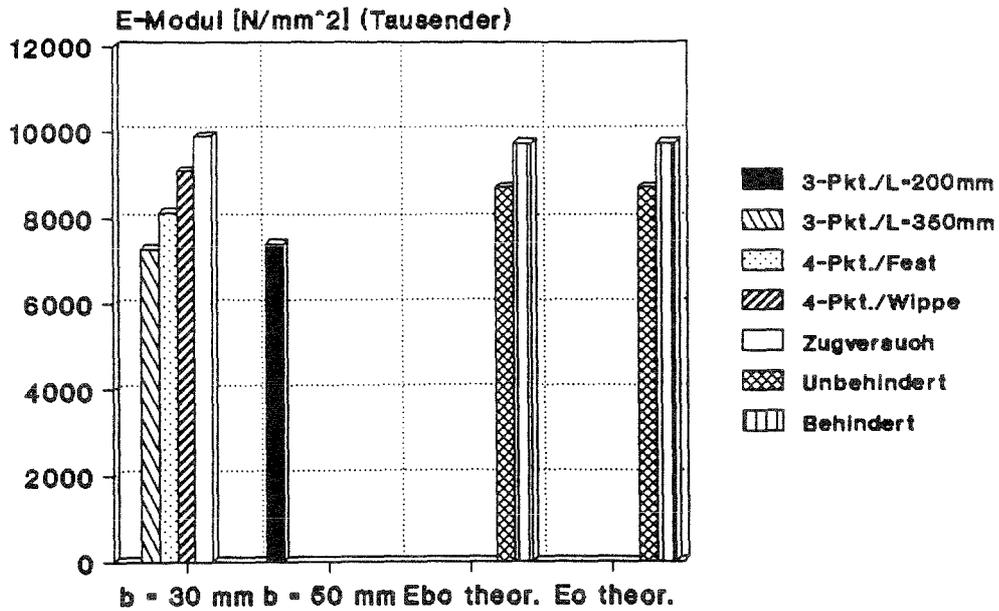
Laminat Nr.3 Bruchlasten als Funktion der Breite



Ungekrümmte Platte (X-Rtg.)

Diagramm 6.3.10

Laminat Nr. 3 Elastizitätsmodule



Ungekrümmte Platte / X-Richtung

Diagramm 6.3.11

Einfluß der Prüfmethode auf die erzielten Maximallasten

(Diagramme 6.3.1, 6.3.2)

Das Ergebnis der Dreipunktpendelbiegung wird bei der Biegerichtung "US" nur von der "reinen" Biegung unterboten. Bei dem Vergleich zwischen den "US"- und "OS"-Ergebnissen ist keine einheitliche Tendenz feststellbar. D.h. der Einfluß der Prüfmethode wird durch starke Schwankungen innerhalb des Laminates überlagert.

Das Versagen bei den Biegeversuchen erfolgte durch das Aufreißen der Zugseite.

Reibungszahlen für die Dreipunktbiegung

(Diagramme 6.3.3, 6.3.4, 6.3.5, 6.3.6)

	Ansatz	L/t	Rtg.	Schnittmoment	Spannungen	Mittelwert
Mit Reibung	"	19	US	4.81	5.07	4.94
	*			5.00	5.21	5.11
"Ohne" Reibung	"	19	US	1.58	2.54	2.06
	*			1.77	2.81	2.29
"Ohne" Reibung	"	19	OS	0.47	1.18	0.83
	*			0.57	1.35	0.96

Tabelle 6.3.1 Ermittelte Reibungszahlen

Vergleich der theoretischen und experimentellen Maximallasten

(Diagramme 6.3.7, 6.3.8)

Die für die theoretische Berechnung angesetzten Bruchspannungen und Bruchdehnungen (Zug/Druck) entsprechen bei diesem Laminat den ermittelten Werten, so daß hier geprüft werden kann, ob eine Spannungsumlagerung stattfindet, die sich außerhalb der Nichtlinearität der Schichten bewegt.

Man kann den Diagrammen entnehmen, daß die berechneten Werten für das Schnittmoment und die Bruchkrümmung bei dem nichtlinearen Ansatz zwischen den experimentellen "US"/"OS"-Ergebnissen der "reinen" Biegung liegen, was gegen eine weitergehende Spannungsumlagerung spricht, während das lineare Ergebnis, insbesondere bei der Krümmung, etwas zu niedrig liegt.

Elastizitätsmodule

(Diagramm 6.3.11)

Hier liegt das Ergebnis der Vierpunktbiegung mit "Wippe" zwischen den theoretischen, behinderten und unbehindertem, Resultaten. Das Versuchsergebnis der festen Vierpunktbiegung liegt unterhalb der beweglichen Vierpunkt- und oberhalb der Dreipunktbiegung, was für eine nicht ganz symmetrische Krafteinleitung durch die Dicken-differenzen spricht. Der mittlere Schubmodul lag bei 108 N/mm^2 , dieser Wert weist starke Schwankungen auf.

Laminat Nr.4 Schnittmomente

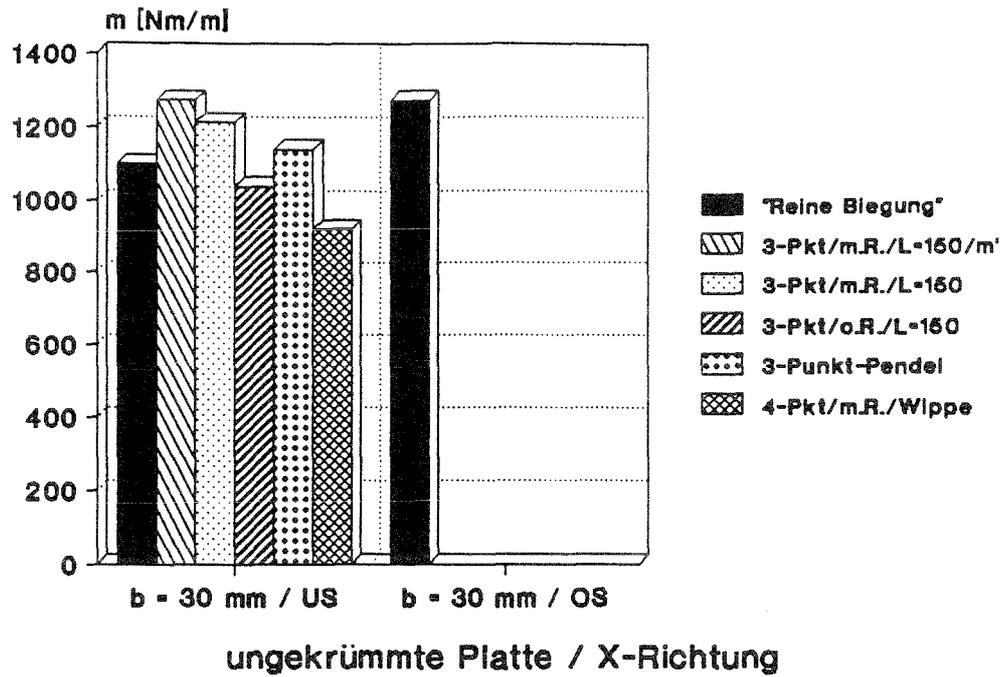


Diagramm 6.4.1

Laminat Nr.4 Spannungen

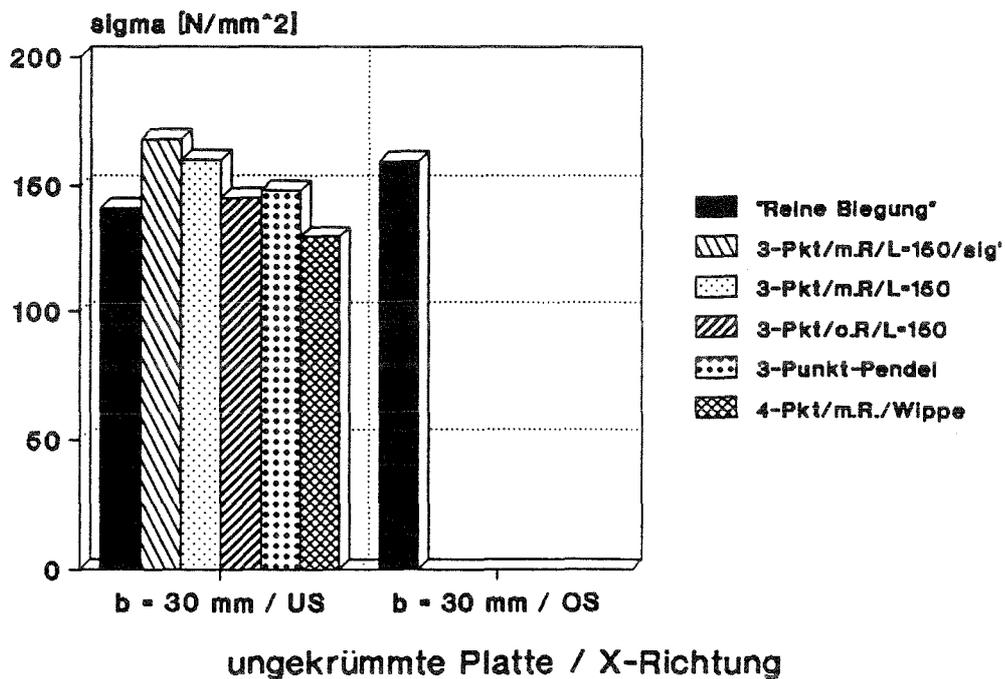


Diagramm 6.4.2

Laminat Nr.4 / X-Rtg. / US
 Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung
 Maximale Schnittmomente

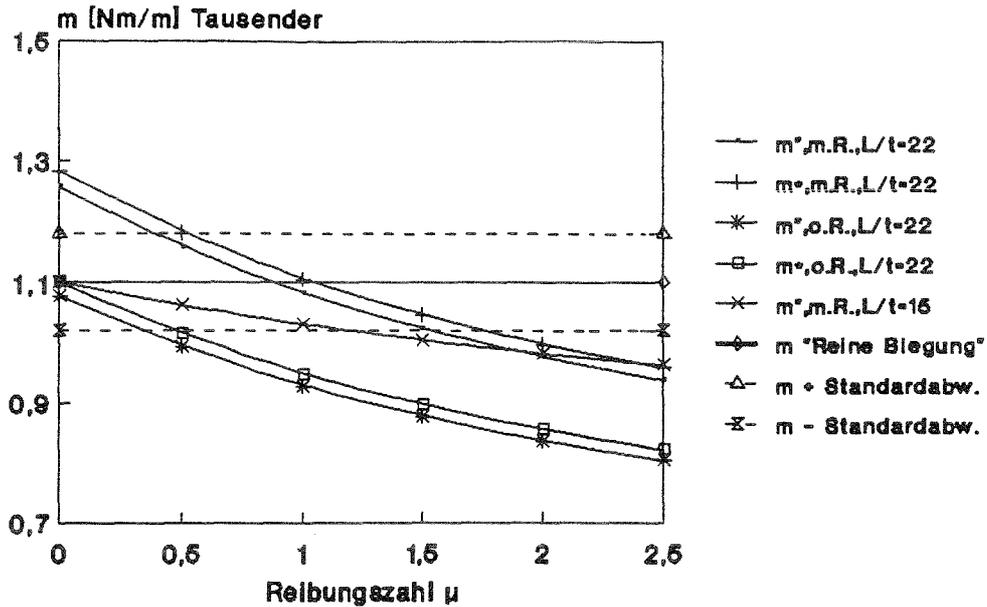


Diagramm 6.4.3

Laminat Nr.4 / X-Rtg. / US
 Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung
 Biegebruchspannungen

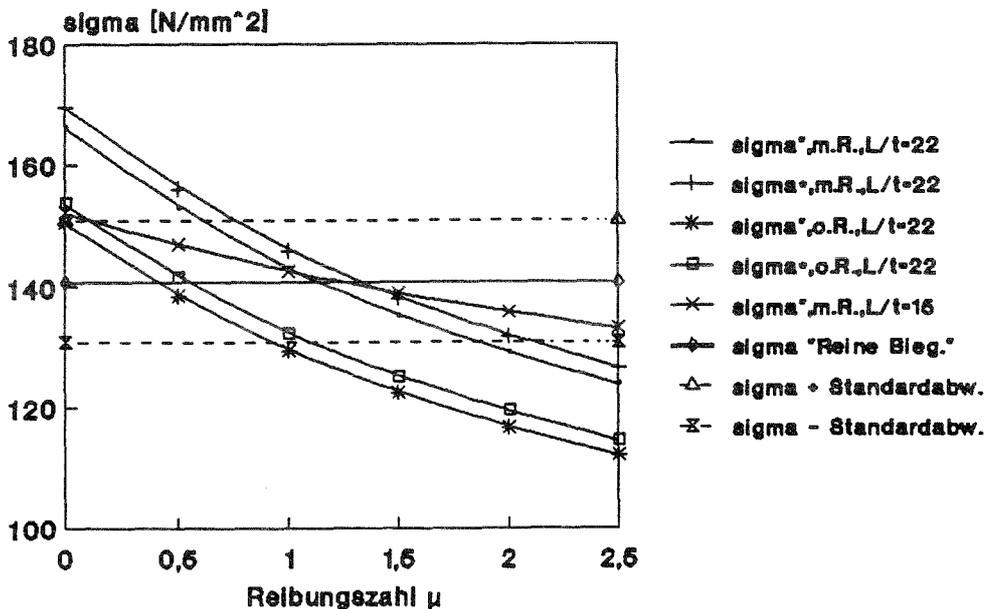


Diagramm 6.4.4

Laminat Nr. 4 / X-Rtg. / US

Schnittmomente : Theorie - Experimentell

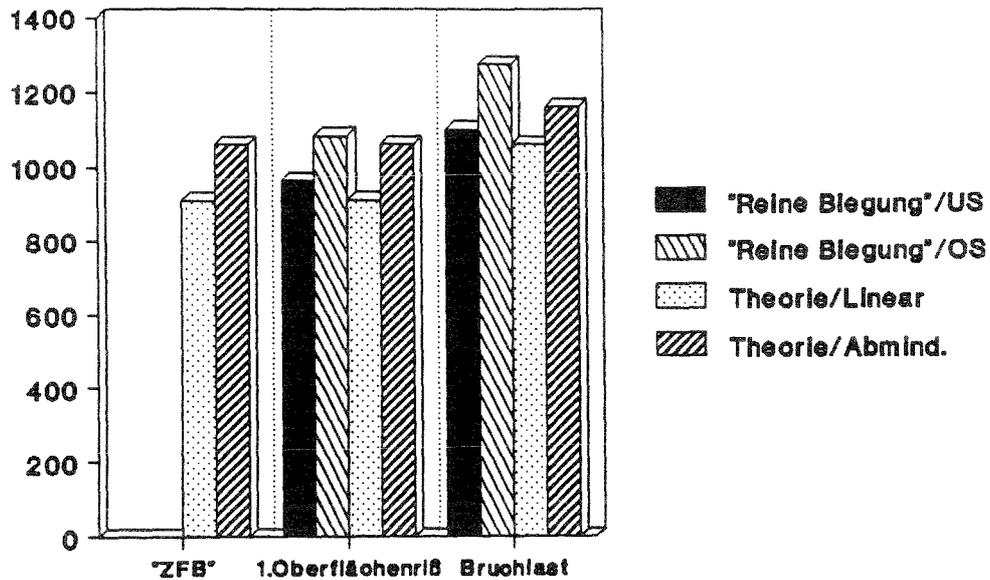


Diagramm 6.4.5

Laminat Nr. 4 / X-Rtg.

Krümmungen : Theorie - Experimentell

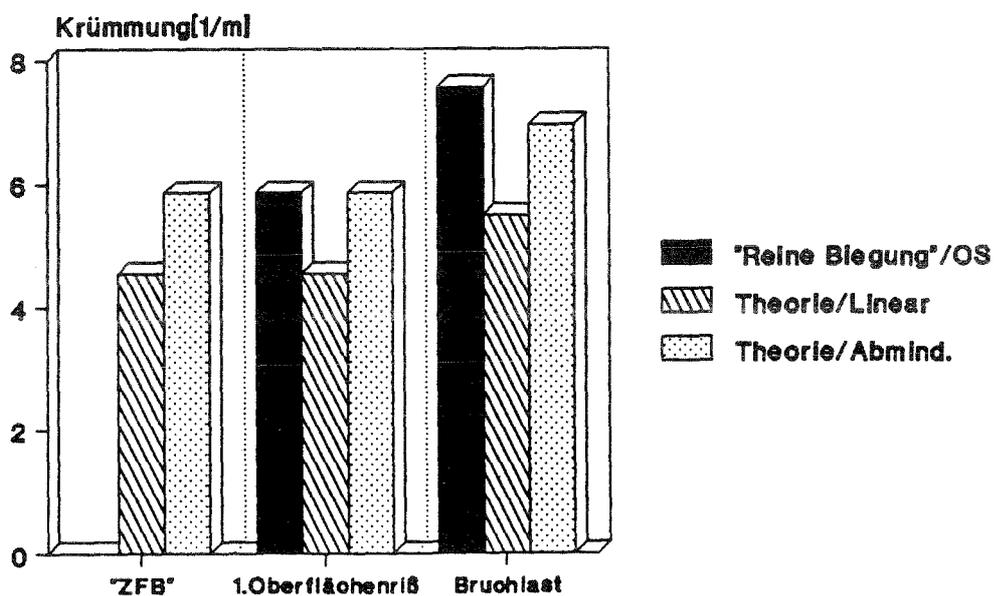
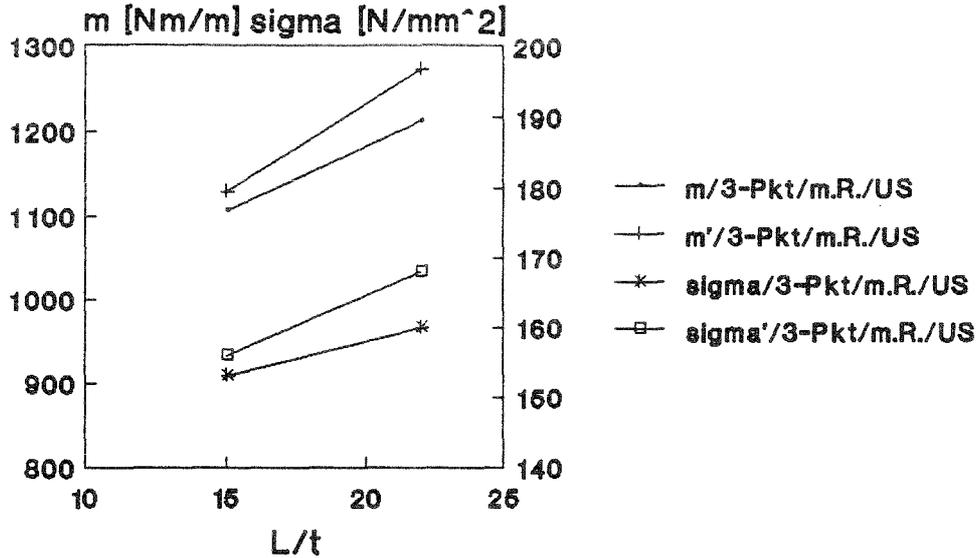


Diagramm 6.4.6

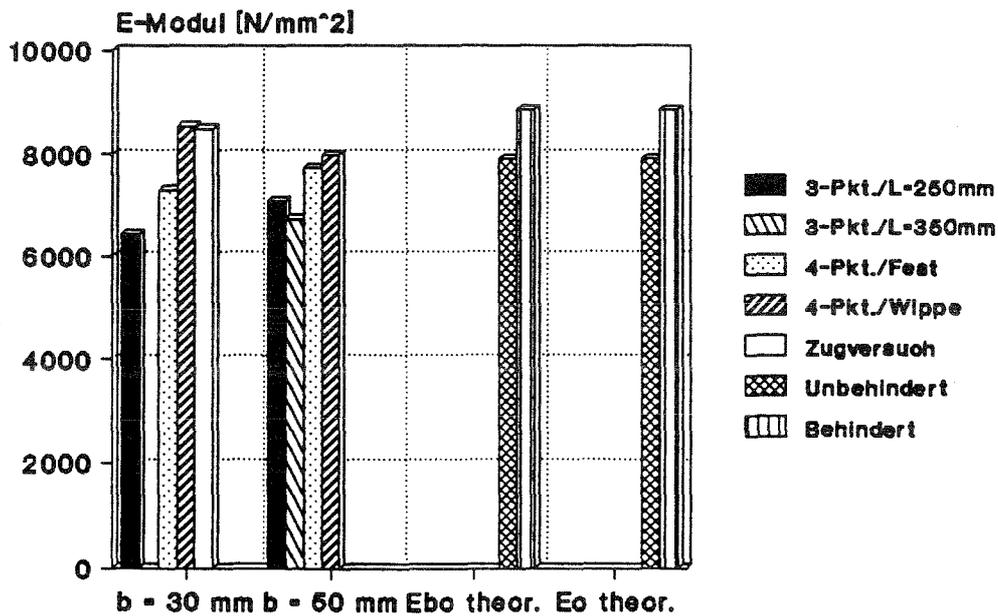
Laminat Nr.4 Bruchlasten der 3-Punkt-Biegung bei Variation des Auflagerabstandes



Ungekrümmte Platte (X-Rtg.)

Diagramm 6.4.7

Laminat Nr. 4 Elastizitätsmodule



Ungekrümmte Platte / X-Richtung

Diagramm 6.4.8

Einfluß der Prüfmethode auf die erzielten Maximallasten

(Diagramme 6.4.1, 6.4.2)

Die höchsten Werte sind wieder mit der reibungsbehafteten Dreipunktbiegung ermittelt worden, bis auf diese Resultate liegen die anderen Ergebnisse unterhalb des Dreipunktpendelwertes, auch bei der Vierpunktbiegung mit "Wippe", trotz oder wegen des Reibungseinflusses, denn diese Proben versagten im Zugbereich, so daß der Riß durch die zusätzliche Zugkraft eingetreten sein könnte.

Auch hier ist wieder deutlich die Differenz zwischen den Belastungsrichtungen "US" und "OS" erkennbar, obwohl es sich um ein symmetr. Laminat handelt.

Reibungszahlen für die Dreipunktbiegung

(Diagramme 6.4.3, 6.4.4)

Da dieses Laminat die gleiche Oberfläche und Harz besitzt, wie das Laminat Nr.3, kann man aus dem Ergebnis schließen, daß sich die hohen Reibungszahlen beim Laminat Nr.3 durch andere Einflüsse ergaben. Deutlich wird beim Vergleich der Reibungszahlen auch wieder der Dickeneinfluß, so ergeben sich bei den Spannungen fast gleich große Reibungszahlen bei den unterschiedlichen Auflagerabständen, während bei den Maximalmomenten eine große Differenz besteht.

	Ansatz	L/t	Rtg.	Schnittmoment	Spannungen	Mittelwert
Mit Reibung	"	22	US	0.89	1.13	1.01
	*			1.06	1.34	1.20
	"	15		0.00	1.28	0.64
"Ohne" Reibung	"		US	-	0.42	-
	*			0.00	0.57	0.29

Tabelle 6.4.1 Ermittelte Reibungszahlen

Vergleich der theoretischen und experimentellen Maximallasten

(Diagramme 6.4.5, 6.4.6)

Bei diesem Laminat bestehen die gleichen Randbedingungen wie beim Laminat Nr.3 und die theoretischen Ergebnisse des nichtlinearen Ansatzes liegen ebenfalls zwischen den Versuchsergebnissen aus der "reinen" Biegung mit den Belastungsrichtungen "US"/"OS".

Elastizitätsmodule

(Diagramm 6.4.8)

Hier liegen sowohl die Werte aus dem Zugversuch, als auch die Werte der Vierpunktbiegung mit "Wippe" zwischen den berechneten Resultaten bei behinderter und unbehinderter Querkontraktion, während die feste Vierpunktbiegung und die Dreipunktbiegung geringere Werte liefern.

Laminat Nr.5 Schnittmomente

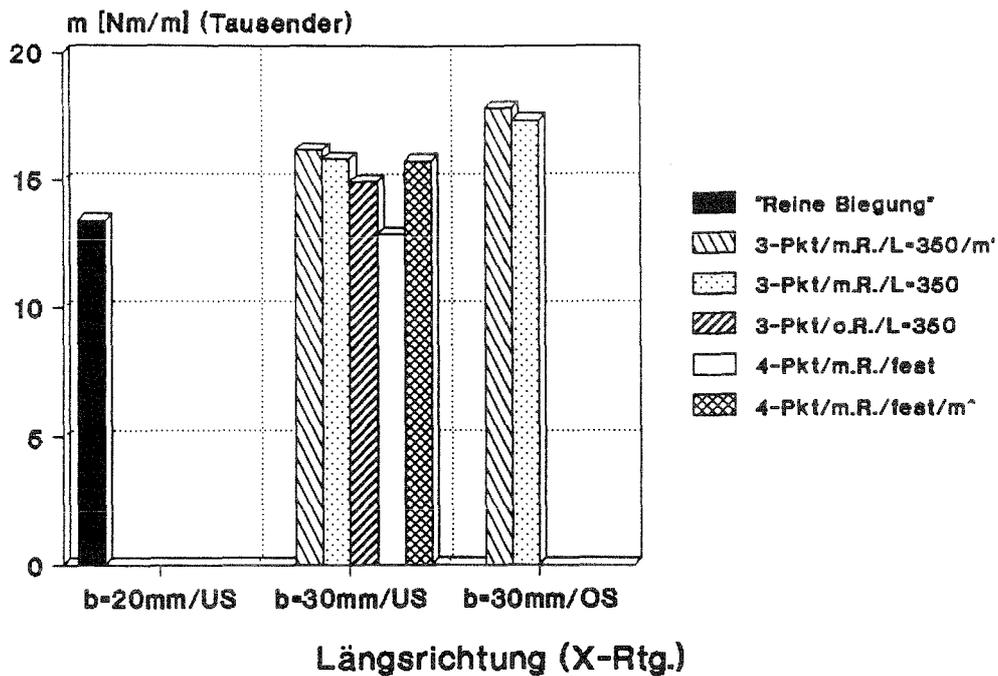


Diagramm 6.5.1

Laminat Nr.5 Spannungen

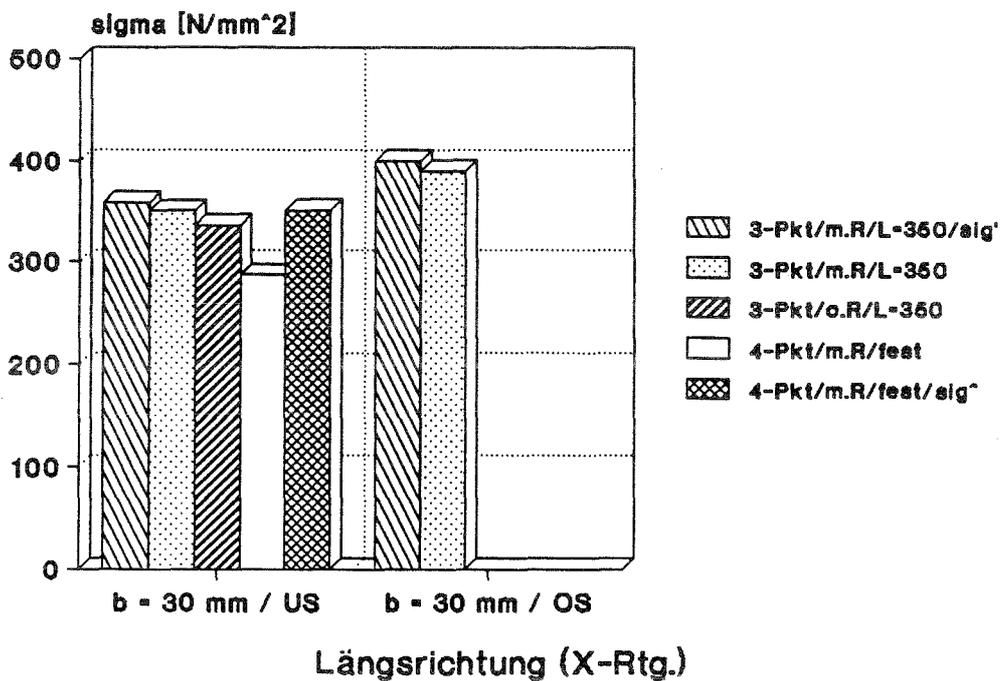


Diagramm 6.5.2

Laminat Nr.5 / X-Rtg. / US
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung
Maximale Schnittmomente

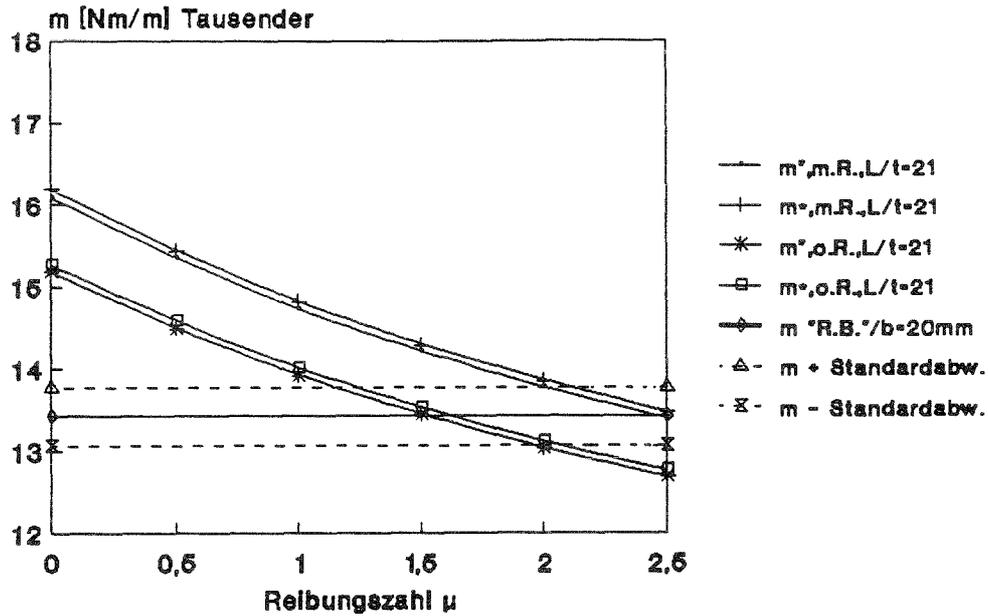


Diagramm 6.5.3

Laminat Nr.5 / X-Rtg. / US
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung
Biegebruchspannungen

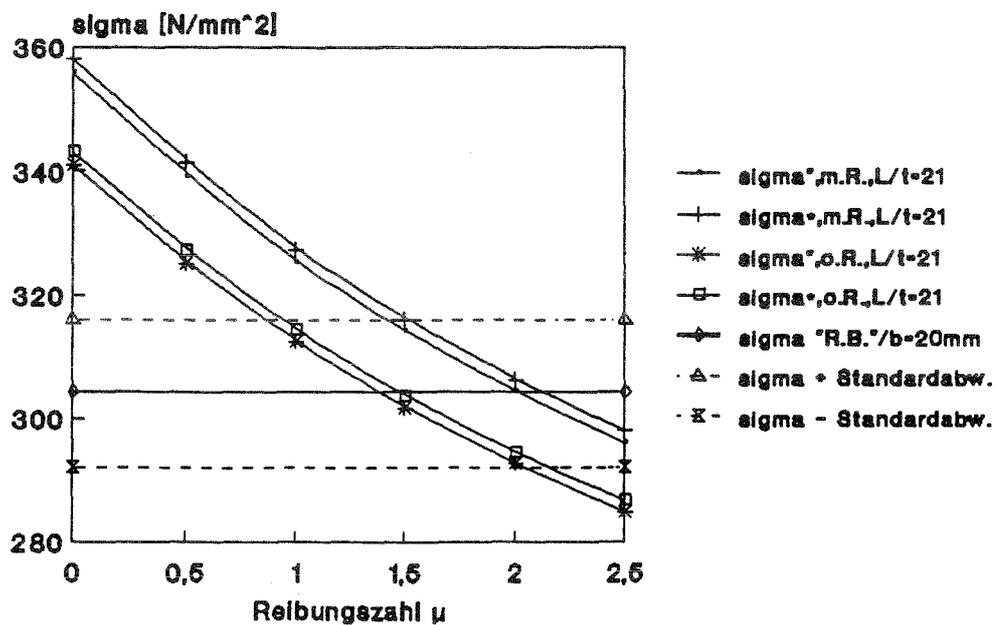


Diagramm 6.5.4

Laminat Nr. 5 / X-Rtg. / US

Schnittmomente : Theorie - Experimentell

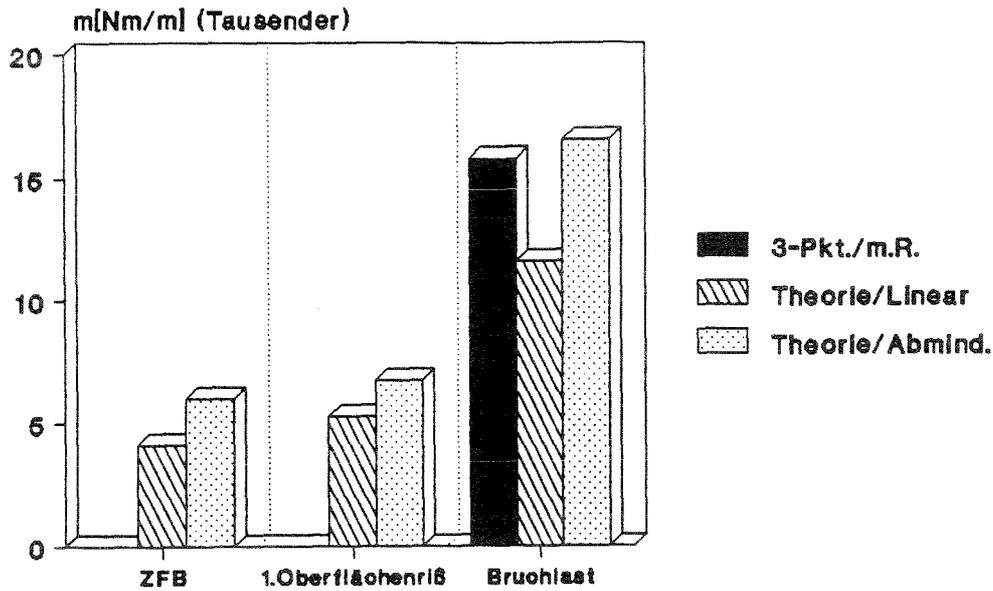


Diagramm 6.5.5

Laminat Nr. 5 / X-Rtg. / US

Krümmungen : Theorie - Experimentell

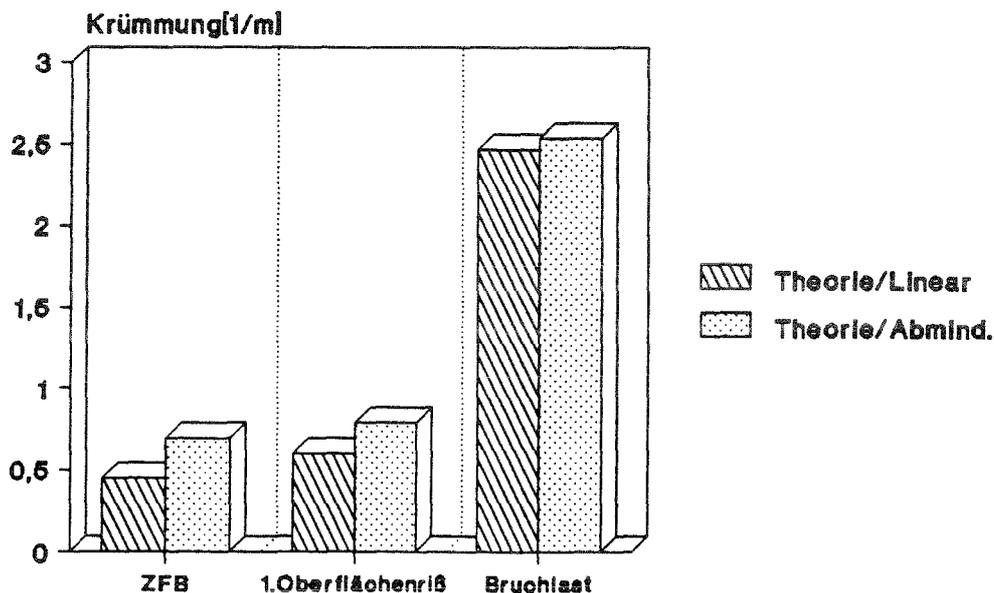


Diagramm 6.5.6

Laminat Nr.5 E-Module als Funktion der Breite

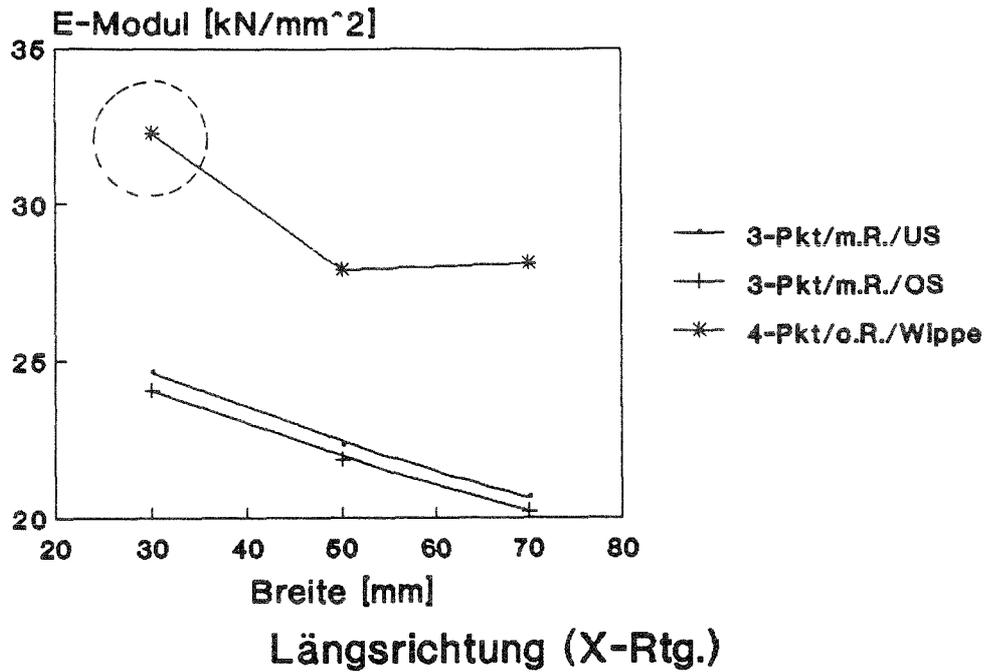


Diagramm 6.5.7

Laminat Nr.5 Bruchlasten als Funktion der Breite

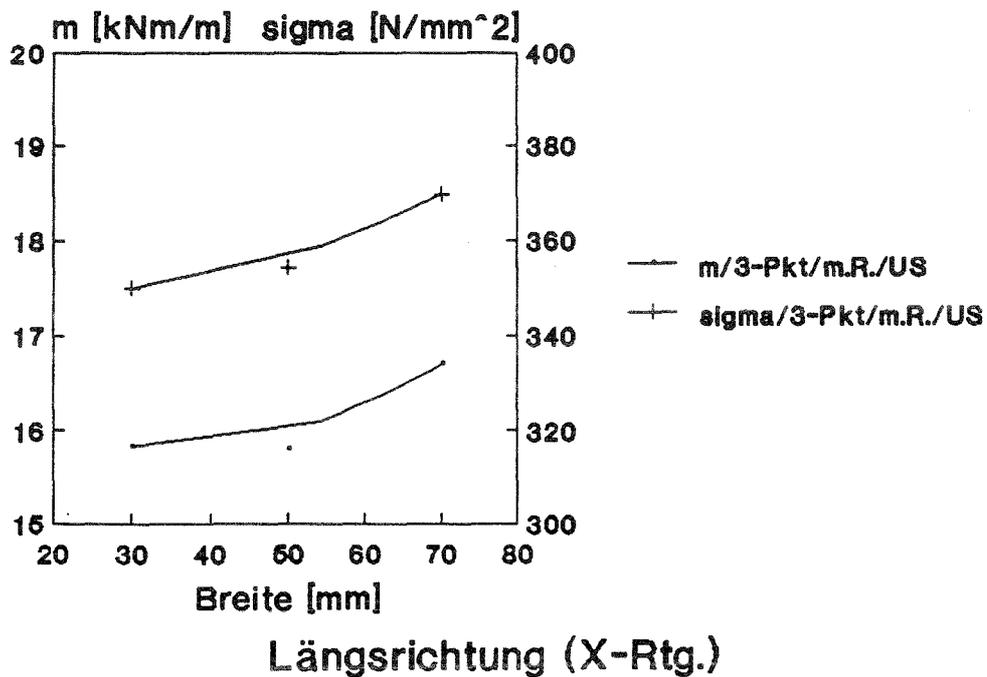
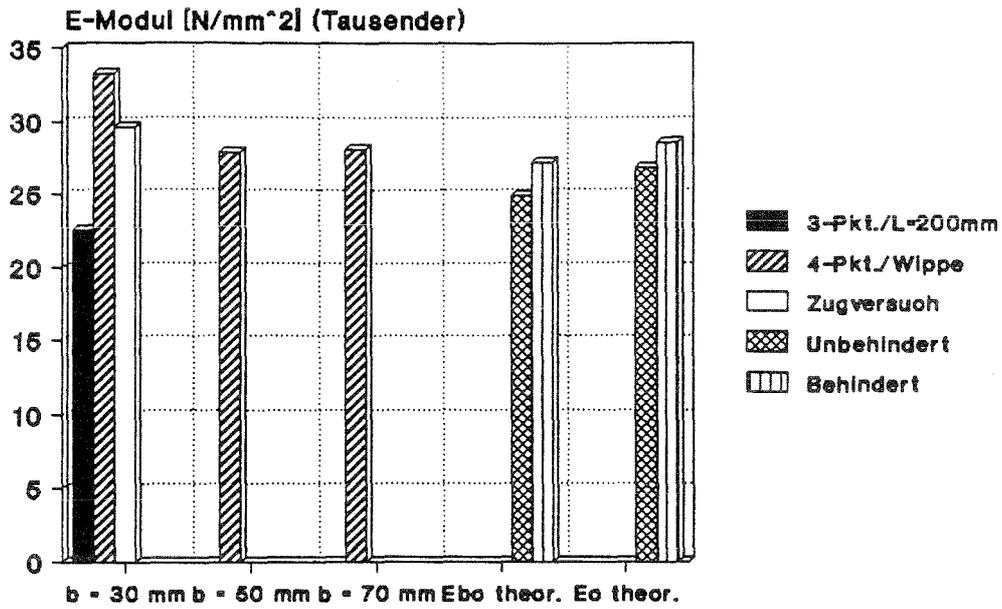


Diagramm 6.5.8

Laminat Nr. 5 Elastizitätsmodule



gekr. Platte r=800 / X-Richtung

Diagramm 6.5.9

Einfluß der Prüfmethode auf die erzielten Maximallasten

(Diagramme 6.5.1, 6.5.2, 6.5.3)

Bei den Dreipunktresultaten zeigen sich Differenzen zwischen der positiven und negativen Momentenbelastung (US/OS) von 10%, was aus der Laminatunsymmetrie und aus den unterschiedlichen Reibungszahlen (örtliche Verformung durch Querkrümmung am Auflager Skizze 2.4) resultiert. Zwischen dem Versuch "3-Pkt/m.R./OS" und "3-Pkt/o.R./US" ergab der "reibungsfreie" Versuch eine 15% geringere Bruchspannung.

Von der Biegeprüfvorrichtung liegen nur Vergleichswerte mit einer Probenbreite $b=20$ mm vor, da die Maximallast der Maschine erreicht wurde, so daß diese Werte durch den Randeinfluß etwas zu niedrig sein dürften.

Deutlich niedriger liegt wieder das Ergebnis der Vierpunktbiegung mit festem Druckstempel.

Die Steigerung der erzielten Maximallasten bei zunehmender Breite (Diagramm 6.5.8) resultiert nicht nur aus dem Randeinfluß, sondern es wird durch erhöhte Reibung aufgrund der örtlichen Verformung eine größere Bruchspannung vorgetäuscht.

Reibungszahlen für die Dreipunktbiegung

(Diagramme 6.5.3, 6.5.4)

Da in diesem Fall als Vergleichswerte von der "reinen" Biegung mit einer Probenbreite von $b=20$ mm herangezogen werden mußten, ergeben sich etwas zu große Reibungszahlen.

	Ansatz	L/t	Rtg.	Schnittmoment	Spannungen	Mittelwert
Mit Reibung	"	21	US	2.48	2.00	2.24
	*			2.55	2.14	2.35
"Ohne" Reibung	"	21	US	1.52	1.39	1.46
	*			1.61	1.49	1.55

Tabelle 6.5.1 Ermittelte Reibungszahlen

Vergleich der theoretischen und experimentellen Maximallasten

(Diagramme 6.5.5, 6.5.6)

In diesem Fall liefert die Theorie nach dem 2. Ansatz zu hohe Werte, jedoch ist zu berücksichtigen, daß in diesem Fall der experimentelle Wert durch den erwähnten Randeinfluß zu niedrig ist.

Elastizitätsmodule

(Diagramm 6.5.8, 6.5.9)

Der Dreipunktbiegeversuch liefert den geringsten Wert, aus dem Vergleich mit der Vierpunktbiegung wurden interlaminare Schubmodule zwischen 383 bis 698 N/mm² ermittelt. Der Wert der Vierpunktbiegung bei $b=30$ mm ist als Ausreißer anzusehen. Ansonsten zeigt sich bei der Ermittlung des Breiteneinflusses (Diagramm 6.5.8) bei der 3-Pkt-Bieg. ein Absinken der Resultate bei zunehmender Breite, was sich durch die örtliche Verformung am Auflager erklären läßt, wobei Unterschiede bei der Belastungsrichtung existieren, während bei der Vierpunktbiegung erwartungsgemäß ein Anstieg der E-Module zu verzeichnen ist.

