

85

**Wirkungsweise von eingeleimten Gewindestangen bei der  
Aufnahme von Querkraften in gekrümmten Biegeträgern  
und Entwicklung von Bemessungsgrundlagen**

**Teil 3**

von

H.J. Blaß, O. Eberhart, J. Ehlbeck und M. Gerold

Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine  
Abteilung Ingenieurholzbau  
Universität Fridericiana Karlsruhe  
Univ.-Professor Dr.-Ing. Hans Joachim Blaß  
1996

## Vorwort

Die Verstärkung gekrümmter Brettschichtholzträger mit eingeleimten Gewindestangen wird in den letzten Jahren zunehmend als Quersugsicherung eingesetzt, obwohl allgemeine anerkannte Bemessungsverfahren bisher fehlen. Die Dimensionierung dieser Verstärkungen erfolgt bisher nach konstruktiven Gesichtspunkten. Die bisherige Erfahrung hat gezeigt, daß bei einer ausreichenden Verstärkung Schadensfälle, die bei unverstärkten Trägern in der Vergangenheit beobachtet wurden, ausgeschlossen werden können.

Im ersten Teil dieses Forschungsvorhabens wurden Einleimmethoden, Meßverfahren und Haftspannungsverläufe untersucht. Der zweite Teil behandelt den zeitabhängigen Haftspannungsverlauf unter Last- und klimatischen Einwirkungen und damit das Langzeitverhalten solcher Verbindungen. Der vorliegende dritte Teil des Forschungsvorhabens umfaßt ergänzende Grundlagenversuche, Versuche mit ausgeklinkten Trägern sowie die Entwicklung eines Rechenmodells und einen Bemessungsvorschlag für gekrümmte und verstärkte Brettschichtholzträger.

Das Forschungsvorhaben entstand im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung (DGfH) mit finanzieller Unterstützung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt). Die umfangreichen Untersuchungen wurden von Dipl.-Ing. M. Gerold und Dipl.-Ing. O. Eberhart durchgeführt. Der Bemessungsvorschlag wurde von Herrn Dipl.-Ing. O. Eberhart erarbeitet, der auch den Forschungsbericht erstellte. Für die Herstellung der Versuchskörper sowie der Versuchsvorrichtungen und für die Messungen waren die Herren G. Rüd, J. Lafferthon und G. Kranz verantwortlich. Bei der Auswertung und graphischen Darstellung der Versuchsergebnisse haben die wissenschaftlichen Hilfskräfte des Lehrstuhls für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen mitgewirkt.

Allen Beteiligten ist für die Mitarbeit zu danken.

Jürgen Ehlbeck

Hans Joachim Blaß

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Allgemeines .....</b>	<b>4</b>
<b>2 Grundlagenversuche.....</b>	<b>5</b>
2.1 Allgemeines .....	5
2.2 Bemessungsvorschläge aus der Literatur.....	6
2.2.1 MÖHLER und HEMMER, 1981.....	6
2.2.2 RIBERHOLT, 1988 und JOHANSSON, 1995 .....	7
2.3 Vergleich zwischen Versuchsergebnissen und Bemessungsvorschlag.....	8
2.4 Versuche.....	10
2.4.1 Versuchsprogramm.....	10
2.4.2 Versuchsmaterial .....	12
2.4.2.1 Holz .....	12
2.4.2.2 Leime.....	13
2.4.2.3 Gewindestangen.....	13
2.4.3 Geometrie und Herstellung der Versuchskörper .....	14
2.4.4 Versuchsaufbau.....	18
2.4.5 Versuchsdurchführung.....	19
2.4.6 Ergebnisse und Auswertung der Ausziehversuche .....	20
2.4.6.1 Allgemeines .....	20
2.4.6.2 Haftspannungs-Verformungsverhalten der geprüften Verbindungen	21
2.4.6.3 Auswertung der Versuche mit spröden Leimen.....	23
2.4.6.4 Auswertung der Versuche mit nichtspröden Leimen .....	23
2.4.6.5 Auswertung der Versuche ohne Leim.....	23
2.4.6.6 Diskussion der Versuchsergebnisse .....	24
2.4.7 Bemessungsvorschlag.....	25
2.5 Zusammenfassung .....	26