Laminat Nr.5 Schnittmomente

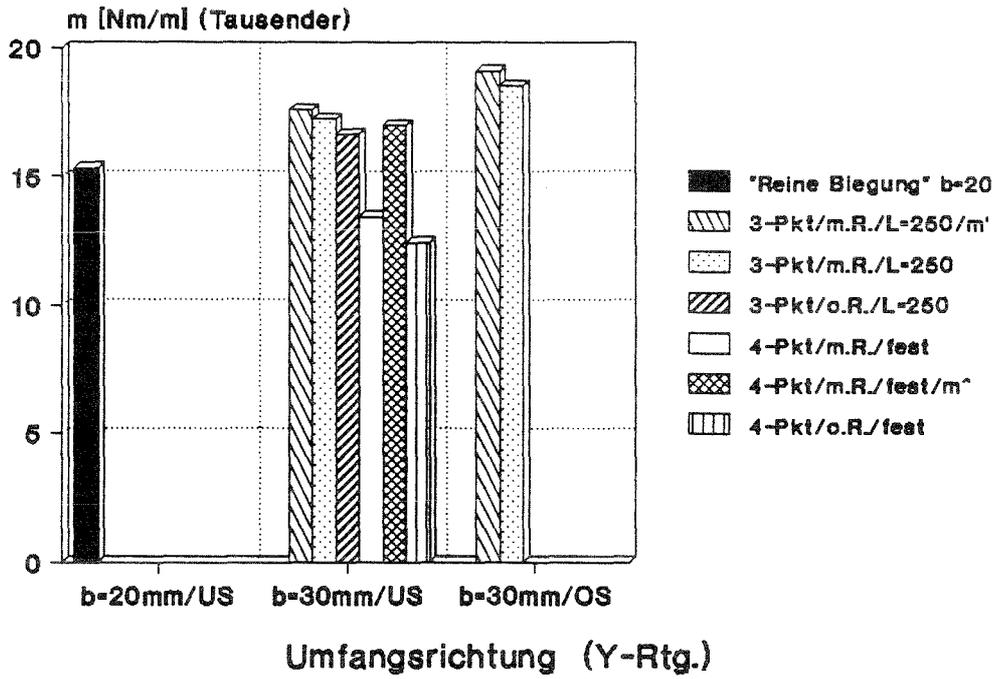


Diagramm 6.5.10

Laminat Nr.5 Spannungen

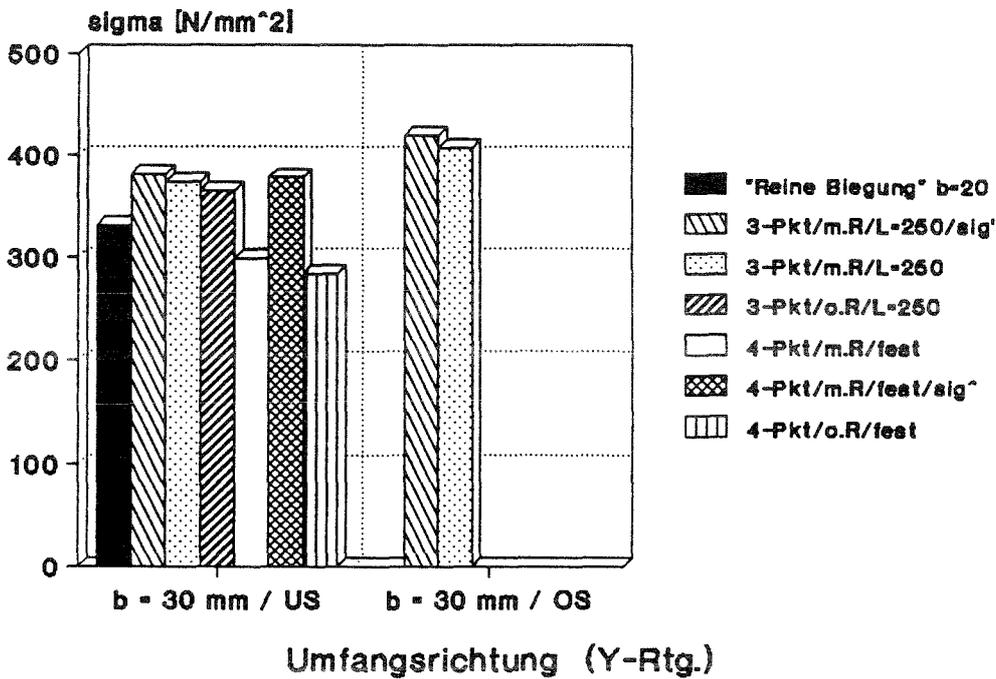


Diagramm 6.5.11

Laminat Nr.5 / Y-Rtg. / US
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung
Maximale Schnittmomente

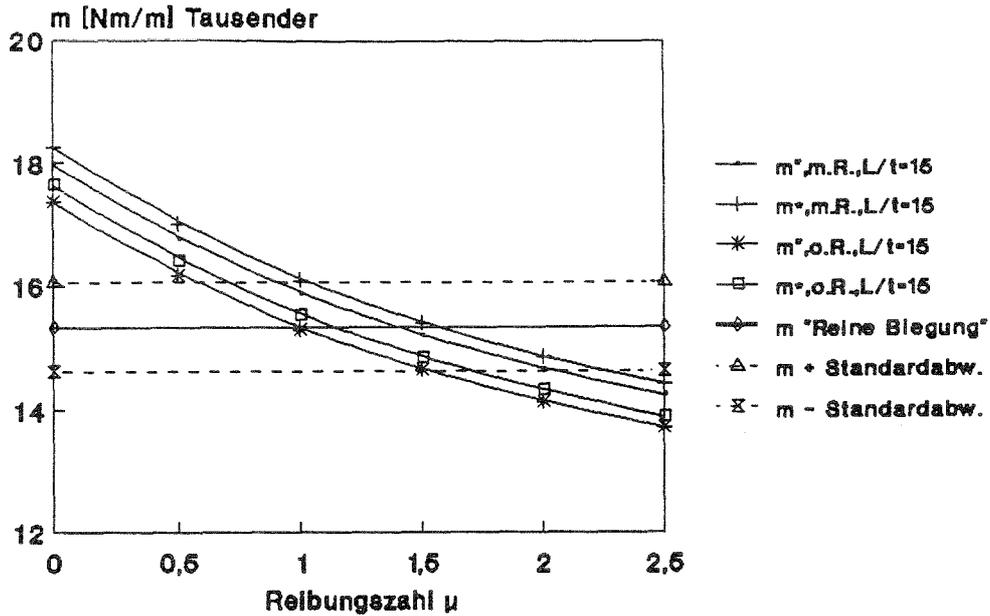


Diagramm 6.5.12

Laminat Nr.5 / Y-Rtg. / US
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung
Biegebruchspannungen

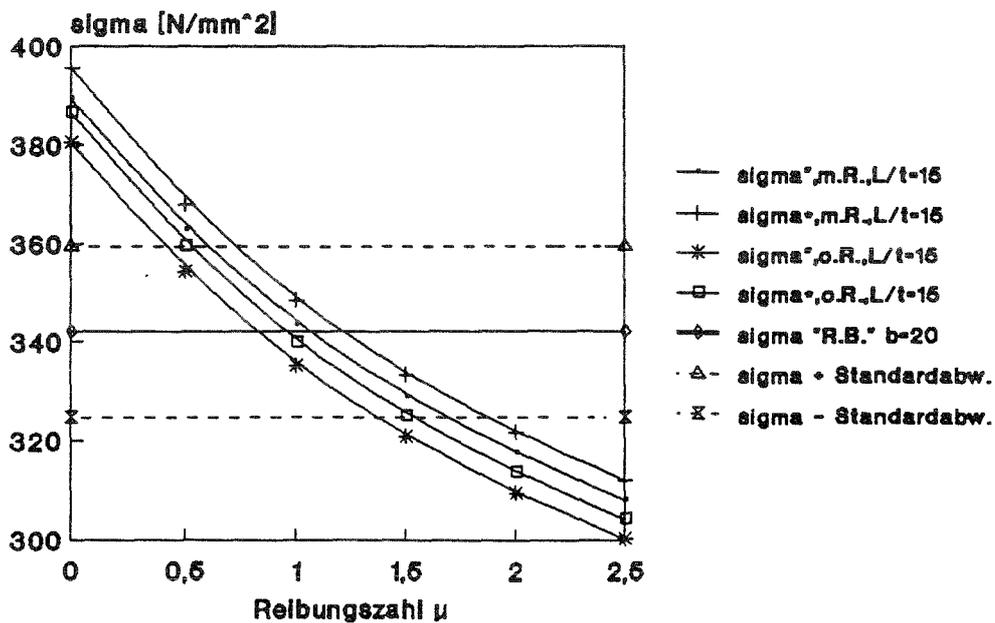


Diagramm 6.5.13

Laminat Nr. 5 / Y-Rtg. / US

Schnittmomente : Theorie - Experimentell

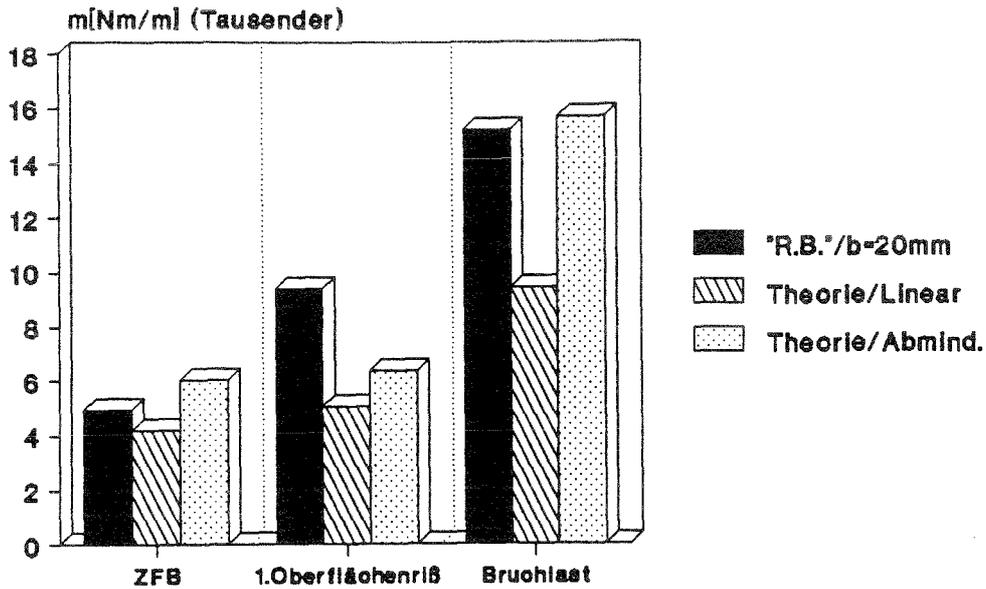


Diagramm 6.5.14

Laminat Nr. 5 / Y-Rtg. / US

Krümmungen : Theorie - Experimentell

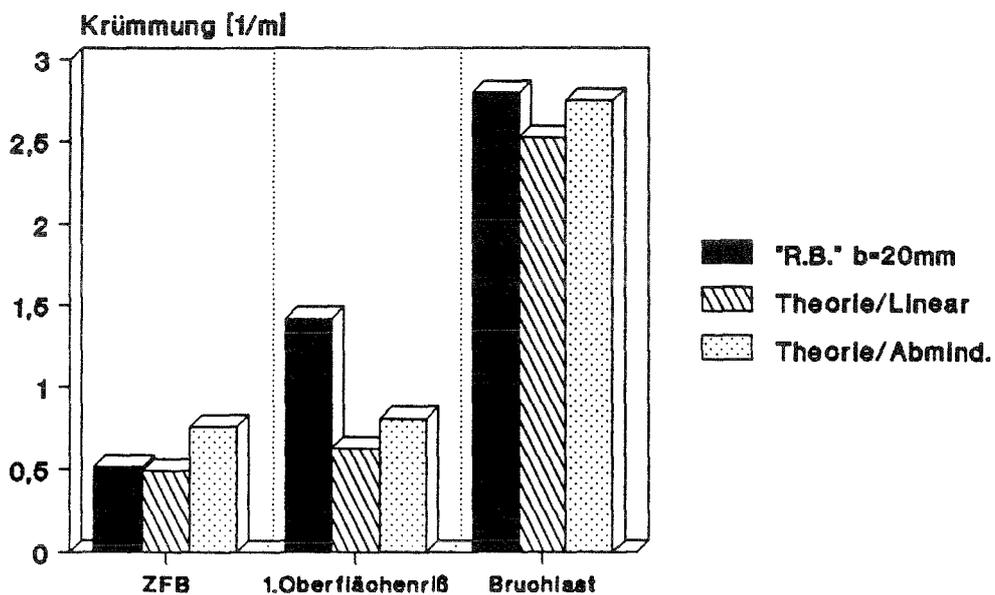
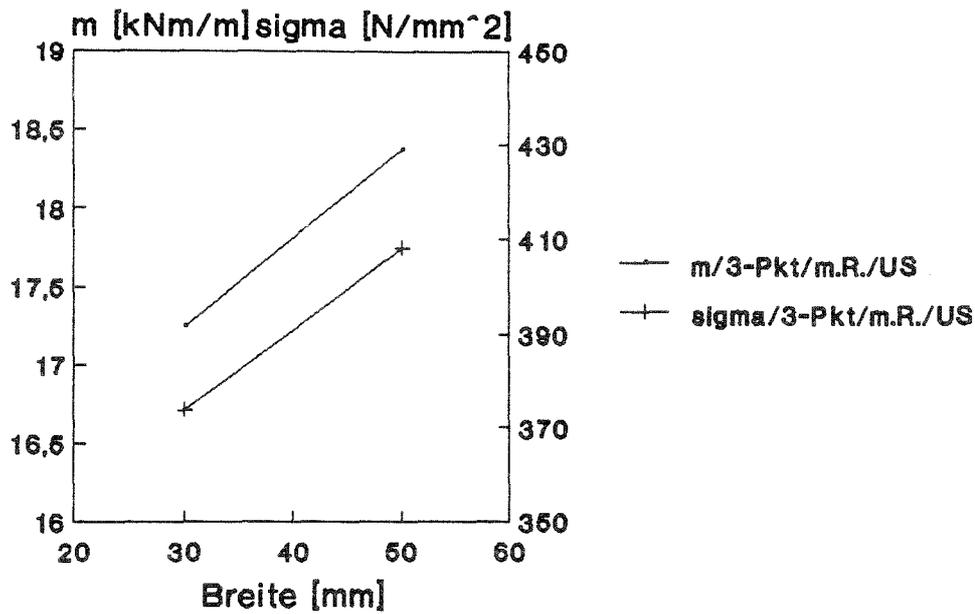


Diagramm 6.5.15

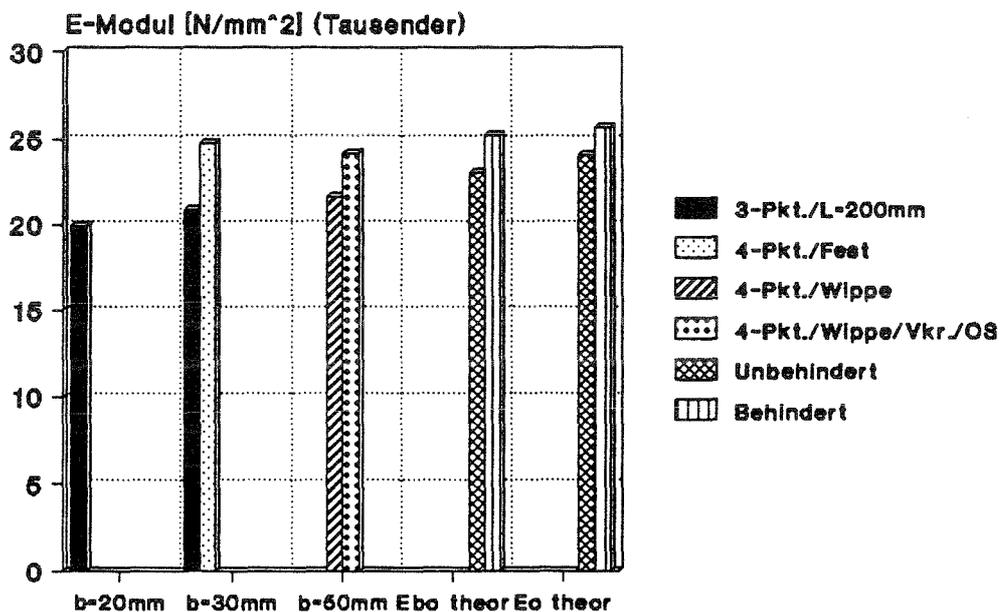
Laminat Nr.5 Bruchlasten als Funktion der Breite



Ufangsrichtung (Y-Rtg.)

Diagramm 6.5.16

Laminat Nr. 5 Elastizitätsmodule



gekr. Platte $r=800$ / Y-Richtung

Diagramm 6.5.17

Einfluß der Prüfmethode auf die erzielten Maximallasten

(Diagramme 6.5.10, 6.5.11)

Es sind die gleichen Tendenzen wie bei den Daten in Längsrichtung feststellbar. Der höchste Wert wird mit der Verformungsberück - sichtigung nach DIN EN 63 (Gl.3.2.5) erzielt. Der Wert aus der "reibungsfreien", festen Vierpunktbiegung liegt noch unterhalb des bereits sehr niedrigen, reibungsbehafteten Versuchs. Durch die Belastungsrichtung "OS"/"US" ergeben sich ebenfalls wieder deutliche Differenzen. Bei den "US"-Versuchen erfolgte ein Versagen im Druckbereich, so daß bei der Dreipunktbiegung, im Gegensatz zur "reinen" Biegung, eine Stützwirkung vorlag, die außer der Reibung zu weiter erhöhten Ergebnissen führte.

Reibungszahlen für die Dreipunktbiegung

(Diagramme 6.5.12, 6.5.13)

Es mußte ebenfalls ein Vergleichswert von der "reinen" Biegung bei einer Breite $b=20$ mm herangezogen werden. Es ergeben sich trotzdem wesentlich geringere Reibungszahlen als bei der Längsrichtung, wo eine Querkrümmung vorlag.

	Ansatz	L/t	Rtg.	Schnittmoment	Spannungen	Mittelwert
Mit Reibung	"	15	US	1.41	1.08	1.25
	*			1.56	1.22	1.39
"Ohne" Reibung	"	15	US	1.00	0.83	0.92
	*			1.16	0.97	1.17

Tabelle 6.5.1 Ermittelte Reibungszahlen

Vergleich der theoretischen und experimentellen Maximallasten

(Diagramm 6.5.14, 6.5.15)

Unter der Annahme, daß der experimentelle Wert durch die mittlere Probenbreite von $b=20$ mm geringfügig zu klein ist, ergibt sich bei den Bruchwerten, Schnittmoment und Krümmung, eine gute Übereinstimmung. Bei dem Zwischenfaserbruch liegt das Resultat des linearen Ansatzes, im Gegensatz zum nichtlinearen, knapp unterhalb des 1.hörbaren Knisterns, während die sichtbaren Außenriße später auftraten als nach der theoretischen Berechnung.

Elastizitätsmodule

(Diagramme 6.5.17)

In diesem Fall lieferte auch die Vierpunktbiegung mit festem Stempel Werte, die zwischen den theoretischen Werten (unbehindert/behindert) lag. Bei den Vierpunktwerten mit Wippe wird deutlich, daß aufgrund der großen Auflagerradien die Vorkrümmung berücksichtigt werden muß, da sonst zu geringe Werte ermittelt werden.

Laminat Nr.6 Schnittmomente

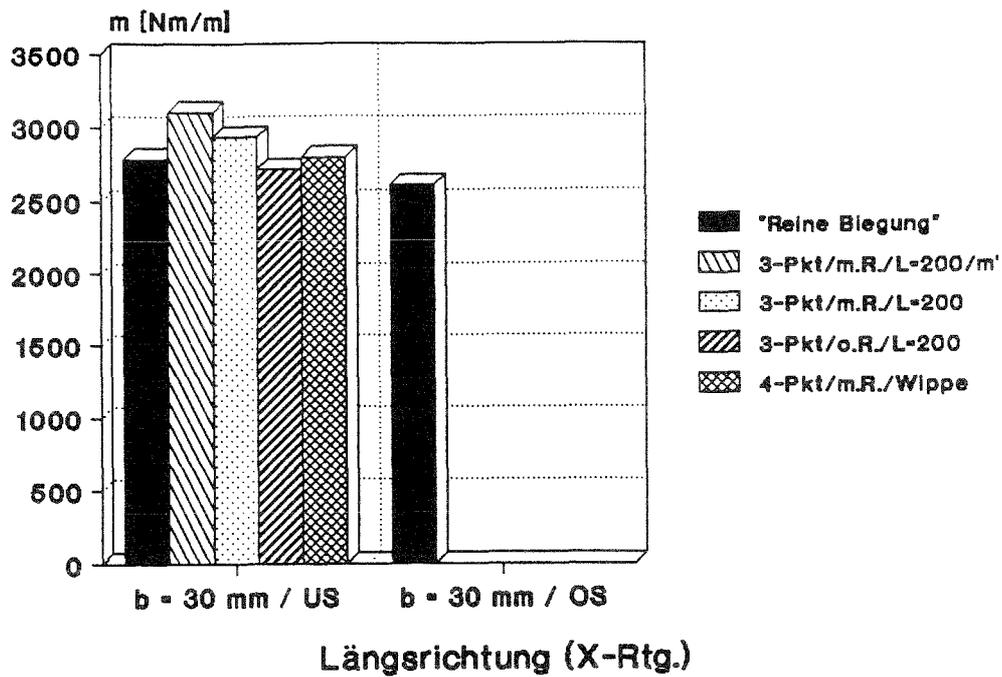


Diagramm 6.6.1

Laminat Nr.6 Spannungen

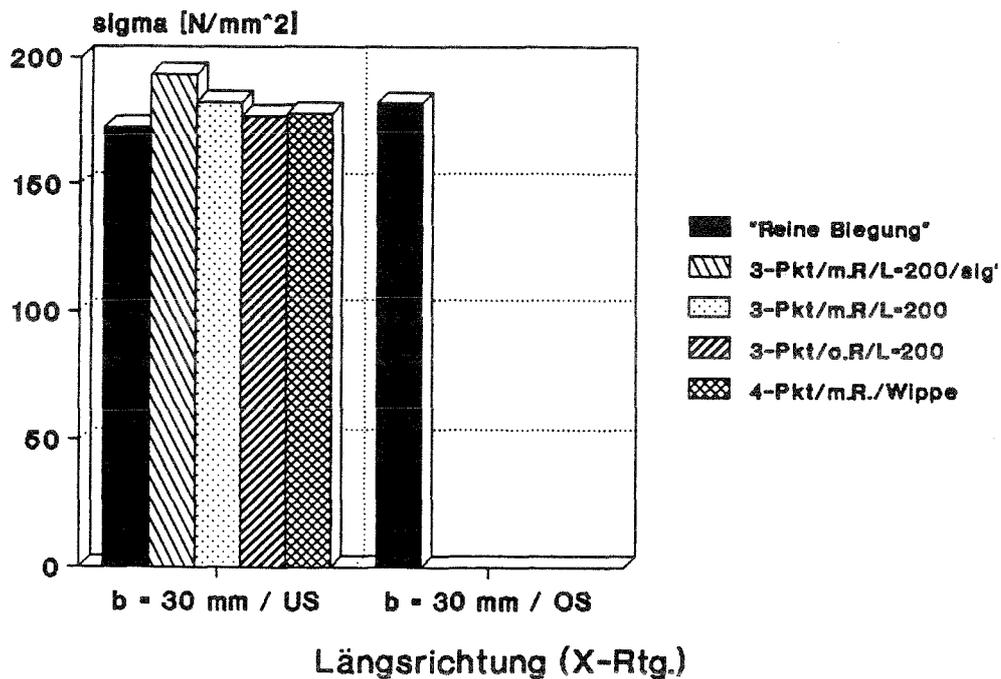


Diagramm 6.6.2

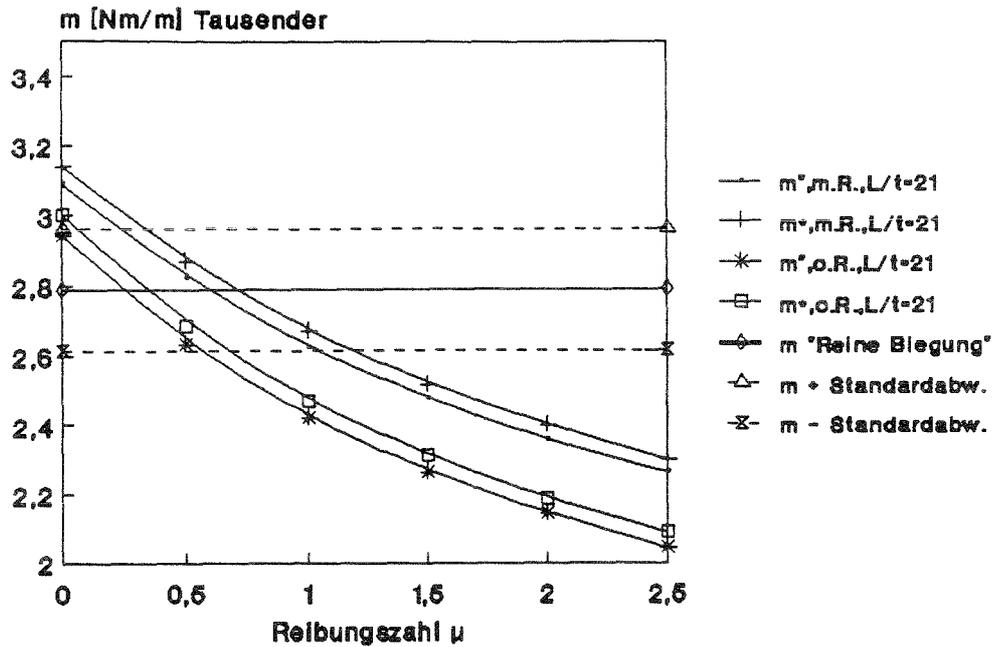
Laminat Nr.6 / X-Rtg. / US
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung

Diagramm 6.6.3

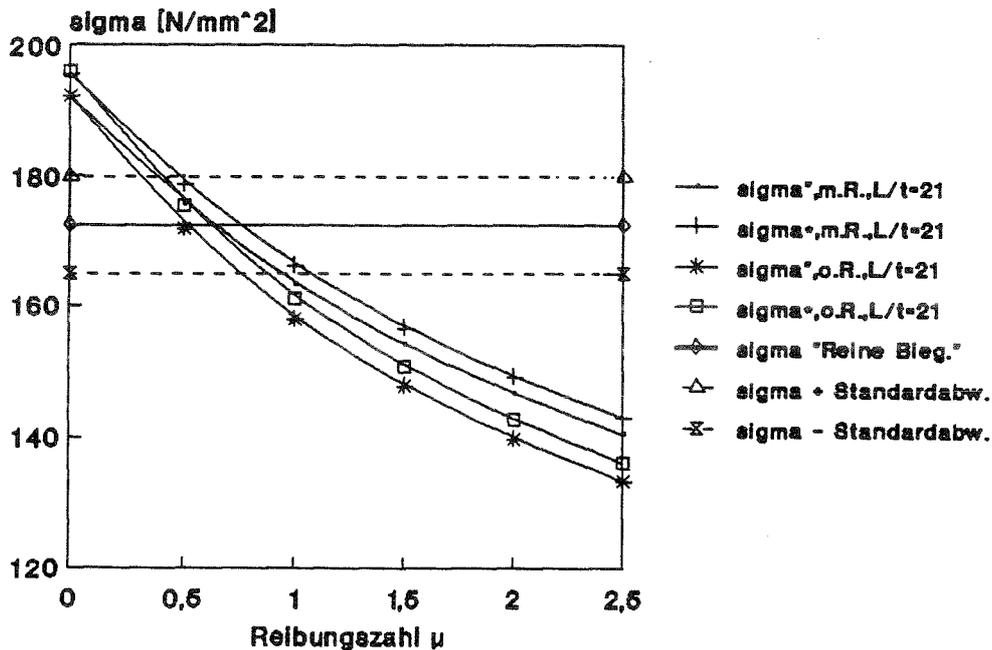
Laminat Nr.6 / X-Rtg. / US
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung

Diagramm 6.6.4

Laminat Nr. 6 / X-Rtg. / US

Schnittmomente : Theorie - Experimentell

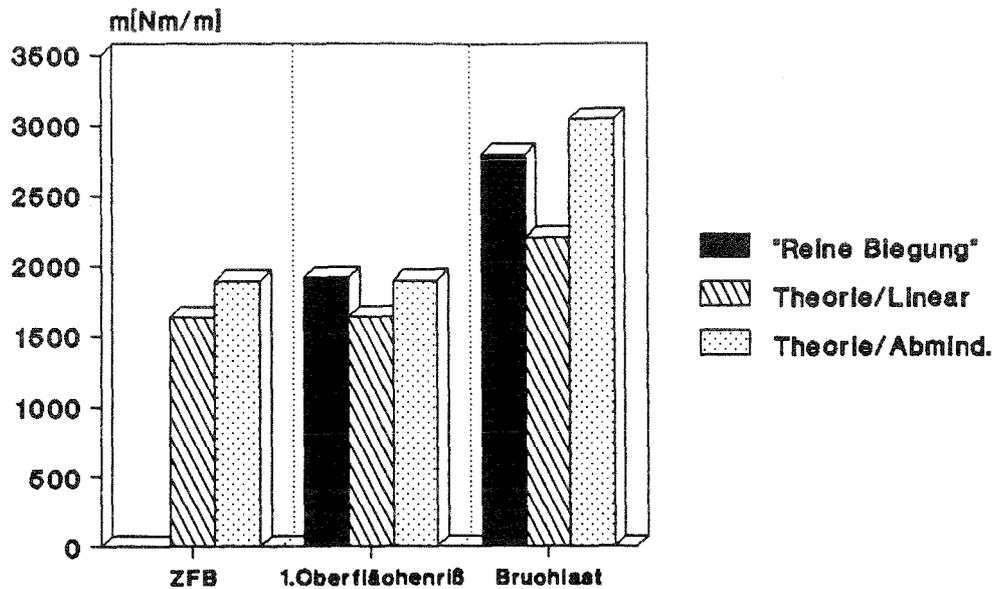


Diagramm 6.6.5

Laminat Nr. 6 / X-Rtg. / US

Krümmungen : Theorie - Experimentell

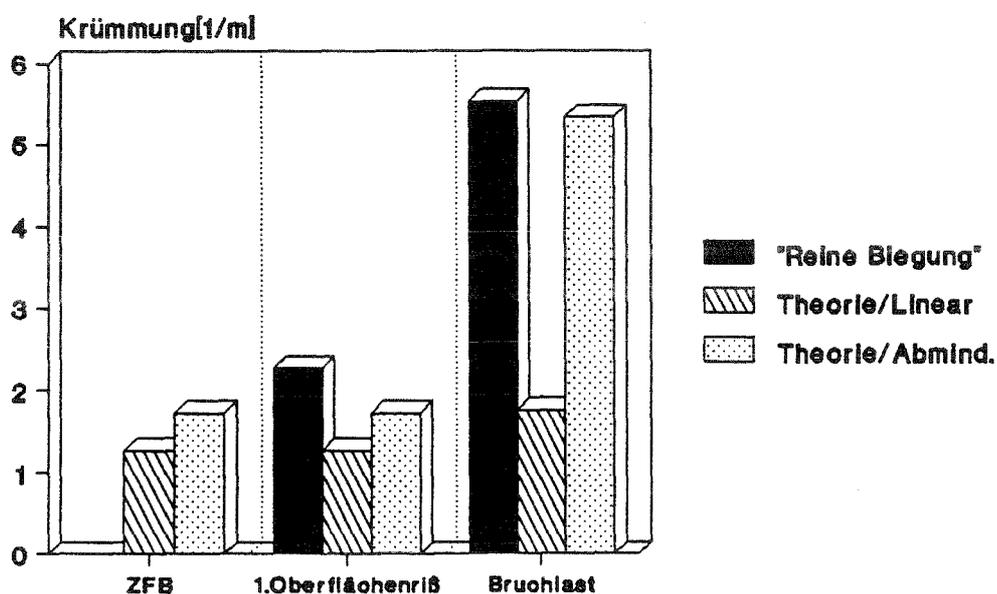


Diagramm 6.6.6

Laminat Nr.6 E-Module als Funktion der Breite

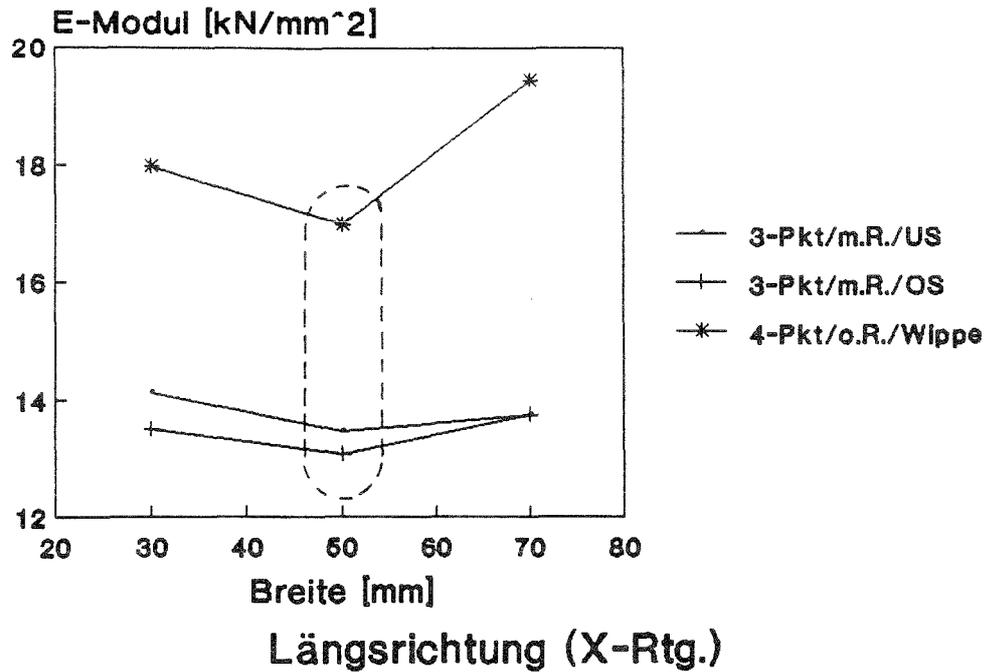


Diagramm 6.6.7

Laminat Nr.6 Bruchlasten als Funktion der Breite

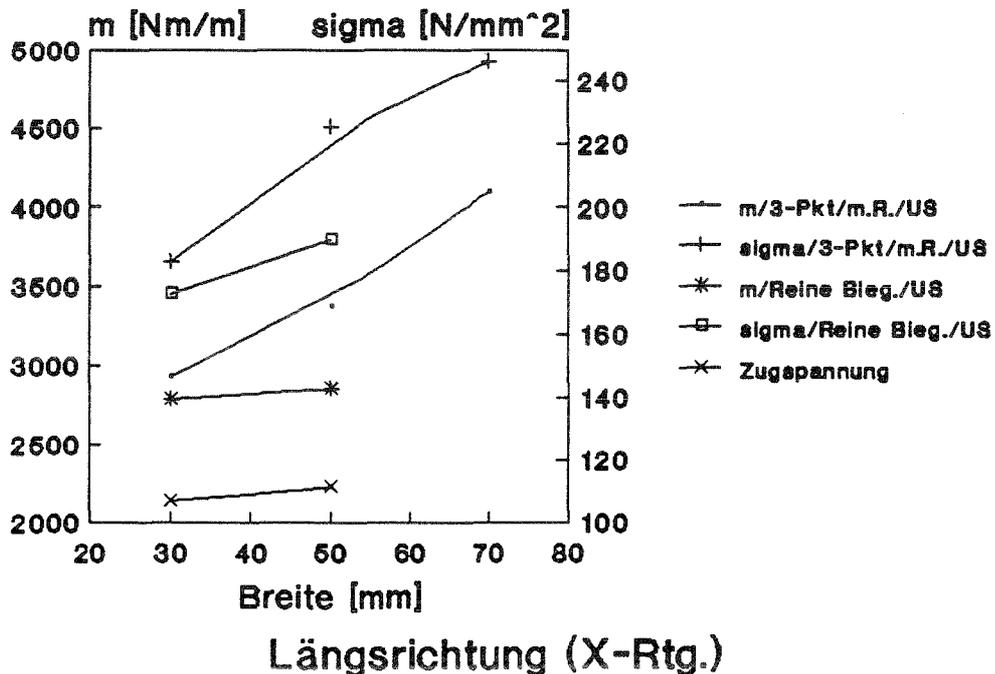
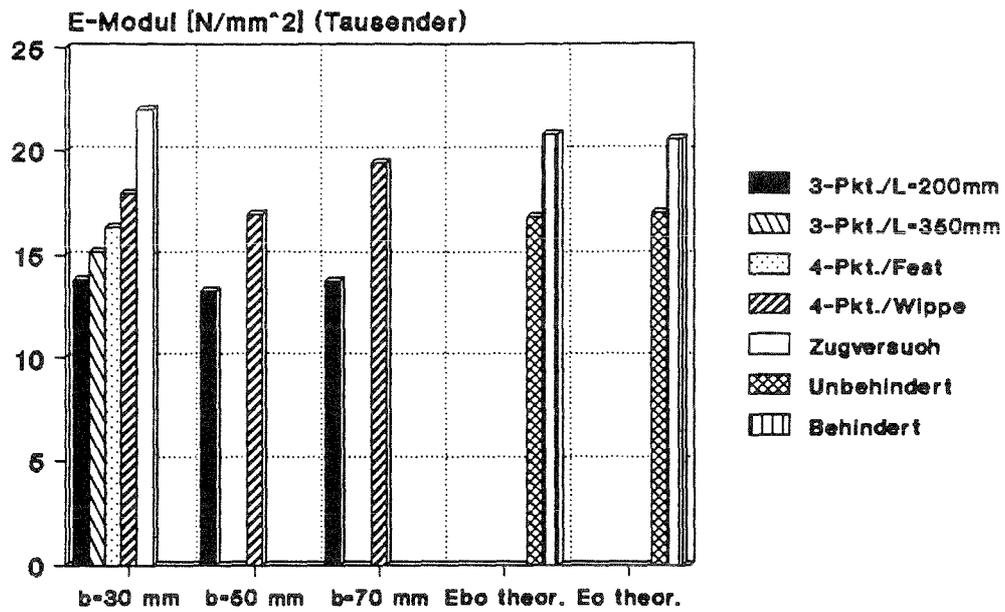


Diagramm 6.6.8

Laminat Nr. 6 Elastizitätsmodule



gekr. Platte $r=800$ / X-Richtung

Diagramm 6.6.9

Einfluß der Prüfmethode auf die erzielten Maximallasten

(Diagramme 6.6.1, 6.6.2, 6.6.8)

Starke Differenzen zwischen den Versuchsserien der "reinen" Biegung sorgen dafür, daß bei den "OS" - Versuchen zwar ein niedrigeres Schnittmoment, jedoch eine höhere Biegebruchspannung als bei den "US" - Versuchen erzielt wird.

Die reibungsbehaftete 4-Pkt-Biegung mit "Wippe" lieferte hier höhere Bruchwerte als die "reibungsfreie" Dreipunktbiegung.

Bei diesem Laminat entstand bei den Versuchen eine sehr starke Querkrümmung, so wurde bei der 3-Pkt-Biegung und $b=50$ mm eine Krümmung unter dem Druckstempel von 4.93 [1/m], bei $b=70$ mm von 2.71 [1/m] gemessen. Dies führt zu einer erheblich Veränderung des Widerstandsmomentes und damit der Spannungsverhältnisse in der Probe. Der Biegestempel lag beim Bruch nur auf einem Punkt der Probe auf, wobei das Versagen im Druckbereich neben dem Druckpunkt lag, welcher auch nach dem Versagen keine Schäden aufwies (Bild 6.6.1).

Auf der anderen Seite gab es große, festigkeitsmindernde, Rand - delaminationseffekte. Jedoch zeigt das Diagramm 6.6.8, daß bei den Ergebnissen aus den Zugversuchen und der "reinen" Biegung der Anstieg von den ermittelten Bruchspannungen langsamer verläuft als bei der Dreipunktbiegung, wobei der Querkrümmungseinfluß sich auch bei der "reinen" Biegung auswirkt, so daß der Randeinfluß nicht die Hauptursache für die wesentlich höheren Dreipunktergebnisse bei den größeren Breiten ist.

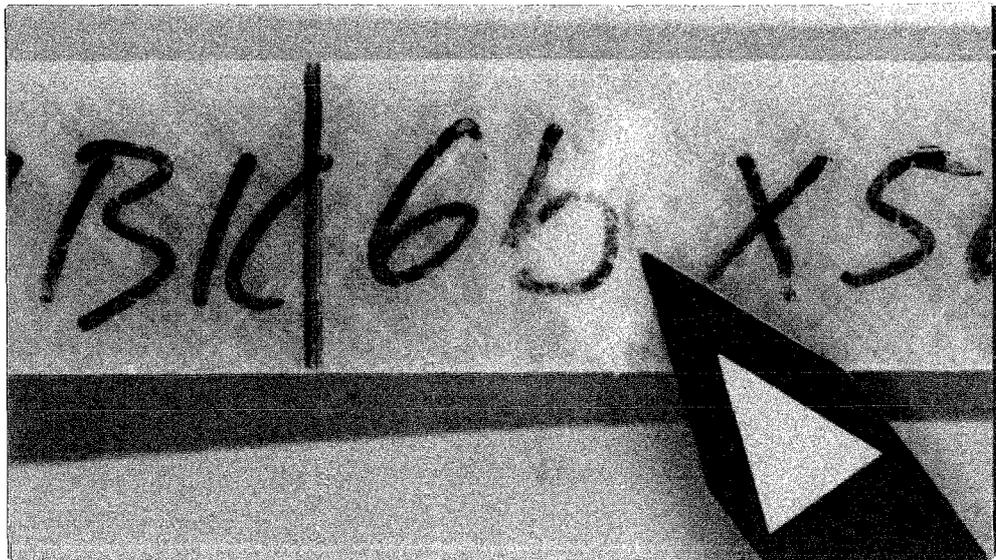


Bild 6.6.1

Reibungszahlen für die Dreipunktbiegung

(Diagramme 6.6.3, 6.6.4)

	Ansatz	L/t	Rtg.	Schnittmoment	Spannungen	Mittelwert
Mit Reibung	"	21	US	0.62	0.66	0.64
	*			0.73	0.76	0.75
"Ohne" Reibung	"	21	US	0.26	0.54	0.40
	*			0.36	0.63	0.50

Tabelle 6.6.1 Ermittelte Reibungszahlen

Vergleich der theoretischen und experimentellen Maximallasten

(Diagramme 6.6.5, 6.6.6)

Hier liegen die ermittelten Bruchkrümmungen fast dreimal so hoch wie die berechneten Krümmungen mit dem linearen Ansatz. Mit dem 2. Ansatz für die theoretische Berechnung ergeben sich bei den Krümmungen und den Schnittmomenten wesentlich bessere Resultate, jedoch liegt hier das berechnete Schnittmoment über dem experimentellen bei einer Probenbreite von $b=30$ mm. Beim Vergleich der "Biegebruchspannung" von $b=50$ mm ergibt sich nur eine geringe Differenz, hier ergab sich experimentell ein Wert von 190 N/mm², theoretisch von 195 N/mm².

Elastizitätsmodule

(Diagramm 6.6.7, 6.6.9)

Bei der Dreipunktversuchsserie mit größerem Auflagerabstand ergibt sich ein größerer Eb-Modul, jedoch ein kleinerer als mit der 4-Pkt-Biegung mit festem Auflager. Die Vierpunktbiegung mit "Wippe" liefert wieder den höchsten und mit der Theorie verträglichsten Wert, welcher leicht größer ist als der Eb-Modul aus den Bruchversuchen mit der Biegeprüfvorrichtung.

Im Diagramm 6.6.7 führt die Versuchsserie der 50mm-Proben sowohl bei der Vierpunkt-, als auch bei der Dreipunktbiegung zu geringeren Eb-Modulen, so daß diese Serie als Ausreißer anzusehen ist. Ansonsten ist die gleiche Tendenz wie bei dem Laminat Nr.5/Längsrichtung festzustellen, d.h. ein Abfall der mit Dreipunktbiegung ermittelten Eb-Modul mit zunehmender Breite, während bei der Vierpunktbiegung mit "Wippe" ein leichter Anstieg zu verzeichnen ist.

Der ermittelte E-Modul liegt zwar scheinbar über den theoretischen Daten, jedoch enthielt die Serie zwei Proben mit einem E-Modul von ca. 26000 N/mm² (Histogramm bei den Ergebnissen im Anhang), ohne diese Werte liegt der E-Modul unter dem theoretischen, behinderten E-Modul.

Laminat Nr.6 Schnittmomente

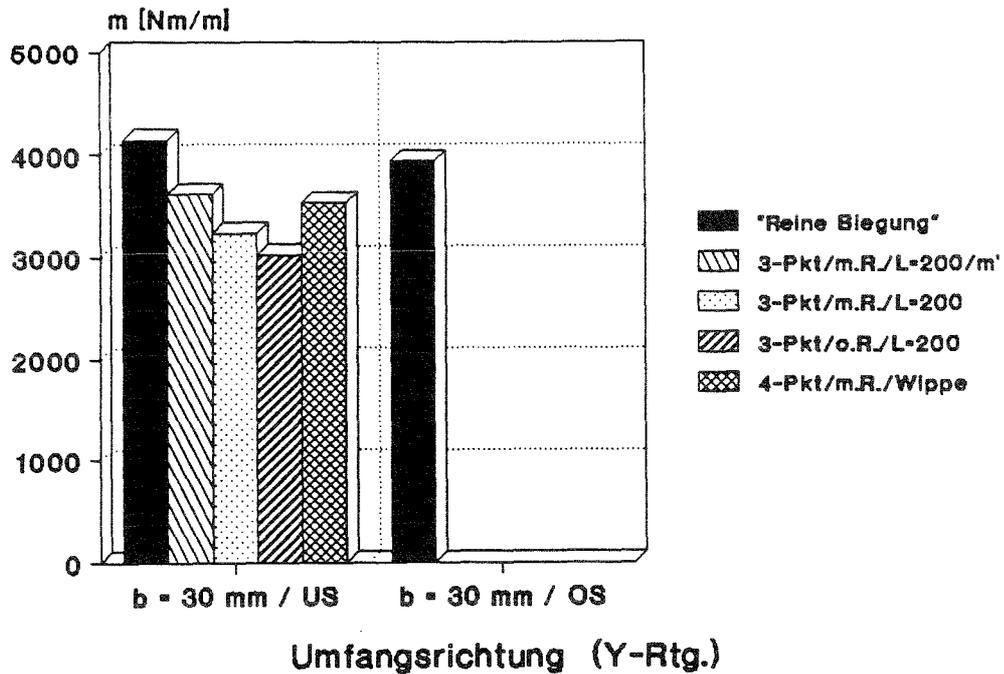


Diagramm 6.6.10

Laminat Nr.6 Spannungen

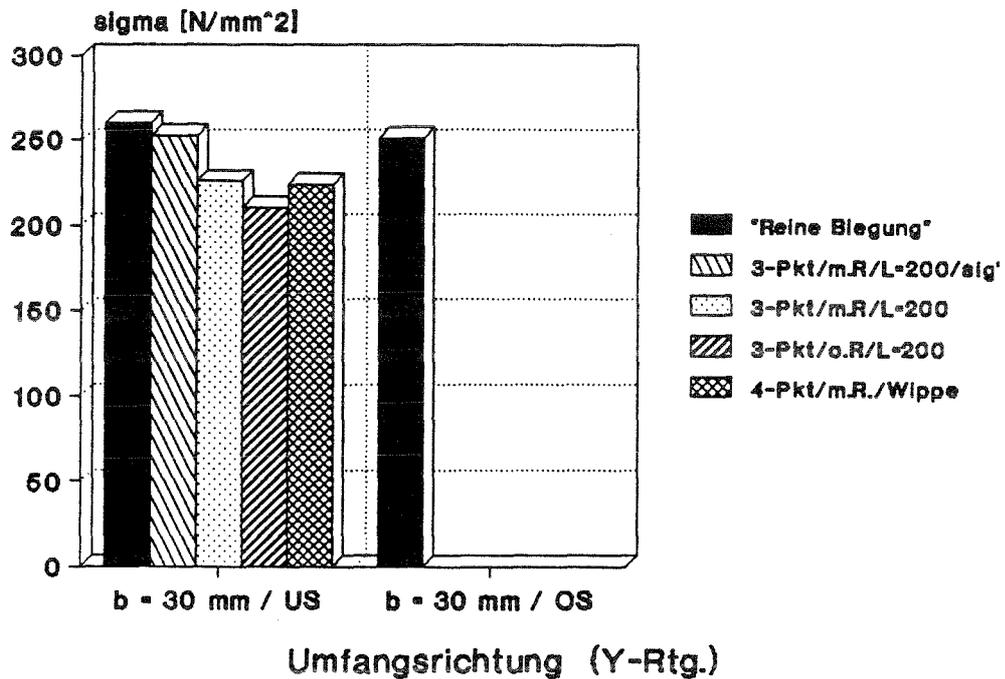


Diagramm 6.6.11

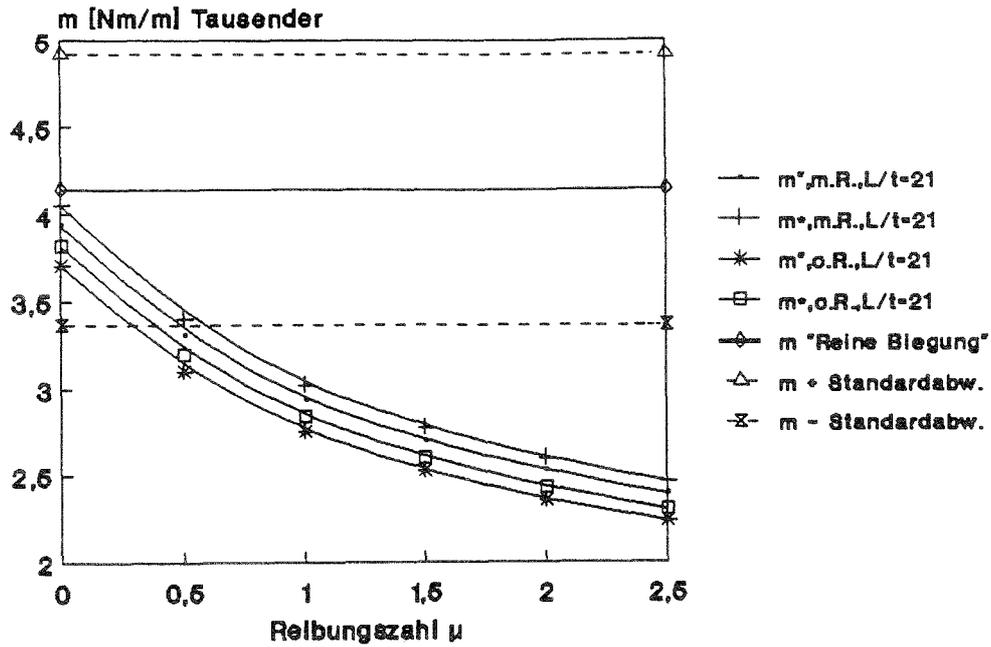
Laminat Nr.6 / Y-Rtg. / US
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung

Diagramm 6.6.12

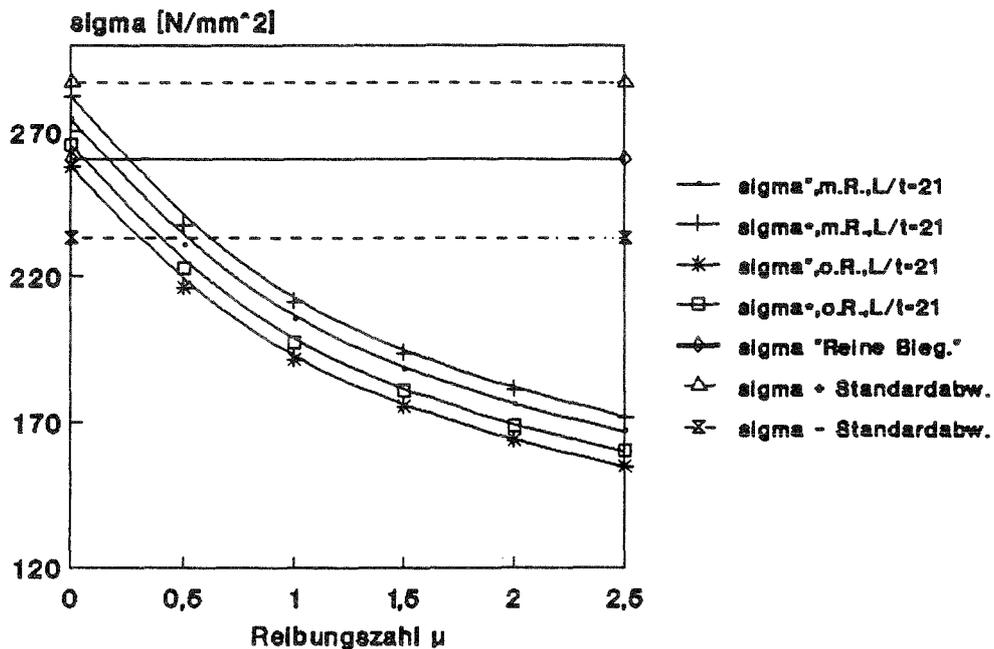
Laminat Nr.6 / Y-Rtg. / US
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung

Diagramm 6.6.13

Laminat Nr. 6 / Y-Rtg. / US

Schnittmomente : Theorie - Experimentell

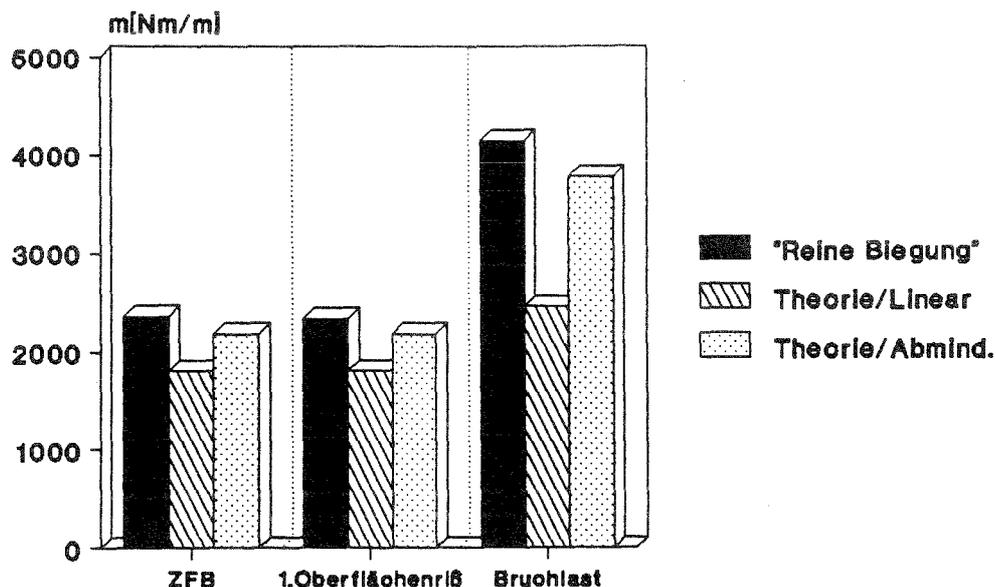


Diagramm 6.6.14

Laminat Nr. 6 / Y-Rtg. / US

Krümmungen : Theorie - Experimentell

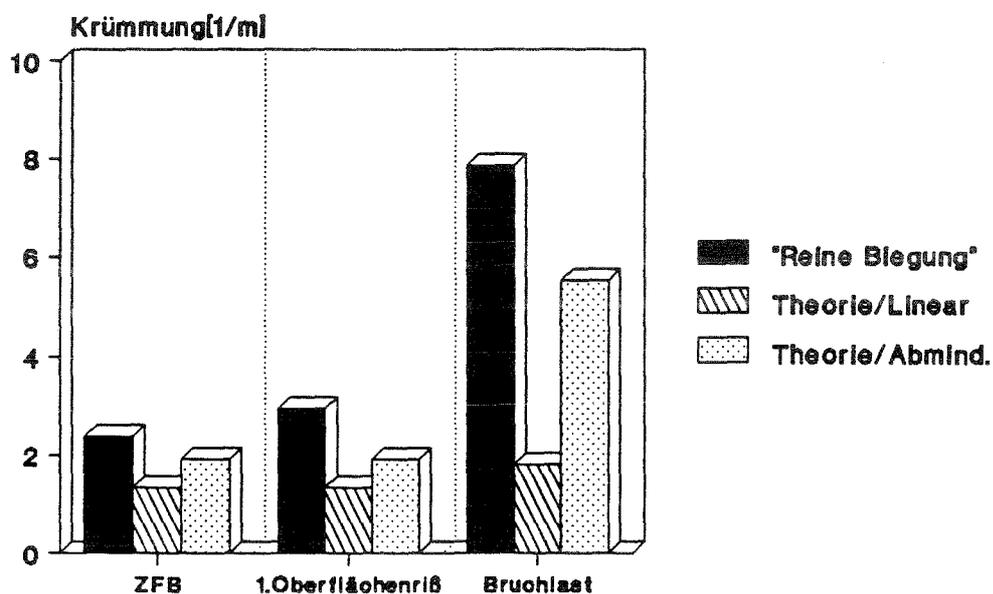
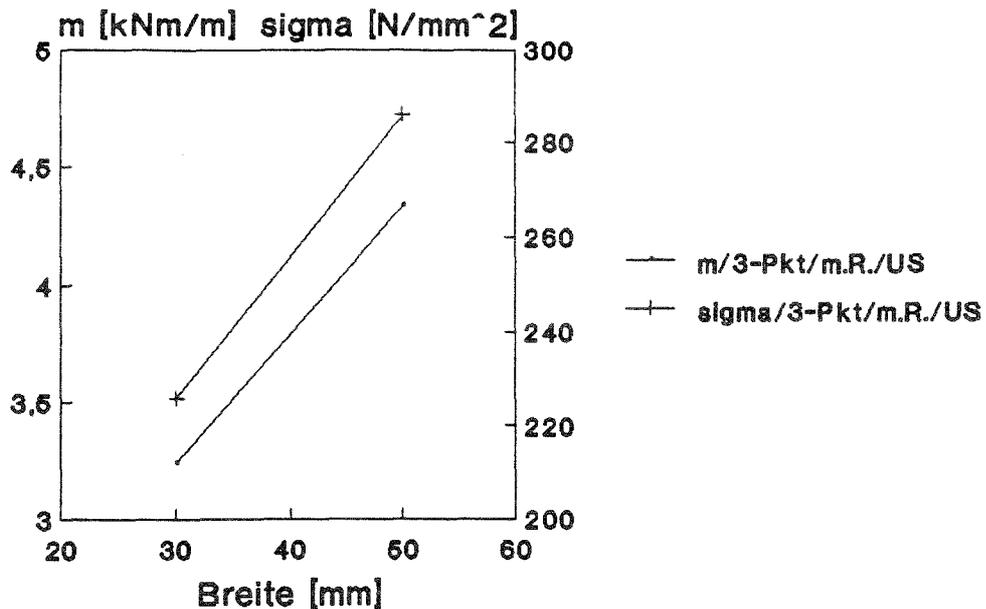


Diagramm 6.6.15

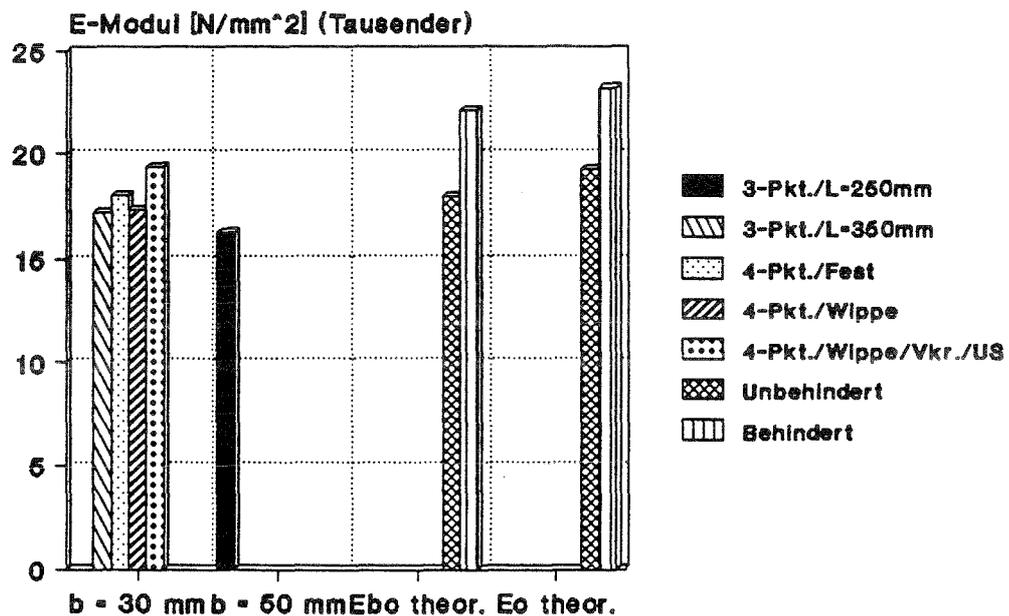
Laminat Nr.6 Bruchlasten als Funktion der Breite



Ufangsrichtung (Y-Rtg.)