<b>3 Rechtwinklig ausgeklinkte BS-Holz-Träger .....</b>	<b>27</b>
3.1 Grundlagen .....	27
3.2 Bemessung von Ausklinkungen .....	27
3.3 Verstärkungsmethoden .....	28
3.4 Versuche .....	30
3.4.1 Versuchsprogramm und -material .....	30
3.4.2 Versuchskörper- und aufbau .....	31
3.4.3 Versuchsdurchführung .....	31
3.4.4 Versuchsergebnisse .....	32
3.4.5 Versuchsauswertung .....	34
3.5 Zusammenfassung .....	35
<b>4 Entwicklung eines Bemessungsvorschlages für mit eingeleimten Gewindestangen verstärkte Bauteile .....</b>	<b>36</b>
4.1 Allgemeines .....	36
4.2 Frühere Untersuchungen .....	36
4.3 Mechanisches Modell .....	37
4.3.1 Allgemeines .....	37
4.3.2 Verwendete Formelzeichen .....	37
4.3.3 Herleitung der Gleichungen für die größte vorhandene Querkraft (im unverstärkten Träger) .....	39
4.3.4 Entwicklung eines Rechenmodells zur Berechnung der Verstärkung durch Gewindestangen .....	39
4.3.4.1 Bestimmung der Verhältniszahl $\eta$ .....	40
4.3.4.2 Zusammenstellung der Gleichungen .....	42
4.3.5 Rechenmodell zur Bestimmung der erforderlichen Trägerverstärkungen .....	42

---

4.4 Untersuchung der verschiedenen Einflußparameter des Rechenmodells.....	44
4.4.1 Mögliche Stabdurchmesser und -abstände, Anwendungsbereiche des Rechenmodells (bzw. der Verstärkungen).....	44
4.4.2 Untersuchung zur Variation des Gewindestangendurchmessers und -abstands.....	45
4.4.3 Einfluß verschiedener Brettschichtholzgüten .....	46
4.5 Bemessung .....	47
<b>5 Versuche mit verstärkten, gekrümmten BS-Holz-Trägern zur Überprüfung des Rechenmodells .....</b>	<b>49</b>
5.1 Allgemeines .....	49
5.2 Versuchsprogramm und -material.....	49
5.3 Versuchsaufbau und Lage der Meßeinrichtungen.....	51
5.4 Versuchsdurchführung.....	53
5.5 Ergebnisse und Auswertung der Bauteilversuche .....	53
<b>6 Vergleich der Versuchsergebnisse mit dem Rechenmodell .....</b>	<b>55</b>
6.1 Biege- und Schubspannungsnachweis.....	55
6.2 Nachweis der Verstärkungsmaßnahme .....	55
<b>7 Zusammenfassung.....</b>	<b>58</b>
<b>8 Literatur.....</b>	<b>60</b>

# 1 Allgemeines

Im ersten Teil dieses Forschungsvorhabens (EHLBECK und SIEBERT, 1987) lag der Schwerpunkt auf der Überprüfung und Beschreibung geeigneter Einleimmethoden für Gewindestangen. Es wurden Gewindestangen unterschiedlicher Stahlsorten, Durchmesser und Gewindeausbildungen in die Untersuchungen einbezogen. Sämtliche Versuche wurden als Kurzzeitversuche unter Normklima DIN 50014-20/65-2 durchgeführt.