Diagramm 6.6.16

Laminat Nr. 6 Elastizitätsmodule



gekr. Platte $r=800$ / Y-Richtung

Diagramm 6.6.17

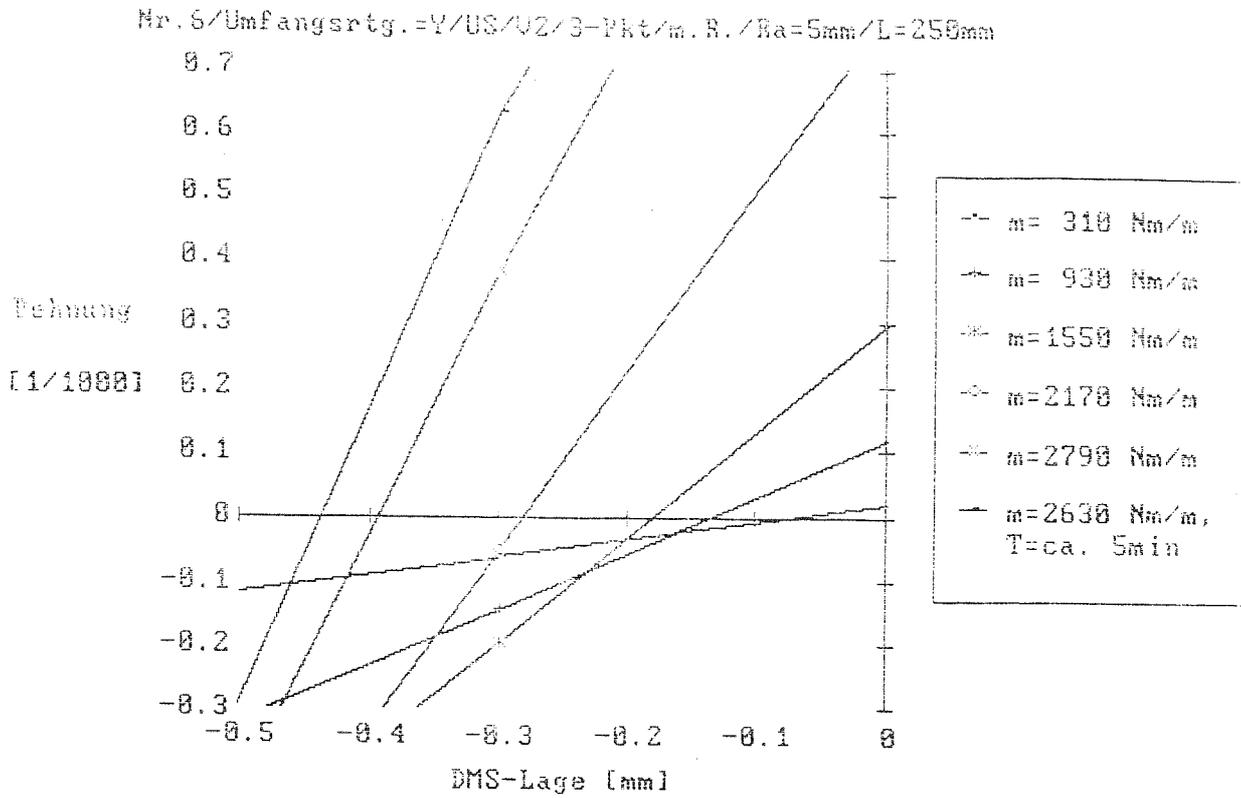


Diagramm 6.6.18

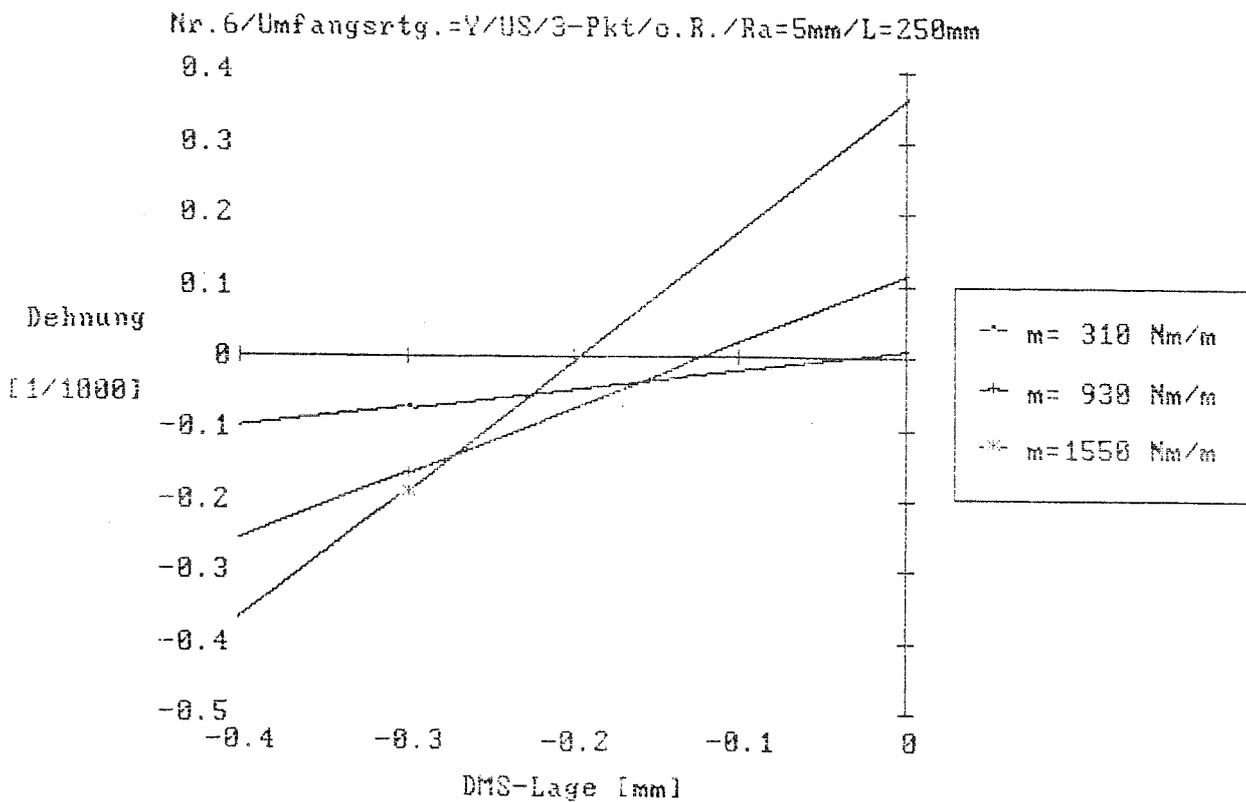


Diagramm 6.6.19

Einfluß der Prüfmethode auf die erzielten Maximallasten

(Diagramme 6.6.10, 6.6.11, 6.6.16)

Diese Werte sollten relativ kritisch betrachtet werden, da innerhalb der einzelnen Platten relativ große Differenzen der Dicke und im Laminataufbauten zu verzeichnen waren. So liegen die mittl. Proben-dicken bei den Serien der "reinen Biegung" zwischen 9.1 und 10.2 mm, die hieraus resultierenden Schnittmomente haben einen Variationskoeffizienten von 18.8 %, ähnliche Verhältnisse finden sich dann auch bei der Dreipunktbiegung mit $b=50$ mm wieder.

Bezüglich der Querverkrümmung, und Randdelamination ergeben sich die gleichen Punkte wie in Längsrichtung.

Reibungszahlen für die Dreipunktbiegung

(Diagramme 6.6.12, 6.6.13)

Bei der Ermittlung der Reibungszahlen mittels der Schnittmomente ergeben sich keine sinnvollen Werte, aber man kann anhand der eingezeichneten Standardabweichungen die großen Schwankungen erkennen, bei den Bruchspannungen ergeben nur geringe Reibungszahlen.

Zwischen den Kurven der reibungsbehafteten und "reibungsfreien" Dreipunktbiegung existiert, ebenso wie in Längsrichtung, nur eine geringe Differenz, d.h. der Reibungseinfluß ist bei diesem Laminat und dessen Oberfläche geringer. Dies wird auch bei den Diagrammen 6.6.18 und 6.6.19 deutlich, denn hier ist die Wanderung der neutralen bei der reibungsbehafteten und "reibungsfreien" Dreipunktbiegung fast gleich groß.

	Ansatz	L/t	Rtg.	Schnittmoment	Spannungen	Mittelwert
Mit Reibung	"	21	US	-	0.17	-
	*			-	0.26	-
"Ohne" Reibung	"	21	US	-	0.00	-
	*			-	0.07	-

Tabelle 6.6.2 Ermittelte Reibungszahlen

Vergleich der theoretischen und experimentellen Maximallasten

(Diagramme 6.6.14, 6.6.15)

Wieder ergeben sich viel zu geringe Bruchkrümmungen und Schnittmomente mit dem linearen Ansatz, hingegen liegen die Werte des zweiten Ansatzes zwar auch leicht unter den Versuchsergebnissen der Biegeprüfvorrichtung, aber das berechnete Schnittmoment ist bereits größer, als daß mit der reibungsbehafteten Dreipunktbiegung erzielte.

Elastizitätsmodule

(Diagramm 6.6.17)

Bei der Dreipunktbiegung mit geringerem Auflagerabstand wird trotz größerer Breite ein geringerer Wert erreicht. Beste Übereinstimmung mit den theoretischen Werten, sowie der größte Wert wird wieder mit beweglichen Vierpunktbiegung unter Berücksichtigung der Vorkrümmung ermittelt, die Eb-Module aus den Bruchversuch mit der Biegeprüfvorrichtung lagen im gleichen Bereich.

Der ermittelte Schubmodul beträgt 153 N/mm^2 (Variationskoeff.=26% !).

Laminat Nr.7 Schnittmomente

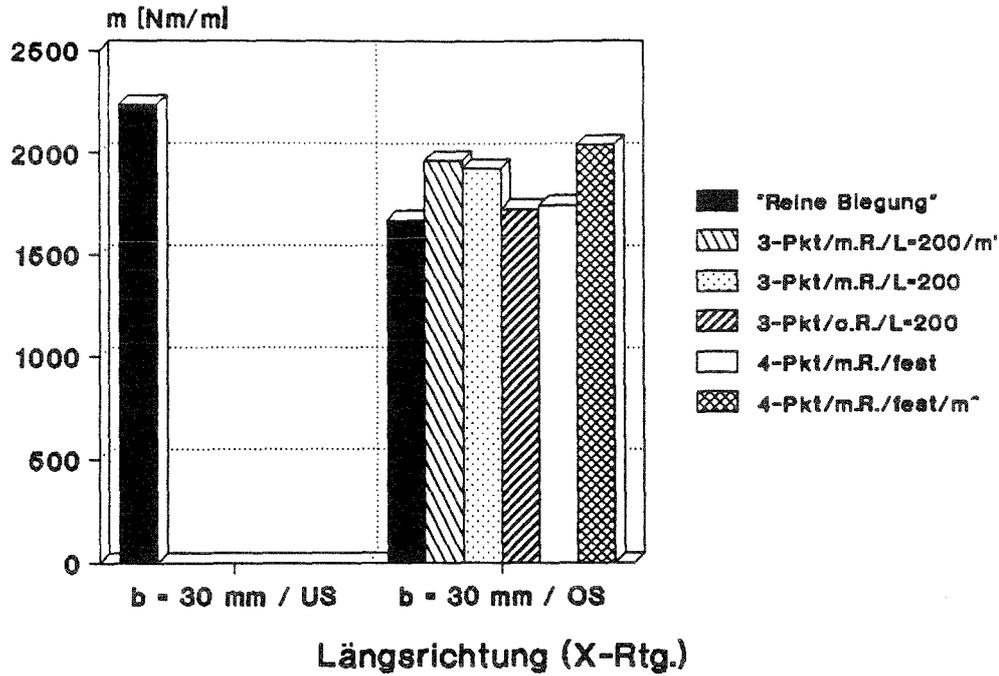


Diagramm 6.7.1

Laminat Nr.7 Spannungen

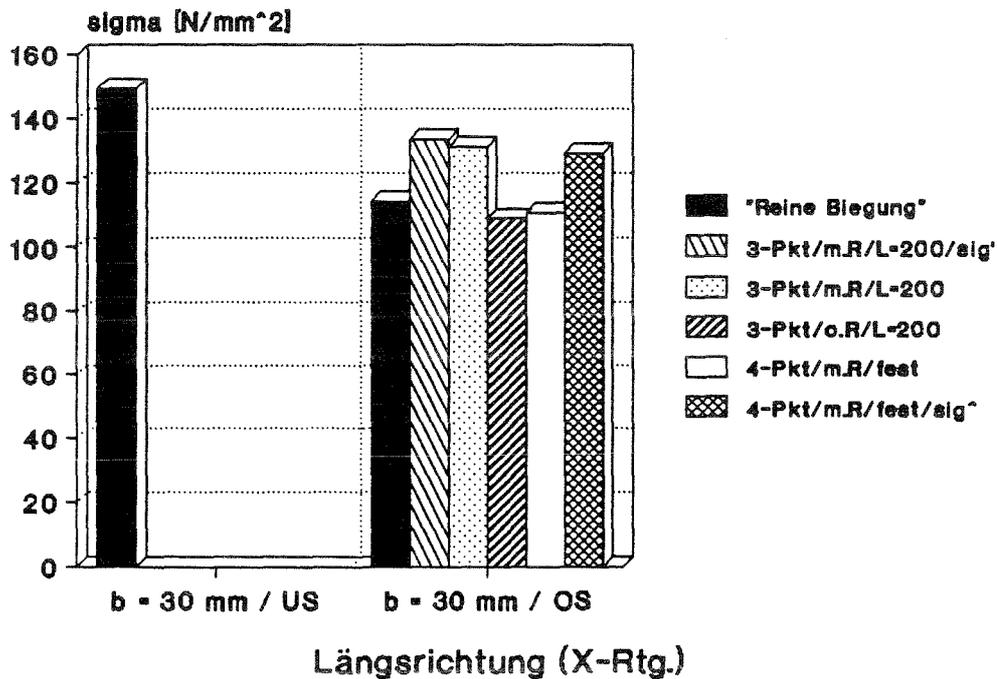


Diagramm 6.7.2

Laminat Nr.7 / X-Rtg. / OS
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung
Maximale Schnittmomente

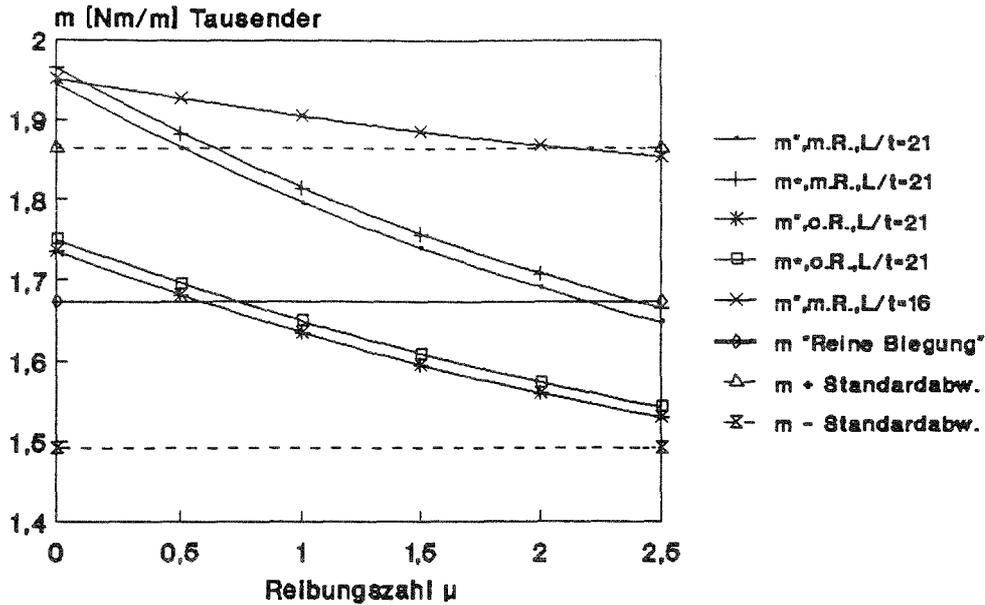


Diagramm 6.7.3

Laminat Nr.7 / X-Rtg. / OS
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung
Biegebruchspannungen

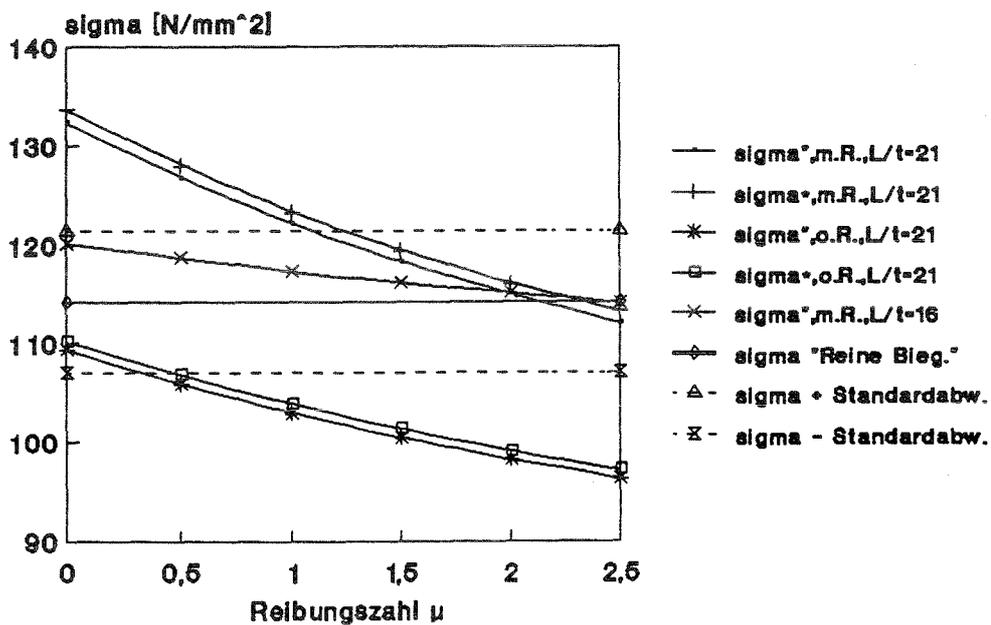


Diagramm 6.7.4

Laminat Nr. 7 / X-Rtg. / US

Schnittmomente : Theorie - Experimentell

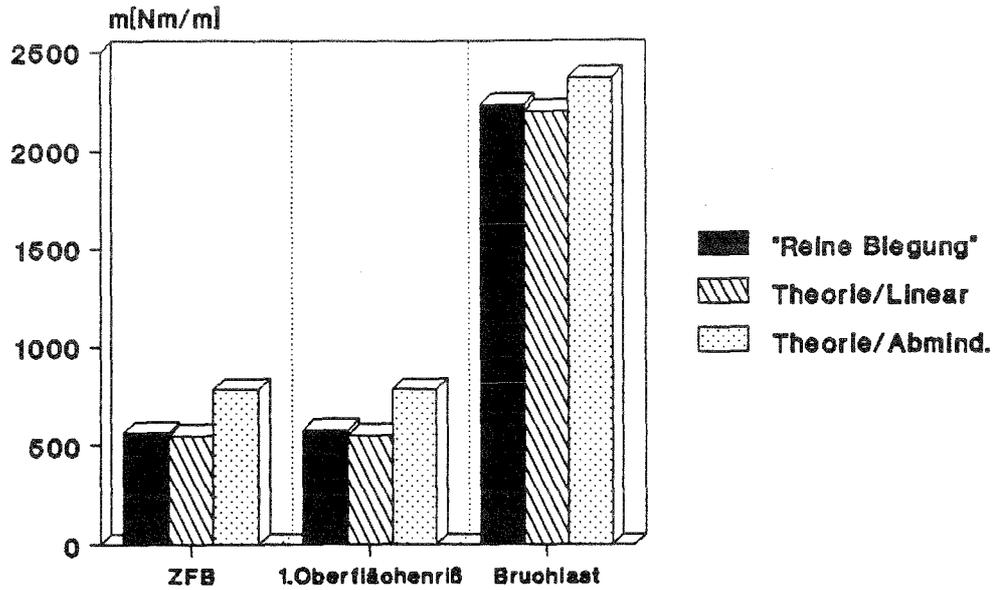


Diagramm 6.7.5

Laminat Nr. 7 / X-Rtg. / US

Krümmungen : Theorie - Experimentell

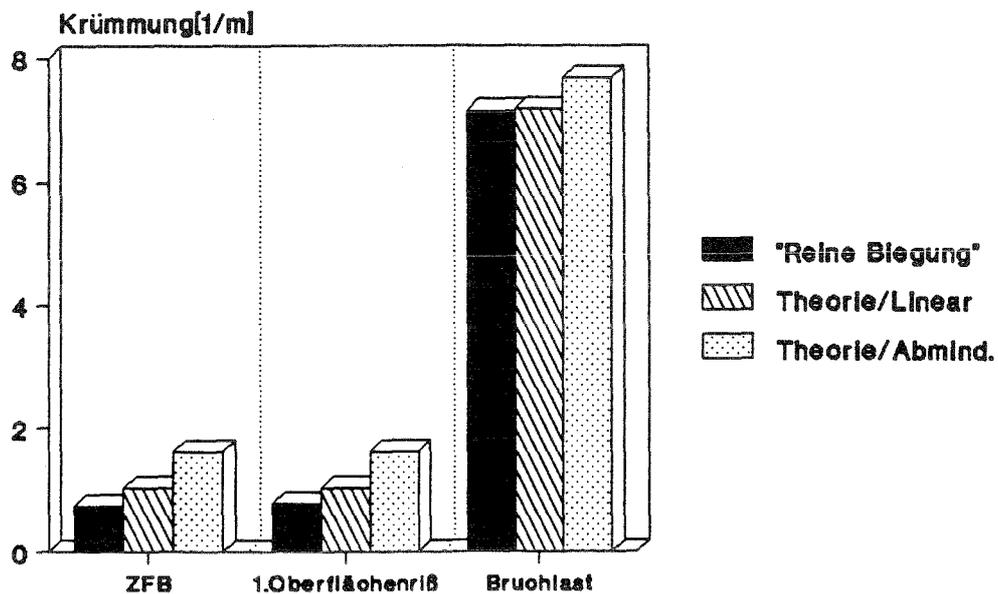


Diagramm 6.7.6

Laminat Nr. 7 / X-Rtg. / OS

Schnittmomente : Theorie - Experimentell

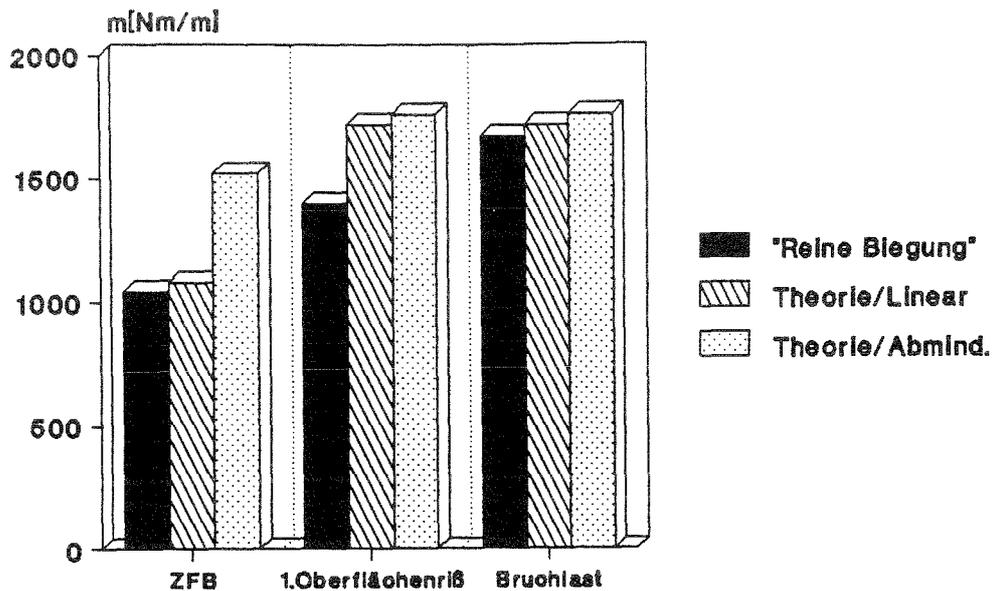


Diagramm 6.7.7

Laminat Nr. 7 / X-Rtg. / OS

Krümmungen : Theorie - Experimentell

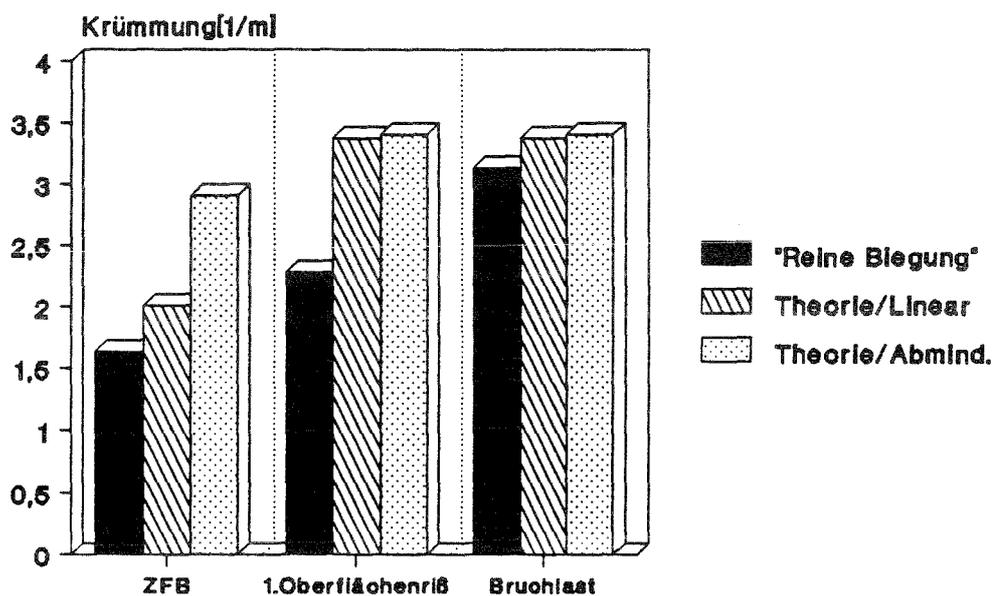


Diagramm 6.7.8

Laminat Nr. 7 Elastizitätsmodule

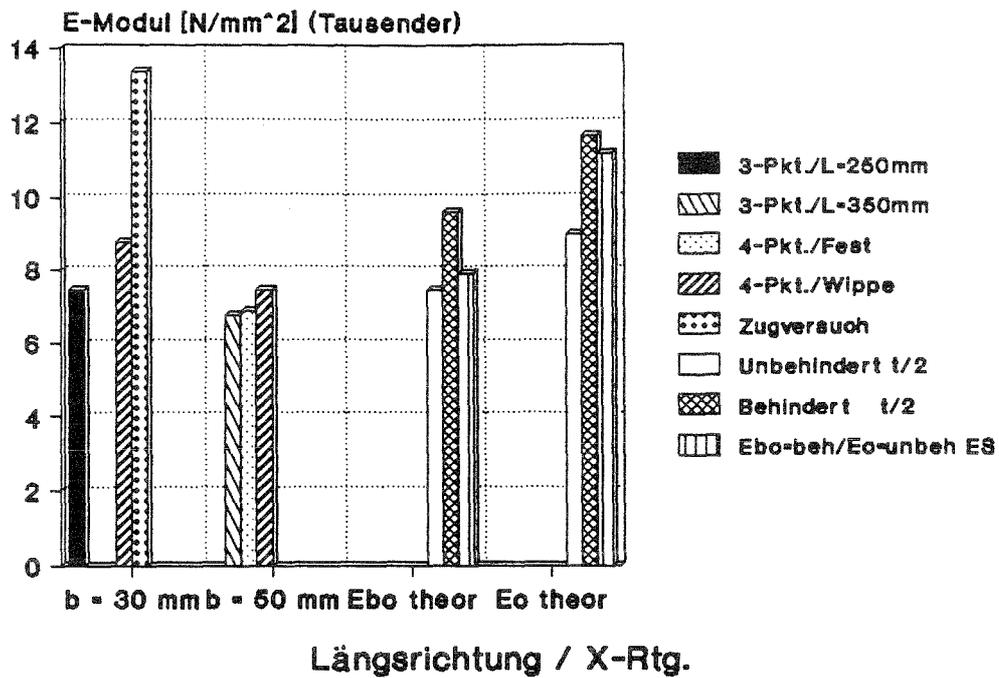


Diagramm 6.7.9

Einfluß der Prüfmethode auf die erzielten Maximallasten

(Diagramme 6.7.1, 6.7.2)

Durch die Auskleidung entstehen starke Differenzen hinsichtlich der Belastungsrichtung "US"/"OS", da die Schutzschicht im Fall der Zugbelastung (OS) weit unterhalb der Maximallast reißt, während sie bei Druckbelastung bis zum Bruch mitträgt.

Die reibungsbehaftete Dreipunktbiegung liefert wieder den höchsten Wert.

Reibungszahlen für die Dreipunktbiegung

(Diagramme 6.7.3, 6.7.4)

In diesen Resultaten zeigen sich die Laminatschwankungen, so liefern die reibungsbehafteten Dreipunktversuche mit den verschiedenen Auflagerabständen nur bei den Spannungen, und der "reibungsfreie" Versuch nur bei den Schnittmomenten sinnvolle Lösungen.

Die relativ hohen Reibungszahlen der reibungsbehafteten Serien lassen sich durch die Auflage auf der Schutzschicht und zusätzlich durch die örtlichen Verformungen dieser quergekrümmten Proben erklären.

	Ansatz	L/t	Rtg.	Schnittmoment	Spannungen	Mittelwert
Mit Reibung	"	21	OS	2.22	2.14	2.18
	*			2.39	2.36	2.38
	"	16		----	2.43	----
"Ohne" Reibung	"	21	OS	0.59	----	----
	*			0.73	----	----

Tabelle 6.7.1 Ermittelte Reibungszahlen

Vergleich der theoretischen und experimentellen Maximallasten

(Diagramme 6.7.5 - 6.7.8)

Hier zeigt sich bei den Belastungsrichtungen "OS" und "US" eine gute Übereinstimmung hinsichtlich der Bruchwerte bei beiden Ansätzen. Jedoch wird bei dem 2. Ansatz die Belastung beim ersten ZFB zu groß berechnet.

Über die Kennwerte der Auskleidung lagen keine genauen Daten vor, so daß sich hiermit die leicht höheren Bruchwerte erklären lassen.

Elastizitätsmodule

(Diagramm 6.7.9)

Hier zeigen sich ebenfalls starke Differenzen, trotz größerer Breite fällt auch bei der Vierpunktbiegung mit Wippe das Ergebnis ab, aber das Resultat der Zugversuchsserie liegt über dem theoretischen Wert, wobei die mittlere Dicke dieser Serie aber auch deutlich unter dem Mittelwert des Laminates liegt.

Diese Abweichungen spiegeln sich auch in den ermittelten Schubmodulen wieder, hier wurden Werte zwischen 21 und 515 N/mm² erzielt.

Laminat Nr.7 Schnittmomente

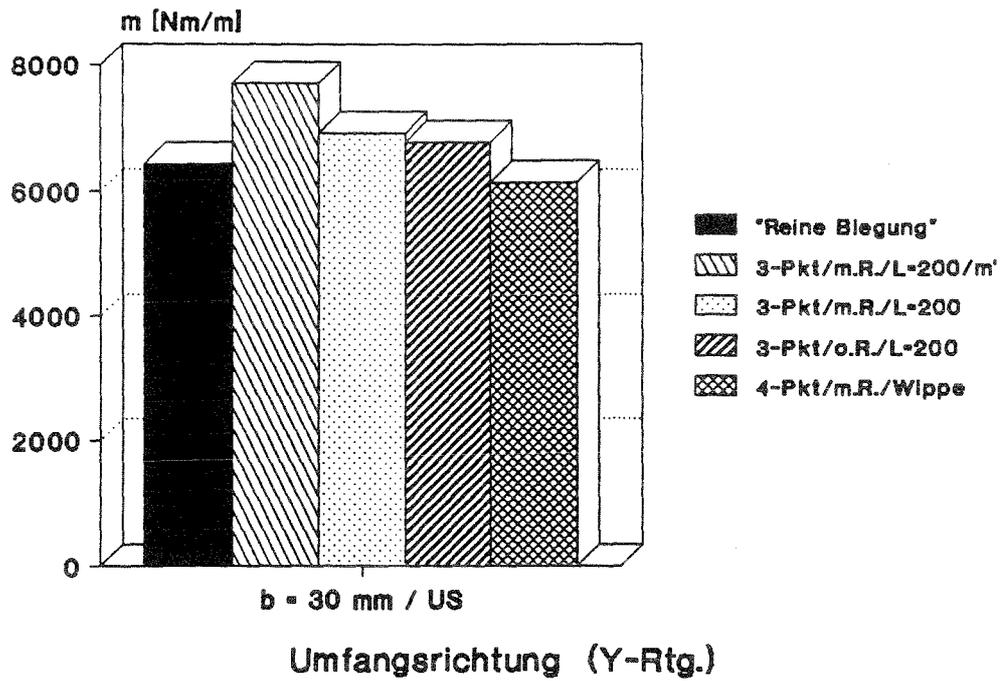


Diagramm 6.7.10

Laminat Nr.7 Spannungen

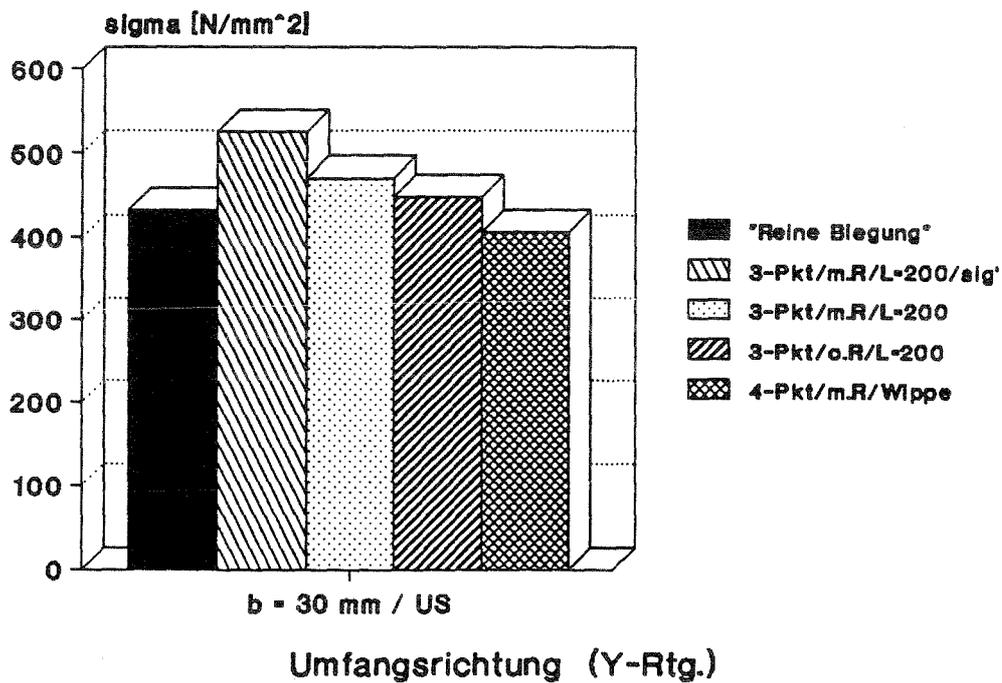


Diagramm 6.7.11

Laminat Nr.7 / Y-Rtg. / US
 Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung

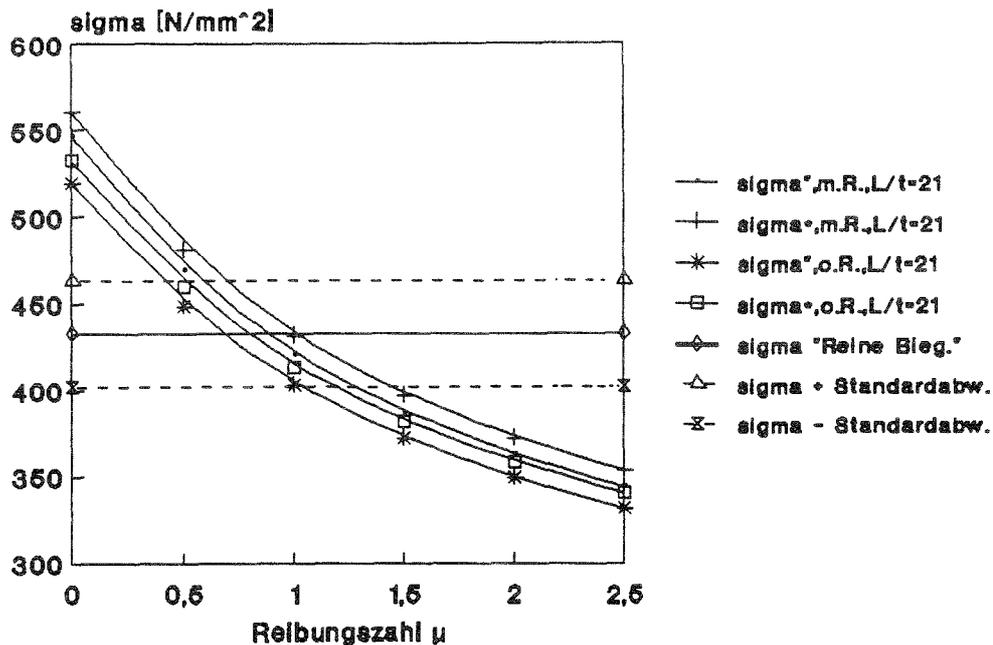


Diagramm 6.7.12

Laminat Nr.7 / Y-Rtg. / US
 Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung

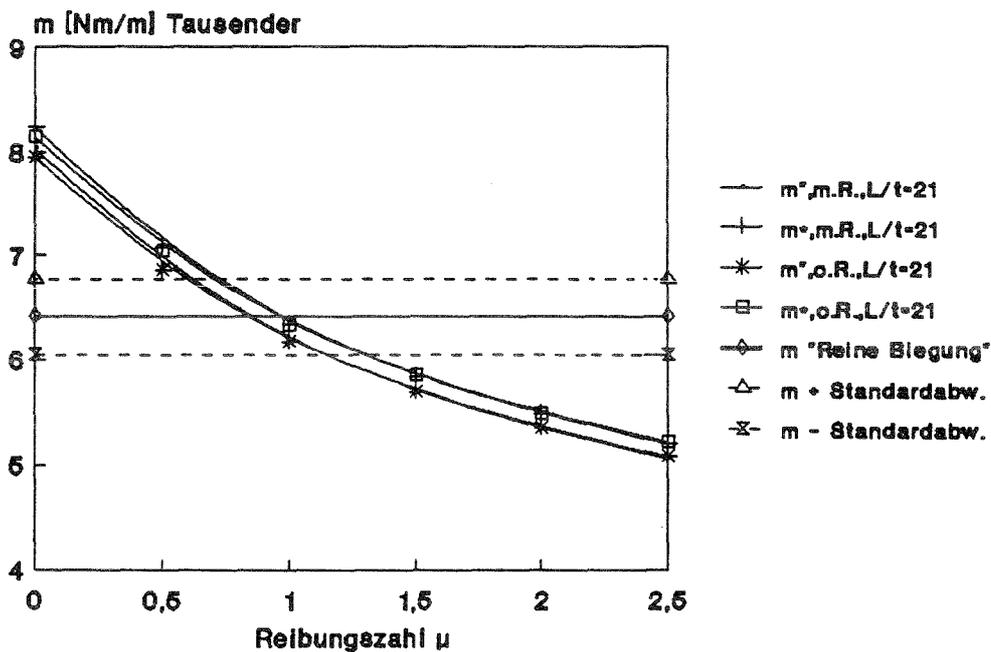


Diagramm 6.7.13

Laminat Nr. 7 / Y-Rtg. / US

Schnittmomente : Theorie - Experimentell

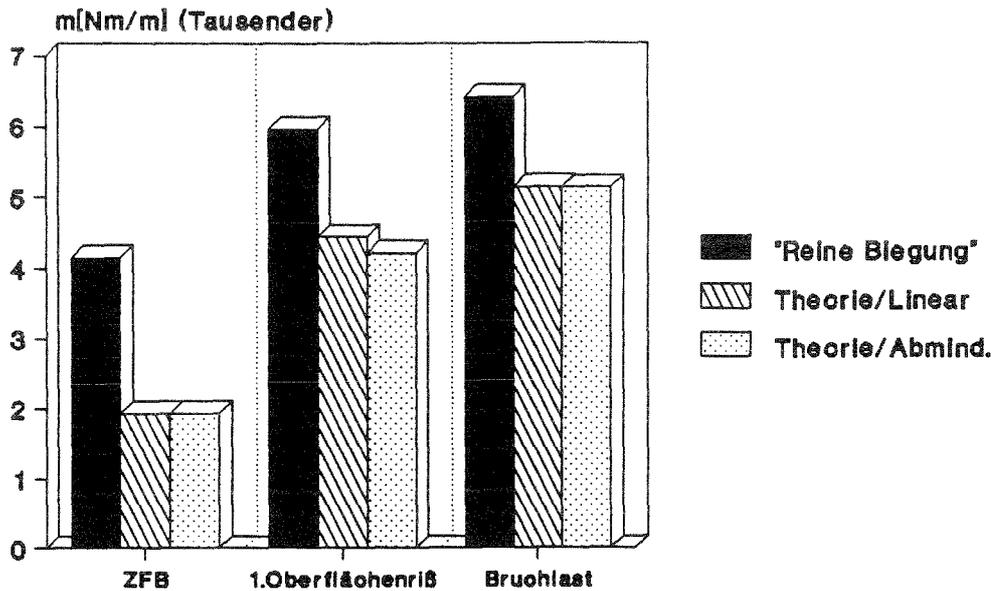


Diagramm 6.7.14

Laminat Nr. 7 / Y-Rtg. / US

Krümmungen : Theorie - Experimentell

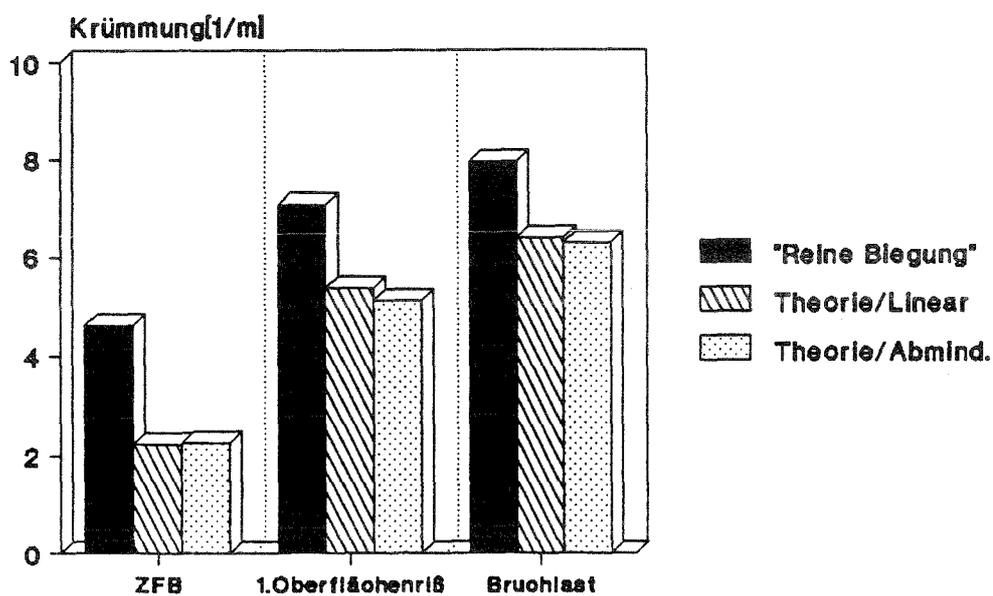


Diagramm 6.7.15

Laminat Nr. 7 Elastizitätsmodule

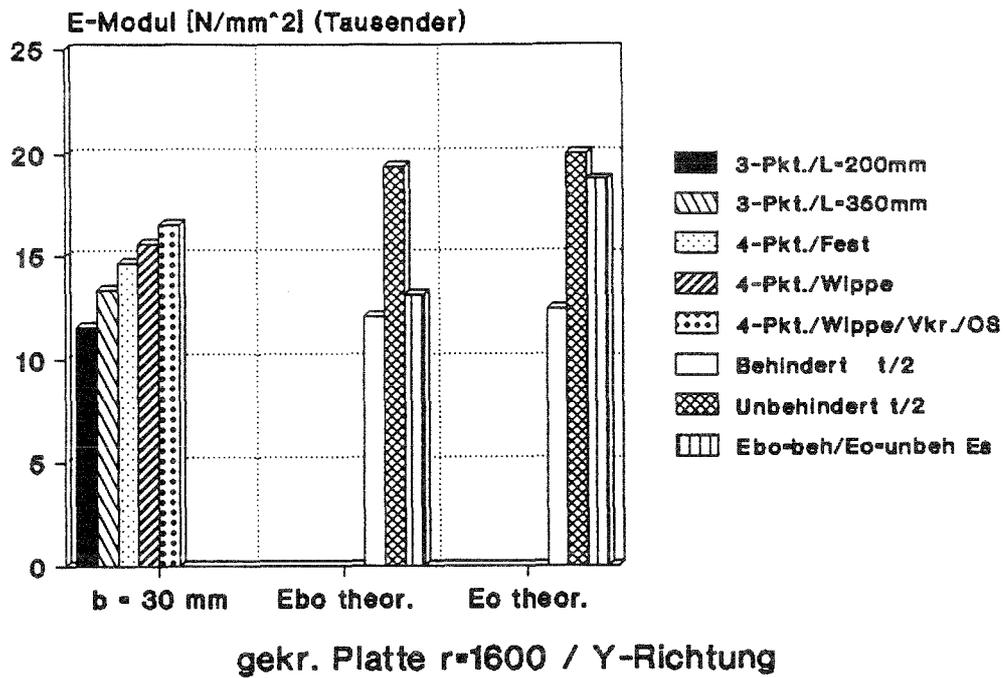


Diagramm 6.7.16

Einfluß der Prüfmethode auf die erzielten Maximallasten

(Diagramme 6.7.10, 6.7.9)

Im Gegensatz zur Längsrichtung ergibt sich durch den großen Weg eine wesentlich höhere Bruchspannung mit Verformungsberücksichtigung nach DIN EN 63 als mit allen anderen Versuchsarten. Ansonsten ist die übliche Reihenfolge der Ergebnishöhe in Abhängigkeit von der Versuchsart zu registrieren.

Bei diesen Versuchsserien (OS) wurde die Auskleidung durch Druck belastet, trug bis zum Bruch mit (bei dem die zugbelastete UD-Schicht versagte), jedoch zeigten sich Schäden unter dieser Lage (Bild 6.7.1).

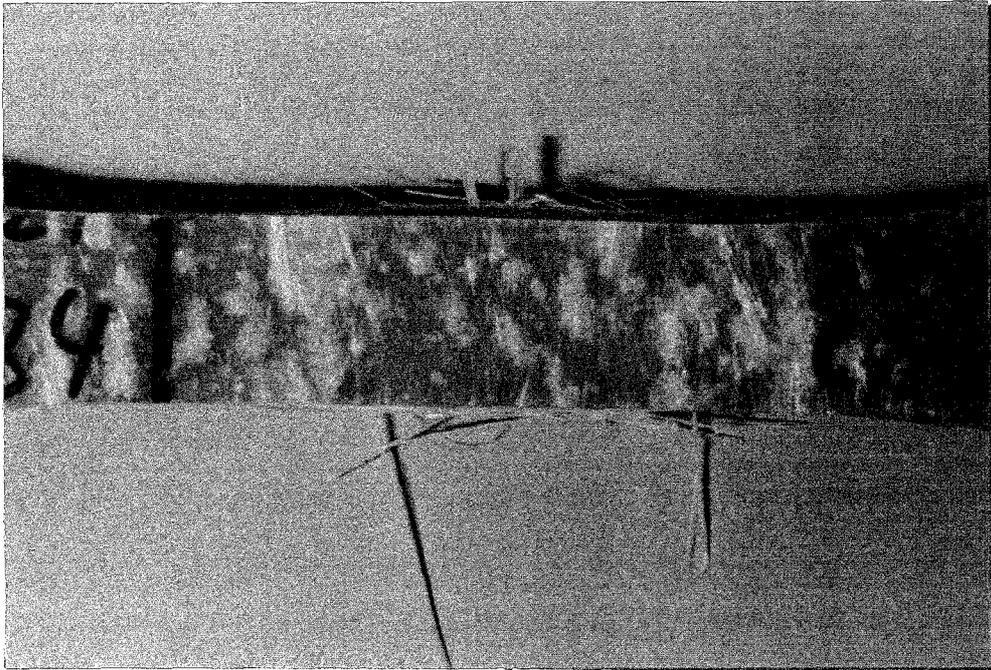


Bild 6.7.1

Reibungszahlen für die Dreipunktbiegung

(Diagramme 6.7.12, 6.7.13)

Die Differenzen zwischen der Versuche mit und ohne Reibung ist verhältnismäßig gering, ist aber nicht unerwartet, da die Proben mit der glatten Außenseite, einer 90°-UD-Lage, auflagen.

	Ansatz	L/t	Rtg.	Schnittmoment	Spannungen	Mittelwert
Mit Reibung	"	21	OS	0.90	0.85	0.88
	*			1.02	0.99	1.01
"Ohne" Reibung	"	21	OS	0.69	0.85	0.77
	*			0.82	0.99	0.91

Tabelle 6.7.2 Ermittelte Reibungszahlen

Vergleich der theoretischen und experimentellen Maximallasten

(Diagramme 6.7.14, 6.7.15)

Hier werden mit den beiden theoretischen Ansätzen ungefähr die gleichen, zu niedrigen Resultate erzielt. Hier kommt die Tatsache zum Tragen, daß die 90°-UD-Lagen dominierend sind, und bei der parallelen Belastung der Fasern auch im 2. Ansatz keine Abminderung erfolgt. Außerdem existiert wieder das Problem mit den Kennwerten der Auskleidung, allerdings waren die theoretischen Daten der X-Rtg. zu hoch, so daß hier eine Korrektur nicht sinnvoll erschien.

Laminat Nr. 8 / X-Rtg. / US

Schnittmomente : Theorie - Experimentell

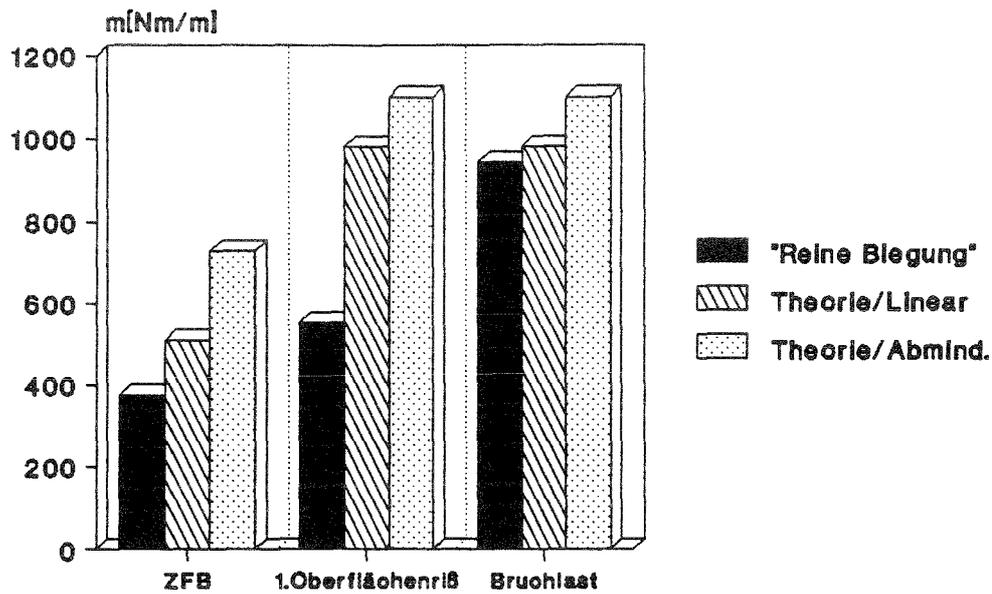


Diagramm 6.8.1

Laminat Nr. 8 / X-Rtg. / US

Krümmungen : Theorie - Experimentell

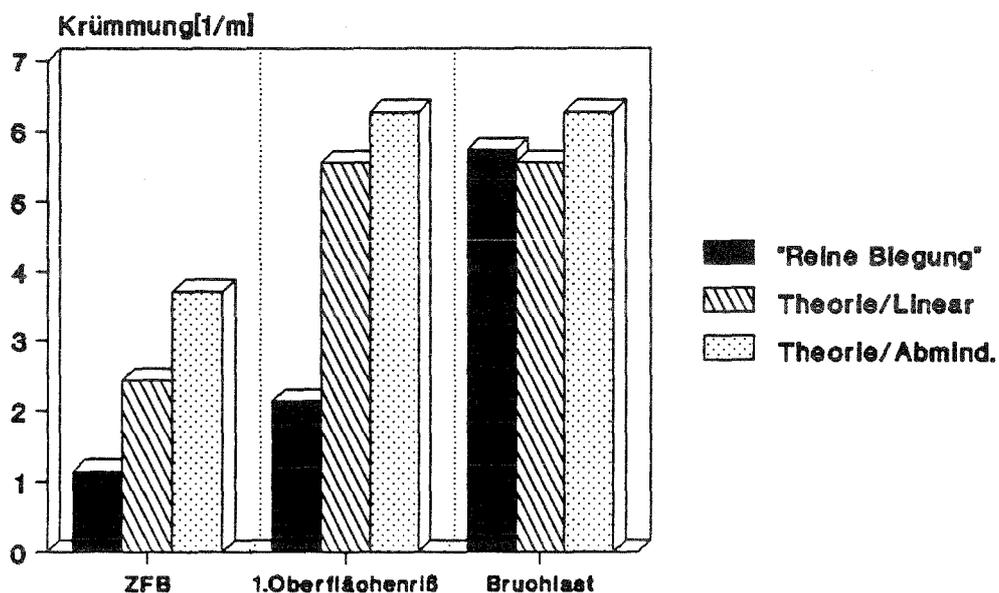


Diagramm 6.8.2

Laminat Nr.8 Schnittmomente

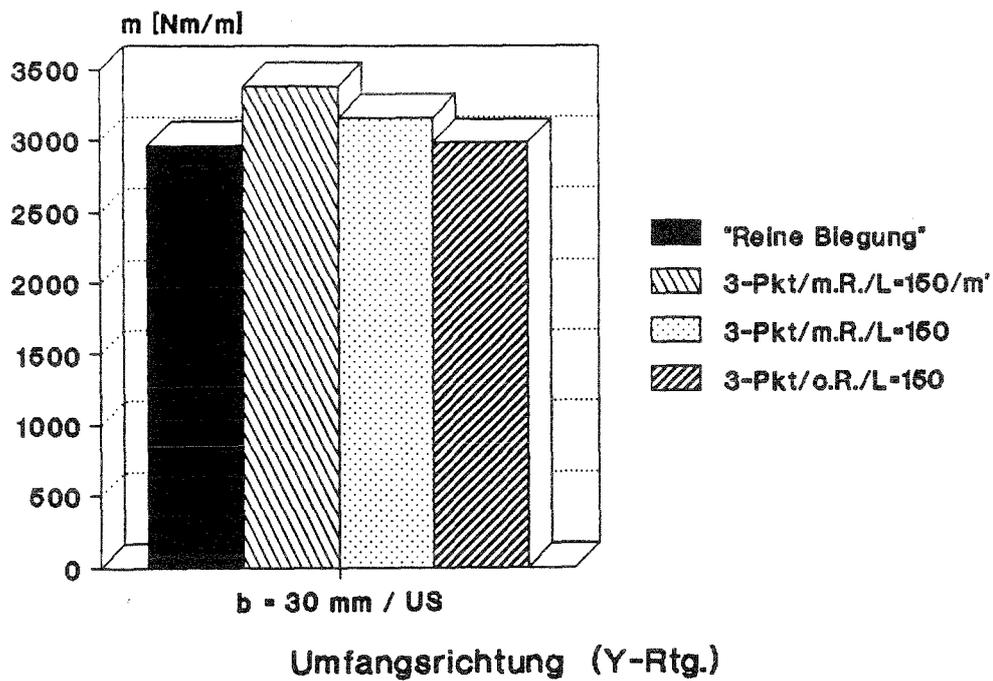


Diagramm 6.8.3

Laminat Nr.8 Spannungen

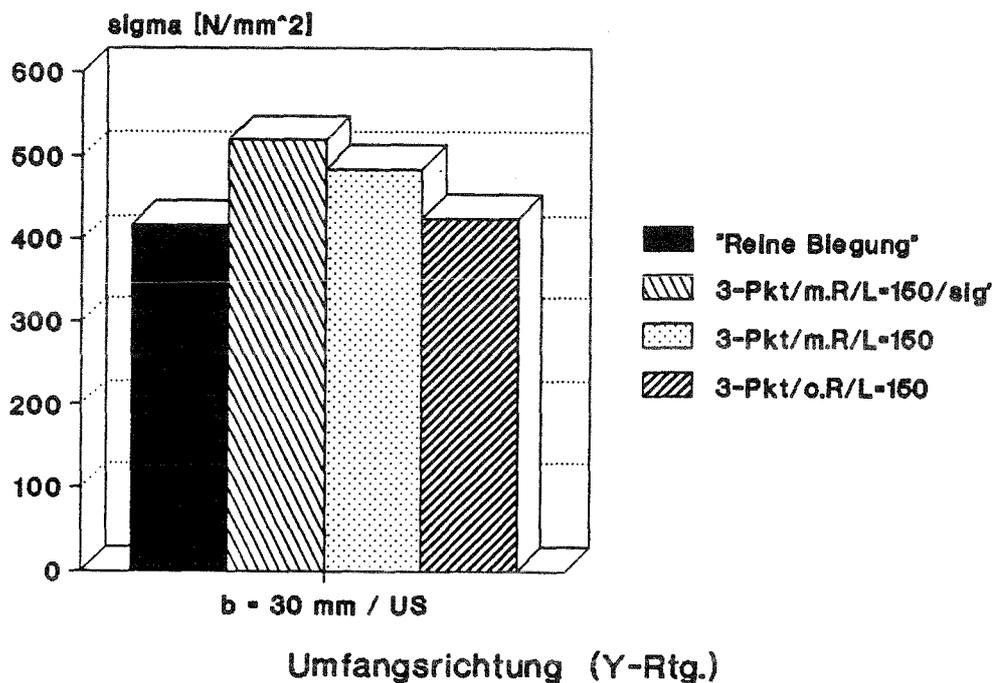


Diagramm 6.8.4

Laminat Nr.8 / Y-Rtg. / US
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung
Maximale Schnittmomente

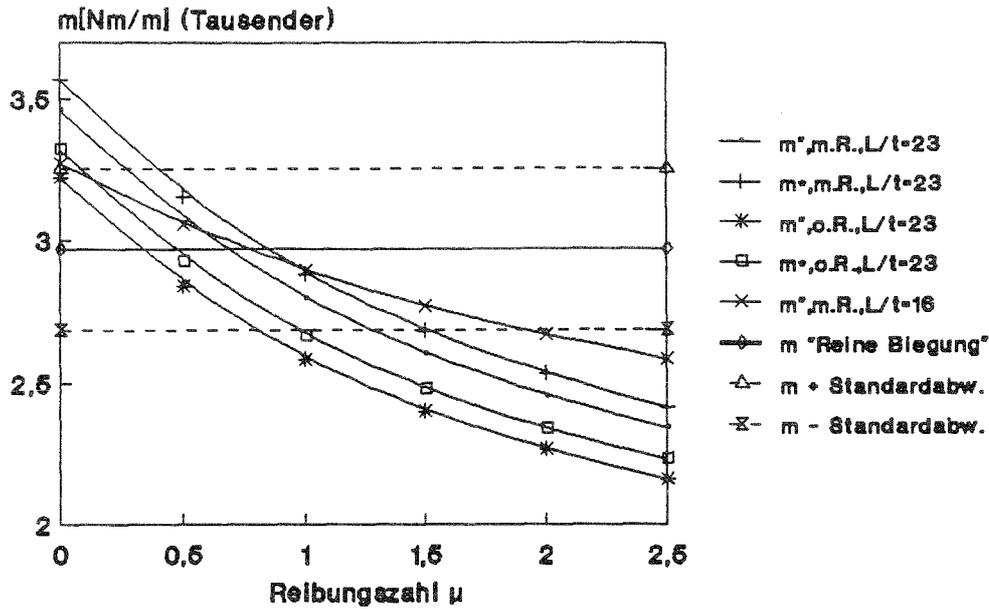


Diagramm 6.8.5

Laminat Nr.8 / Y-Rtg. / US
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung
Biegebruchspannungen

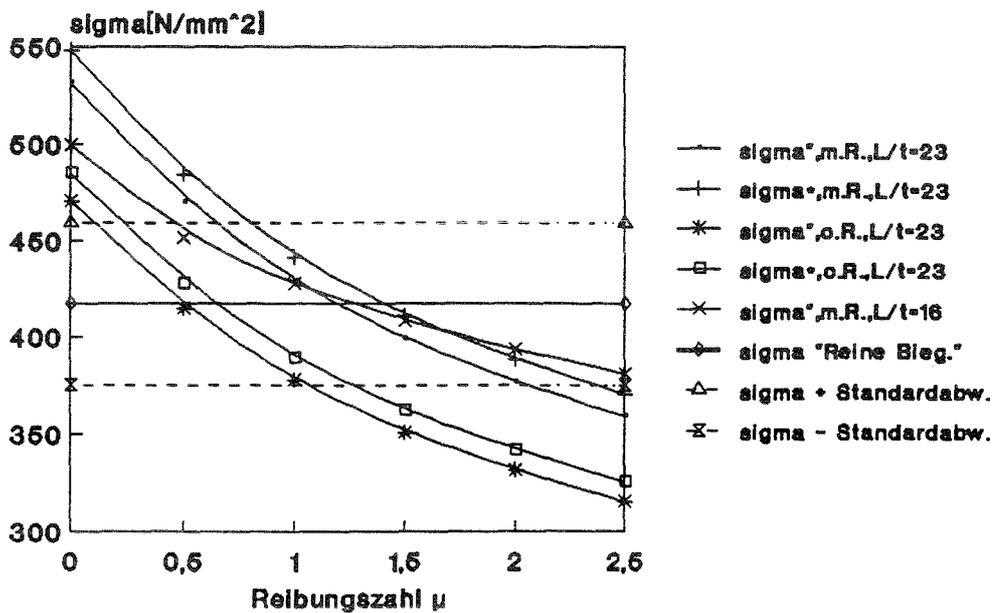


Diagramm 6.8.6

Laminat Nr. 8 / Y-Rtg. / US

Schnittmomente : Theorie - Experimentell

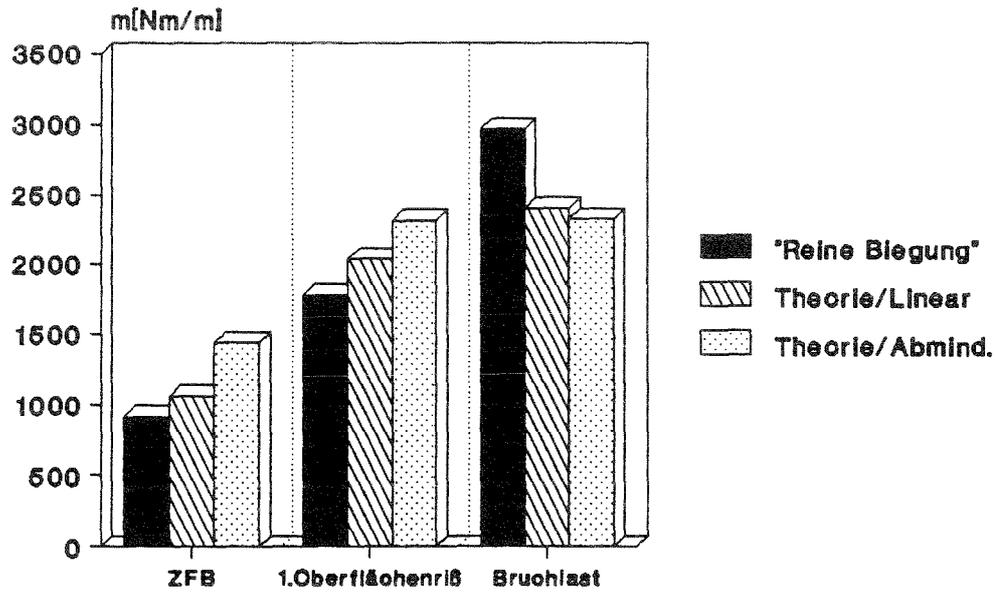


Diagramm 6.8.7

Laminat Nr. 8 / Y-Rtg. / US

Krümmungen : Theorie - Experimentell

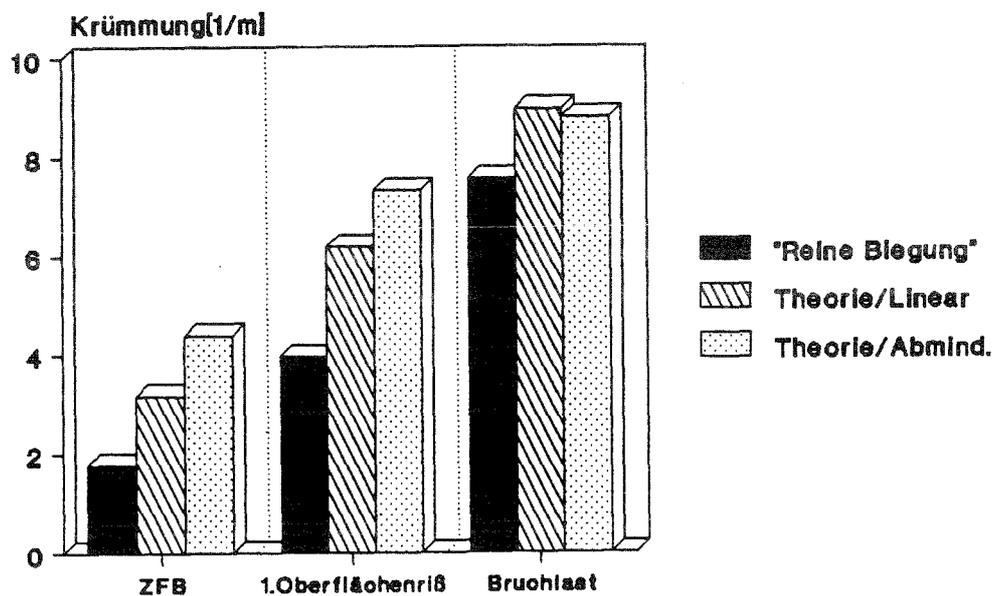


Diagramm 6.8.8

Laminat Nr.8
 Bruchlasten der 3-Punkt-Biegung bei
 Variation des Auflagerabstandes / b=30mm

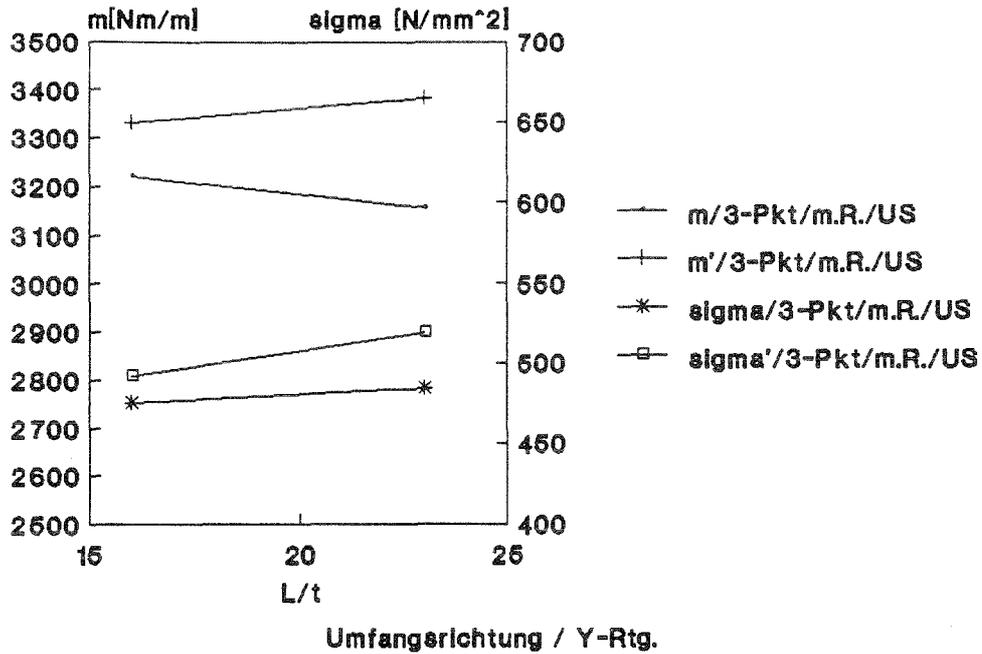


Diagramm 6.8.9

Laminat Nr.8
 Bruchlasten als Funktion der Breite
 L/t=16

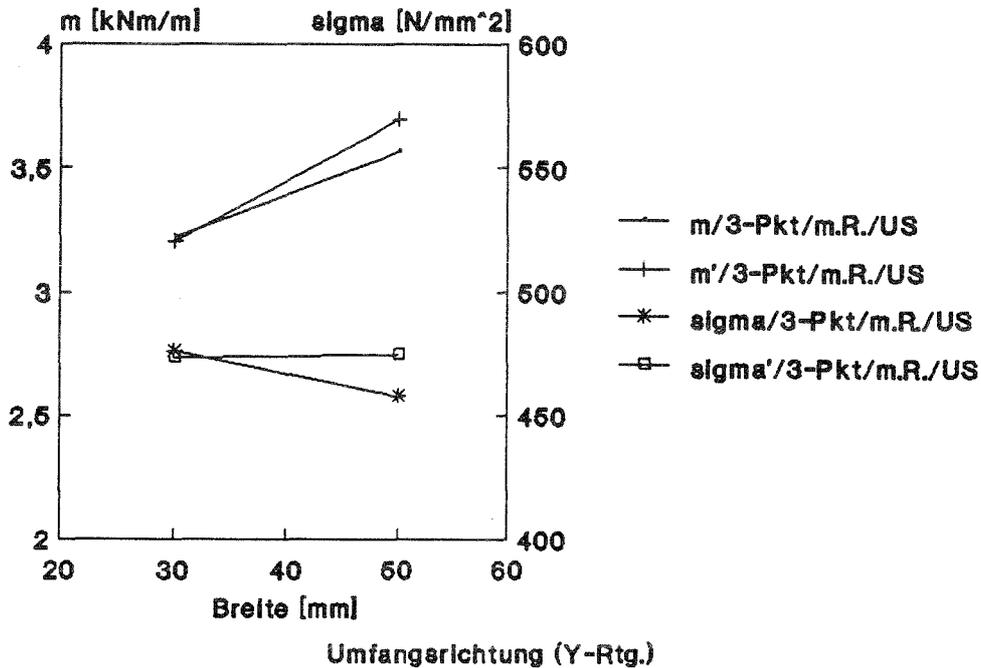
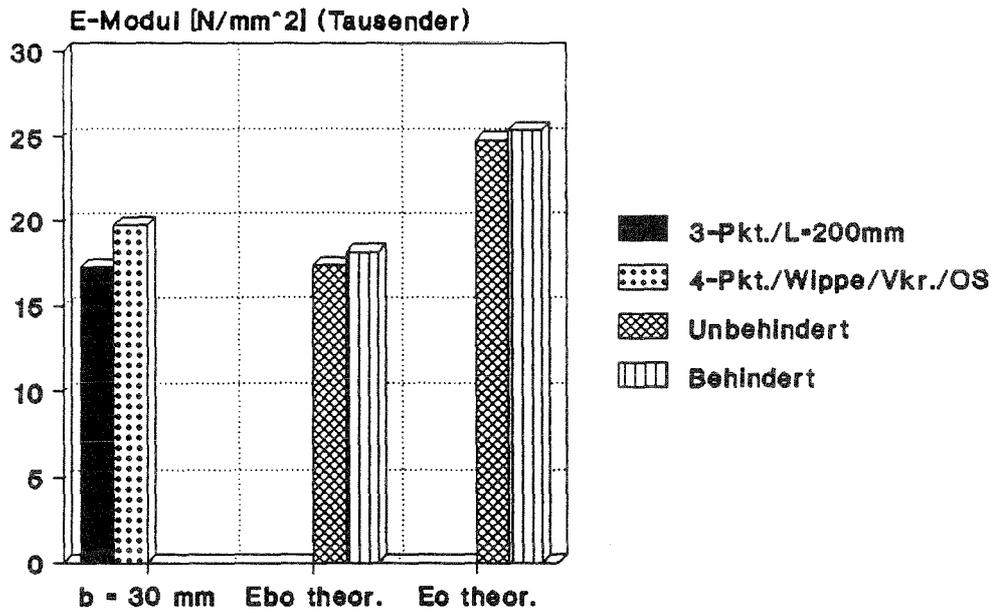


Diagramm 6.8.10

Laminat Nr. 8 Elastizitätsmodule



gekr. Platte r=1000 / Y-Richtung

Diagramm 6.8.11

Einfluß der Prüfmethode auf die erzielten Maximallasten

(Diagramme 6.8.3, 6.8.4, 6.8.9, 6.8.10)

Die "reine" Biegung und die "reibungsfreie" Dreipunktbiegung liefern die geringsten Resultate.

Bei der Variation des Auflagerabstand ist bei den Schnittmomenten ein leichtes Sinken, bei den Biegespannungen ein geringes Steigen mit zunehmendem Verhältnis L/t feststellbar, während die Faservolumenbezogenen Spannungen (Werte im Anhang) quasi konstant bleiben, so daß bei diesem Laminat in diesem Längenbereich kein großer Einfluß feststellbar ist.

Bei der Variation der Breite ergibt sich ein ähnliches Bild, wenn man die Werte m/σ heranzieht.

Reibungszahlen für die Dreipunktbiegung

(Diagramme 6.8.5, 6.8.6)

Da bei diesem Laminat keine wesentlicher Einfluß des Auflagerabstands festzustellen war, schneiden sich hier die Linien der Reibungszahlen bei einem Wert, der zu gleichen Resultaten bei beiden Auflagerabständen führt, und zugleich im Bereich des Meßwertes der Biegeprüfvorrichtung liegt. Dies spricht sowohl für den Ansatz, als auch für das Ergebnis der "reinen" Biegung.

	Ansatz	L/t	Rtg.	Schnittmoment	Spannungen	Mittelwert
Mit Reibung	"	23	US	0.70	1.21	0.96
	*			0.85	1.42	1.14
	"	16		0.79	1.28	1.04
"Ohne" Reibung	"	23	US	0.35	0.52	0.44
	*			0.49	0.66	0.58

Tabelle 6.8.1 Ermittelte Reibungszahlen

Vergleich der theoretischen und experimentellen Maximallasten

(Diagramme 6.8.1, 6.8.2 / Längsrichtung)

(Diagramme 6.8.7, 6.8.8 / Umfangsrichtung)

Es sind mit dem 2. Ansatz in X- und in Y-Richtung zu hohe Krümmungen berechnet wurden, hingegen sind die Schnittmomente in Längsrichtung zu hoch, in Umfangsrichtung zu niedrig. Da bei den theoretischen Biegemodulen in Y-Rtg. im Vergleich zum Meßwert der Vierpunktbiegung ebenfalls zu niedrige Werte berechnet wurden, ist anzunehmen, daß die Veraschung und Ermittlung des Laminataufbaus mit Probenstücken erfolgte, die nicht repräsentativ waren.

Laminat Nr. 9 / X-Rtg. / US

Schnittmomente : Theorie - Experimentell

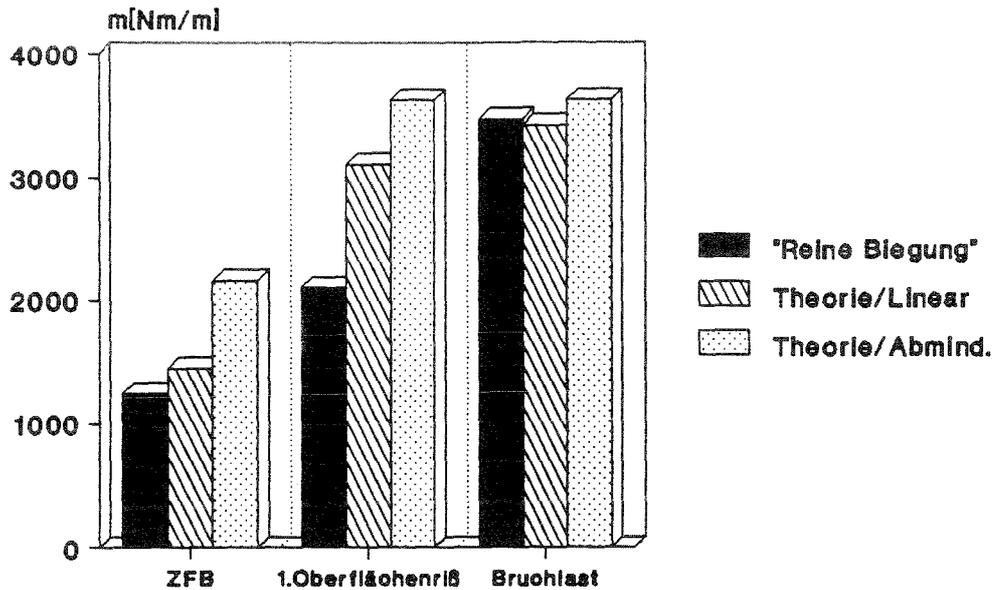


Diagramm 6.9.1

Laminat Nr. 9 / X-Rtg. / US

Krümmungen : Theorie - Experimentell

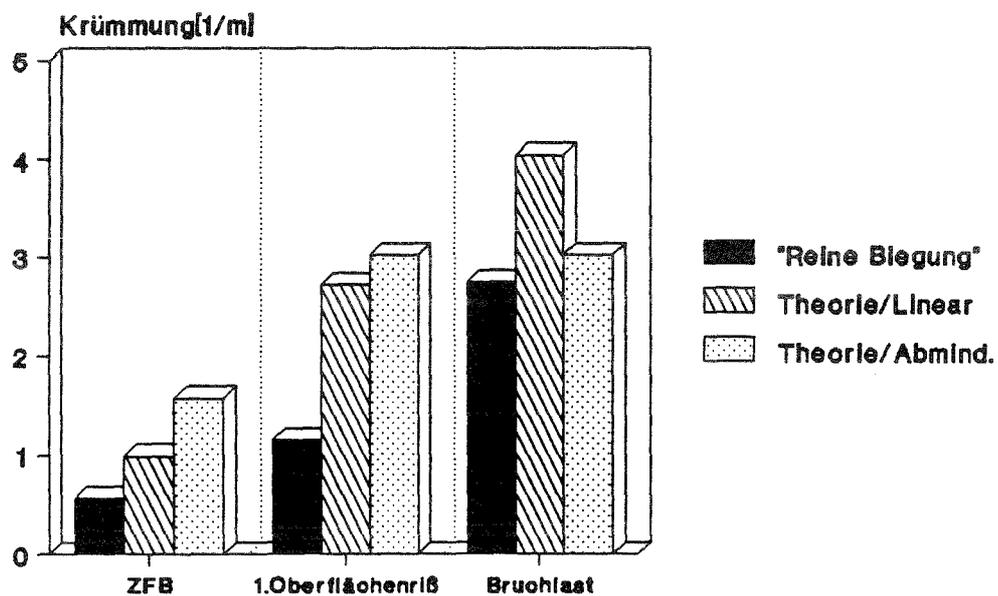


Diagramm 6.9.2

Laminat Nr.9 E-Module als Funktion der Breite

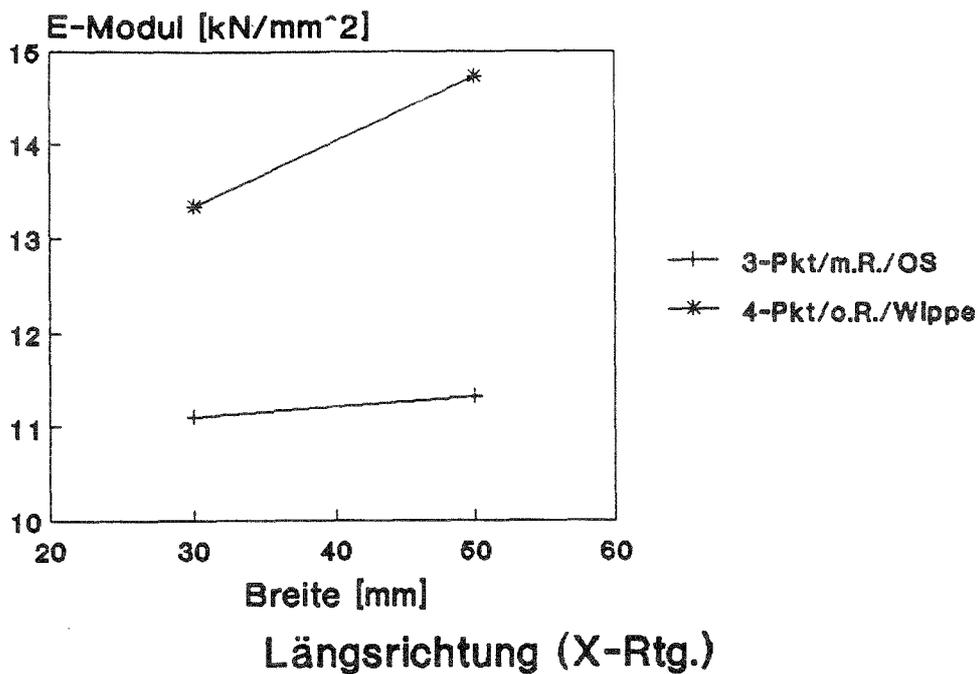


Diagramm 6.9.3

Laminat Nr. 9 Elastizitätsmodule

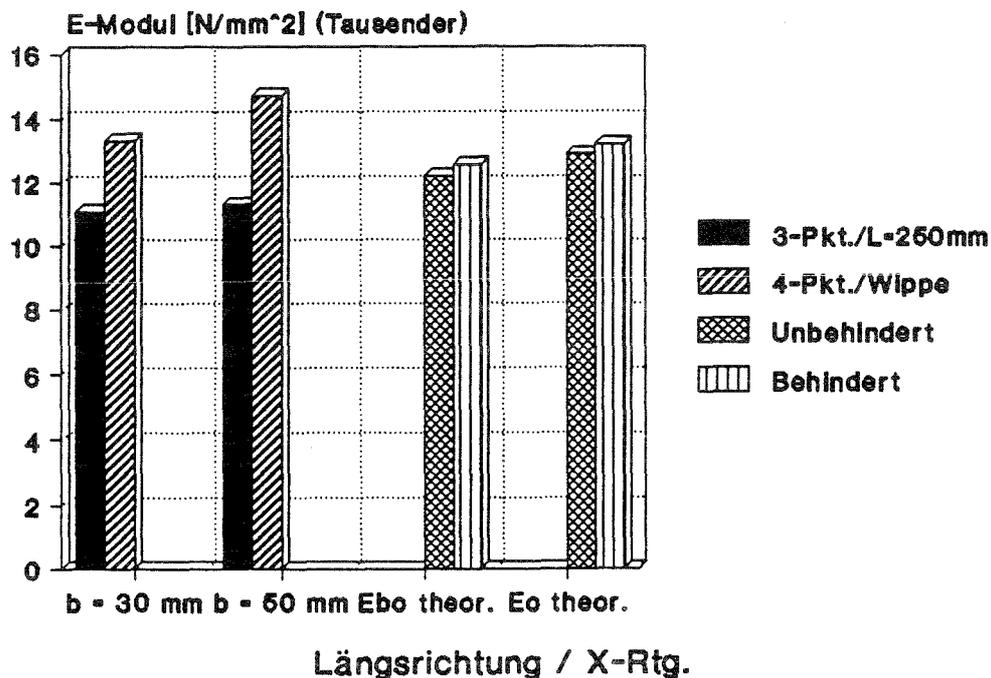


Diagramm 6.9.4

Laminat Nr.9 Schnittmomente

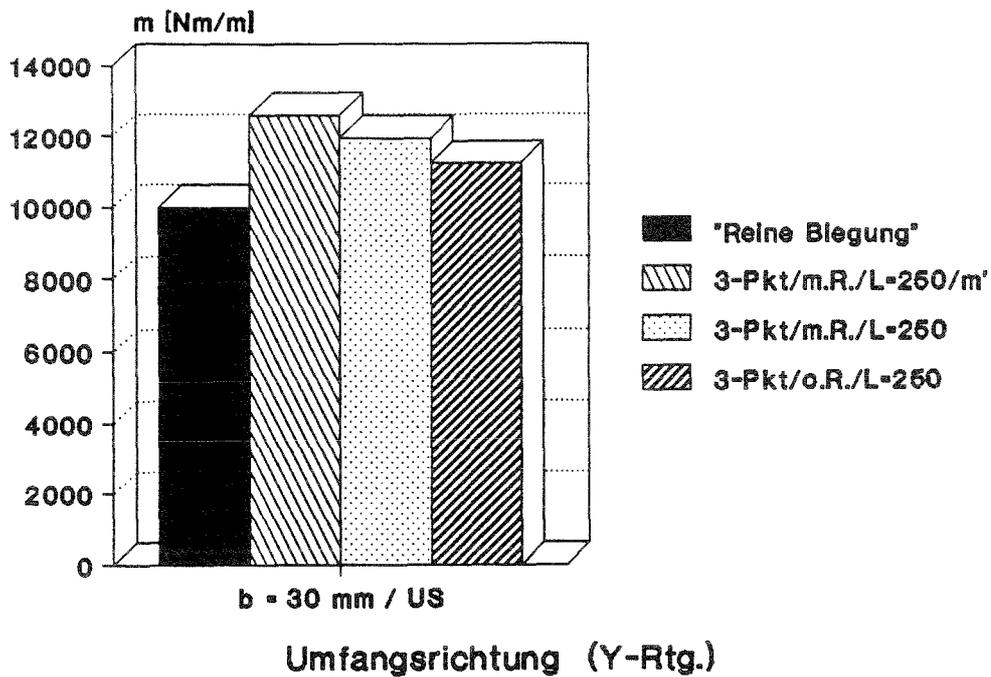


Diagramm 6.9.5

Laminat Nr.9 Spannungen

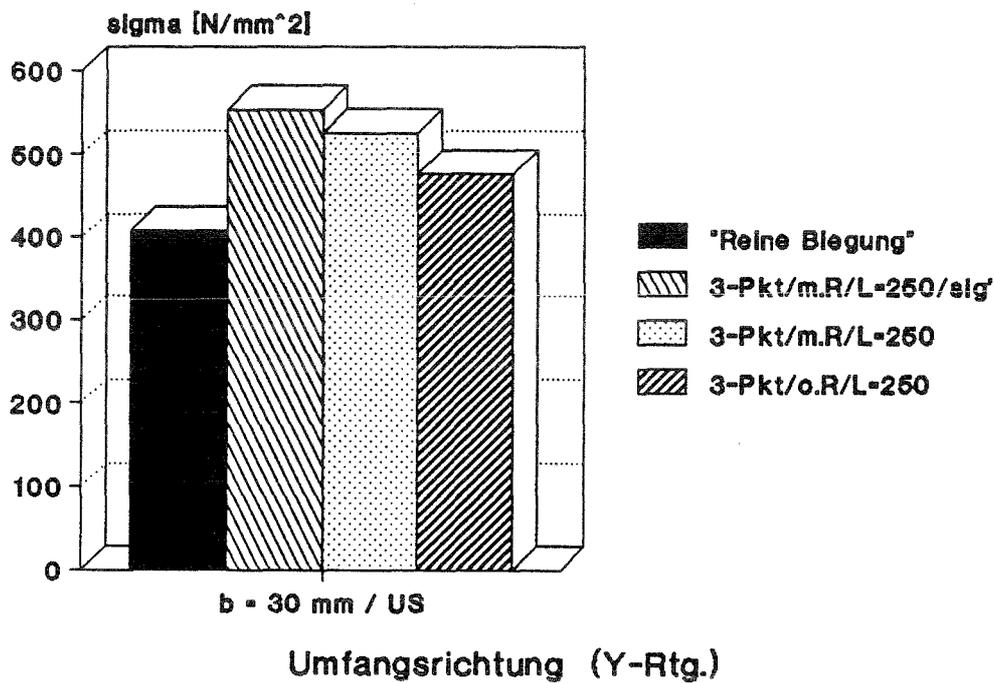


Diagramm 6.9.6

Laminat Nr.9 / Y-Rtg. / US
 Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung
 Maximale Schnittmomente

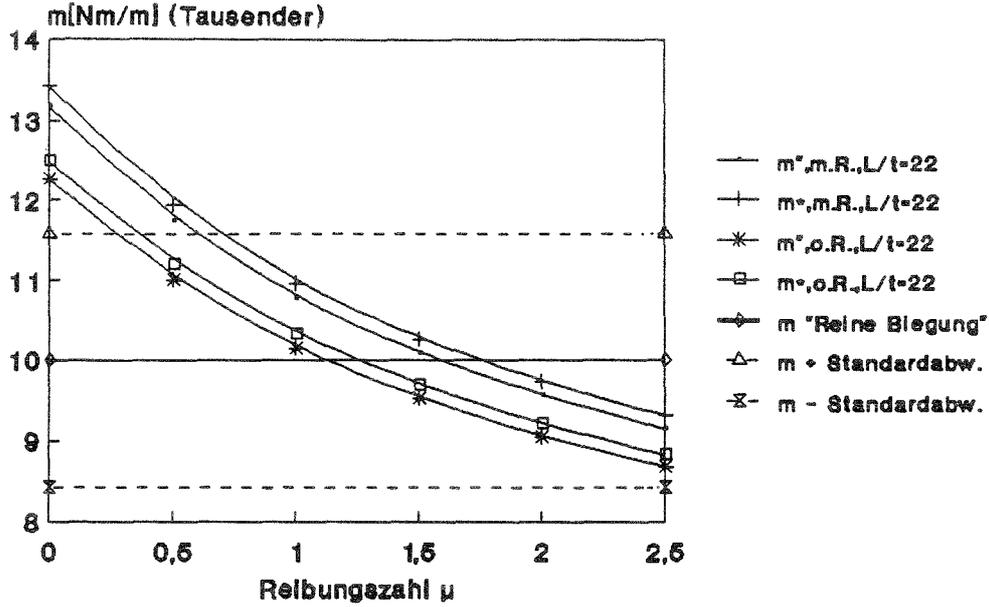


Diagramm 6.9.7

Laminat Nr.9 / Y-Rtg. / US
 Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung
 Biegebruchspannungen

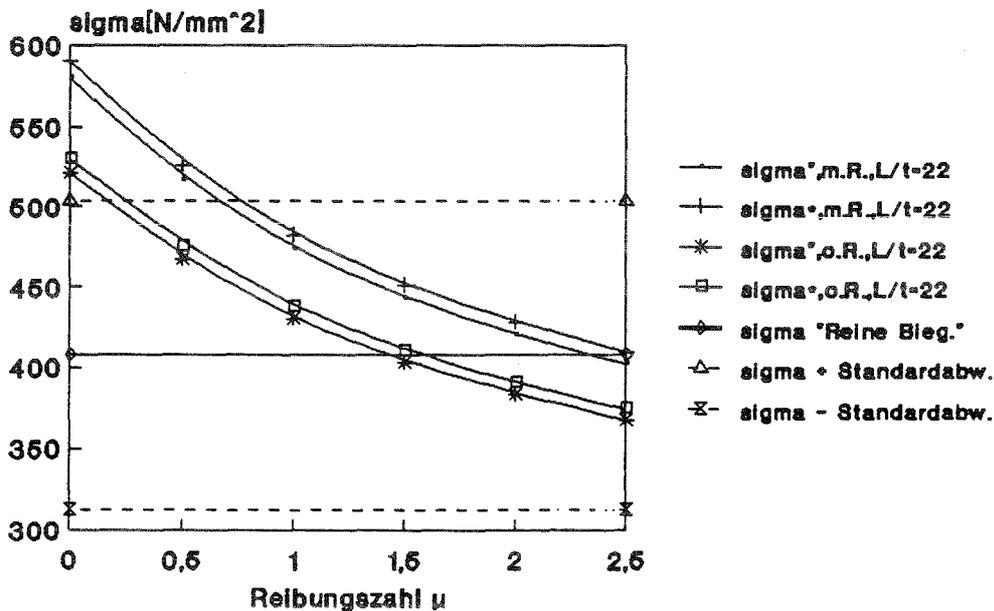


Diagramm 6.9.8

Laminat Nr. 9 / Y-Rtg. / US Schnittmomente : Theorie - Experimentell

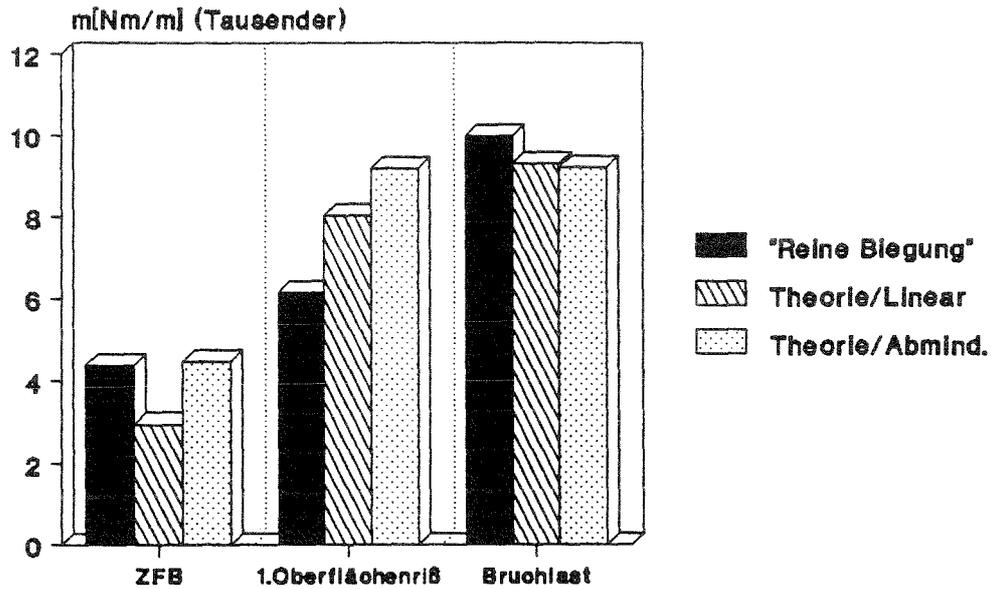


Diagramm 6.9.9

Laminat Nr. 9 / Y-Rtg. / US Krümmungen : Theorie - Experimentell

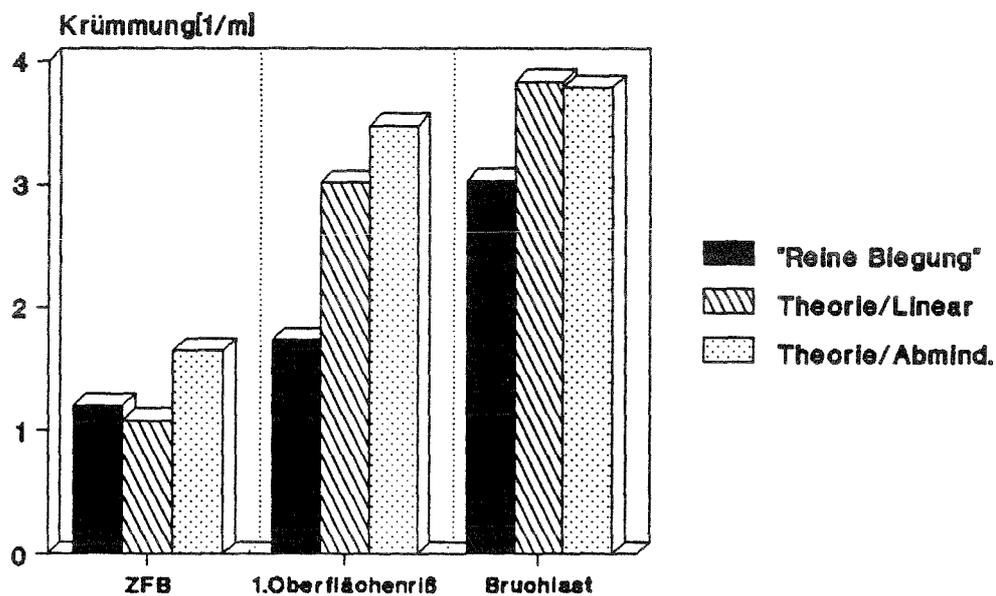
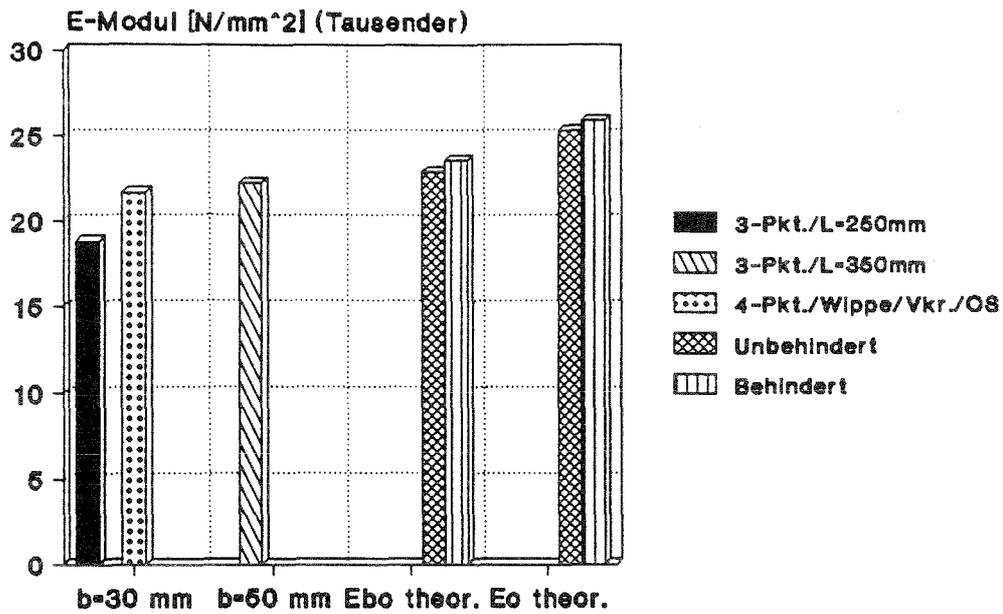


Diagramm 6.9.10

Laminat Nr. 9 Elastizitätsmodule



gekr. Platte r=1000 / Y-Richtung

Diagramm 6.9.11

Einfluß der Prüfmethode auf die erzielten Maximallasten

(Diagramme 6.9.5, 6.9.6)

Innerhalb der einzelnen Proben waren große Dickendifferenzen zu registrieren (bis zu 1.8 mm). Für die Versuche mit der Biegeprüfvorrichtung standen nur drei Proben zur Verfügung, das Ergebnis weist eine hohen Schwankung auf, so daß sich das Konfidenzintervall für P=75% beim Schnittmoment von 8549 bis 11463 Nm/m erstreckt.

Reibungszahlen für die Dreipunktbiegung

(Diagramme 6.9.7, 6.9.8)

Die Reibungszahlen sind ebenfalls, unter dem Gesichtspunkt der Schwankungen, skeptisch zu betrachten, erkennbar ist dies auch an der eingezeichneten Standardabweichung.

	Ansatz	L/t	Rtg.	Schnittmoment	Spannungen	Mittelwert
Mit Reibung	"	22	US	1.59	2.33	1.29
	*			1.77	2.50	1.46
"Ohne" Reibung	"	22	US	1.25	1.44	1.35
	*			1.13	1.60	1.37

Tabelle 6.9.1 Ermittelte Reibungszahlen

Vergleich der theoretischen und experimentellen Maximallasten

(Diagramme 6.9.1, 6.9.2, 6.9.9, 6.9.10)

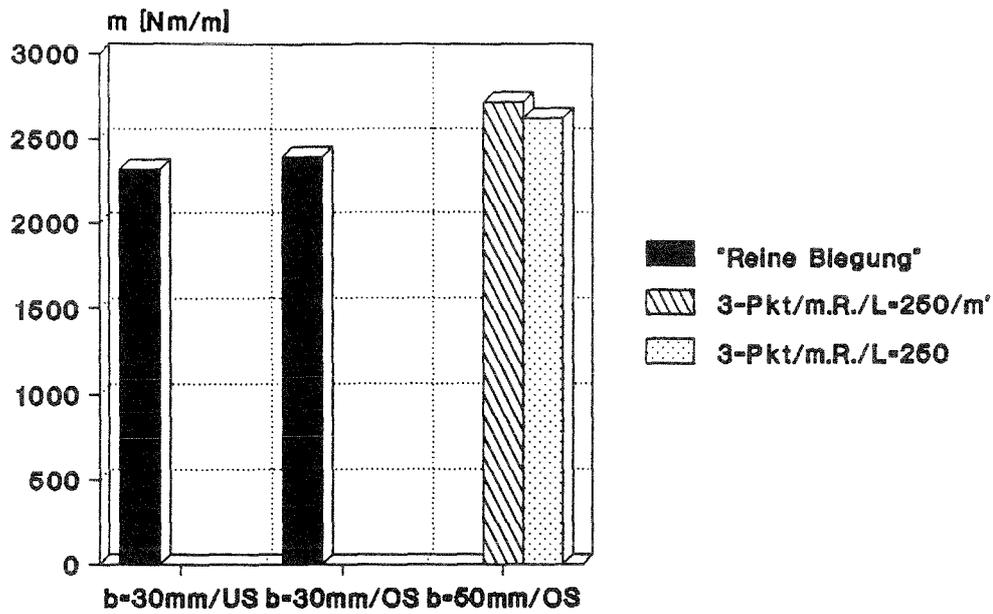
In X-Richtung wird mit beiden theoretischen Ansätzen ein gute Überkunft bei dem Bruchschnittmoment erzielt, aber bei dem ersten Ansatz erfolgt durch die direkte "Nullsetzung" der Schichten eine zu starke Wanderung des elastischen Schwerpunktes, was zu der überhöhten Bruchkrümmung führt.

Hingegen werden in Y-Richtung etwas zu geringe Schnittmomente, aber zu hohe Krümmungen erzielt, aber hier sollten wieder die Toleranzen der Versuchsserie beachtet werden. So ergab sich für die Bruchkrümmung ein minimaler Wert von 2.24 [1/m], der maximale Wert lag bei 3.76 [1/m], was quasi der Bruchkrümmung des 2.Ansatzes von 3.78 [1/m] entspricht.

Elastizitätsmodule

Bei der Variation der Breite ist in Diagramm 6.9.3, trotz der Querkrümmung, auch bei der 3-Punkt-Biegung ein leichter Anstieg des Biegemoduls bei größerer Breite festzustellen, der jedoch geringer ausfällt als bei der Vierpunktbiegung mit "Wippe". Jedoch zeigen sich bei dem Vergleich mit den theoretischen Ergebnissen die Laminatschwankungen.

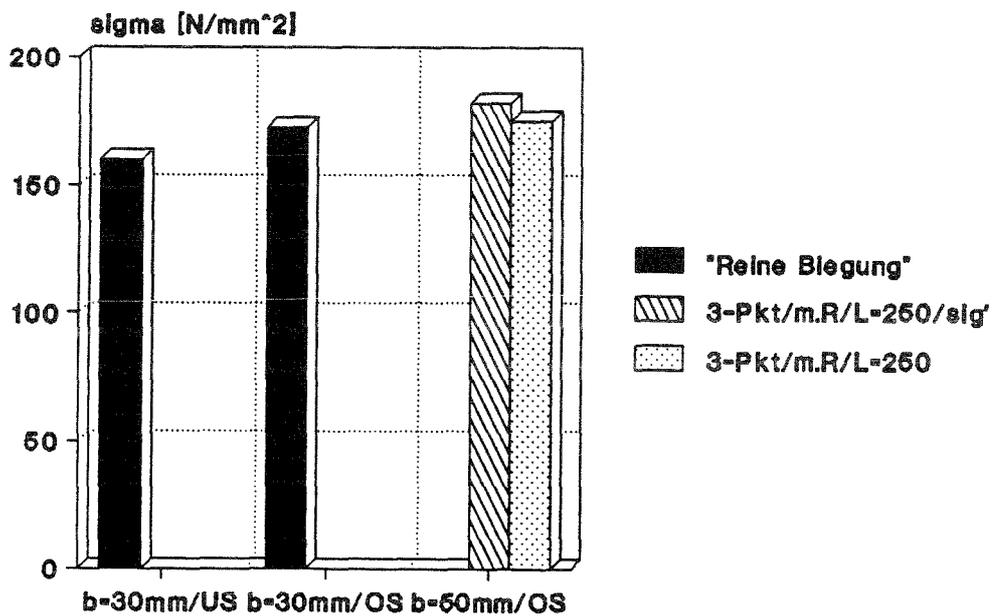
Laminat Nr.10 Schnittmomente



ungekrümmte Platte / X-Richtung

Diagramm 6.10.1

Laminat Nr.10 Spannungen



ungekrümmte Platte / X-Richtung

Diagramm 6.10.2

Laminat Nr.10 / X-Rtg. / OS
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung
Schnittmomente

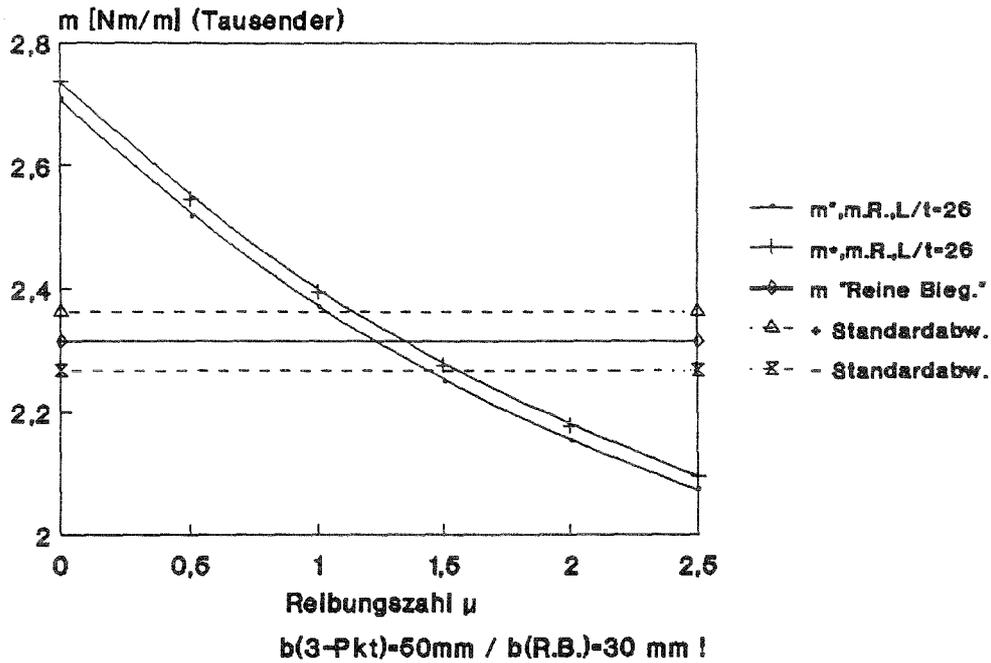


Diagramm 6.10.3

Laminat Nr.10 / X-Rtg. / OS
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung
Biegebruchspannungen

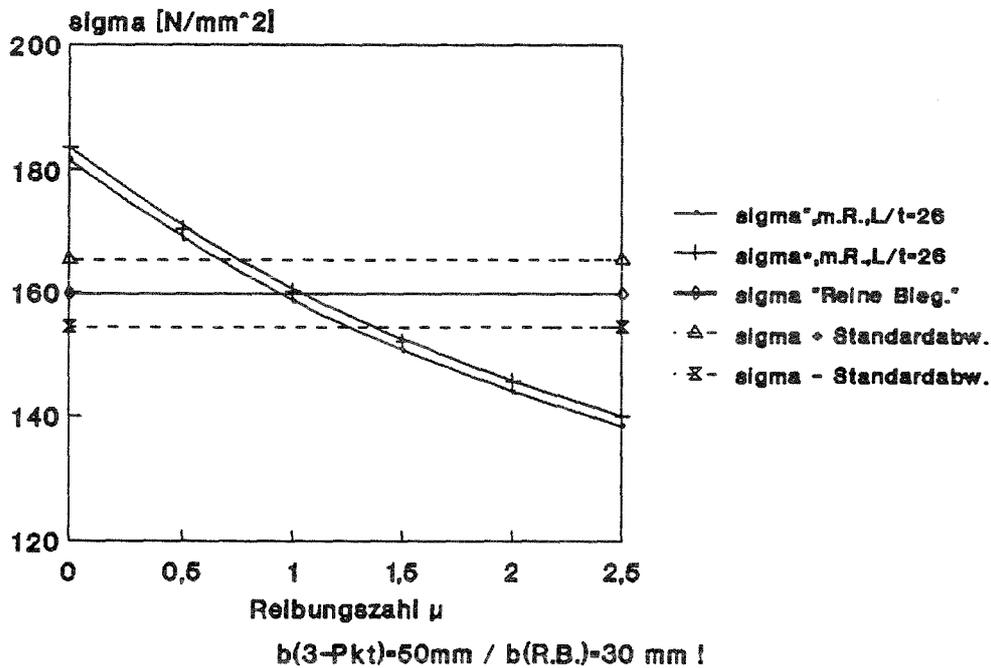


Diagramm 6.10.4

Laminat Nr.10 / X-Rtg. Schnittmomente : Theorie - Experimentell

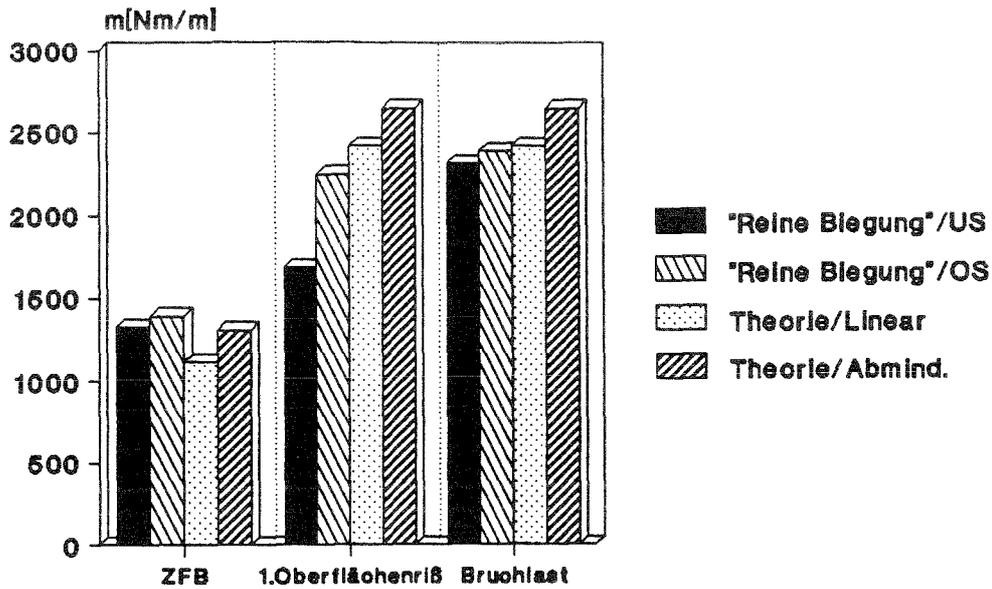


Diagramm 6.10.5

Laminat Nr.10 / X-Rtg. Krümmungen : Theorie - Experimentell

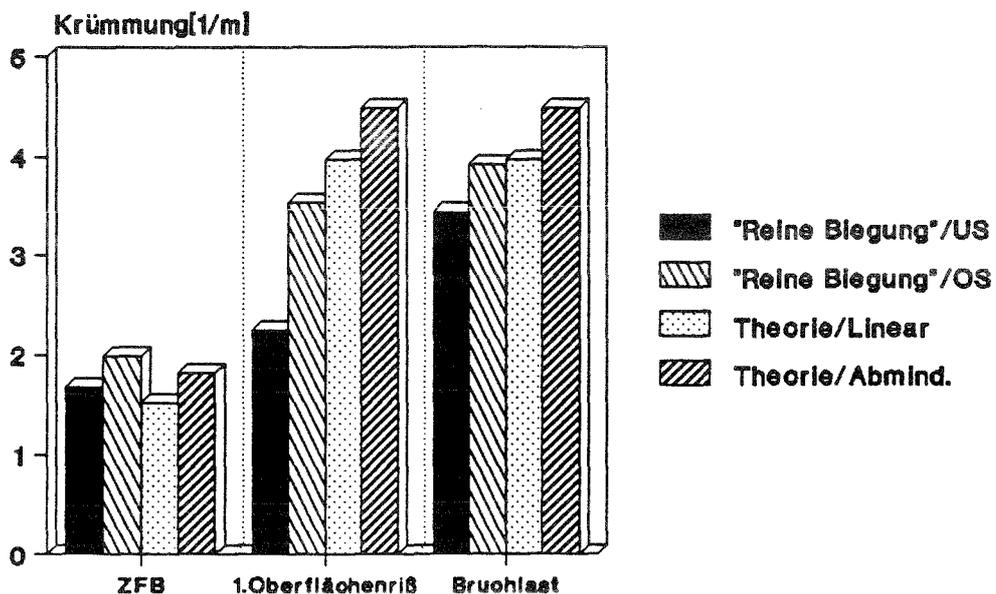
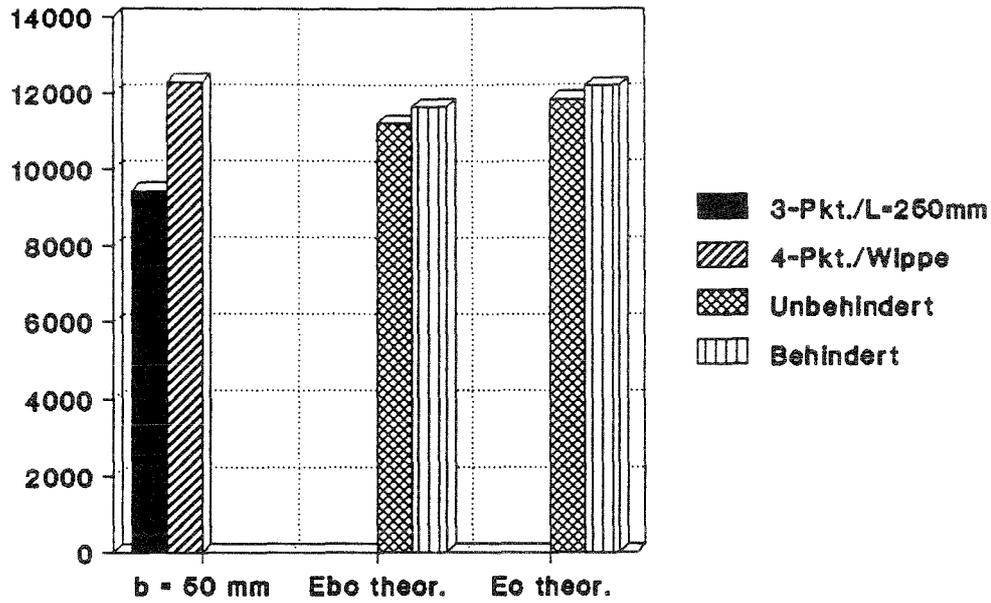


Diagramm 6.10.6

Laminat Nr. 10 Elastizitätsmodule



Ungekrümmte Platte / X-Richtung

Diagramm 6.10.7

Einfluß der Prüfmethode auf die erzielten Maximallasten

(Diagramme 6.10.1, 6.10.2)

Es sind geringfügige Differenzen zwischen der Belastungsrichtung "US" und "OS" zu registrieren, wenn man jedoch die Bruchspannungen betrachtet, liegen hier entgegengesetzte Verhältnisse vor, so daß diese Unterschiede nicht als signifikant anzusehen sind.

Reibungszahlen für die Dreipunktbiegung

(Diagramme 6.10.3, 6.10.4)

Hier findet zwar ein Vergleich zwischen unterschiedlichen Breiten statt, jedoch liegen die Schnittpunkt im erwarteten Bereich. Die Proben lagen mit der glatten Seite auf, was trotzdem zu Reibungszahlen von etwa 1 führte.

	Ansatz	L/t	Rtg.	Schnittmoment	Spannungen	Mittelwert
Mit	"	26	OS	1.23	0.95	1.09
Reibung	*			1.36	1.06	1.21

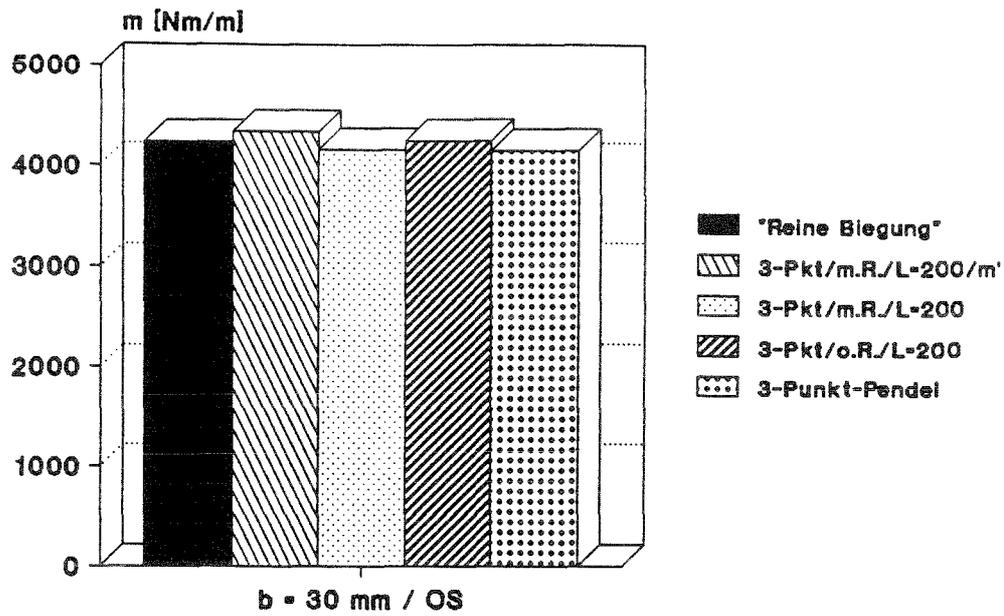
Tabelle 6.6.1 Ermittelte Reibungszahlen

Vergleich der theoretischen und experimentellen Maximallasten

(Diagramme 6.10.5, 6.10.6)

In diesem Fall ergeben sich, insbesondere mit dem 2. Ansatz, zu hohe Schnittmomente und Krümmungen. Bei der Veraschung wurden aber auch Winkelfehler der einzelnen Schichten bis zu 10° ermittelt, was in der Berechnung nicht zu berücksichtigen war.

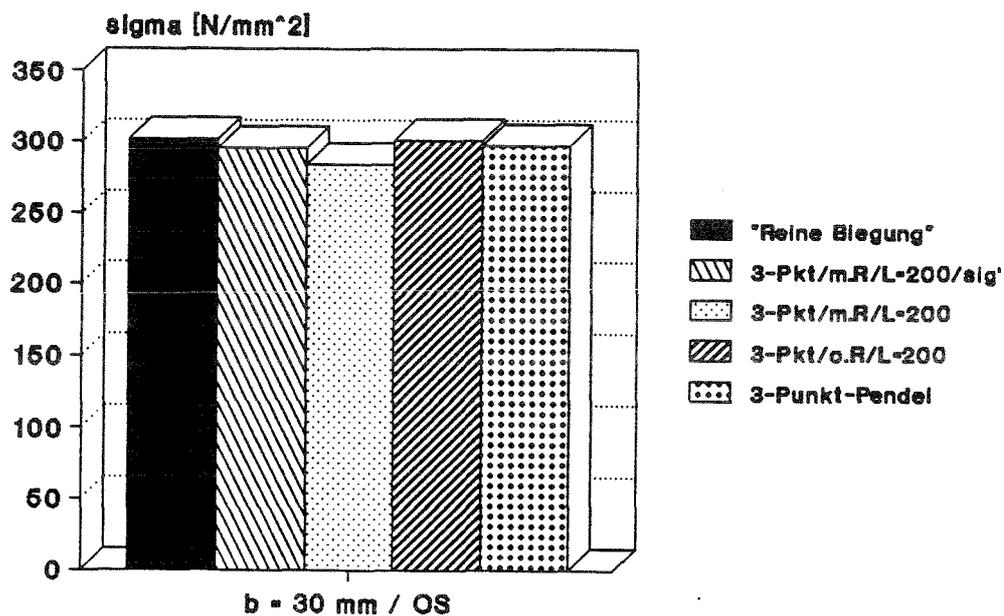
Laminat Nr.10 Schnittmomente



ungekrümmte Platte / Y-Richtung

Diagramm 6.10.8

Laminat Nr.10 Spannungen



ungekrümmte Platte / Y-Richtung

Diagramm 6.10.9

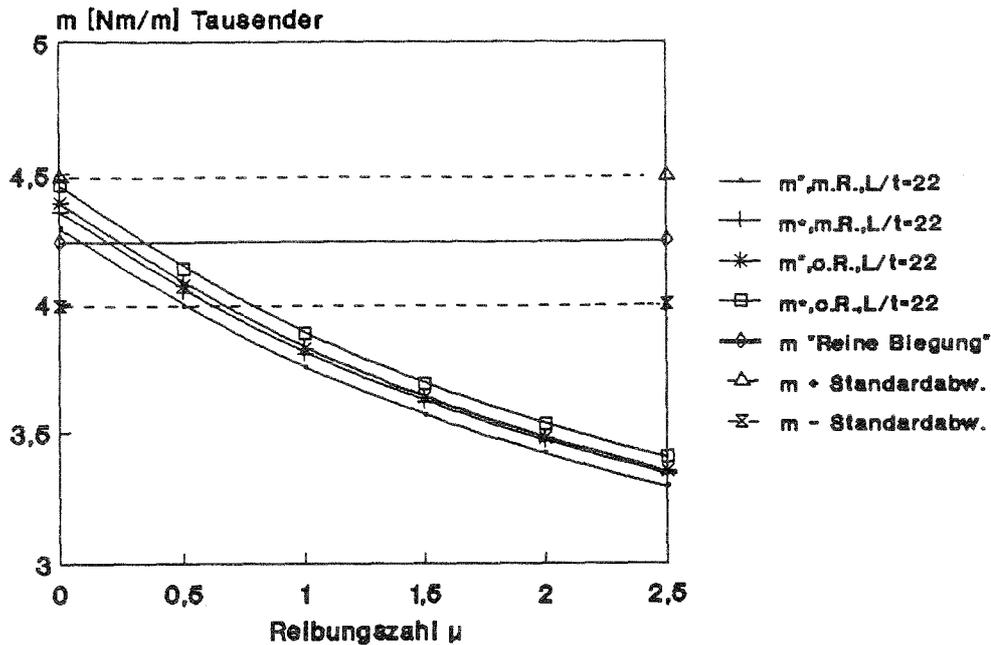
Laminat Nr.10 / Y-Rtg. / OS
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung

Diagramm 6.10.10

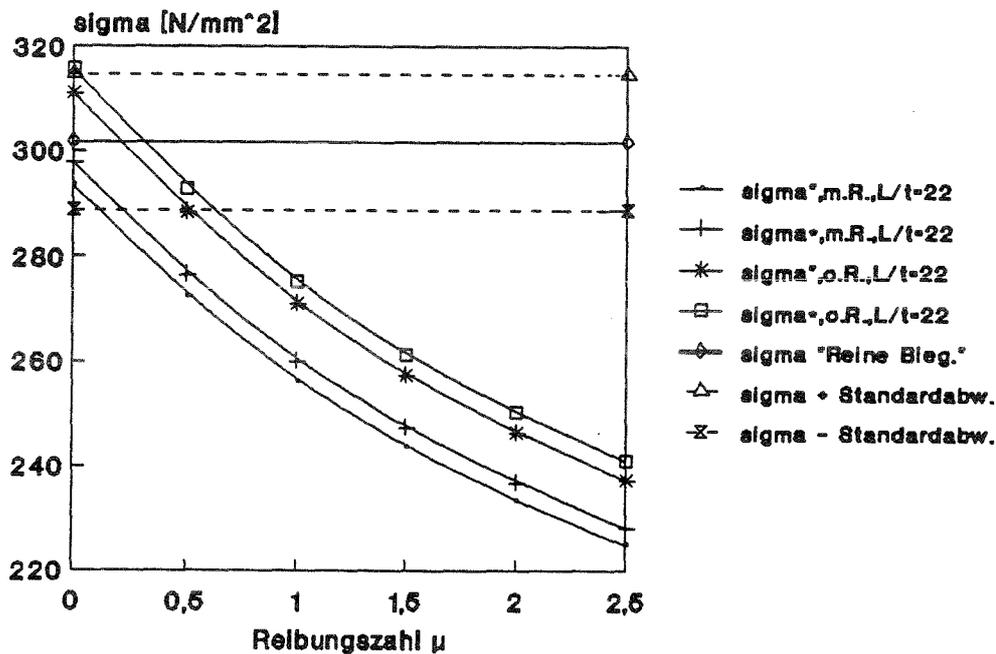
Laminat Nr.10 / Y-Rtg. / OS
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung

Diagramm 6.10.11

Laminat Nr.10 / Y-Rtg. / OS

Schnittmomente : Theorie - Experimentell

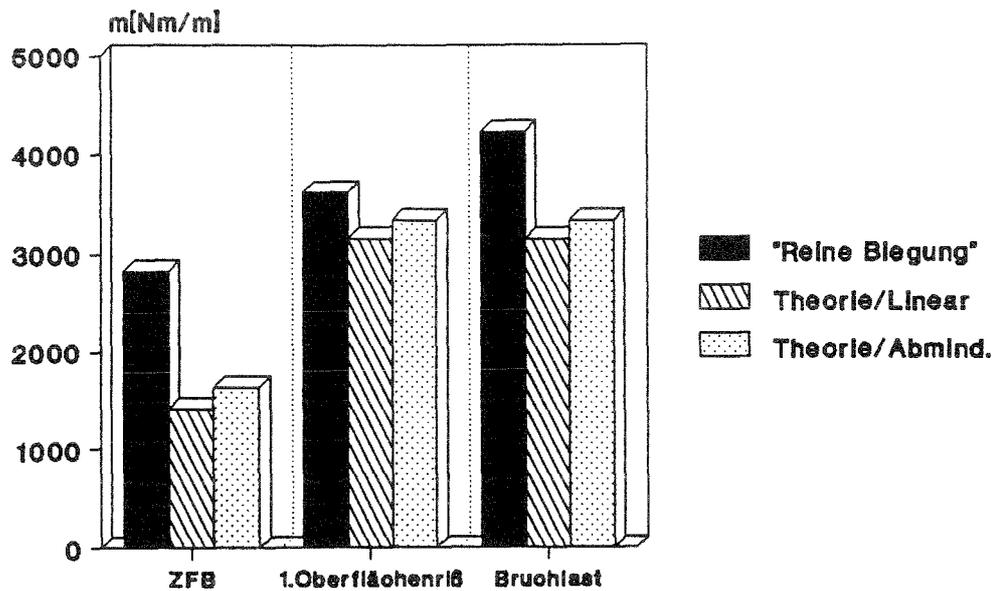


Diagramm 6.10.12

Laminat Nr.10 / Y-Rtg. / OS

Krümmungen : Theorie - Experimentell

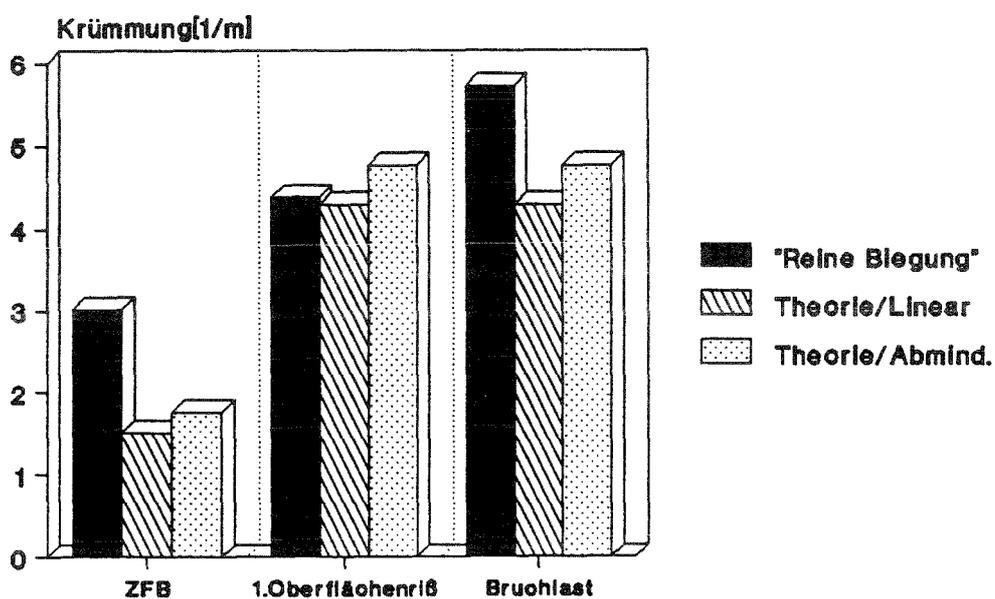


Diagramm 6.10.13

Laminat Nr. 10 Elastizitätsmodule

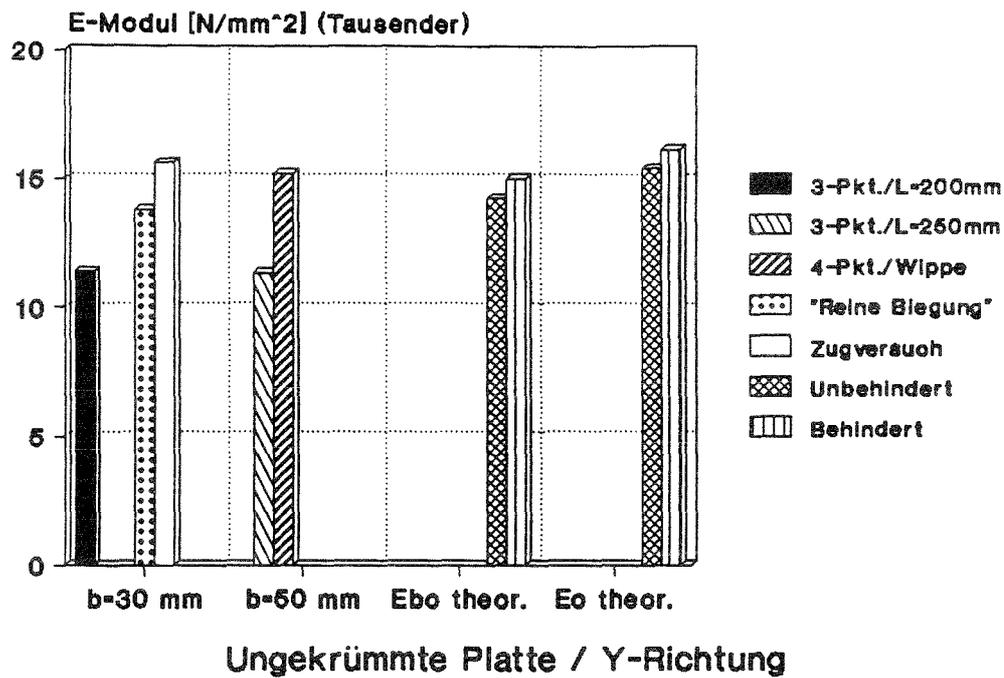


Diagramm 6.10.14

Einfluß der Prüfmethode auf die erzielten Maximallasten

(Diagramme 6.10.8, 6.10.9)

Im Gegensatz zu den bisherigen Resultaten sieht es bei den Bruchspannungen so aus, als ob die Reibung zu einem vorzeitigen Versagen führen würde, da bei der Dreipunktbiegung ohne Reibung ein höherer Wert als mit den reibungsbehafteten Auflagern, und bei der "reinen" Biegung ein noch größerer Wert erzielt wurde. Jedoch sind die Differenzen relativ gering und bei der X-Richtung oder dem Laminat Nr.11 (mit gleichem Harz, Oberfläche und Bruchverhalten) zeigten sich die üblichen Tendenzen.

Reibungszahlen für die Dreipunktbiegung

(Diagramme 6.10.11, 6.10.12)

	Ansatz	L/t	Rtg.	Schnittmoment	Spannungen	Mittelwert
Mit Reibung	"	22	OS	0.09	----	----
	*			0.21	----	----
"Ohne" Reibung	"	22	OS	0.25	0.21	0.23
	*			0.35	0.31	0.33

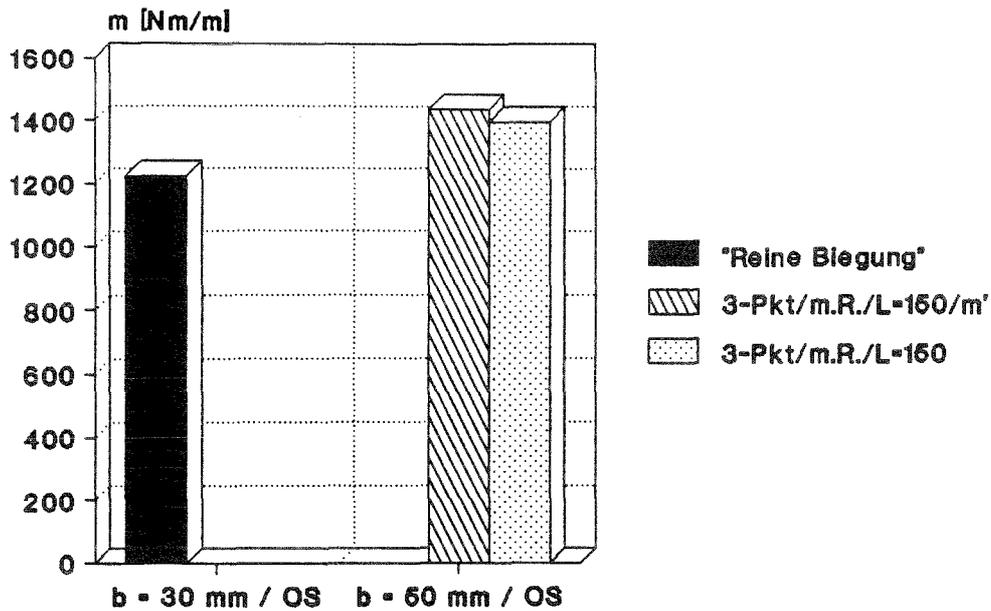
Tabelle 6.10.2 Ermittelte Reibungszahlen

Vergleich der theoretischen und experimentellen Maximallasten

(Diagramme 6.10.13, 6.10.14)

Während bei der X-Richtung zu hohe theoretische Werte zu verzeichnen waren, bietet sich hier ein entgegengesetztes Bild, so daß anzunehmen ist, daß außer den Winkelfehlern auch noch Differenzen bei dem Verhältnis Kett-,Schußrichtung bestehen. Hier wurden Verhältnisse von 2.3 : 1 bis 2.7 : 1 ermittelt.

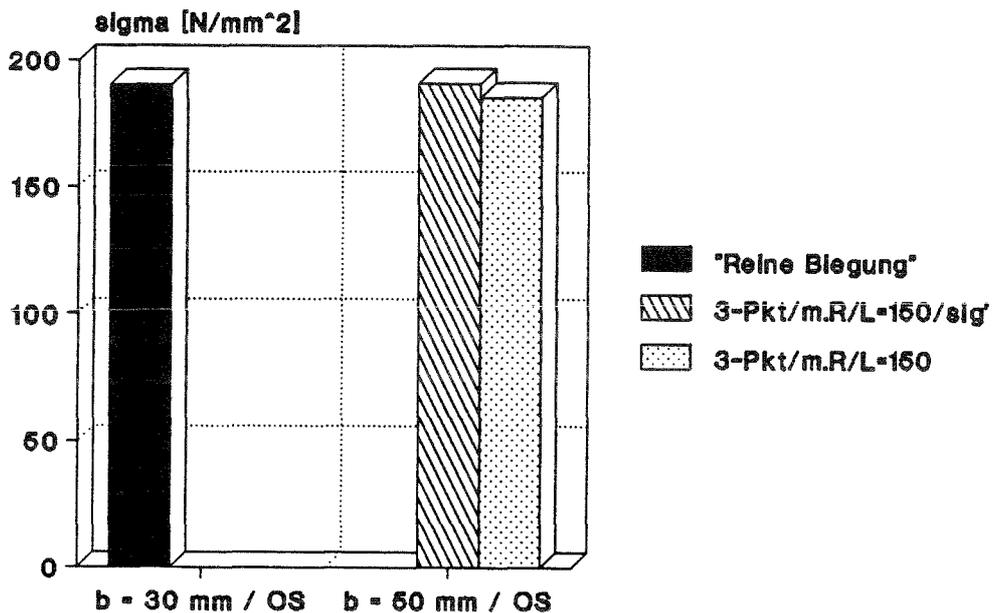
Laminat Nr.11 Schnittmomente



ungekrümmte Platte / X-Richtung

Diagramm 6.11.1

Laminat Nr.11 Spannungen



ungekrümmte Platte / X-Richtung

Diagramm 6.11.2

Laminat Nr.11 / X-Rtg. / OS
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung
Schnittmomente

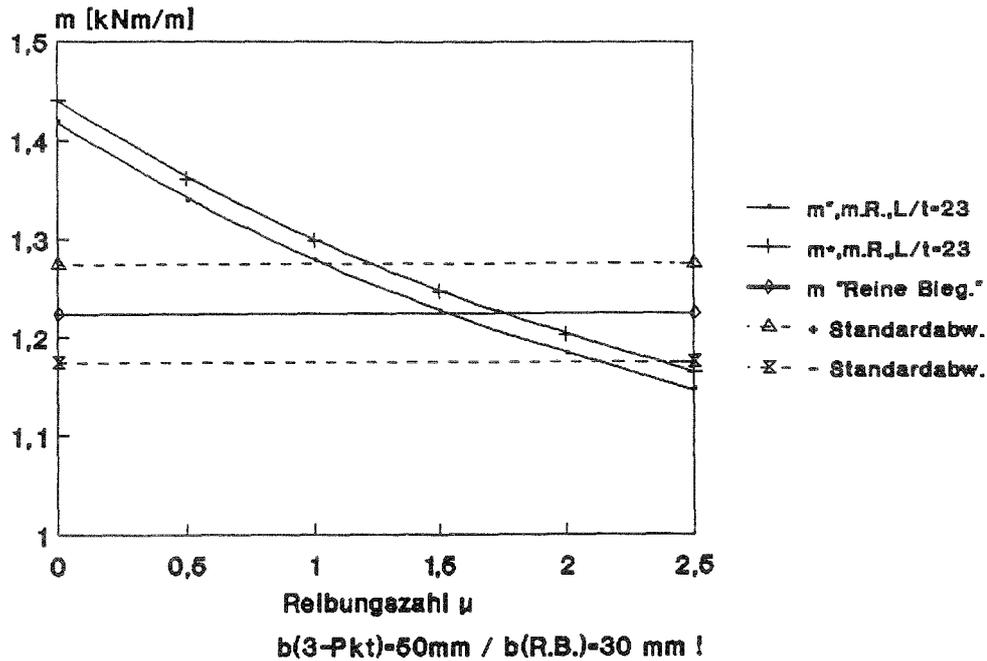


Diagramm 6.11.3

Laminat Nr.11 / X-Rtg. / OS
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung
Biegebruchspannungen

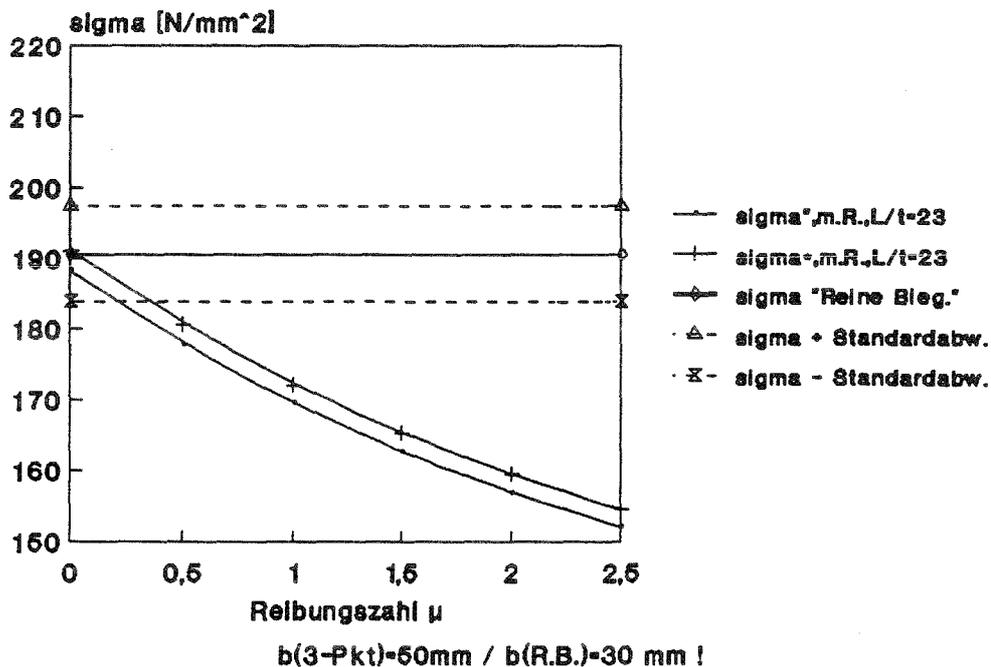


Diagramm 6.11.4

Laminat Nr.11 / X-Rtg. / OS
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung
Faservolumenbezogene Bruchspannungen

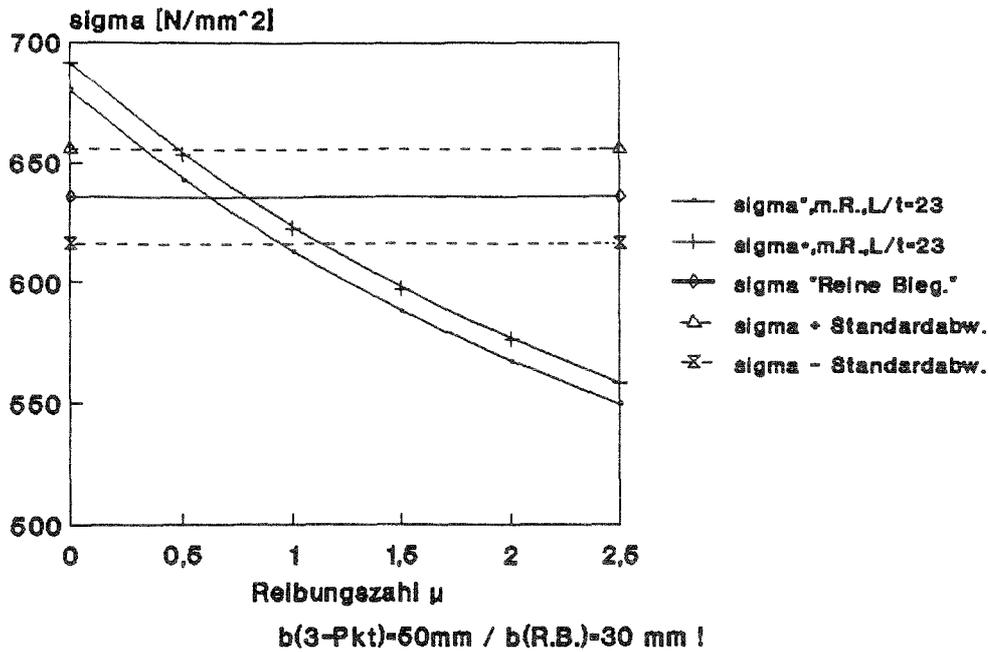


Diagramm 6.11.5

Laminat Nr.11 / X-Rtg.
Schnittmomente : Theorie - Experimentell

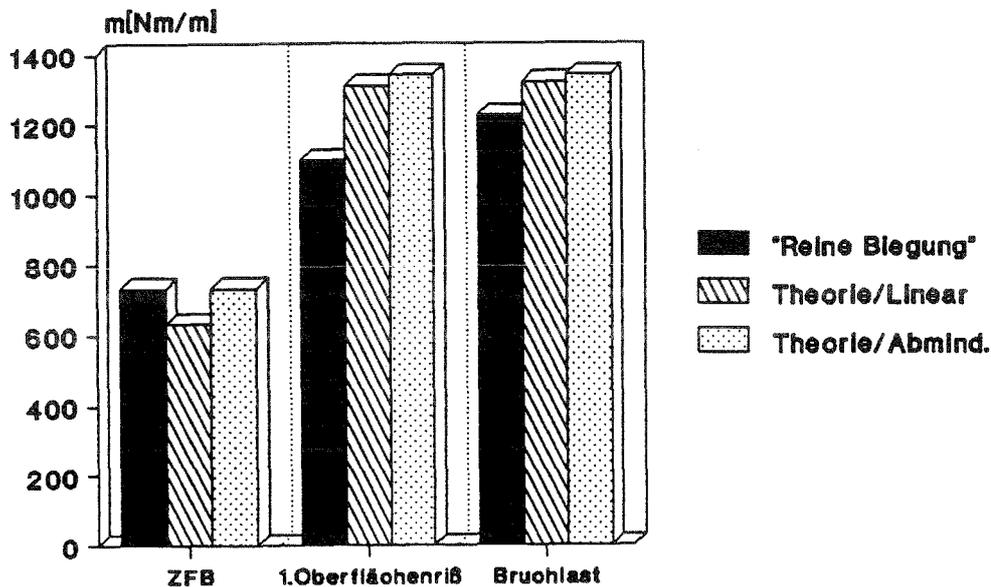


Diagramm 6.11.6

Laminat Nr.11 / X-Rtg. / US

Krümmungen : Theorie - Experimentell

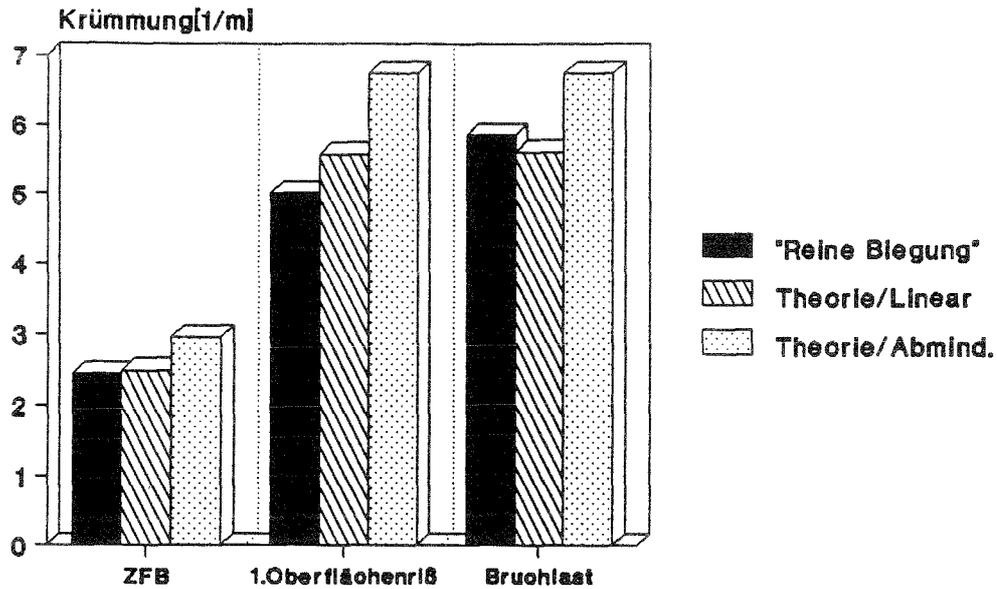
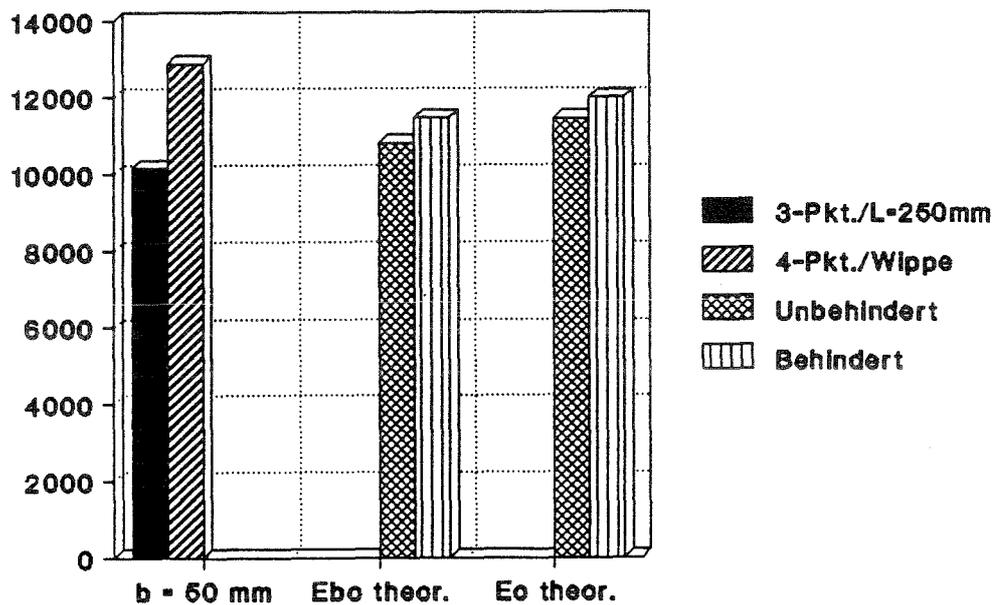


Diagramm 6.11.7

Laminat Nr. 11

Elastizitätsmodule



Ungekrümmte Platte / X-Richtung

Diagramm 6.11.8

Reibungszahlen für die Dreipunktbiegung

(Diagramme 6.11.3 - 6.11.5)

Es wird ein Wert der Dreipunktbiegung mit $b=50\text{mm}$ und der "reinen" Biegung mit $b=30\text{mm}$ verglichen. Da sich bei den Biegebruchspannungen keine sinnvollen Daten ergaben, wurden zusätzlich die faservolumenbezogenen Verläufe aufgetragen (Diagramm 6.11.5).

	Ansatz	L/t	Rtg.	m	σ_B	$\sigma_{B\phi}$	Mittelwert
Mit	"	23	OS	1.53	----	0.63	1.08
Reibung	*			1.75	0.05	0.80	0.87

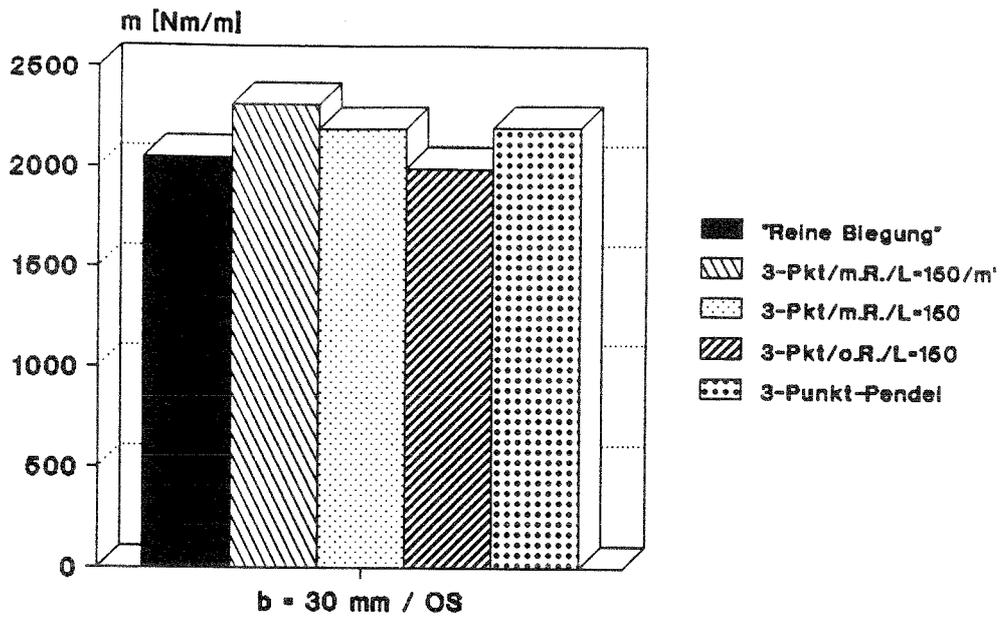
Tabelle 6.1.1 Ermittelte Reibungszahlen

Vergleich der theoretischen und experimentellen Maximallasten

(Diagramme 6.11.6, 6.11.7)

Es existiert die gleiche Problematik wie bei dem etwas dickeren Laminat Nr.10 hinsichtlich der Winkelfehler und Gewebeverhältnis. Von der Größe der Abweichung sind die theoretischen Werte jedoch akzeptabel.

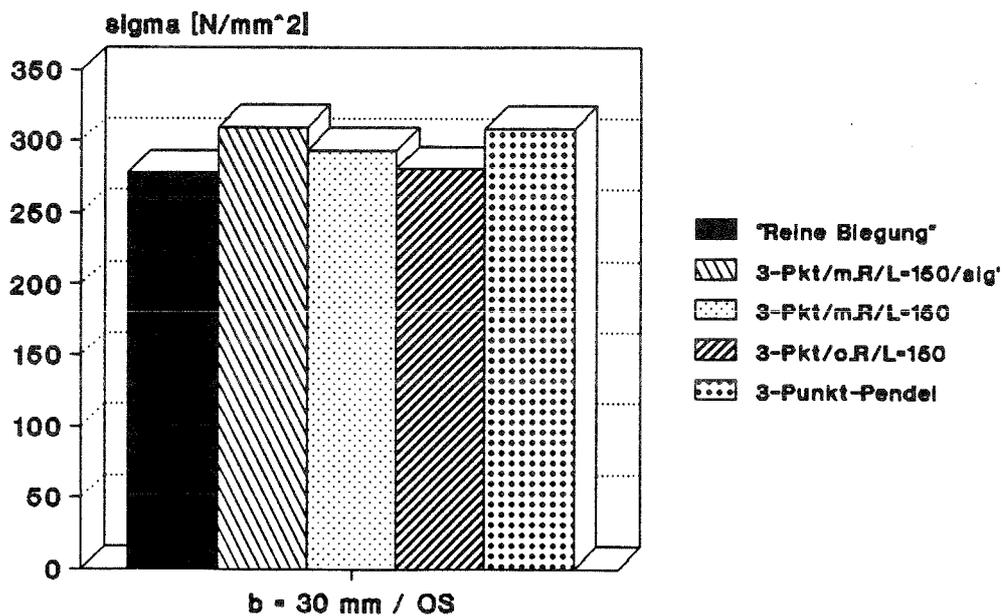
Laminat Nr.11 Schnittmomente



ungekrümmte Platte / Y-Richtung

Diagramm 6.11.9

Laminat Nr.11 Spannungen



ungekrümmte Platte / Y-Richtung

Diagramm 6.11.10

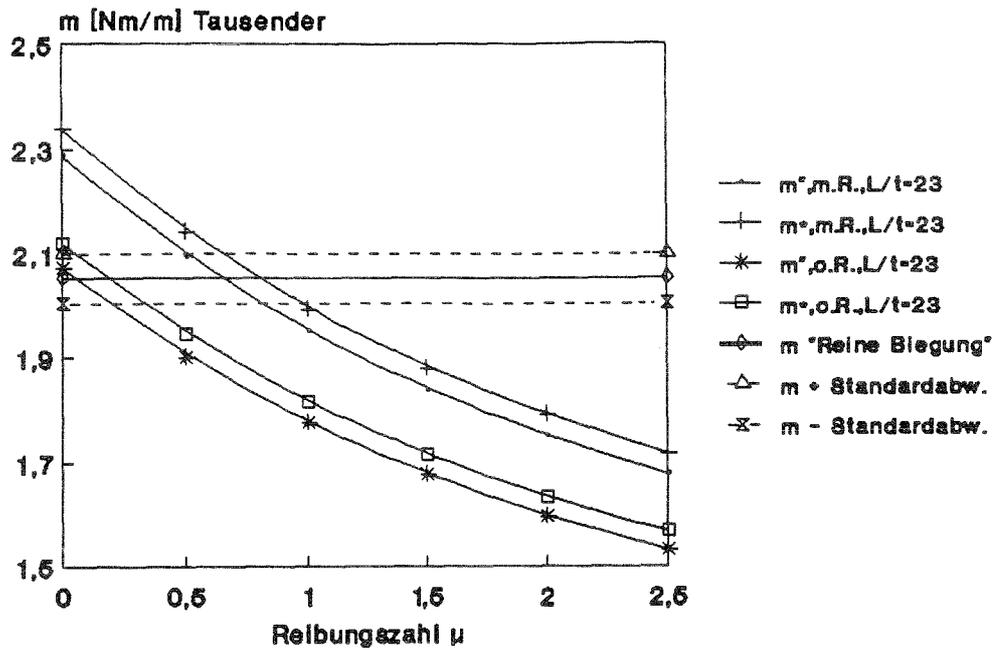
Laminat Nr.11 / Y-Rtg. / OS
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung

Diagramm 6.11.11

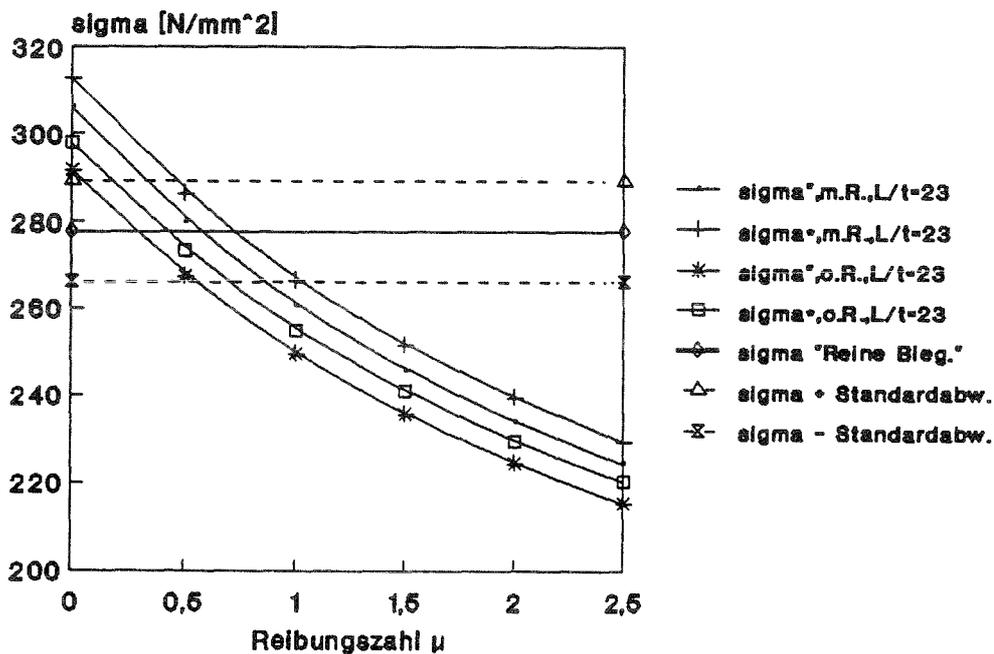
Laminat Nr.11 / Y-Rtg. / OS
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung

Diagramm 6.11.12

Laminat Nr.11 / Y-Rtg. / US

Schnittmomente : Theorie - Experimentell

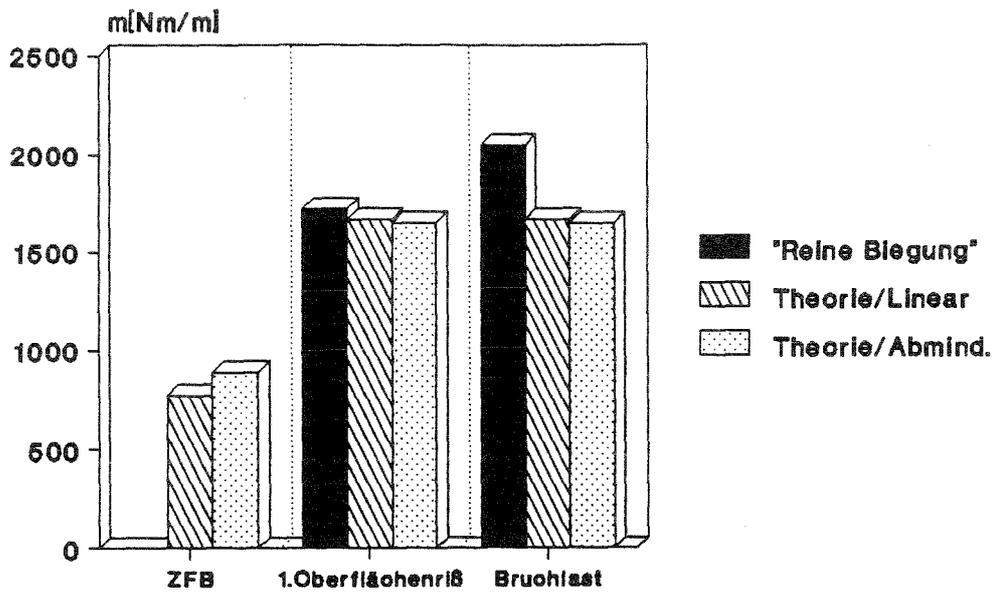


Diagramm 6.11.13

Laminat Nr.11 / Y-Rtg. / US

Krümmungen : Theorie - Experimentell

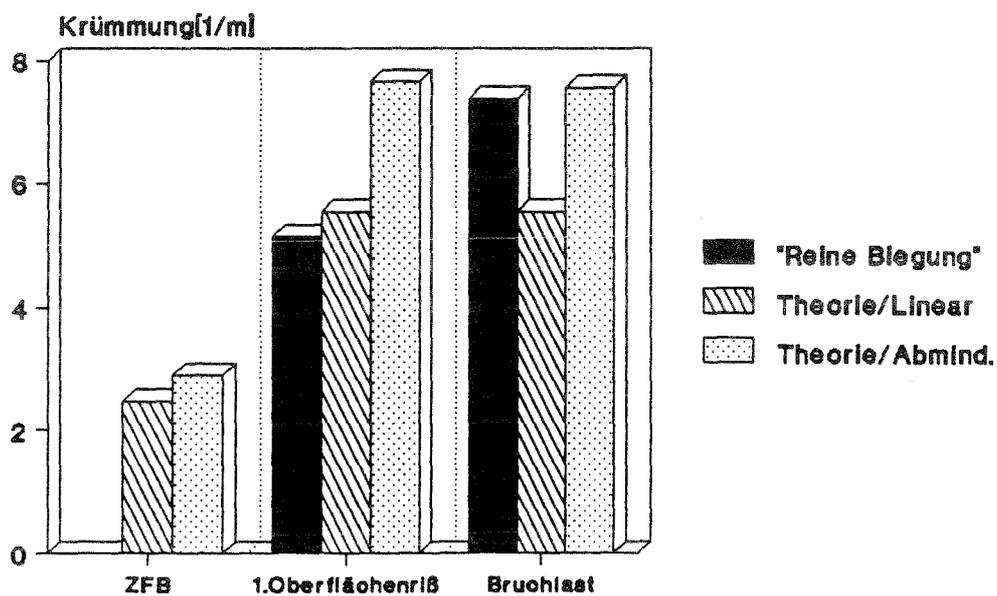
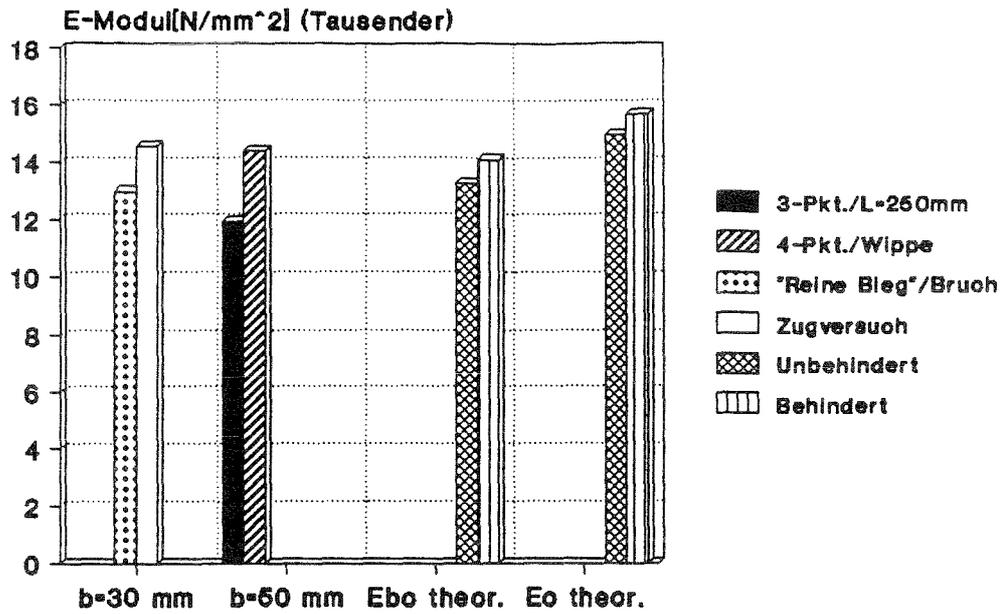


Diagramm 6.11.14

Laminat Nr. 11 Elastizitätsmodule



Ungekrümmte Platte / Y-Richtung

Diagramm 6.11.15

Einfluß der Prüfmethode auf die erzielten Maximallasten

(Diagramme 6.11.9, 6.11.10)

Die Pendelvorrichtung liefert wieder eine Grenze, die von allen Versuchsarten unterboten wird. Der Meßwert der Biegeprüfvorrichtung liegt bei den Biegespannungen unter der reibungsfreien 3-Pkt-Biegung. Im Bild 6.11.1 erkennt man an der linken Probe, aus einem Dreipunktversuch, nur einen Riß, der auch nicht senkrecht zur Belastungsrichtung verläuft und unter der Oberfläche weitere Delamination. Bei der rechten, mit der Biegeprüfvorrichtung gefahrenen, Probe sieht man Risse und Delamination über den gesamten Bereich, außerdem ist sichtbar, daß die Risse nicht nur vom Rand ausgehen, sondern auch in der Probenmitte entstehen. Es handelt sich in beiden Fällen um Schäden im Zugbereich, dieses Versagen war bei den Laminaten Nr.10, 11 in X- und Y-Richtung zu beobachten.

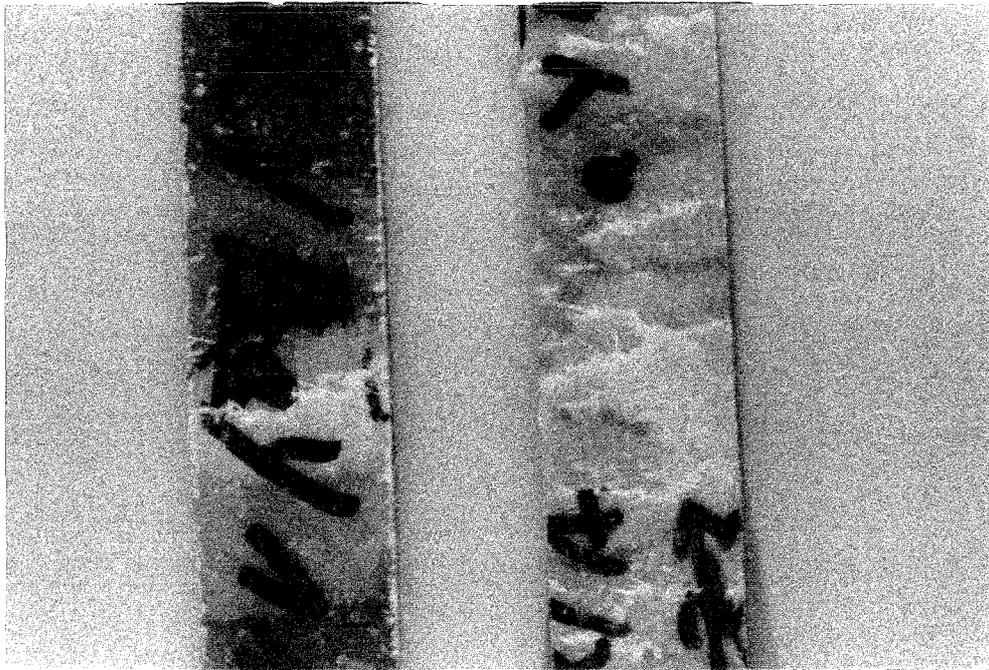


Bild 6.11.1

Reibungszahlen für die Dreipunktbiegung

(Diagramme 6.11.11, 6.11.12)

	Ansatz	L/t	Rtg.	Schnittmoment	Spannungen	Mittelwert
Mit Reibung	"	23	OS	0.67	0.59	0.63
	*			0.81	0.73	0.77
"Ohne" Reibung	"	23	OS	0.06	0.30	0.18
	*			0.19	0.43	0.31

Tabelle 6.11.2 Ermittelte Reibungszahlen

Vergleich der theoretischen und experimentellen Maximallasten

(Diagramme 6.11.13, 6.11.14)

Analog zum Laminat Nr.10 sind die theor. Schnittmomente zu gering, jedoch existiert bei dem 2. Ansatz eine bessere Übereinstimmung mit der experimentellen Bruchkrümmung.

Laminat Nr.12 Schnittmomente (Große Dickedifferenzen)

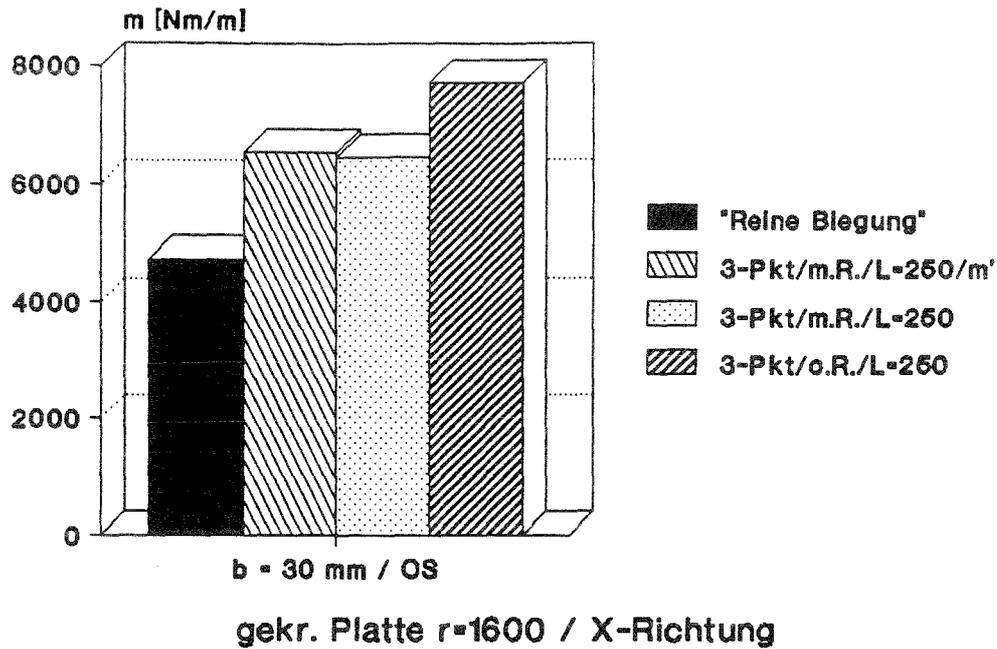


Diagramm 6.12.1

Laminat Nr.12 Spannungen (Große Dickendifferenzen)

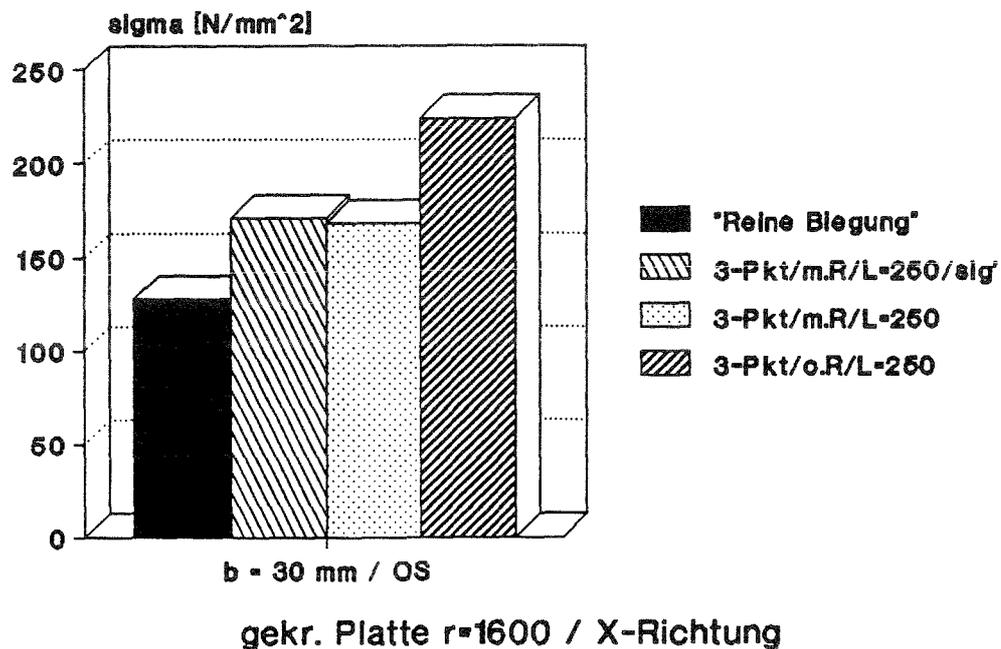


Diagramm 6.12.2

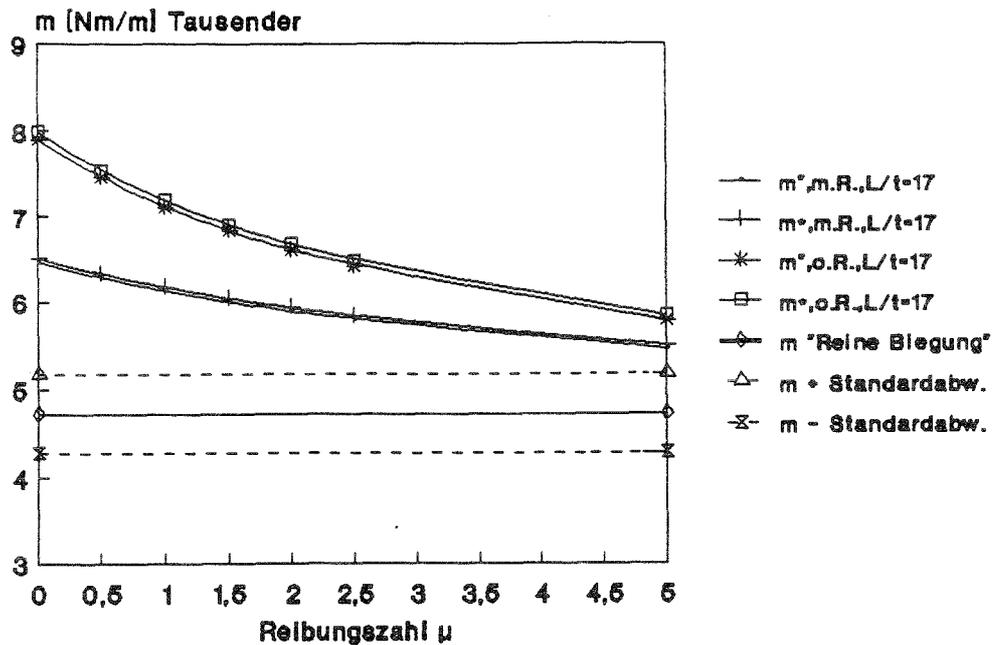
Laminat Nr.12 / X-Rtg. / OS
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung

Diagramm 6.12.3

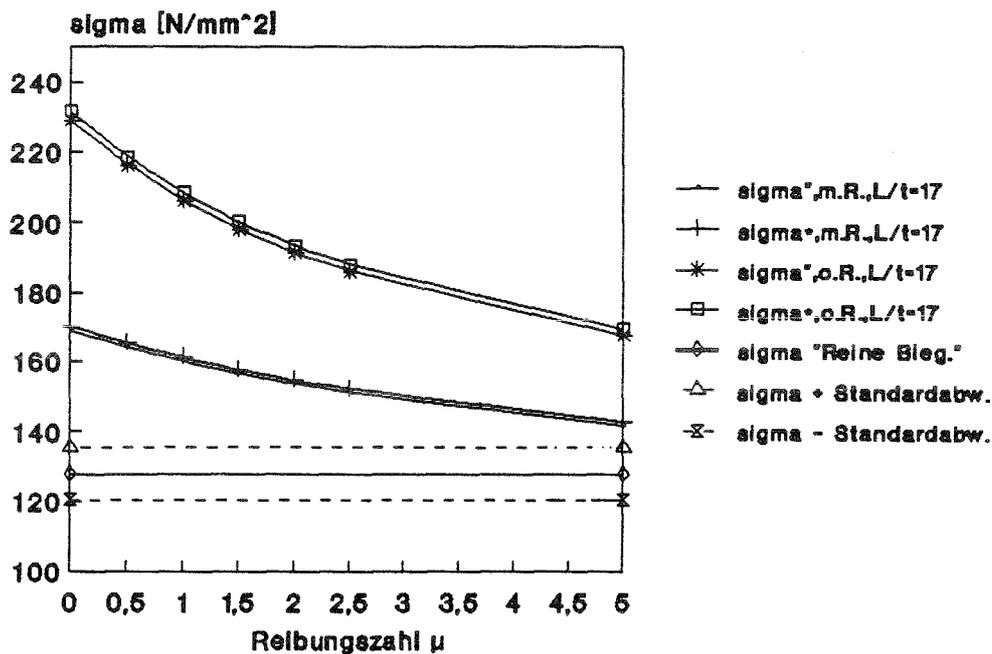
Laminat Nr.12 / X-Rtg. / OS
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung

Diagramm 6.12.4

Laminat Nr.12 / X-Rtg. / OS Schnittmomente : Theorie - Experimentell

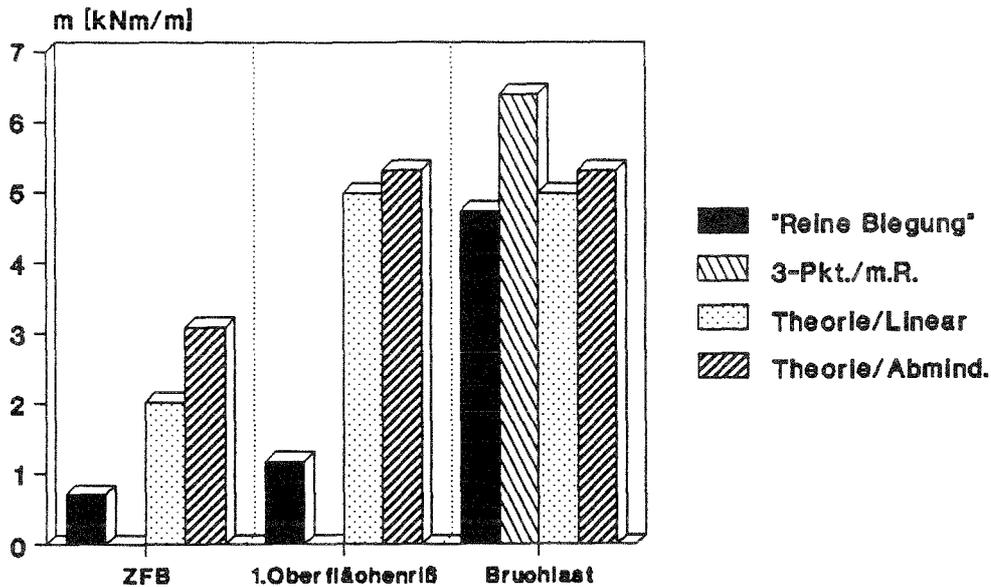


Diagramm 6.12.5

Laminat Nr.12 / X-Rtg. / OS Krümmungen : Theorie - Experimentell

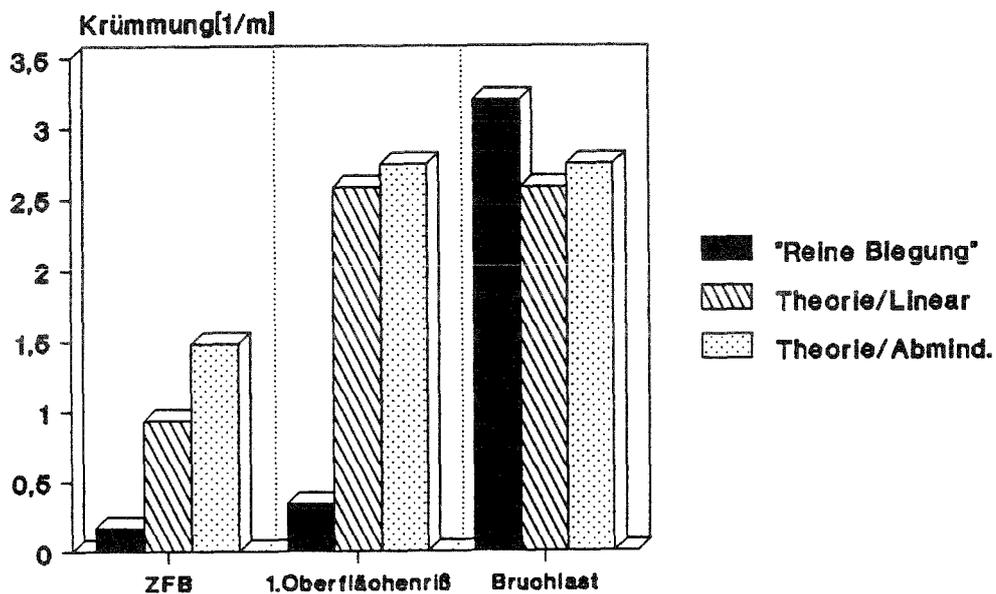
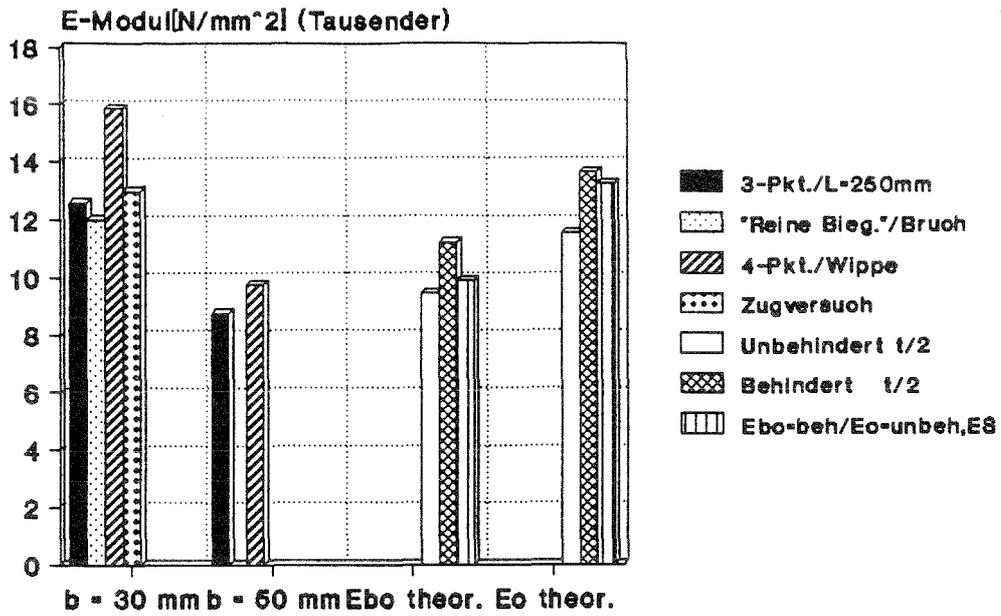


Diagramm 6.12.6

Laminat Nr. 12 Elastizitätsmodule



gekr. Platte $r=1600$ / X-Richtung

Diagramm 6.12.7

Laminat Nr.12 Schnittmomente

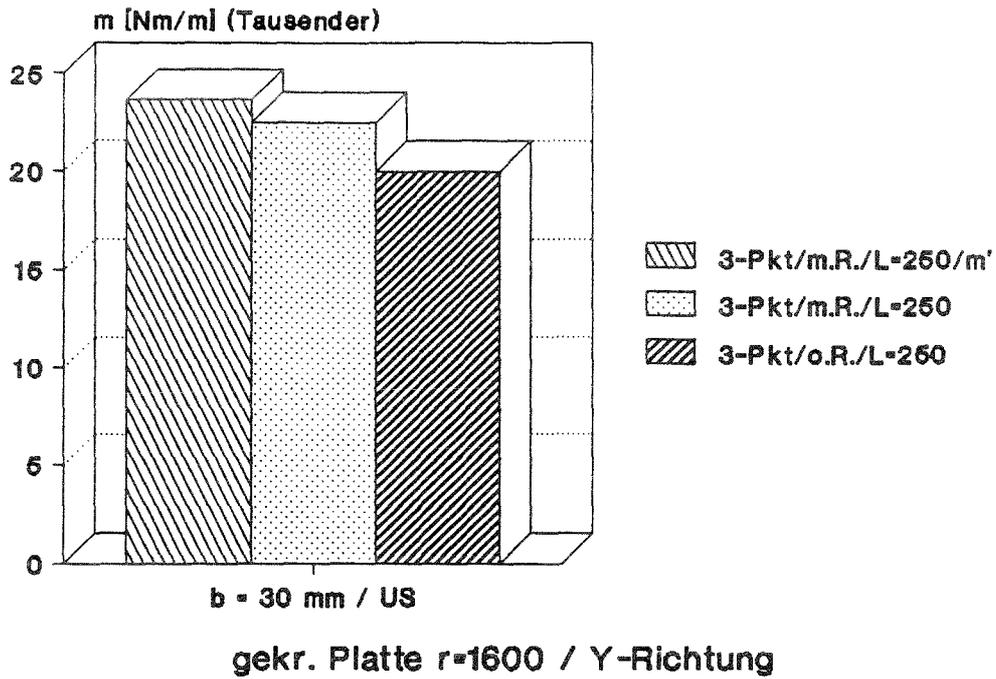


Diagramm 6.12.8

Laminat Nr.12 Spannungen

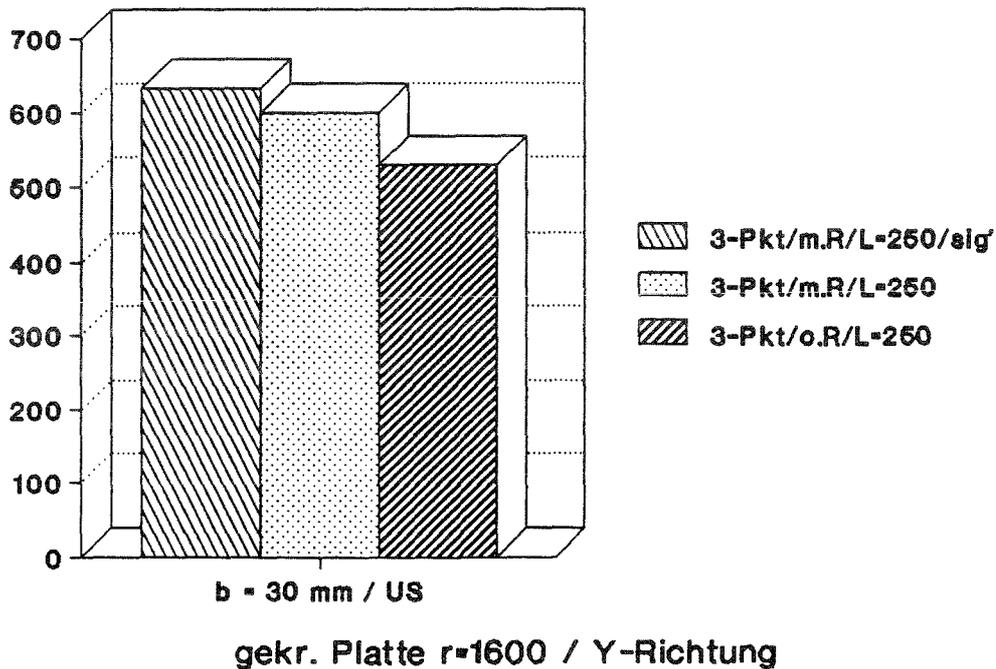


Diagramm 6.12.9

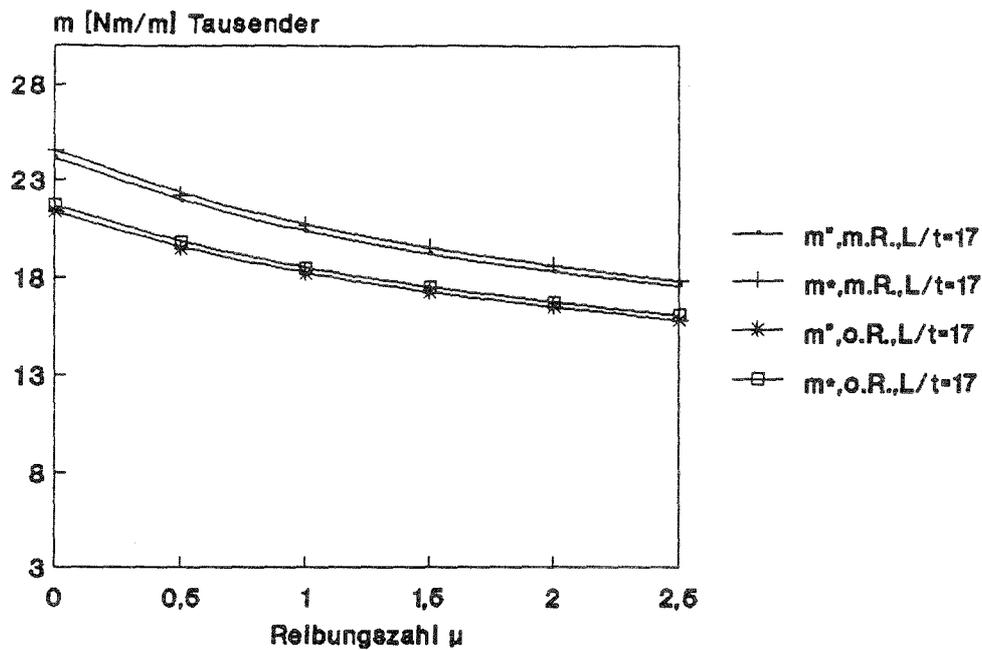
Laminat Nr.12 / Y-Rtg. / US
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung

Diagramm 6.12.10

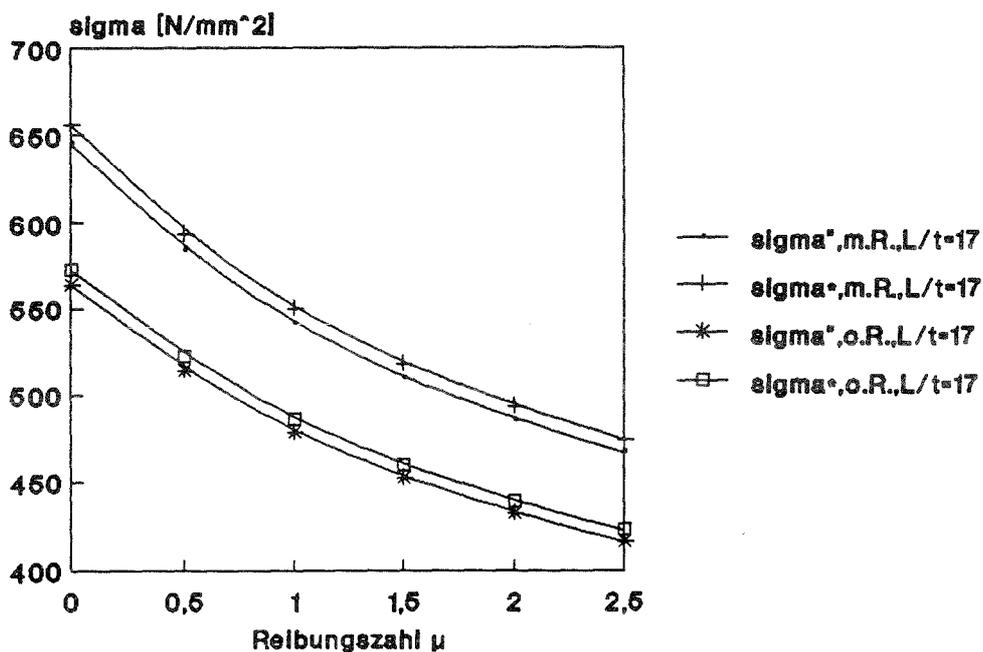
Laminat Nr.12 / Y-Rtg. / US
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung

Diagramm 6.12.11

Laminat Nr.12 / Y-Rtg. / US

Schnittmomente : Theorie - Experimentell

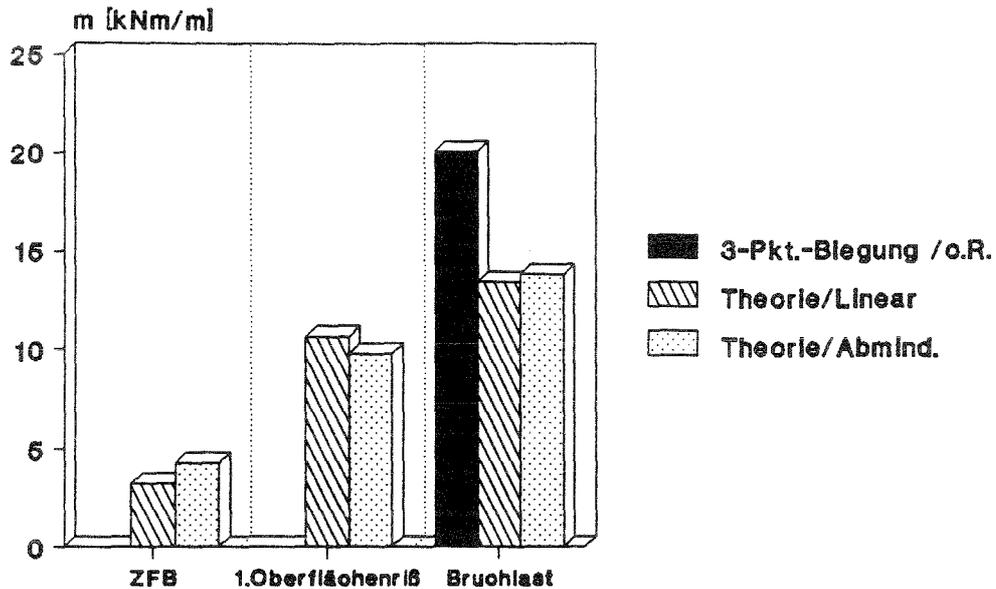


Diagramm 6.12.12

Laminat Nr.12 / Y-Rtg. / US

Krümmungen : Theorie - Experimentell

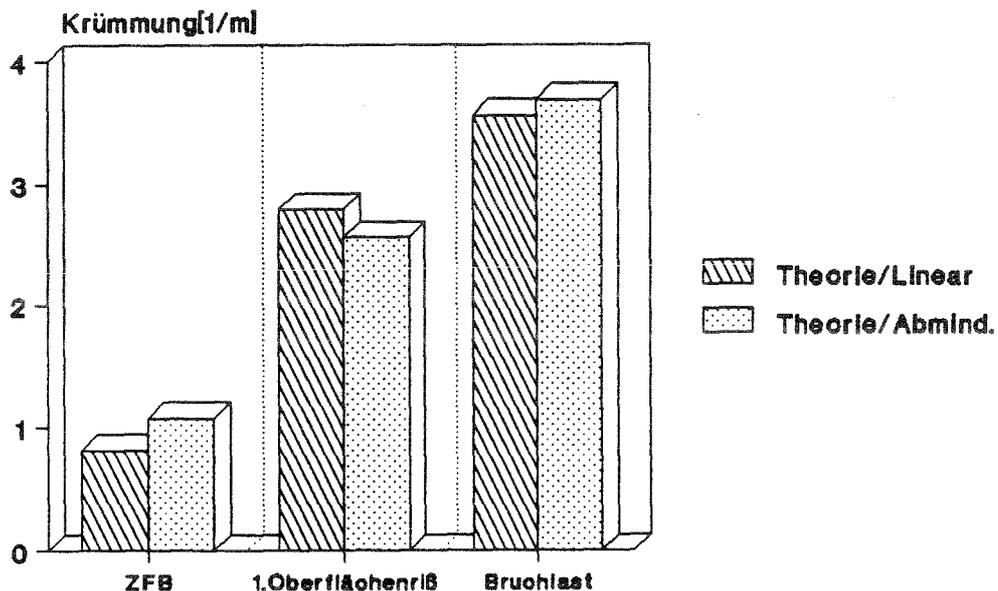


Diagramm 6.12.13

Laminat Nr. 12 Elastizitätsmodule

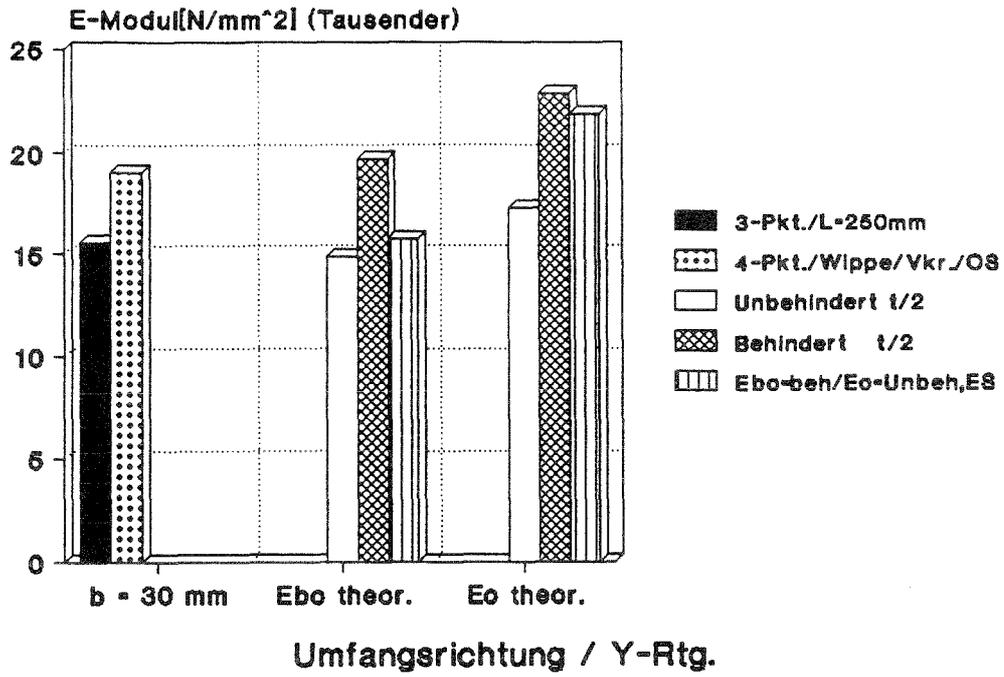


Diagramm 6.12.14

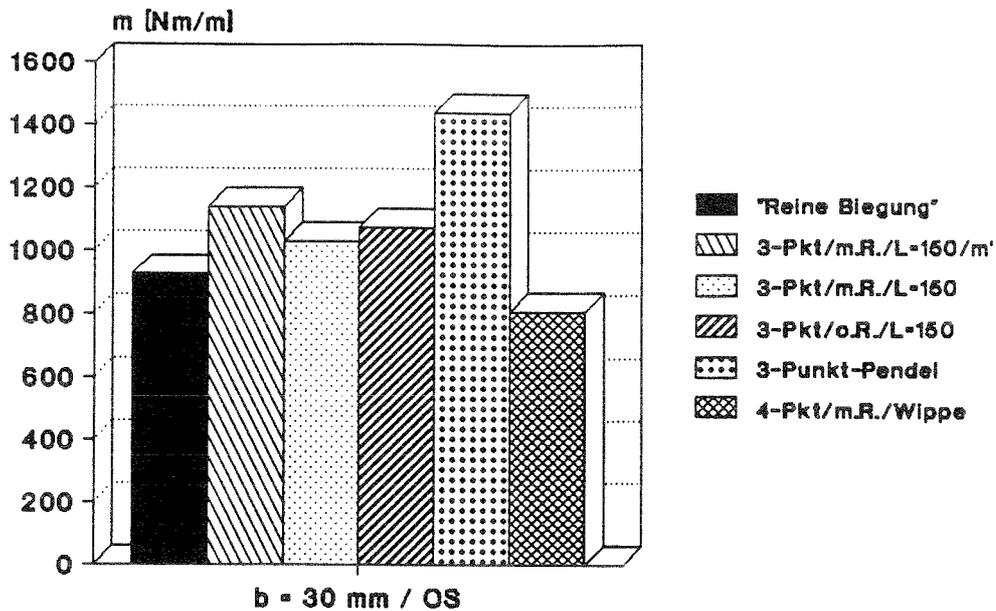
Einfluß der Prüfmethode auf die erzielten Maximallasten

Dieses Laminat zeigt die Schwierigkeiten bei der Beurteilung von GFK-Teilen. So ergeben sich in X-Richtung Schwankungen bei den Maximalwerten und E-Modulen, die einen Vergleich zwischen den Serien nicht zulassen. In Umfangsrichtung lag die maximale Differenz der Probendicke mit 1.2 mm noch relativ gering gegenüber 3.6 mm in Längsrichtung.

Vergleich der theoretischen und experimentellen Maximallasten

Unter Beachtung der Laminatschwankungen liegt der Wert in X-Richtung noch relativ gut, in Y-Richtung deutet der Vergleich mit der 3-Punkt-Biegung ohne Reibung auf zu niedrige theoretische Daten.

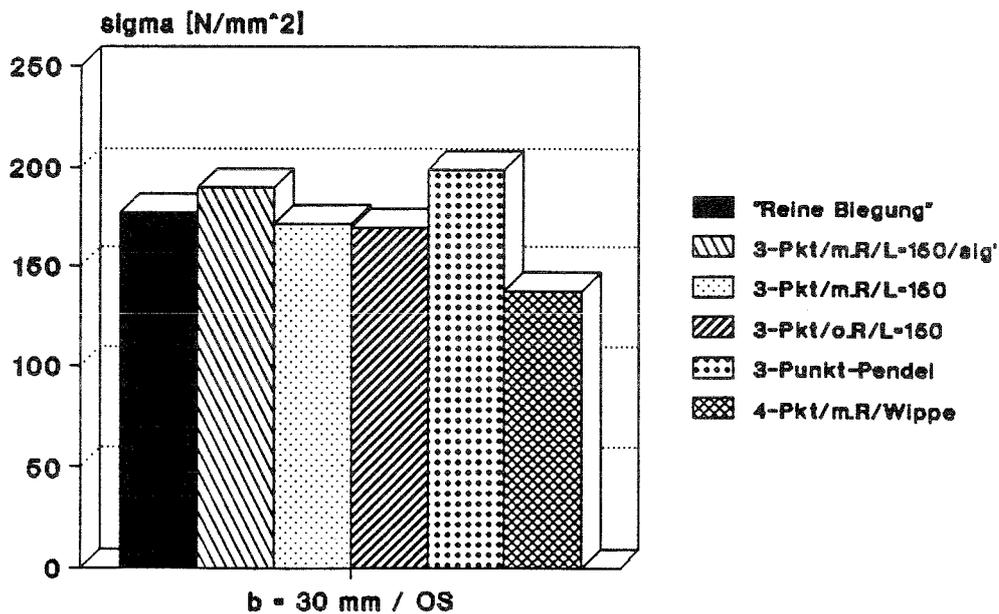
Laminat Nr.13 Schnittmomente



ungekrümmte Platte / X-Richtung

Diagramm 6.13.1

Laminat Nr.13 Spannungen



ungekrümmte Platte / X-Richtung

Diagramm 6.13.2

Laminat Nr.13 / X-Rtg. / OS
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung
Schnittmomente

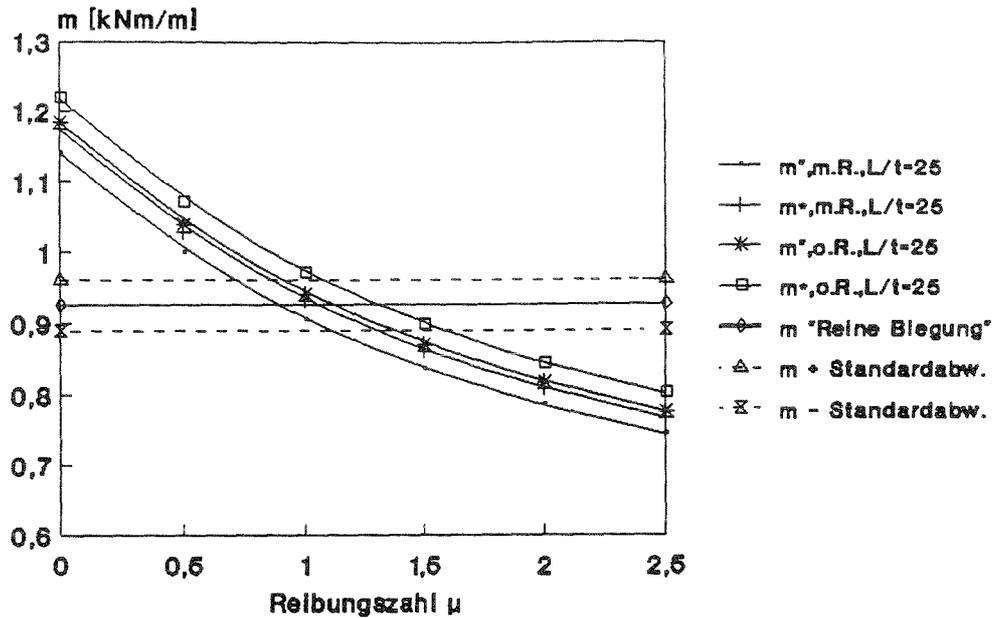


Diagramm 6.13.3

Laminat Nr.13 / X-Rtg. / OS
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung
Biegebruchspannungen

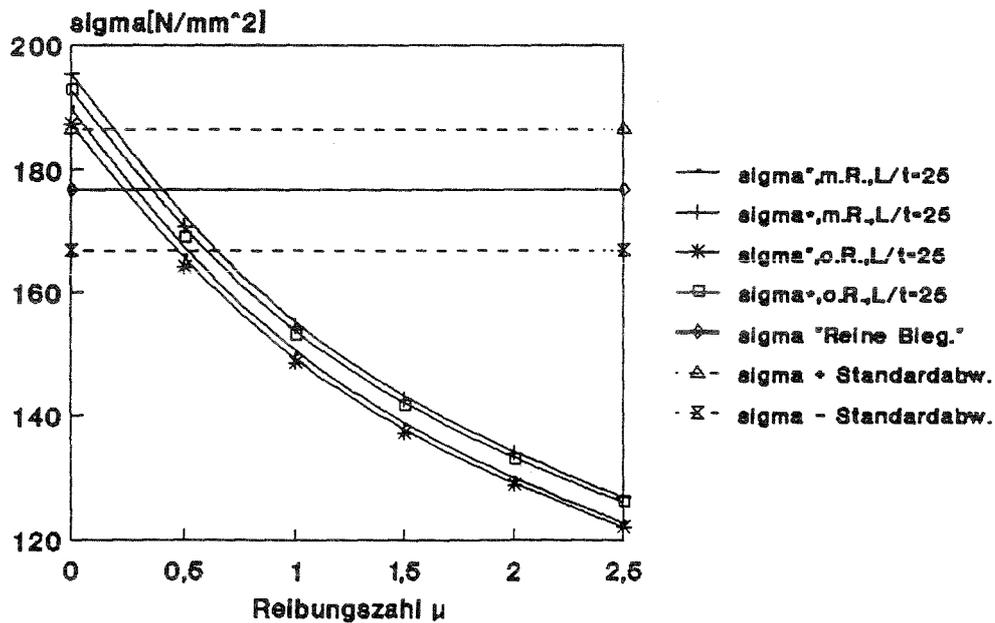


Diagramm 6.13.4

Laminat Nr.13 / X-Rtg. / US

Schnittmomente : Theorie - Experimentell

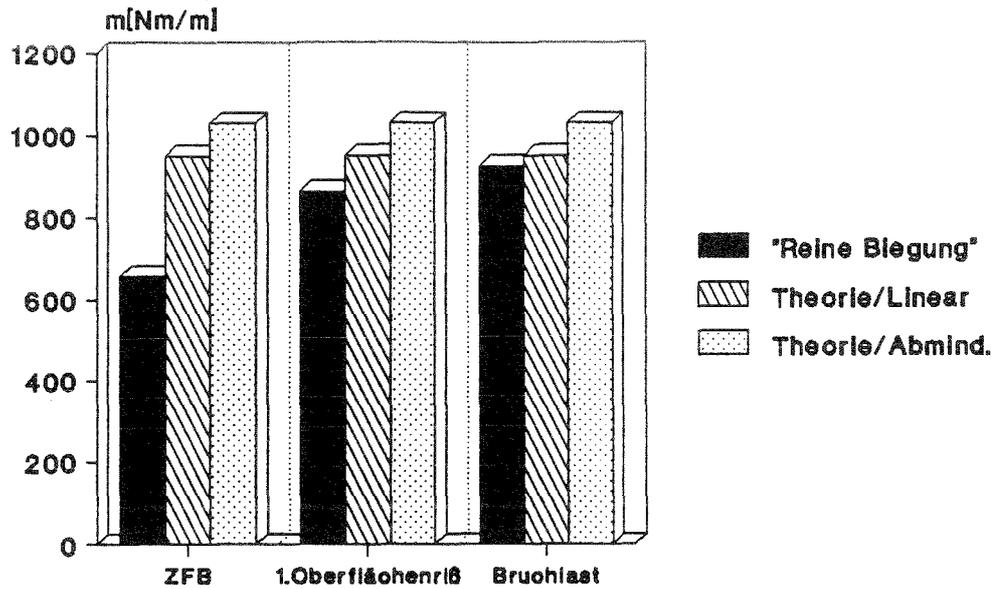


Diagramm 6.13.5

Laminat Nr.13 / X-Rtg.

Krümmungen : Theorie - Experimentell

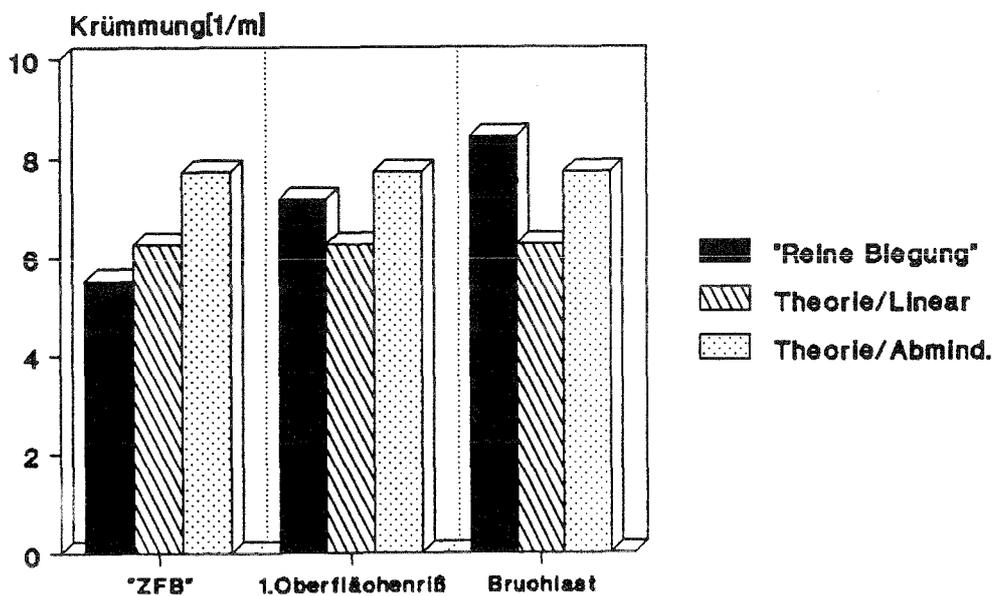


Diagramm 6.13.6

Laminat Nr. 13 Elastizitätsmodule

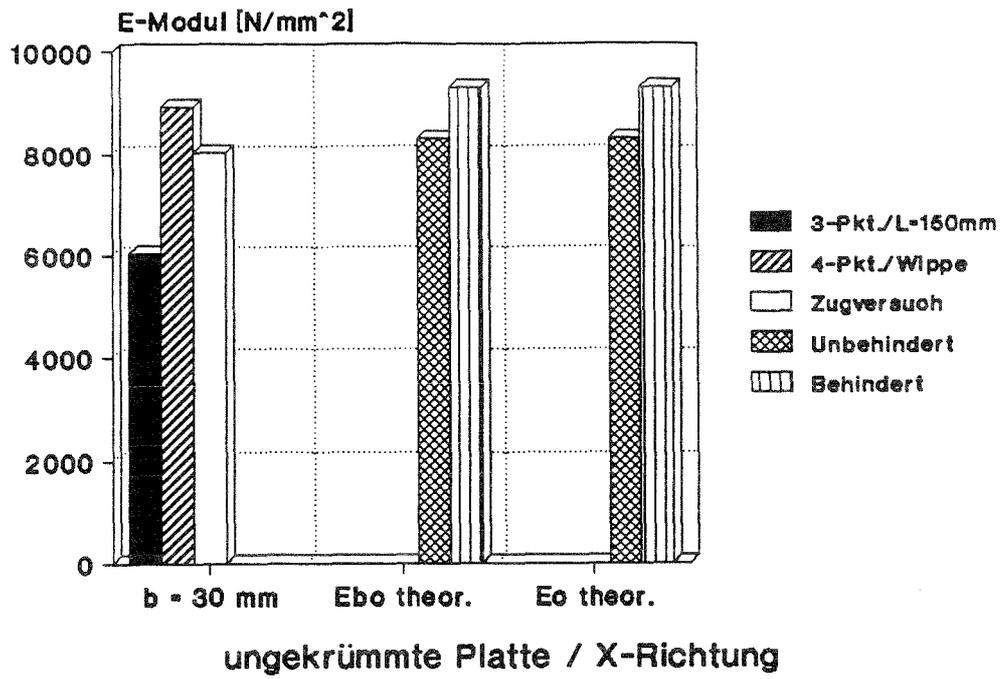


Diagramm 6.13.7

Einfluß der Prüfmethode auf die erzielten Maximallasten

(Diagramme 6.13.1, 6.13.2)

Dieses Mattenlaminat ist vergleichbar mit Laminat Nr.4. Durch das große Verhältnis von $L/t = 25$ ergibt sich durch die Längenänderung bei der Pendelvorrichtung ein zu großer Wert, der sich nicht als obere Grenze eignet.

Reibungszahlen für die Dreipunktbiegung

(Diagramme 6.13.3, 6.13.4)

Durch die Dickendifferenzen ergeben sich bei den Schnittmomenten für die "reibungsfreie" Serie höhere Reibungszahlen.

Bei diesen Versuchen lag die "glatte" Seite am Lager auf.

	Ansatz	L/t	Rtg.	Schnittmoment	Spannungen	Mittelwert
Mit Reibung	"	25	OS	0.92	0.36	0.64
	*			1.06	0.42	0.74
"Ohne" Reibung	"	25	OS	1.14	0.24	0.69
	*			1.31	0.28	0.80

Tabelle 6.13.1 Ermittelte Reibungszahlen

Vergleich der theoretischen und experimentellen Maximallasten

(Diagramme 6.13.5, 6.13.6)

Auf den ersten Blick ist das theoretische Schnittmoment, insbesondere vom nichtlinearen Ansatz, und die Krümmung zu niedrig. Beim Vergleich der Biegebruchspannungen stellt man jedoch fest, daß der theoretische Wert des 2. Ansatzes kleiner ist als der experimentelle, da die mittl. Probendicke der Serie nur 5.6 mm betrug.

Bei den Zugversuchen ergaben sich auch faservolumenbezogene Spannungen von 731.5 N/mm^2 , was den angesetzten Kennwerten entspricht.

Laminat Nr.14 Schnittmomente

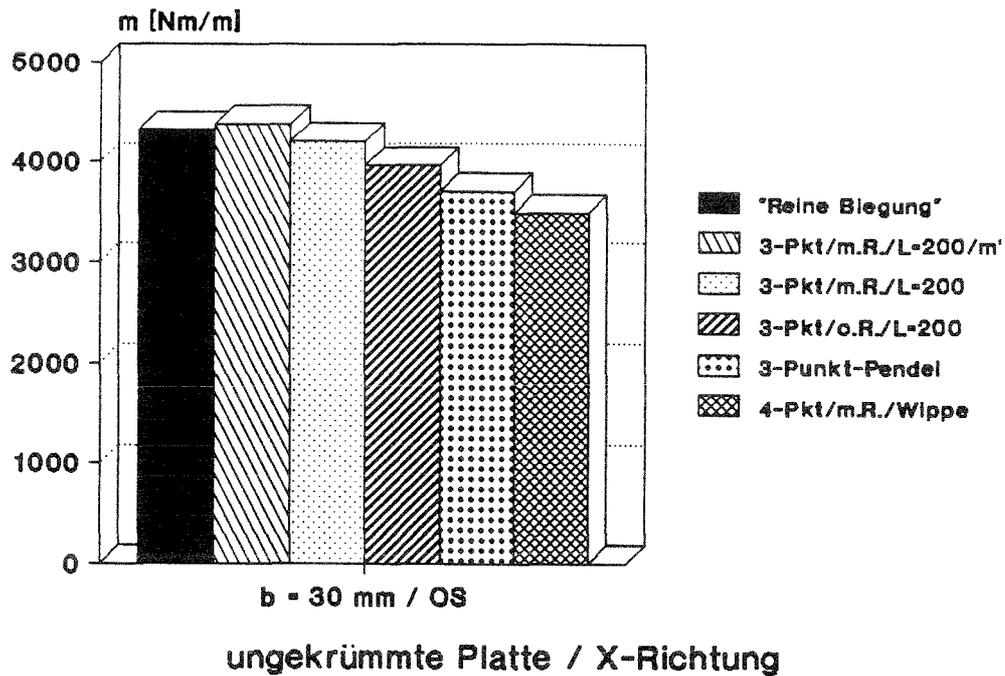


Diagramm 6.14.1

Laminat Nr.14 Spannungen

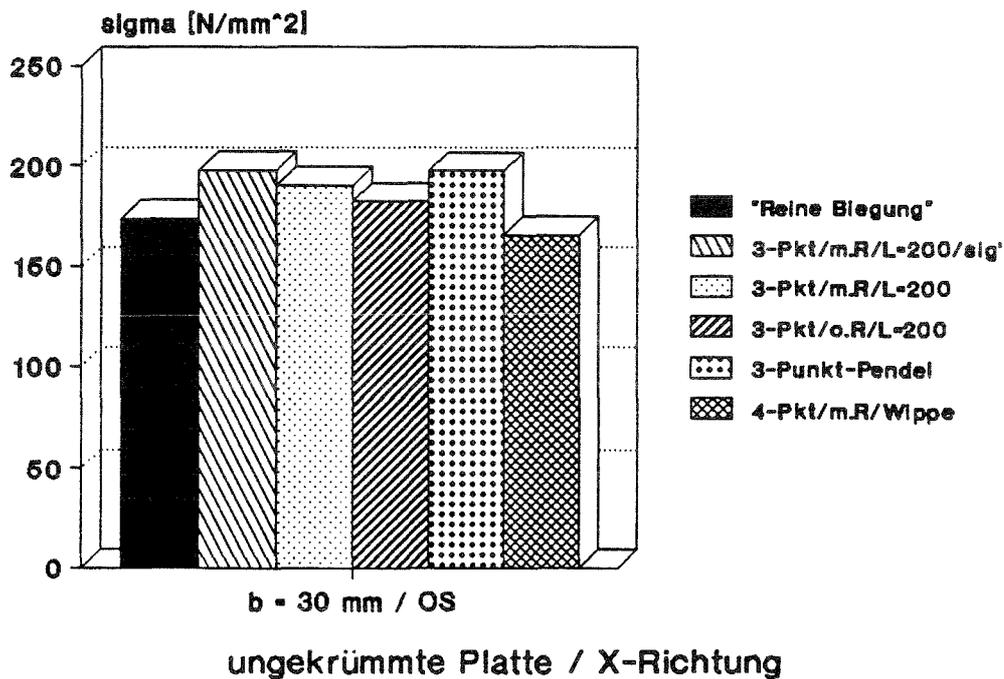


Diagramm 6.14.2

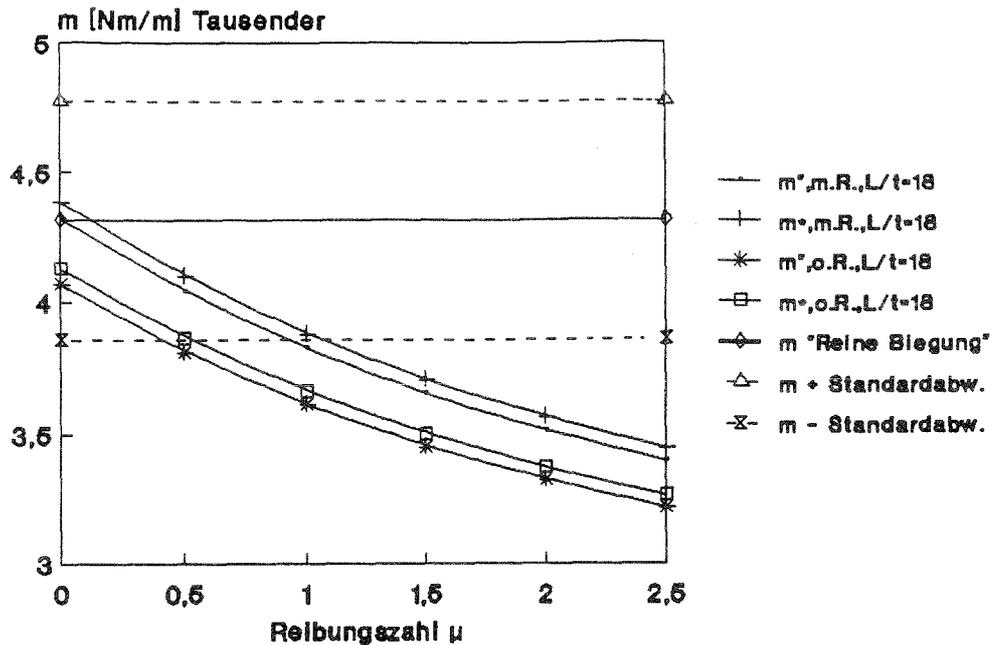
Laminat Nr.14 / X-Rtg. / OS
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung

Diagramm 6.14.3

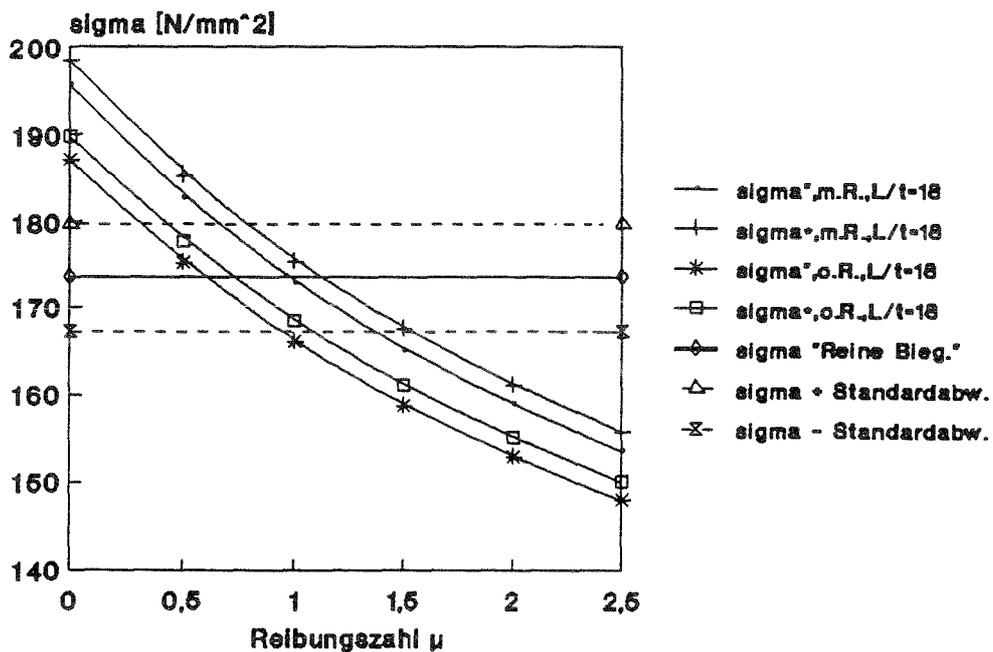
Laminat Nr.14 / X-Rtg. / OS
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung

Diagramm 6.14.4

Laminat Nr.14 / X-Rtg. / US

Schnittmomente : Theorie - Experimentell

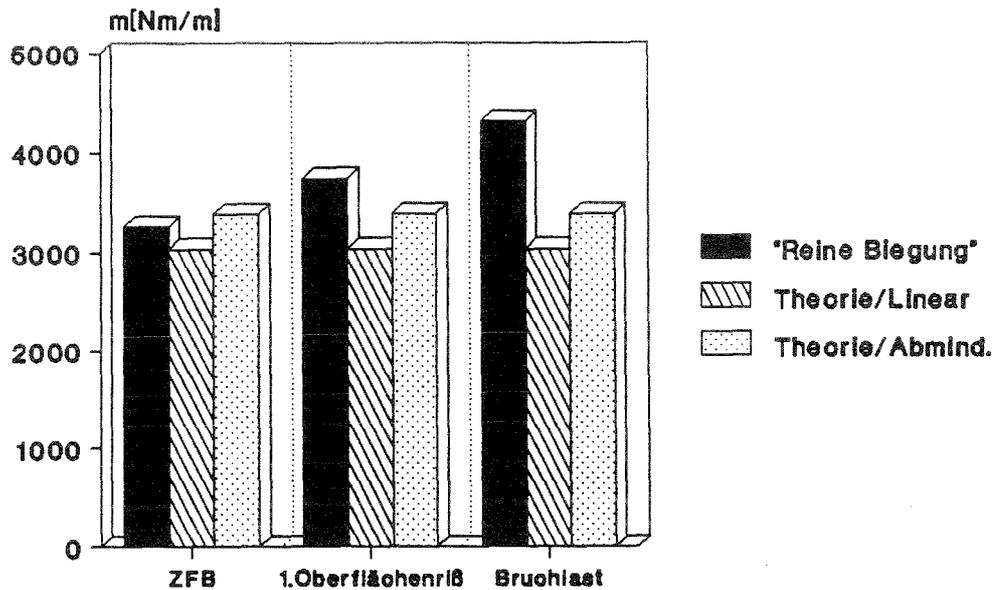


Diagramm 6.14.5

Laminat Nr.14 / X-Rtg. / US

Krümmungen : Theorie - Experimentell

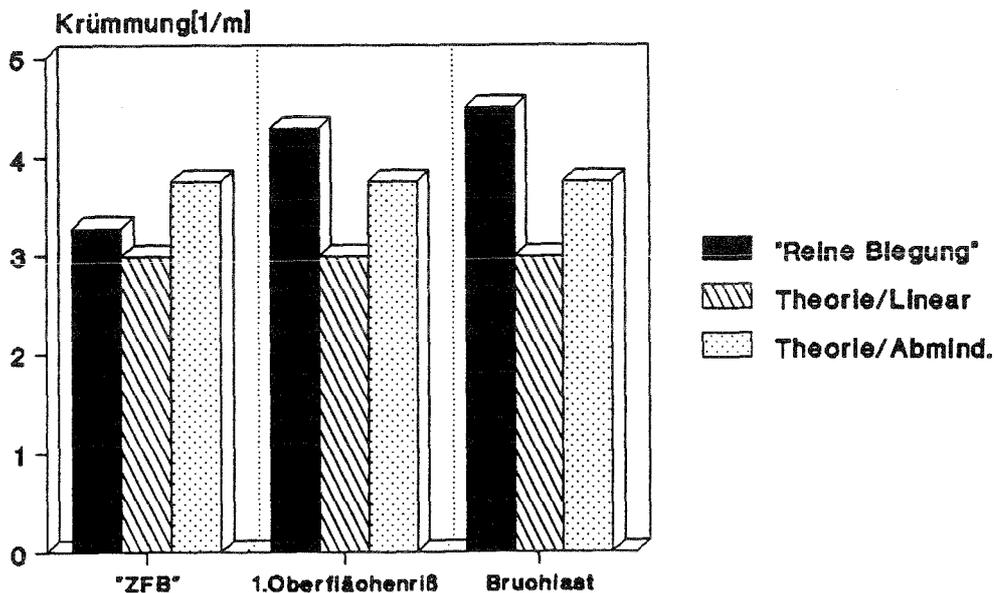


Diagramm 6.14.6

Laminat Nr. 14 Elastizitätsmodule

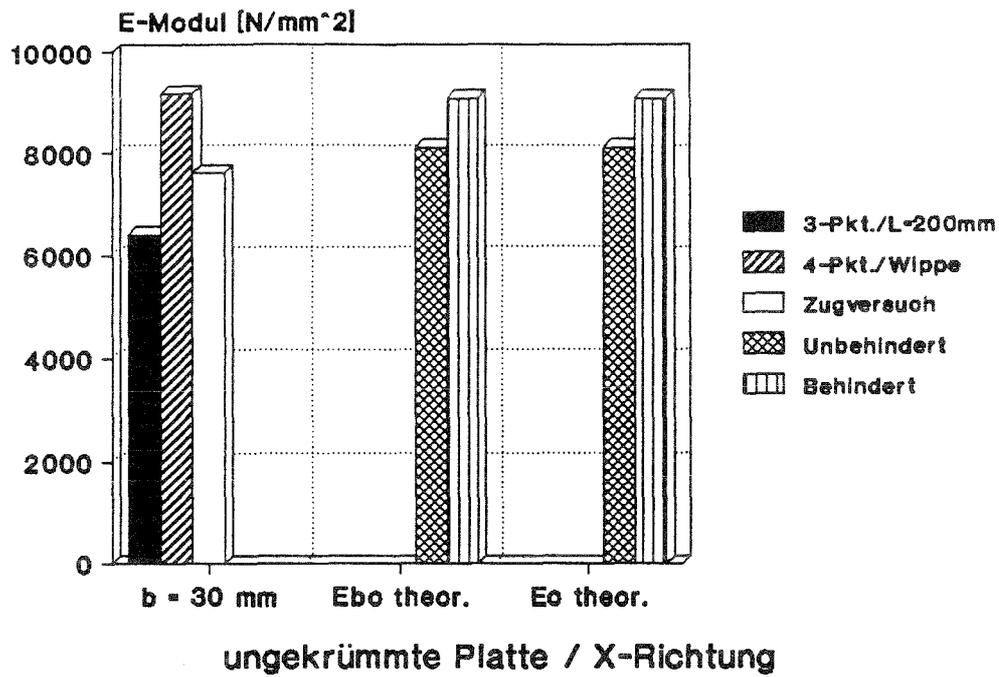


Diagramm 6.14.7

Einfluß der Prüfmethode auf die erzielten Maximallasten

(Diagramme 6.14.1, 6.14.2)

Es sind die üblichen Tendenzen und Dickenschwankungen feststellbar, das Ergebnis der Pendelvorrichtung liegt trotz des verhältnismäßig geringen Auflagerabstandes relativ hoch.

In dem Bild 6.14.1 sieht man die typische Versagensform der Mattenlaminat im Dreipunktversuch. Im Zugbereich tritt ein Riß auf, von dem ein weiteres Einreißen ausgeht, während der Druckbereich noch keine sichtbaren Schäden aufweist.

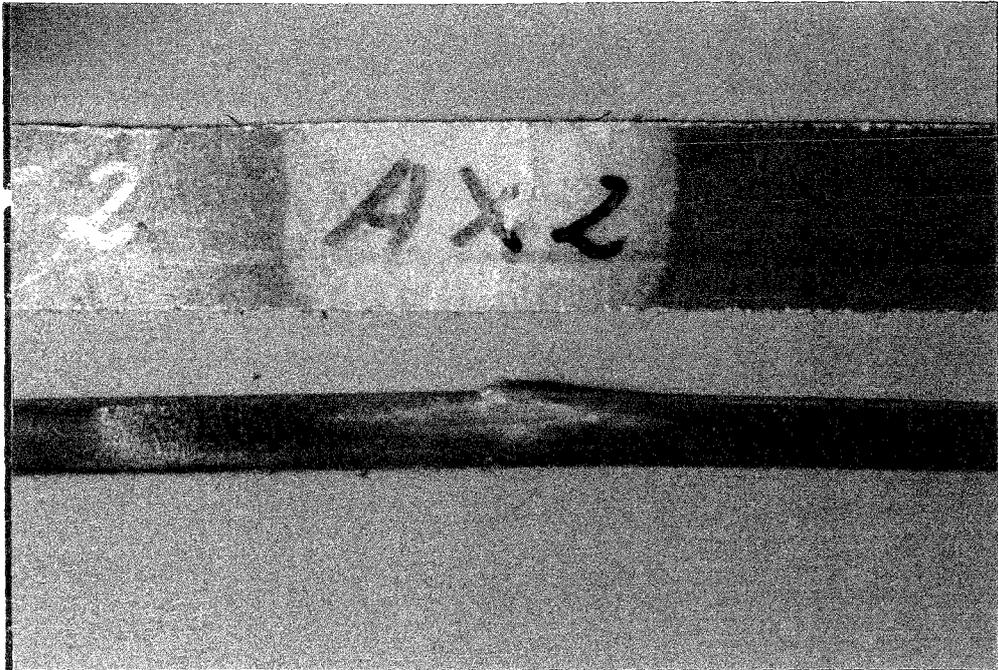


Bild 6.14.1

Reibungszahlen für die Dreipunktbiegung

(Diagramme 6.14.3, 6.14.4)

	Ansatz	L/t	Rtg.	Schnittmoment	Spannungen	Mittelwert
Mit Reibung	"	18	OS	0.00	0.99	0.50
	*			0.13	1.13	0.63
"Ohne" Reibung	"	18	OS	----	0.61	----
	*			----	0.73	----

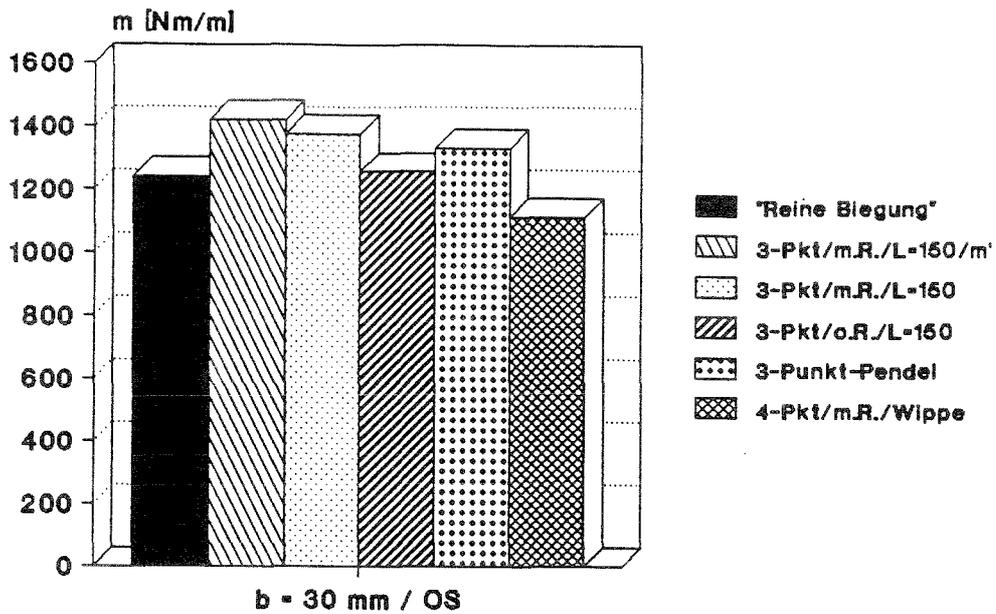
Tabelle 6.14.1 Ermittelte Reibungszahlen

Vergleich der theoretischen und experimentellen Maximallasten

(Diagramme 6.14.5, 6.14.6)

Hier lassen sich die geringeren Werte nicht mit den Schwankungen in der Plattendicke erklären. Aber dafür lagen die Bruchspannungen der Zug- und Druckversuchsserien über den angesetzten Kennwerten, so ergaben diese Versuche : $\sigma_{B\phi} = 786 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_{dB\phi} = 1022 \text{ N/mm}^2$.

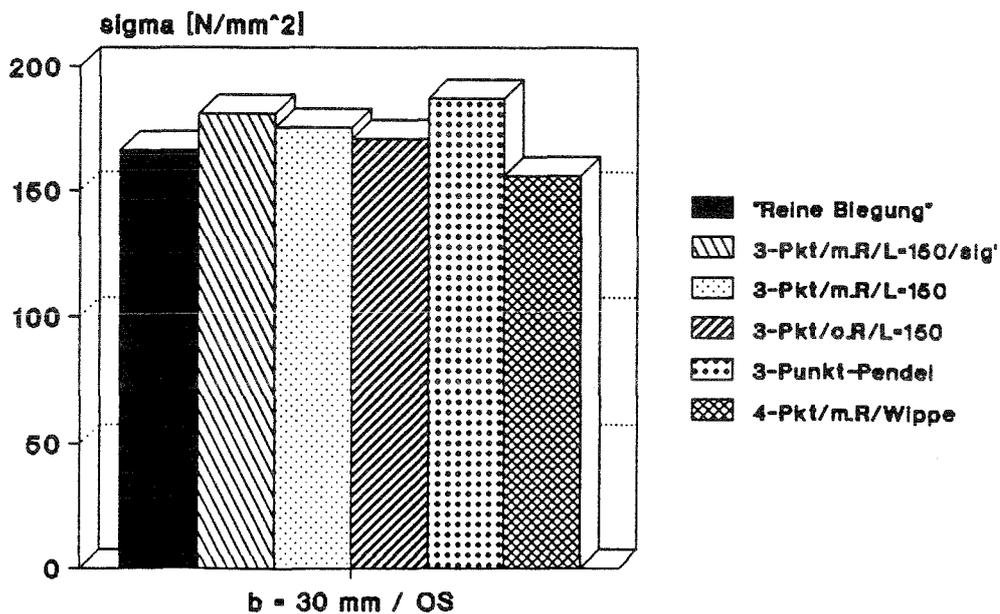
Laminat Nr.15 Schnittmomente



ungekrümmte Platte / X-Richtung

Diagramm 6.15.1

Laminat Nr.15 Spannungen



ungekrümmte Platte / X-Richtung

Diagramm 6.15.2

Laminat Nr.15 / X-Rtg. / OS
 Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung

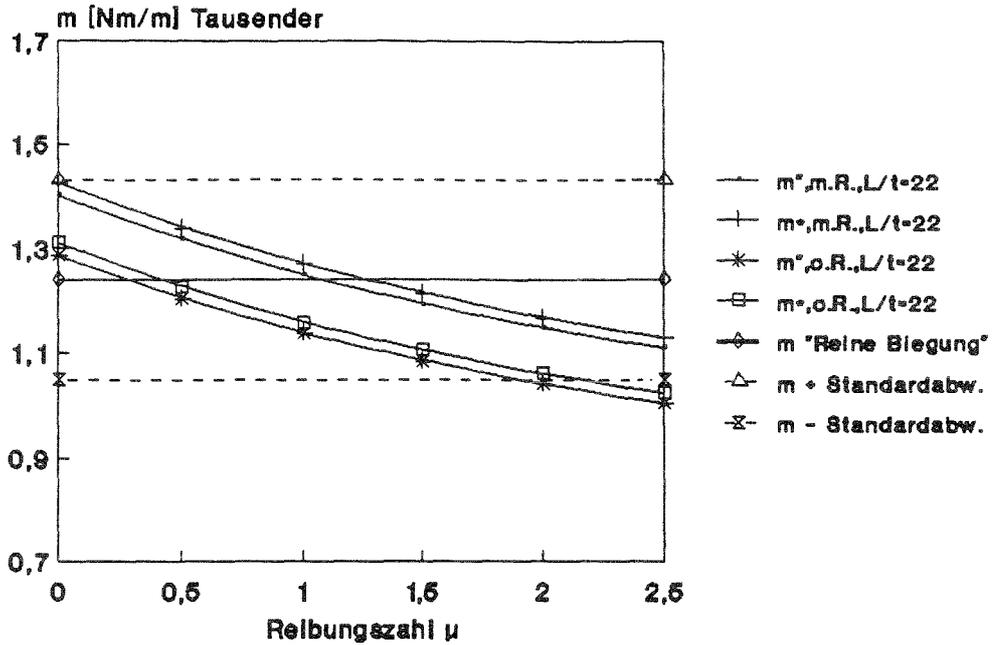


Diagramm 6.15.3

Laminat Nr.15 / X-Rtg. / OS
 Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung

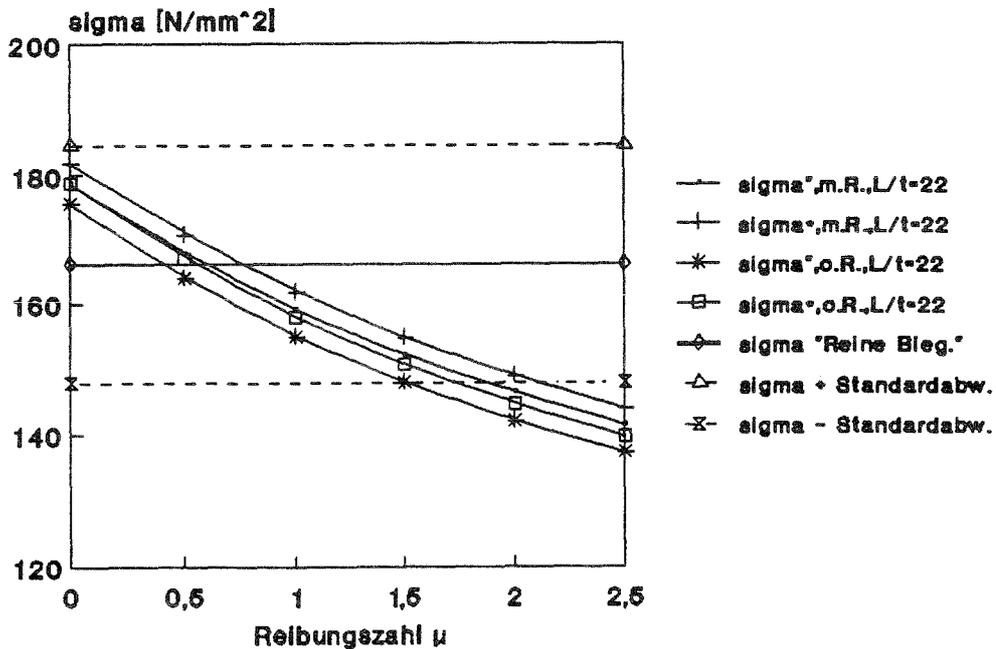


Diagramm 6.15.4

Laminat Nr.15 / X-Rtg. / US Schnittmomente : Theorie - Experimentell

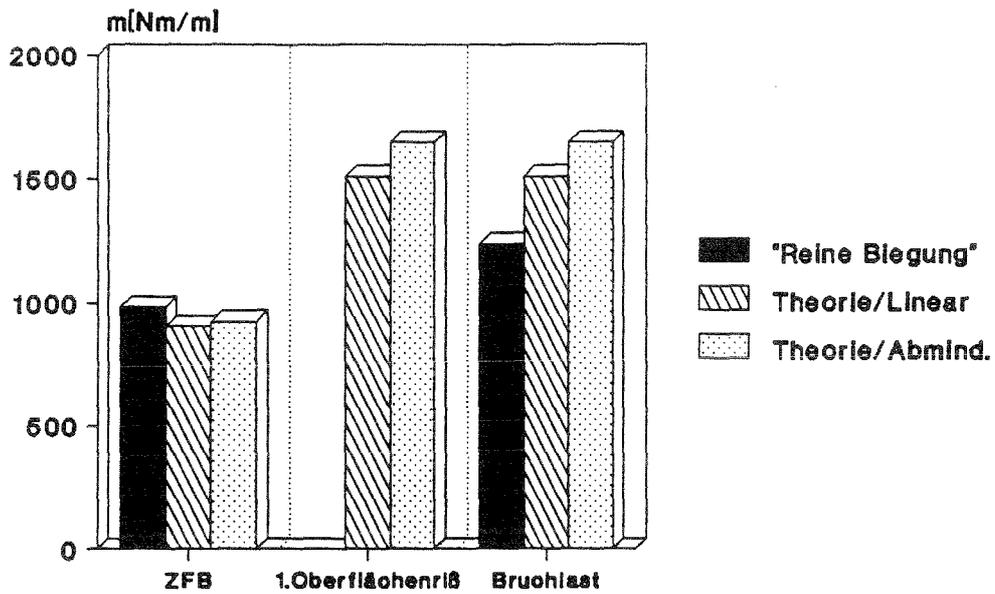


Diagramm 6.15.5

Laminat Nr.15 / X-Rtg. / US Krümmungen : Theorie - Experimentell

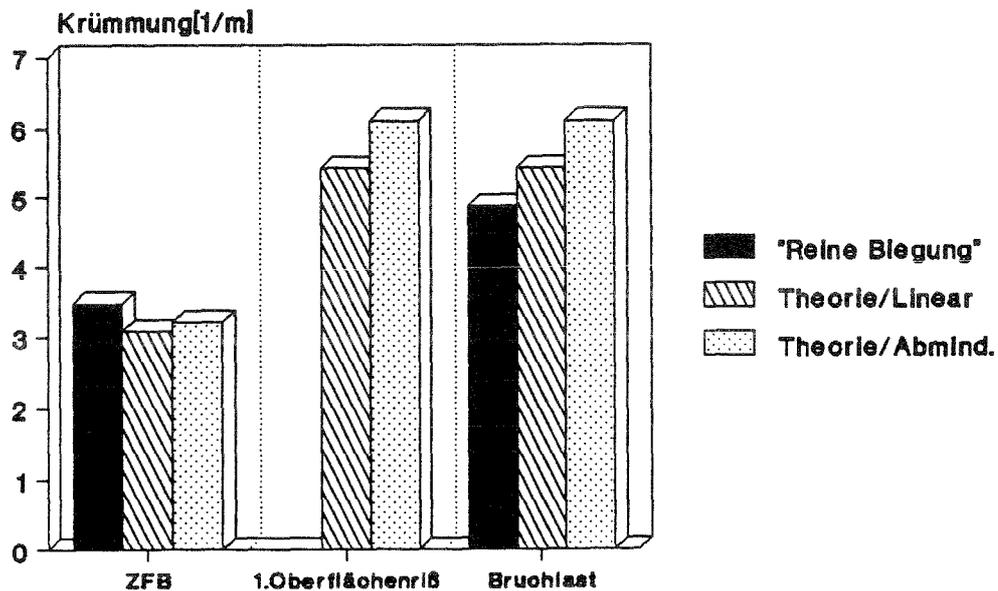


Diagramm 6.15.6

Laminat Nr. 15 Elastizitätsmodule

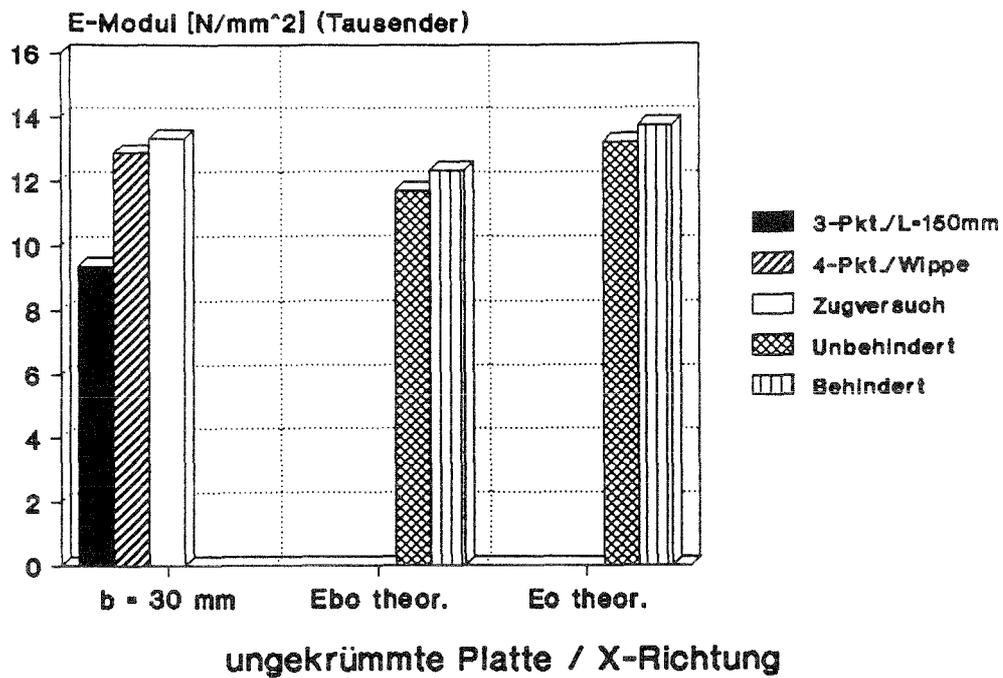


Diagramm 6.15.7

Einfluß der Prüfmethode auf die erzielten Maximallasten

(Diagramme 6.15.1, 6.15.2)

Dieses Laminat versagt bei der Biegebelastung im Druckbereich, wobei die dicken Gewebelagen nicht gut durchtränkt waren, so daß an den Knotenpunkte zwischen Kett- und Schußrichtung zuerst Schäden zu verzeichnen waren, die zur Delamination im Druckbereich führten.

Die Dreipunktpendelvorrichtung liefert bei dem Verhältnis von $L/t=22$ eine Biegebruchspannung, die über allen anderen Resultaten liegt und somit als obere Schranke unbrauchbar ist.

Reibungszahlen für die Dreipunktbiegung

(Diagramme 6.15.3, 6.15.4)

	Ansatz	L/t	Rtg.	Schnittmoment	Spannungen	Mittelwert
Mit Reibung	"	22	OS	1.08	0.63	0.86
	*			1.27	0.78	1.03
"Ohne" Reibung	"	22	OS	0.28	0.42	0.35
	*			0.41	0.57	0.49

Tabelle 6.?.1 Ermittelte Reibungszahlen

Vergleich der theoretischen und experimentellen Maximallasten

(Diagramme 6.15.5, 6.15.6)

Durch das erwähnte, vorzeitige Versagen im Druckbereich werden die theoretischen Werte nicht erreicht, während bei den Mischlaminaten Nr.1 und Nr.2 die theoretischen Bruchkrümmungen und Schnittmomenten unter den experimentellen Daten liegen, dort fand das Versagen im Zugbereich statt.

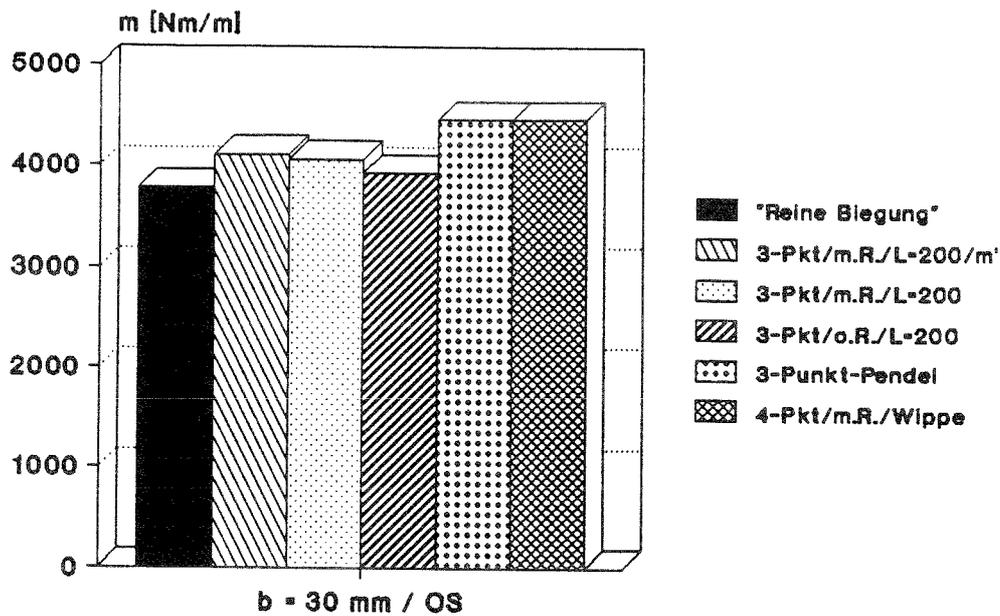
Bei dem Vergleich des 1.berechneten Zwischenfaserbruchs und dem 1.hörbaren Knistern ergibt sich bei beiden Ansätzen eine gute Übereinkunft.

Elastizitätsmodule

(Diagramm 6.15.7)

Die mittlere Dicke der Vierpunktserie liegt unterhalb der theor. und mittleren Dicke des Laminates, was das etwas erhöhte Resultat gegenüber den theoretischen Biegemodulen erklärt (unter der Annahme eines konstanten Flächengewichtes).

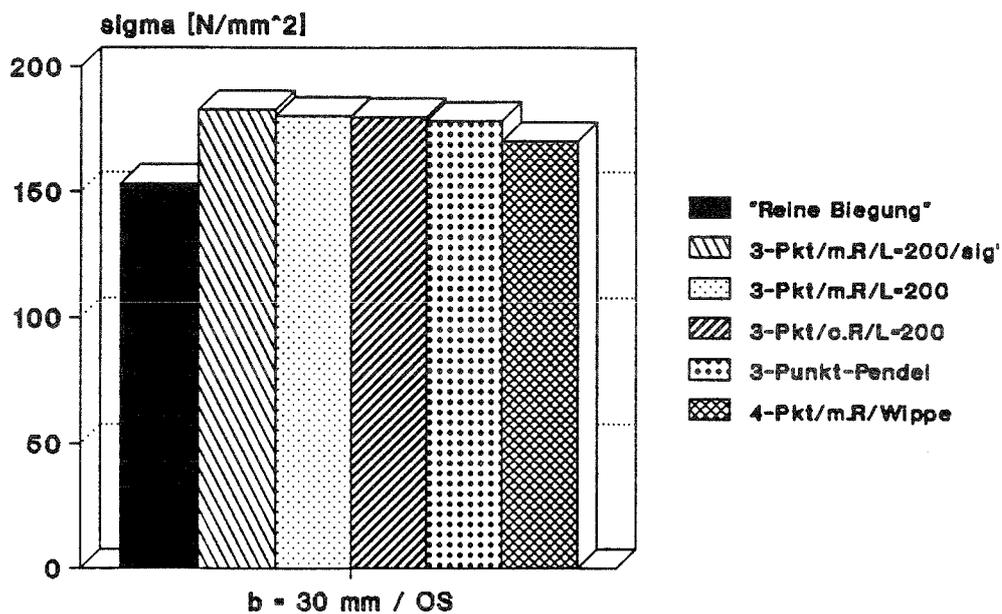
Laminat Nr.16 Schnittmomente



ungekrümmte Platte / X-Richtung

Diagramm 6.16.1

Laminat Nr.16 Spannungen



ungekrümmte Platte / X-Richtung

Diagramm 6.16.2

Laminat Nr.16 / X-Rtg. / OS
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung
Schnittmomente

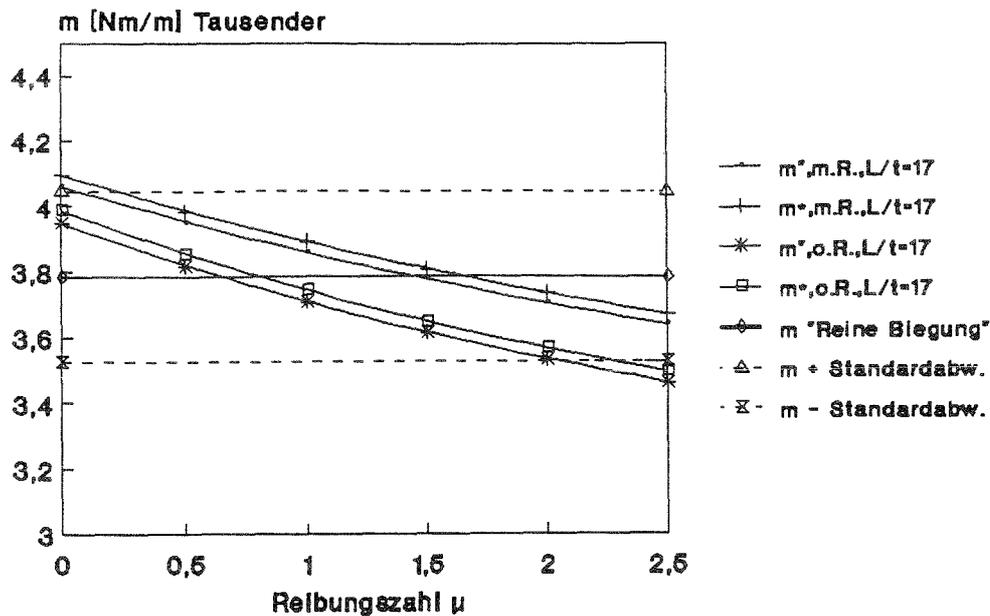


Diagramm 6.16.3

Laminat Nr.16 / X-Rtg. / OS
Reibungszahlen für 3-Punkt-Biegung

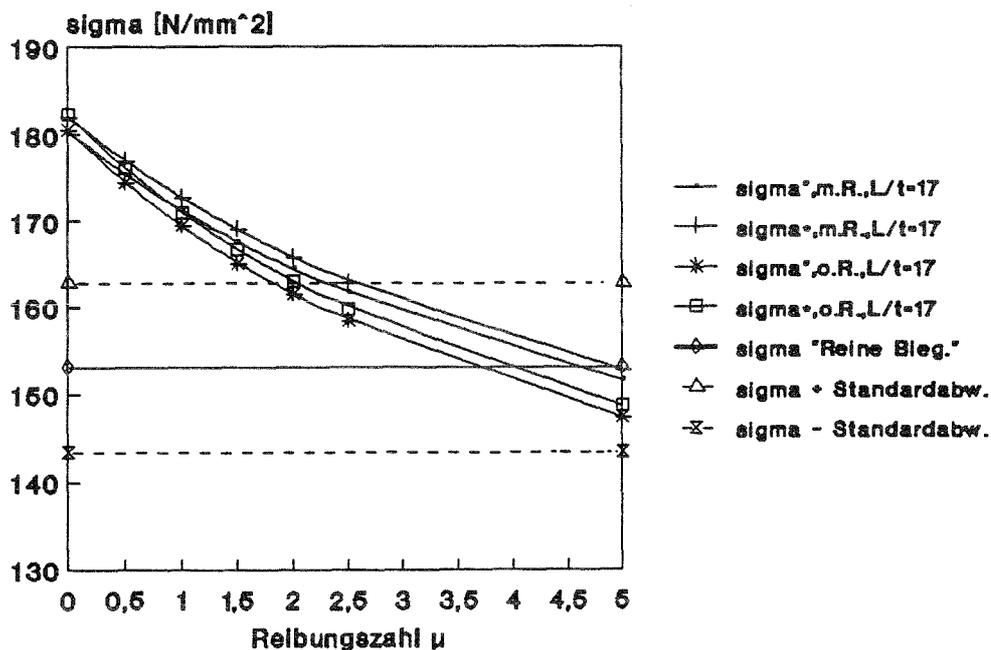


Diagramm 6.16.4

Laminat Nr.16 / X-Rtg. Schnittmomente : Theorie - Experimentell

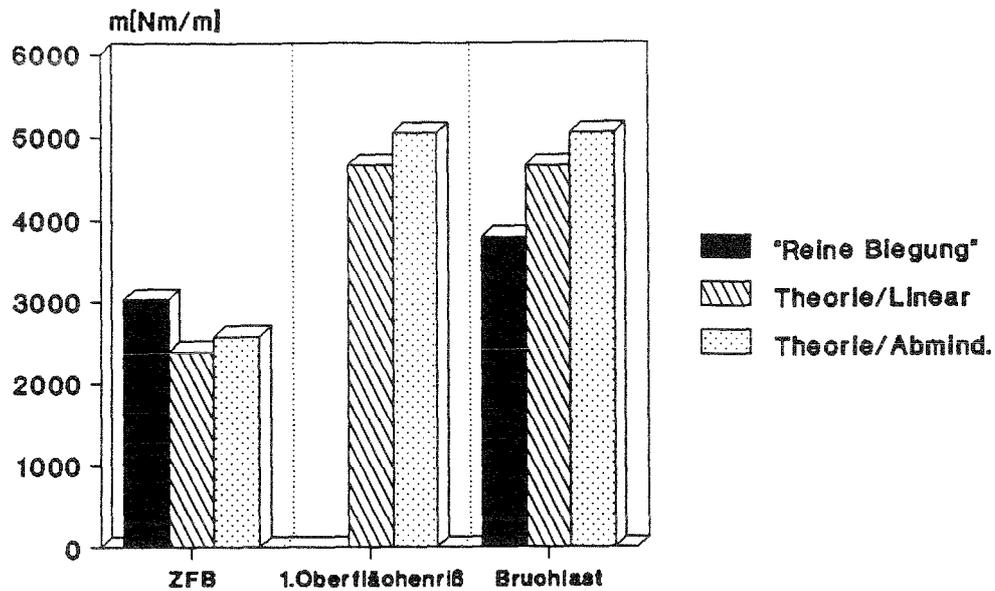


Diagramm 6.16.5

Laminat Nr.16 / X-Rtg. / US Krümmungen : Theorie - Experimentell

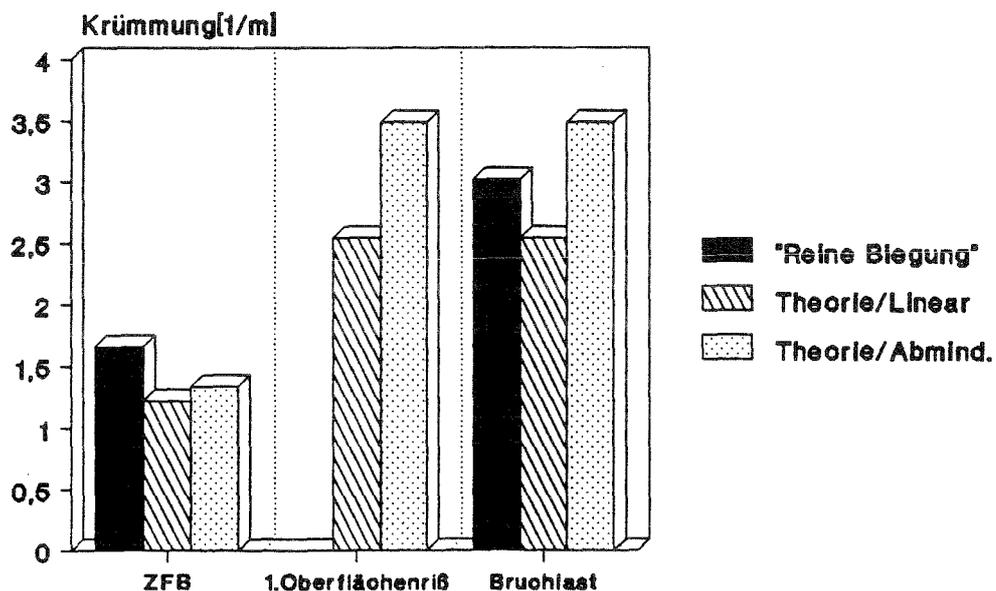
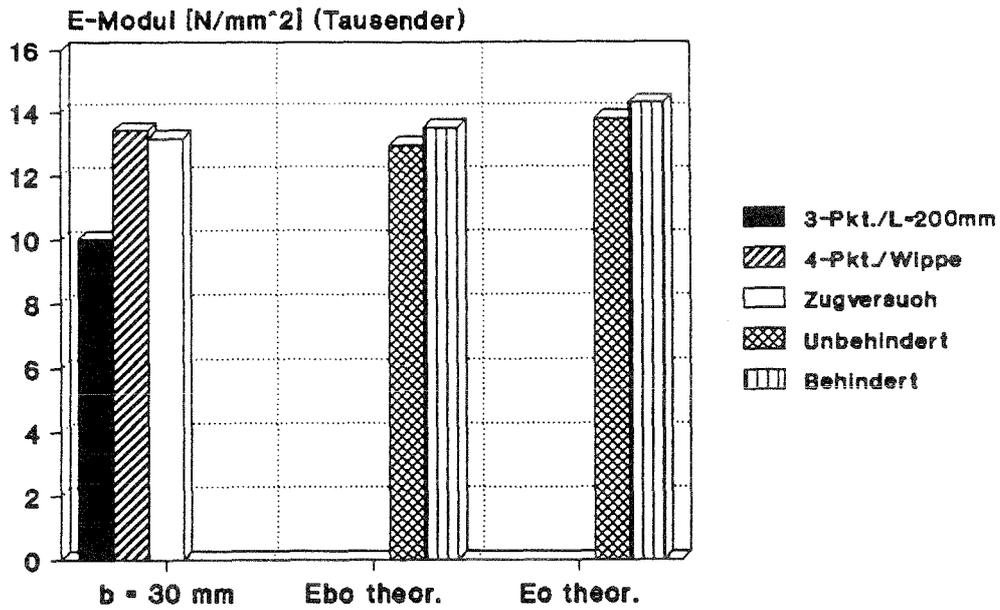


Diagramm 6.16.6

Laminat Nr. 16 Elastizitätsmodule



ungekrümmte Platte / X-Richtung

Diagramm 6.16.7

Einfluß der Prüfmethode auf die erzielten Maximallasten

(Diagramme 6.16.1, 6.16.2)

Bei diesem Laminat besteht die gleiche Problematik im Druckbereich wie beim Laminat Nr.15. So läßt sich der starke Abfall der "reinen" Biegung durch die nicht vorhandene Stützwirkung von dem Druckstempel

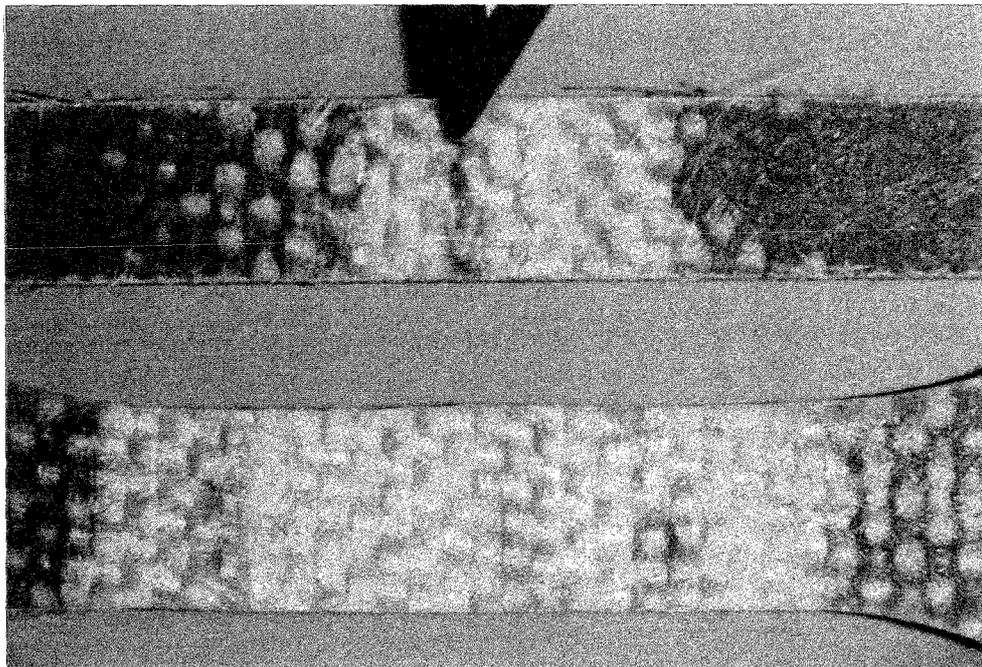


Bild 6.16.1

erklären. Im Bild 6.16.1 erkennt man bei der oberen Probe (Pfeil) einen fast ungeschädigten Bereich an der Stelle, wo der Druckstempel der Dreipunktbiegung auflag. Die untere Schulterprobe, aus einem Versuch mit der Biegeprüfvorrichtung, zeigt über den gesamten Meßbereich eine konstante Schädigung, welche im Übergangsbogen zum eingespannten Probenende abnimmt.

Dieser Effekt tritt auch bei der Dreipunkt-Pendel-Biegung auf, dessen Ergebnis hier nur von der "reinen Biegung" und der Vierpunktbiegung unterschritten wird, wobei letztere ebenfalls die Stützwirkung besitzt.

Reibungszahlen für die Dreipunktbiegung

(Diagramme 6.16.3, 6.16.4)

Die relativ hohe "Reibungszahl" aus den Biegebruchspannungen beinhaltet auch die angesprochene Stützwirkung, ist also nicht nur auf Reibungseffekte zurückzuführen.

	Ansatz	L/t	Rtg.	Schnittmoment	Spannungen	Mittelwert
Mit Reibung	"	17	OS	1.45	4.62	3.04
	*			1.64	4.93	3.29
"Ohne" Reibung	"	17	OS	0.66	3.72	2.19
	*			0.82	4.03	2.43

Tabelle 6.16.1 Ermittelte Reibungszahlen

Vergleich der theoretischen und experimentellen Maximallasten

(Diagramme 6.16.5, 6.16.6)

Es existiert wieder das gleiche Problem im Druckbereich wie bei dem Laminat Nr.15, welches nur eine geringere Dicke aufweist.

Bei Druckversuchen mit diesem Laminat wurde nur eine Bruchspannung von $\sigma_{dB}=100\text{ N/mm}^2$ erreicht, während mit den verwendeten Werkstoffkennwerten und dem 2. Ansatz eine Druckbruchspannung von 157 N/mm^2 berechnet wurde.

Bei Zugbelastung lag der theoretische Wert von $\sigma_{zB}=188\text{ N/mm}^2$ etwas unter dem experimentellen mit $\sigma_{zB}=196\text{ N/mm}^2$.

Laminat Nr.17 / X-Rtg. / US

Schnittmomente : Theorie - Experimentell

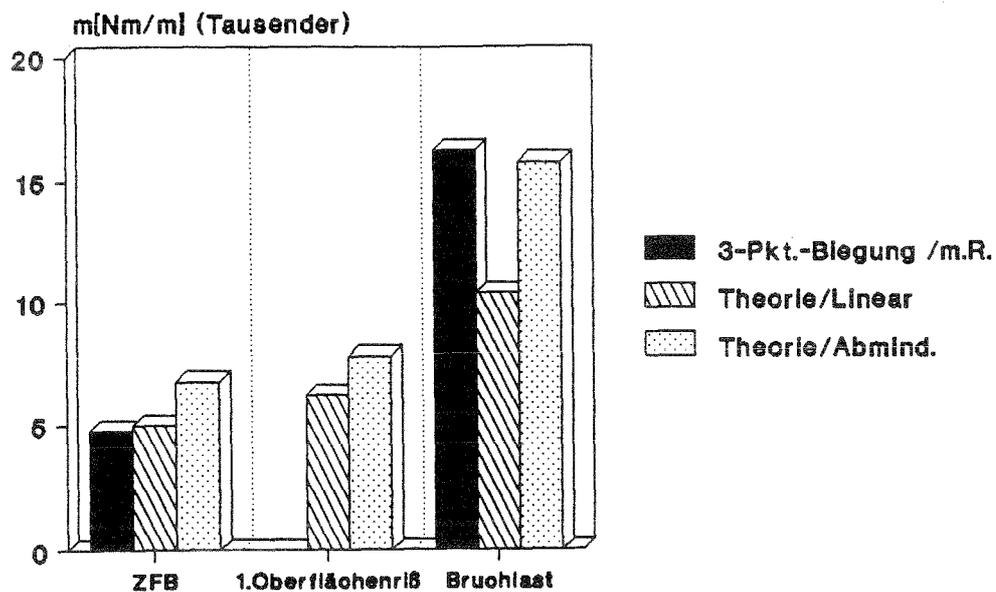


Diagramm 6.17.1

Laminat Nr. 17

Elastizitätsmodule

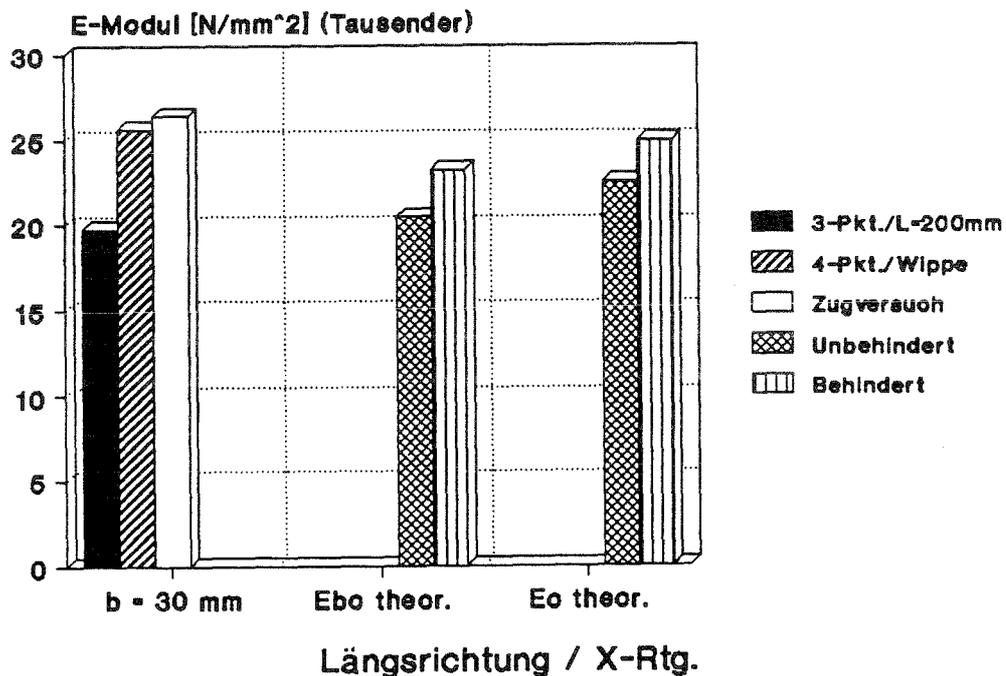


Diagramm 6.17.2

Laminat Nr.17 Schnittmomente

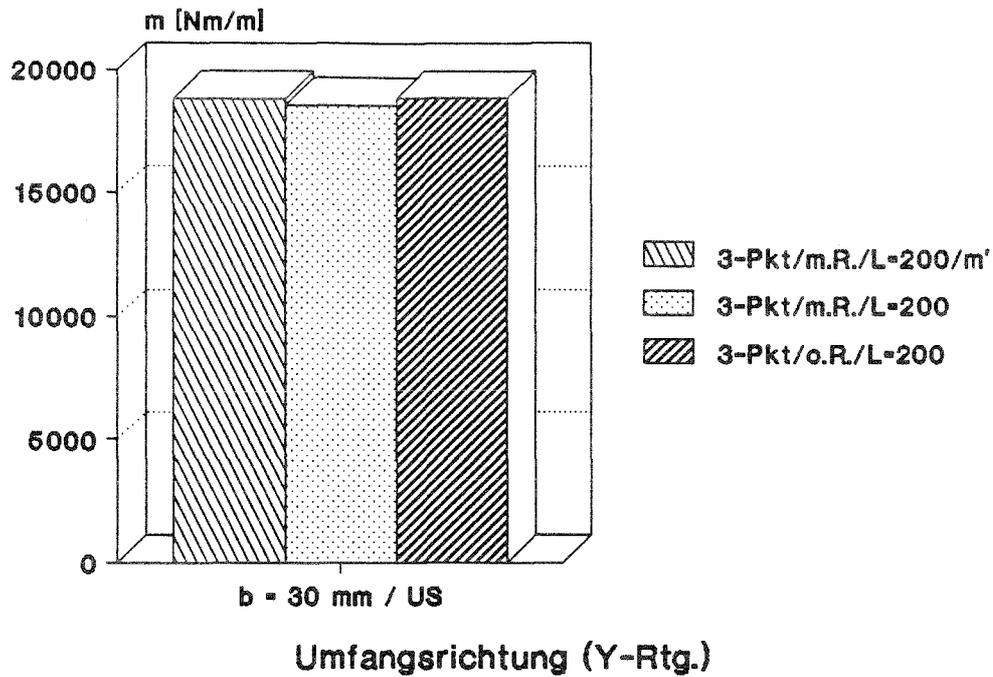


Diagramm 6.17.3

Laminat Nr.17 Spannungen

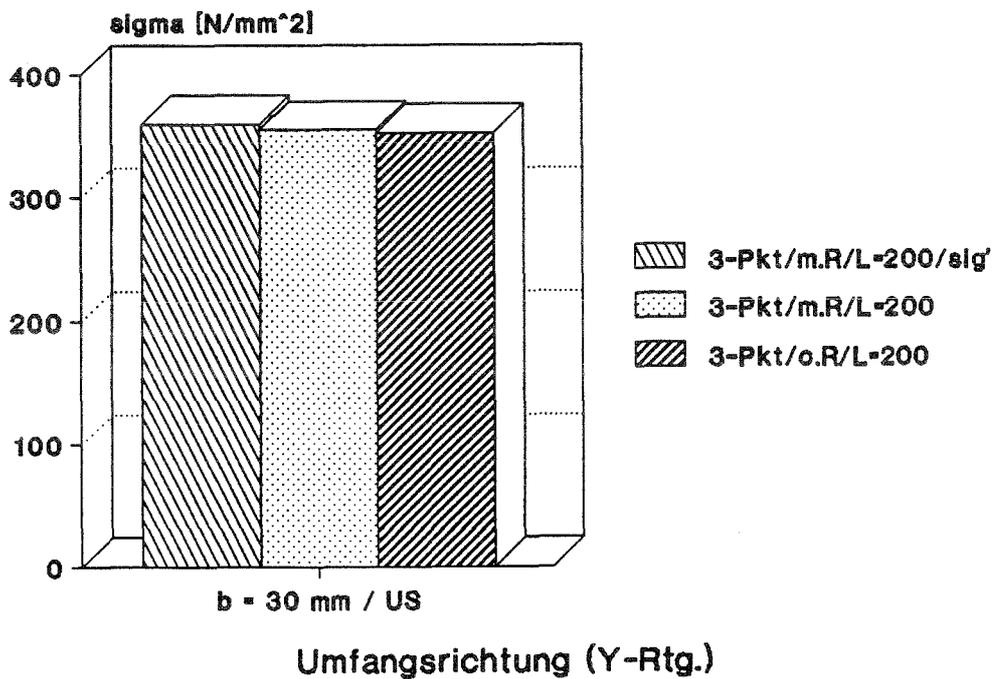


Diagramm 6.17.4

Laminat Nr.17 / Y-Rtg. / US

Schnittmomente : Theorie - Experimentell

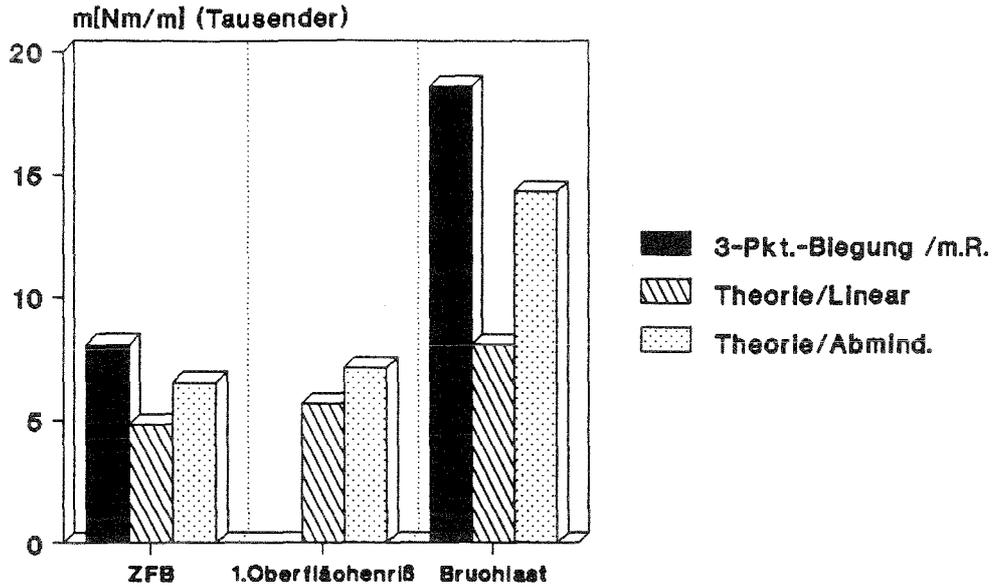


Diagramm 6.17.5

Laminat Nr. 17

Elastizitätsmodule

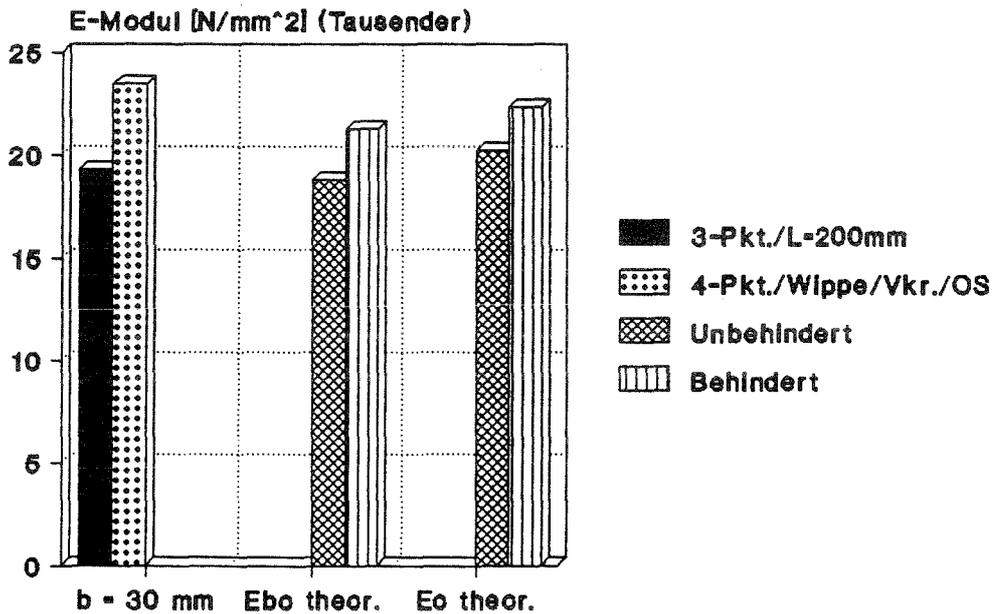
gekr. Platte $r=750$ / Y-Richtung

Diagramm 6.17.6

Vergleich der theoretischen und experimentellen Maximallasten

Bei diesem Laminat stand leider nur geringes Probenmaterial zur Verfügung, so daß nur Versuche mit der Dreipunktbiegung bei einem kurzen Auflagerabstand zur gefahren werden konnten, so daß hier ein Schubversagen erfolgte.

Aber dieses relativ dicke Wickellaminat bietet eine gute zusätzliche Kontrolle für die theoretischen Maximallastansätze.

Analog zu den Ergebnissen der Wickellamine Nr.5 und Nr.6 ergibt sich auch hier eine wesentlich bessere Übereinstimmung des nicht-linearen, abgeminderten Ansatzes mit den Versuchsergebnissen als mit linearem Ansatz. Dies betrifft die Längs- und Umfangsrichtung.

Für die X-Richtung ist bei den Zugversuchen eine Schnittlast von 4584 N/mm ermittelt worden, während der theoretische Wert 4160 N/mm beträgt.

7. Vergleich der Versuchs- und Auswertungsarten

In den Tabellen 7.1 und 7.2 sind die Verhältnisse der erzielten Biegebruchspannungen zu den Zugbruchspannungen, bzw. in der Tabelle 7.3 zu den Resultaten der Biegeprüfvorrichtung, eingetragen.

"Reine" Biegung / Biegeprüfvorrichtung

Vorteile :

- Minimale Reibung, unabhängig von der Probenoberfläche oder Querkrümmung
- Querkraftfrei
- verformungsunabhängige Momentberechnung
- Krümmungsmessung ist möglich
- Moment wirkt über eine Meßstrecke

Nachteile :

- Aufwendige Probenherstellung, sonst besteht die Gefahr, daß die Proben bei unsauberen Übergängen im Auslauf versagen
- Zeitaufwand bei den Versuchen ist sehr hoch
 - Reinigen des Horizontalschlittens (schmutzempfindlich)
 - Einspannen der Proben
 - Anklemmen des Krümmungsmeßgerätes
 - Nachjustieren des Vertikalschlittens um Dickenschwankungen auszugleichen
- Vorbelastung durch das Gewicht des Vertikalschlittens ist für sehr dünne Proben zu hoch, bzw. es sind Vorrichtungen in verschiedenen Größen erforderlich.
- Einspannung kann als Störstelle fungieren
- Kostenintensiv

Dreipunktbiegung

Vorteile :

- Einfache Probenform (Rechteckproben)
- Vorrichtung ist i.a. vorhanden (reibungsbehaftete Auflager)
- Einfache Versuchsausführung
- Schneller Probenaustausch

Nachteile :

- Druckstempel kann ein Versagen auslösen oder verhindern
- Das aktuelle Moment in der Probe ist nicht exakt zu berechnen
- Das maximale Moment besteht nur in einem Punkt
- Reibung täuscht ein zu hohes Moment vor
- Die Reibung ist nicht konstant, sondern wird beeinflusst durch
 - Querkrümmung (Skizze 2.3)
 - Schutzschichten
 - Oberflächenbeschaffenheit
- "Reibungsfreie" Auflager sind schmutzempfindlich

Ergebnisse :**Schnittmoment**

Die reibungsbehaftete Dreipunktbiegung liefert, insbesondere bei der Berücksichtigung der Verformung nach DIN EN 63 (Gleichung 3.2.5), i.a. das höchste Resultat.

Die Benutzung der "reibungsfreien" Auflager führt i.a. zu geringeren Werten als die üblichen Auflager. Unter Vernachlässigung der Verformung weisen diese Ergebnisse die beste Übereinstimmung mit der "reinen" Biegung auf.

Elastizitätsmodul

Aufgrund des vernachlässigten Querkraftanteils bei der Verformung wird mit der Dreipunktbiegung der niedrigste E_b -Modul ermittelt (Gleichung 3.2.6). Durch die örtlichen Verformungen bei Proben, die eine Vorkrümmung senkrecht zur Längsrichtung aufweisen, fallen die Versuchsergebnisse noch geringer aus.

Dreipunkt-Pendel-Biegung**Vorteile :**

- Einfache Probenform, allerdings sind Einschnitte zur Abrutschverhinderung notwendig
- Kein Reibungseinfluß
- Keine hohen Anschaffungskosten

Nachteile :

- Vorgekrümmte Proben können bei der Belastung wegrutschen
- Druckstempel kann ein Versagen auslösen oder verhindern
- Änderung des Auflagerabstandes durch die Verformung
- Einschnitt der Probe muß mit Auflagerabstand übereinstimmen

Ergebnisse**Schnittmoment**

Bei zu großen Verformungen, also in erster Linie bei Auflagerabständen $L > 20 \cdot t$ werden zu hohe Resultate erzielt, welche sich nicht als obere Grenze verwenden lassen, da mit allen anderen Versuchsarten kleinere Werte ermittelt wurden.

Vierpunktbiegung**Vorteile :**

- Einfache Probenform
- Moment ist zwischen den inneren Auflagern konstant (bei geringer Verformung)
- Zur Bestimmung der E_b -Module am besten geeignet

Nachteile :

- Symmetrische Krafteinleitung ist bei festen inneren Druckstempeln nicht gewährleistet
- Bei den Bruchversuchen mit "Wippe" führt die Vertikalkraft zu einer Auslenkung, so daß auch hier teilweise nur ein Innenlager zum Tragen kommt.
- Große Verformungen
- Reibungseinfluß ist schwieriger abzuschätzen

Ergebnisse**Schnittmoment**

Die Bruchwerte liegen i.a. erheblich unter den Resultaten der anderen Prüfmethode. In den Tabellen sind nicht alle Vierpunktversuche aufgeführt, dem Anhang sind noch Resultate mit anderen Auflagerkombinationen zu entnehmen, die jedoch ebenfalls zu gering sind. → Für Bruchversuche ist diese Versuchsart nicht geeignet.

Elastizitätsmodul

Die Vierpunktbiegung mit "Wippe" wurde i.a. der höchste und mit der Theorie am verträglichste Wert gemessen. Es muß bei den verwendeten großen Auflagerradien die Änderung der Auflageabstände durch die Vorkrümmung berücksichtigt werden.

Versuche mit dem festen Druckstempel führten zu höheren Resultaten als bei der Dreipunktbiegung, lagen aber i.a. unter den theoretischen Ergebnissen.

Nr.	Rtg		3-Pkt. m.R. mit m'	3-Pkt m.R.	3-Pkt o.R.	3-Pkt- Pendel	4-Pkt Wippe m.R.	4-Pkt fest m.R.	4-Pkt fest o.R.	"Reine" Biegung	σ_B [N/mm ²]
1	X	US OS	1.23 1.17	1.19 1.13	1.16	1.10	1.21		1.00	1.085	189.5
2	X	US OS	1.22	1.13	1.04 1.13	1.33	1.00			1.085 1.333	172.7
3	X	US OS	1.61 1.22	1.55 1.18	1.39 1.33	1.22	1.25		1.10	1.09 1.18	137.9
4	X	US OS	1.34	1.28	1.16	1.18	1.04			1.13 1.27	125.0
5	X	US OS	1.52 1.70	1.49 1.65	1.42			1.22		*1.29	235.8
6	X	US OS	1.81	1.70	1.65 1.80		1.60			1.609 1.703	107.1
-- Starke Querkrümmung bei den Biegeversuchen --											
7	X	US OS	1.75	1.72	1.43			1.45		1.96 1.50	76.2
-- Laminat mit 2.5mm Chemieschutzschicht --											
10	Y	US OS	1.28	1.22	1.30	1.28				1.30	231.7
11	Y	US OS	1.48	1.40	1.34	1.48				1.33	208.7
(12)	X	US OS	1.66	1.63	2.17					1.24	102.9
13	X	US OS	1.43	1.29	1.28	1.50	1.04			1.34	132.1
14	X	US OS	1.45	1.39	1.34	1.45	1.21			1.27	136.2
15	X	US OS	0.96	0.93	0.90	0.99	0.79			0.88	189.5
16	X	US OS	0.93	0.92	0.91	0.91	0.86			0.78	196.1
17	X	US OS	1.19	1.18							253.0

Tabelle 7.1 Verhältnisse der Bruchspannungen zu den Zugspannungen
in Abhängigkeit von der Versuchsart (b=30mm)

(..) : Starke Schwankungen der Probendicke im Laminat

* : Versuchsserie mit der Probenbreite b=20 mm

Nr.	Rtg		3-Pkt m.R.	3-Pkt o.R.	3-Pkt- Pendel	4-Pkt Wippe m.R.	4-Pkt fest m.R.	4-Pkt fest o.R.	"Reine" Biegung	$\sigma_{zB\phi}$ [N/mm ²]
1	X	US OS	1.22 1.11	1.16	1.14	1.20		1.04	1.09	731.6
2	X	US OS	1.15	1.03 1.13	1.32	1.00			1.07 1.34	794.1
3	X	US OS	1.58 1.22	1.38 1.31	1.24	1.29		1.13	1.12 1.21	703.2
4	X	US OS	1.31	1.16	1.22	1.03			1.17 1.34	744.7
5	X	US OS	1.49 1.65	1.42			1.22		1.28*	385.0
6	X	US OS	1.72	1.63 1.83		1.66			1.63 1.62	189.1
-- Starke Querkrümmung bei den Biegeversuchen --										
7	X	US OS	1.78	1.54			1.56		2.05 1.55	272.8
-- Laminat mit 2.5mm Chemieschutzschicht --										
9	X	US OS	1.89		2.07				1.48	260.6+
10	Y	US OS	1.28	1.33	1.30				1.33	771.2
11	Y	US OS	1.39	1.30	1.43				1.31	757.4
(12)	X	US OS	1.62	2.04					1.21	311.6
13	X	US OS	1.30	1.32	1.66	1.03			1.25	731.5
14	X	US OS	1.41	1.34	1.35	1.19			1.36	785.6
15	X	US OS	0.94	0.88	0.95	0.79			0.86	691.1
16	X	US OS	0.85	0.84	0.89	0.87			0.76	692.7

Tabelle 7.2 Verhältnis der erzielten Biegebruchspannung zur ermittelten Zugbruchspannung bezogen auf den Faservolumengehalt in Abhängigkeit von der Versuchsart (b=30mm)

(..) : Starke Schwankungen der Probendicke im Laminat

* : Versuchsserie mit der Probenbreite b=20 mm

+ : Versuchsserie mit der Probenbreite b=50 mm

Nr.	Rtg		3-Pkt. m.R. mit m'	3-Pkt m.R.	3-Pkt o.R.	3-Pkt- Pendel	4-Pkt Wippe m.R.	4-Pkt fest m.R.	4-Pkt fest o.R.	Zug- versuch	R.B. [N/mm ²]
1	X	US OS	1.13	1.10	1.07	1.01	1.12		0.92	0.92	205.7
2	X	US OS	1.13	1.04	0.96 0.85	1.22	0.93			0.92 0.75	187.3 230.2
3	X	US OS	1.48 1.03	1.42 1.00	1.27 1.13	1.11	1.14		0.93	0.91 0.85	150.8 162.3
4	X	US OS	1.19	1.14	1.03	1.05	0.92			0.89 0.78	140.8 159.3
5	X	US OS	1.18	1.15	1.10			0.94		0.77	304.3*
5	Y	US OS	1.15	1.13	1.02			0.90	0.86		331.5*
6	X	US OS	1.12	1.06	1.03 1.06		0.99			0.62 0.59	172.4 182.3
6	Y	US OS	0.97	0.87	0.81		0.86				260.3 251.1
7	X	US OS	1.17	1.15	0.95			0.97		0.51 0.67	149.4 114.2
7	Y	US OS	1.21	1.09	1.03		0.94				432.9
8	Y	US OS	1.24	1.16	1.02						417.2
9	X	US OS	+1.37	+1.33						+0.69	148.9
9	Y	US OS	1.36	1.29	1.17						408.3
10	X	US OS	1.14	1.10							159.8 172.5
10	Y	US OS	0.98	0.94	1.00	0.99				0.77	301.7
11	X	US OS	+1.00	+0.97							190.6
11	Y	US OS	1.11	1.06	1.01	1.11				0.75	277.7
(12)	X	US OS	1.34	1.31	1.75					0.81	127.8
13	X	US OS	1.07	0.97	0.96	1.12	0.78			0.75	176.7
14	X	US OS	1.14	1.10	1.05	1.14	0.95			0.79	173.5
15	X	US OS	1.09	1.06	1.03	1.13	0.94			1.14	166.23
16	X	US OS	1.19	1.18	1.17	1.16	1.11			1.28	153.1

Tabelle 7.3 Verhältnis der Bruchspannung zur ermittelten Biegebruchspannung aus der Versuchsserie mit der Biegeprüfvorrichtung in Abhängigkeit von der Versuchsart (b=30 mm)

(..) : Starke Schwankungen der Probendicke im Laminat

* : Versuchsserie mit der Probenbreite b=20 mm

+ : Versuchsserie mit der Probenbreite b=50 mm

8. Vergleich : Theorie - Praxis

Die Tabelle 8.1 beinhaltet die Verhältnisse der Ergebnisse aus den beiden theoretischen Ansätzen zu den Versuchsdaten.

Während die Differenzen der beiden Ansätze bei der Zugbelastung i.a. nicht sehr hoch sind, ergibt sich vor allem bei den Laminaten mit Kreuzlagen eine bessere Übereinstimmung hinsichtlich des Schnittmomentes und der Bruchkrümmung mit dem 2.Ansatz.

Bei den Mischlaminaten Nr.15 und Nr.16 sind 33% zu große theoretische Ergebnisse zu registrieren, diese Lamine versagte wegen schlechter Tränkung der dicken Gewebelagen durch Delamination im Druckbereich, welche von den Knotenpunkten des Gewebes ausgelöst wurde. Hingegen fallen bei den Mischlaminaten Nr.1 und Nr.2 die theoretischen Resultate zu gering aus, dort versagte der Zugbereich bei der Biegebelastung.

Nr.	Rtg.	An- satz	Biegebelastung Rtg	Biegebelastung				Zugbelastung			
				mB	oBb	theor. oBbφ	/exp. aB	nB	oZB	oZBφ	theor./exp. eZB
1	X	1/2	US	0.85 0.93	0.84 0.92	0.85 0.92	0.80 0.89	0.89 0.86	0.88 0.85	0.89 0.86	0.82 0.81
2	X	1/2	US	0.90 0.91	0.87 0.88	0.88 0.89	0.77 0.79	0.83 0.81	0.83 0.81	0.83 0.81	0.75 0.75
3	X	1/2	US	0.99 1.08	1.02 1.11	1.01 1.10	0.89 1.08	1.04 1.04	1.03 1.03	1.04 1.04	0.94 1.12
3	X	1/2	OS	0.91 0.99	0.95 1.04	0.93 1.02	0.81 0.98				
4	X	1/2	US	0.96 1.05	1.01 1.10	0.99 1.08		0.99 0.99	0.97 0.97	0.99 0.99	0.73 0.91
5	X	1/2	US	*0.86 *1.24	*0.85 *1.22	*0.86 *1.23	*1.20 *1.23	1.42 1.16	1.42 1.16	1.42 1.16	1.69 1.12
5	Y	1/2	US	*0.62 *1.03	*0.64 *1.06	*0.63 *1.04	*0.90 *0.98				
6	X	1/2	US	0.79 1.09	0.82 1.13	0.80 1.11	0.32 0.97	1.07 1.04	1.07 1.04	1.07 1.04	0.48 1.00
6	Y	1/2	US	0.59 0.91	0.61 0.93	0.60 0.92	0.23 0.70				
7	X	1/2	US	0.99 1.06	0.98 1.06	0.86 0.93	1.01 1.08	1.51 1.51	1.44 1.44	1.32 1.32	2.26 2.24
7	Y	1/2	US	0.80 0.80	0.79 0.79	0.70 0.70	0.80 0.79				
8	X	1/2	US	1.04 1.17	1.07 1.20	1.05 1.17	0.97 1.09				
8	Y	1/2	US	0.81 0.79	0.93 0.90	0.87 0.84	1.18 1.16				
9	X	1/2	US	0.99 1.04	1.09 1.15	1.04 1.10	1.47 1.10	1.20+ 1.27+	1.22+ 1.29+	1.19+ 1.27+	
9	Y	1/2	US	0.93 0.92	1.08 1.06	1.00 0.99	1.26 1.25				
10	X	1/2	US	1.05 1.14	1.07 1.17	1.06 1.16	1.16 1.31				
10	Y	1/2	US	0.74 0.79	0.74 0.78	0.74 0.79	0.75 0.83	0.99 0.98	0.97 0.95	0.99 0.97	0.79 0.78
11	X	1/2	US	1.08 1.09	0.98 0.99	1.03 1.04	0.96 1.15				
11	Y	1/2	US	0.81 0.80	0.85 0.84	0.83 0.82	0.75 1.04	1.02 0.99	1.05 1.03	1.02 0.99	0.92 0.91
(12)	X	1/2	OS	1.02 1.02	1.03 1.04	0.97 0.98	0.64 0.63	1.20 1.20	1.24 1.24	1.14 1.14	
(12)	Y	1/2	US	#0.60 #0.61	#0.61 #0.63	#0.57 #0.59					
13	X	1/2	OS	1.03 1.11	0.90 0.97	0.96 1.04	0.74 0.92	1.00 1.00	1.00 1.00	1.00 1.00	
14	X	1/2	OS	0.70 0.78	0.80 0.89	0.75 0.84	0.66 0.84	0.93 0.93	0.93 0.93	0.93 0.93	
15	X	1/2	OS	1.22 1.33	1.22 1.33	1.22 1.33	1.11 1.25	0.92 0.92	0.93 0.93	0.92 0.92	
16	X	1/2	OS	1.23 1.33	1.23 1.34	1.23 1.34	0.84 1.16	0.92 0.91	0.94 0.94	0.92 0.91	
17	X	1/2	US	#0.64 #0.97	#0.65 #0.98	#0.64 #0.97		0.91 0.91	0.91 0.91	0.91 0.91	
17	Y	1/2	US	#0.43 #0.77	#0.42 #0.75	#0.43 #0.76					

Tabelle 8.1 Verhältnisse der theoretischen/experimentellen Daten
 Experimentelle Schnittmomente und Krümmung aus
 den Versuchen mit der Biegeprüfvorrichtung
 (..): Starke Schwankungen der Probendicke im Laminat
 * : Versuchsserie mit der Probenbreite b=20 mm
 + : Versuchsserie mit der Probenbreite b=50 mm
 # : Vergleichswerte aus der Dreipunktbiegung

9. Auswertungsvorschläge

Ermittlung der Schnittmomente / Bruchspannungen

Die Dreipunktbiegung ist die einfachste und schnellste Prüfmethode.

Für Probendicken von 8-15 mm wird die Verwendung von "reibungsfreien" Auflagern (z.B. nach Skizze 3.2.2) empfohlen. Für größere Dicken von $t > 15$ mm sind die üblichen Auflager ausreichend, da hier erfahrungsgemäß in erster Linie eine Überprüfung der interlaminaren Festigkeit notwendig ist und die Bruchfestigkeiten zunehmen.

Die Dreipunktbiegung mit den "reibungsfreien" Auflagern (Skizze 3.2.2) ist mit den Gleichungen (3.2.3 und 3.2.4) die trivialste Form der Auswertung, die bei den geprüften Laminaten zu der besten Übereinstimmung gegenüber der "reinen" Biegung führte.

Um den störenden Einfluß der Querkraft zu reduzieren, sollte bei der Dreipunktbiegung $L/t=20$ angesetzt werden, bei größere Verhältnissen wird die Verformung zu groß. Nach den vorliegenden Ergebnissen führt ein maximaler Weg des Druckstempels bis zu dem 2,5-fachen der Probendicke zu akzeptablen Resultaten.

Eine größere Variationsmöglichkeit bietet der 2. Ansatz für die Dreipunktbiegung durch die Änderung der Reibungskoeffizienten.

Die vereinfachte Version (Gleichungen 3.2.17,3.2.25 - 3.2.31) ist für Auflagerradien $R_a \leq 5$ mm ausreichend, sonst muß die Änderung des Auflagerabstandes durch das Abrollen mit den Gleichungen 3.2.7 - 3.2.22 berücksichtigt werden.

Aus den vorliegenden Ergebnissen ergeben sich folgende Reibungszahlen :

- 1.2 : Für reibungsbehaftete Auflager
- 0.6 : Für "reibungsfreie" Auflager
- + 0.1 : Unter Benutzung des vereinfachten Ansatzes
- + 0.5 : Bei Proben mit einer Querkrümmung

(unter Umständen ist eine weitere Erhöhung bei Chemieschutzschichten oder sehr rauher Oberfläche sinnvoll, jedoch kann hier keine konkrete Angabe gemacht werden.)

So ergibt sich zum Beispiel für eine ebene Probe bei Benutzung der reibungsbehafteten Auflager und des vereinfachten Ansatzes eine Reibungszahl von 1.3 (= 1.2 + 0.1). Als Auflagerradius ist $R_a=5\text{mm}$ für die Dreipunktbiegung die sinnvollste Größe, niedrige Werte können bei Unebenheiten der Probenoberfläche zu erhöhter Reibung, größere Radien zu einer wesentlichen Änderung des Auflageabstands während des Versuchs führen.

Bei den vorliegenden Ergebnissen traten bei dem Vergleich innerhalb der Probenbreite $b=30\text{mm}$ keine Verhältnisse von $\sigma_{bB}/\sigma_{zB} > 2$ auf, größere Breiten führen i.a. zu höheren Schnittmomenten.

Da diese Werte teilweise aus der belastungsbedingte Querkrümmung (siehe S.11), also Änderung des Widerstandsmoments, und bei Proben mit eine Vorkrümmung senkrecht zur Momentbelastung aus erhöhter Reibung durch die örtliche Verformung (Skizze 2.3) resultieren, ist von größeren Probenbreiten abzuraten.

Aufgrund der Längenänderung bei der Verformung, und der damit verbundenen Abrutschgefahr, kann die Dreipunkt-Pendel-Biegung nicht als allgemeine Prüfmethode empfohlen werden. Wenn bei quasihomogenen Laminaten Verhältnisse von $\sigma_{bB}/\sigma_{zB} > 1.5$ auftreten, könnte man mit der Dreipunkt-Pendel-Biegung und einem Verhältnis von $L/t \approx 16$ überprüfen, ob die Reibung ausschlaggebend ist.

(Auswertung mit der Gleichungen 3.2.2-3.2.4)

Ermittlung des Elastizitätsmodul der Biegung

Für die Ermittlung des E_{b0} -Moduls ist die Vierpunktbiegung mit einem schwenkbar gelagerten Druckstempel und Krümmungsmeßgerät am besten geeignet, d.h. es stimmen die theoretischen und experimentellen Daten gut überein (Gleichung 3.4.7).

Diese Formel ist nur für Vorkrümmungsradien R geeignet, die wesentlich größer sind als die Auflagerabstände l_a und l_i . (Ungekrümmte Platte : $R \rightarrow \infty$)

Bei Proben mit Vorkrümmung müssen die geänderten Auflagerabstände eingesetzt werden (Gleichung 3.4.1-3.3.6), wenn die Auflagerradien größer als 5mm sind, bzw. sollten kleine Auflagerradien zum Einsatz kommen.

10. Ausblick

Die vorliegenden Resultate basieren auf Ergebnissen aus Kurzzeitversuchen, eine weitere Untersuchung bezüglich des Langzeitverhaltens bei der Biegebelastung muß noch folgen.

Die Maximallastberechnung bedarf noch einer weiteren Verfeinerung, z.B. durch eine Abminderung des E-Moduls parallel zur Faser, bedingt durch das Strecken der Fasern und Nichtlinearität des Harzes. Bei der Berechnung des Druckbereichs sollten die Stabilitätsprobleme zumindest näherungsweise berücksichtigt werden.

Das aktuelle Programm zur Maximallastberechnung wurde für die Datensätze des Forschungsauftrages konzipiert. Hier muß noch die Integration in ein Programm erfolgen, in welchem die Lamine anwenderfreundlicher zusammengestellt und bearbeitet werden können.

Die Versuchsdaten sind in einer Datenbank abgespeichert und stehen für weitere statistische Untersuchungen, z.B. Ausreißertest, Verteilungskurven, zur Verfügung.

11. Statistik - Grundlagen

n : Anzahl der Werte

X_i : Einzelwert einer Serie

Mittelwert (im Anhang mit "M" bezeichnet)

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i \quad (11.1)$$

Varianz

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (11.2)$$

Standardabweichung

$$s = + \sqrt{s^2} \quad (11.3)$$

Variationskoeffizient

$$v = \frac{s}{\bar{X}} \quad (11.4)$$

Konfidenzintervalle (Vertrauensintervalle)

Im Anhang sind die Abweichungen vom Mittelwert für die statistische Sicherheiten $P=75\%$ und $P=95\%$ für das zweiseitige Konfidenzintervall aufgeführt.

Untere Grenze : $G_U = M - X(P=..)$

Obere Grenze : $G_O = M + X(P=..)$

Die Berechnung von $X(P=..)$ erfolgte nach K.Bosch /20/.

12. Verwendete Geräte

Für alle Biegeversuche ist die Hydropulsmaschine PCN 0011 der Firma Schenck verwendet worden.

- Nennkraft 25 KN
- Nennhub 100 mm

Die Kraftmessung erfolgte mit der Ringtorsions-Kraftmeßdose Schenck PMNR/25 KN.

Die Zug- und Druckversuche erfolgten mit der Hydropulsmaschine Schenck PEZ 1924.

- Nennkraft 400 KN
- Nennhub 200 mm

Hier wurde die Kraftmeßdose Schenck PM / 400 KN genutzt.



Bild 12.1 Versuchsstand mit den beiden Hydropulsmaschinen

Für die Ermittlung der Lage und Wanderung der neutralen Faser sind die Dehnungsmeßketten HBM KY 21, mit einer Meßgitterlänge von 0.8 mm und einem Abstand von 1mm zwischen den einzelnen Meßgittern, zum Einsatz gekommen.

Die Aufnahme der Dehnungen erfolgte mit dem Vielfachmeßgerät UPM 60.

Bei den Zug- und Druckversuchen erfolgte die Dehnungsaufnahme für die E-Module mit den Dehnungsmeßstreifen TML PL10-11, bzw. mit HBM LY 61.

Außerdem wurden für die E-Module ein mechanischer Wegaufnehmer mit der Meßlänge von 70 mm verwendet.

Die Krümmungsmessung bei den Bruchversuchen mit der Biegeprüfvorrichtung und bei der Vierpunktbiegung zur Bestimmung des Biegemoduls erfolgte mit dem induktiven Wegaufnehmer HBM W 5 TK.

Die Messung der Krümmungsänderungen mit dem induktiven Aufnehmer und der Dehnungen mit den DMS erfolgte über den Meßverstärker HBM KWS/T-5

Die Versuche wurden mit dem X-Y-Schreiber HP 7044A aufgezeichnet.

- /1/ **H. Heißler**
Verstärkte Kunststoffe in der Luft- und Raumfahrt
Verlag W.Kohlhammer, 1986
- /2/ **S.W. Tsai, H.T. Hahn**
Introduction to composite materials
TECHNOMIC Publishing Co., 1980
- /3/ **DIN EN 61**
- /4/ **DIN EN 63**
- /5/ **K. Oberbach**
Kunststoff-Kennwerte für Konstrukteure
Carl Hanser Verlag, 1980
- /6/ **Prof. Dr.-Ing. A. Puck**
Schichtweise Bruchanalyse von Faser-/Matrix-Laminaten
bei zusammengesetzter Beanspruchung
- /7/ **DIN Taschenbuch 18**
Prüfnormen für Kunststoffe
Beuth-Vertrieb GmbH, 1974
- /8/ **M. Stark**
Diplomarbeit : Bestimmung der Bruchmomente von GFK
unter Berücksichtigung des nichtlinearen Verhaltens im
 $\sigma - \epsilon$ - Verhaltens
Fachhochschule Aachen, 1989
- /9/ **T. Kunkel, U. Raßweiler**
Diplomarbeit : Theoretische und experimentelle Bruchunter-
suchungen an kreuzgewickelten GFK - Laminaten
Fachhochschule Aachen, 1989

- /10/ **M. Ebel**
Diplomarbeit : Vergleich verschiedener Prüfmethode n zur
Bestimmung der Kriechbeiwerte
Fachhochschule Aachen, 1986
- /11/ **M. Lentzen, M. Pauly**
Studienarbeit : Konstruktion einer Biegeprüfvorrichtung
Fachhochschule Aachen, 1988
- /12/ **W.Beitz, K.-H. Küttner**
Dubbel : Taschenbuch für den Maschinenbau
Springer-Verlag, 1986
- /13/ **U.Gönner**
Studienarbeit : Untersuchung der Scherfestigkeit verstärkter Kunststoffe
mit verschiedenen Faserstrukturen
Universität Stuttgart, 1988
- /14/ **R.Prinz, K.Schmidt**
Bruchflächen delaminierter Probestäbe aus CFK
Zeitschrift für Flugwissenschaften und Weltraumforschung 10 (1986), Heft 4
- /15/ **R.Schütze, H.C.Goetting**
Randdelaminationsbehinderung in CFK-Laminaten
Zeitschrift für Flugwissenschaften und Weltraumforschung 10 (1986), Heft 4
- /16/ **Tsu-Wei Chou, R.L.McCullough, R.B. Pipes**
Verbundwerkstoffe
Spektrum der Wissenschaften, Dezember 1986
- /17/ **Prof. Dr.-Ing. A.Puck**
Vorlesungsmanuskript KFK I / II
Stuttgart, 1983
- /18/ **4.BMFT-Statusseminar**
Luftfahrtforschung und Luftfahrttechnologie
Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH, 1986

- /19/ **Prof. Dr.-Ing H.Öry**
Leichtbau I/II
Vorlesungsmanuskript RWTH Aachen
- /20/ **K. Bosch**
Angewandte Statistik
Vieweg&Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1986
- /21/ **I. Vincze**
Mathematische Statistik mit industriellen Anwendungen
B.I.-Wissenschaftsverlag, 1971
- /22/ **Bleymüller, Gehlert, Gülicher**
Statistik für Wirtschaftswissenschaftler
Verlag Vahlen, 1987
- /23/ **J. Bruhn**
Statistik für programmierbare Taschenrechner
Vieweg&Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1984
- /24/ **W.Schneider**
Mikromechanische Betrachtung von Bruchkriterien unidirektional
verstärkter Schichten aus Glasfaser/Kunststoff
Dissertation im Fachbereich Maschinenbau an der Technischen
Hochschule Darmstadt, 1974
- /25/ **G.Menges, R.Kleinholz**
Bestimmen der interlaminaren Scherfestigkeit
Kunststoffe, Bd. 59, Heft 12, S. 959-966, 1969

T
2336

Prof. Dr.-Ing. Nonhoff, FH Aachen,
Roetgener Str. 11, 5106 Roetgen

Forschungsvorhaben "Korrelation zwischen Zugbeanspruchung und
Biegebeanspruchung bei GF-UP-Laminaten"

Summary

A few of remarkable differences have become evident regarding the parameters of solidity resulting from the tensile tests after DIN EN 61 and the bending tests according to DIN EN 63. It should be checked whether these differences were resulting from the behaviour of material or whether the test methods were reason for wrong results. In order to find out the influence of the test method on the test results, the bending strengths have been determined as follows:

by means of a three-point linkage and a four-point linkage bending device - with friction and without friction -, by means of a testing apparatus for "straight bending" as well as a pendulum three-point linkage bending device. The highest transverse rupture stresses were caused by the three-point linkage device - with friction -, particularly if the deformation is considered in the evaluation according to DIN EN 63/equation 7.

Due to the influence of friction a righting moment arises on the three-point linkage bending device which can be taken in consideration by means of coefficients of friction in the evaluation. These coefficients of friction have been determined by the comparison of the results from the tests of "straight bending". Moreover, other influences have also been included for determination.

If the friction has been taken in consideration or if the determination of the coefficients of friction relates to supports "without friction" a good co-relation between the values of tensile and bending strength is given.

T 2336

Prof. Dr.-Ing. Nonhoff, FH Aachen,
Roetgener Str. 11, 5106 Roetgen

Forschungsvorhaben "Korrelation zwischen Zugbeanspruchung und
Biegebeanspruchung bei GF-UP-Laminaten"

Resumé

Entre les valeurs caractéristiques de la solidité que étaient obtenus des essais de traction conforme à DIN EN 61 et des essais de flexion conforme à DIN EN 63 il y avait quelques différences considérables. Il fallait être examiné si ces différences résultent de l'attitude de la matière première où si la méthode d'essai donne des résultats faux. Pour détecter l'influence de la méthode d'essai, les résistances à la flexion ont été déterminées: par l'intermédiaire d'un appareil à courber sur une fixation en trois points et sur une autre fixation en quatre points, avec et sans friction, puis par l'intermédiaire d'un équipement d'essai pour "courbure directe" et un appareil pendulaire à courber sur une fixation en trois points. Les tensions de flexion à la rupture les plus hautes résultaient de la courbure - avec friction - sur la fixation en trois points, particulièrement si la déformation conforme à DIN EN 63/ équation 7 était considérée dans l'évaluation.

A cause de l'influence de la friction un couple antagoniste s'est produit avec l'appareil à courbure sur une fixation en trois points, qui peut être réduit si on prend des bobines comme support ou qui peut être pris en considération par l'intermédiaire des coefficients de friction dans l'évaluation. Ces coefficients ont été déterminés par la comparaison des résultats expérimentaux de "la friction directe". Aussi des autres influences ont été pris en considération.

Tenant compte de la friction ou si la détermination des valeurs caractéristiques (paramètres?) est réalisée avec des supports "sans friction", la co-relation entre les valeurs de résistance à la tension et à la flexion est bonne.