Im zweiten Teil wurde die Verbindung Stahl - Leim - Holz klimatischen und Langzeitbeanspruchungen bei verschiedenen Belastungsniveaus ausgesetzt. Variiert wurden die Gewindeform, der Leim sowie der Winkel zwischen Gewindestangen- und Holzfaserrichtung. Der zweite Teil gliederte sich deshalb in zwei Abschnitte :

- Abschnitt I: Kurzzeitversuche unter reiner Klimabeanspruchung ohne äußere Lasteinwirkung (EHLBECK, BELCHIOR-GASPARD und GEROLD, 1992)
- Abschnitt II: Langzeitversuche in einer offenen, überdachten Halle unter konstanter äußerer Last (EHLBECK und EHRHARDT, 1994)

Im dritten Teil wurden neben ergänzenden Grundlagenversuchen auch Bauteilver-suche an verstärkten ausgeklinkten BS-Holz-Trägern und verstärkten gekrümmten BS-Holz-Trägern durchgeführt. Weiter wurde ein Bemessungsvorschlag für eingeleimte Gewindestangen entwickelt.

Der dritte Teil gliedert sich in vier Abschnitte :

- Abschnitt I: Ergänzende Grundlagenversuche zur Bestimmung der Haftfestigkeit von rechtwinklig zur Faserrichtung eingebrachten Gewindestangen
- Abschnitt II: Versuche mit verstärkten ausgeklinkten BS-Holz-Trägern mit geometr. Randbedingungen, die von der Norm abweichen
- Abschnitt III: Entwicklung eines Bemessungsvorschlages für mit eingeleimten Gewindestangen verstärkte BS-Holz Bauteile
- Abschnitt IV: Versuche mit verstärkten, gekrümmten BS-Holz-Trägern zur Überprüfung des Bemessungsvorschlages

## 2 Grundlagenversuche

### 2.1 Allgemeines

Für die nachfolgend verwendeten Material- und Versuchsbezeichnungen werden folgende Begriffsbestimmungen vorgenommen :

- Der Begriff "Gewindestange" wird immer dann verwendet, wenn von der Gesamtheit der untersuchten Stahlstangen, unabhängig von Stangentyp und Profilierung, gesprochen wird
- "Gewindestab" (Gewi-Stab) bezeichnet den Spannstahl mit Gewinderippen
- "Metrisches Gewinde" kennzeichnet Stangen mit metrischem Gewinde nach DIN 976
- "Holzschraube" bezeichnet Stangen mit einem Holzschraubengewinde nach DIN 571
- Unter dem Begriff "Leime" werden alle in Abschnitt 2.4.1 aufgeführten Harze und Leime zusammengefaßt, ungeachtet der Tatsache, daß aus chemisch-technischer Sicht eine andere Bezeichnung zutreffend wäre.

Um eine möglichst große Anzahl vergleichbarer Versuchsergebnisse zu erhalten, wurde eine Literaturdurchsicht, die sich auf die vergangenen 20 Jahre und den europäischen Raum beschränkte, durchgeführt. Bei dieser Recherche wurden nur Ergebnisse mit einer axialen Beanspruchung der Gewindestangen berücksichtigt. Bei der Auswertung der ca. 100 Versuchsergebnisse wurde festgestellt, daß es sich in der Regel um Tastversuche handelte, d. h. es wurden mit kleinen Versuchsreihen eine Vielzahl von Leimen, Stangentypen und Gewindeformen, Durchmessern, Einleimlängen und Einleimverfahren untersucht. Diese vorhandenen Versuchsergebnisse wurden nun durch weitere Versuchsreihen ergänzt. Im Besonderen wurden erstmalig geringere Einleimlängen (30 ÷ 240 mm) geprüft. Die Untersuchungen beschränkten sich entsprechend der Zielsetzung des Forschungsvorhabens auf rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes eingebrachte Gewindestangen.

## 2.2 Bemessungsvorschläge aus der Literatur

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Bemessungsvorschläge beschränken sich auf rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes eingebrachte Gewindestangen unter axialer Zugbelastung. Ergänzende Angaben zu den gewählten Einleimverfahren und zu anderen Belastungen sind in den angegebenen Quellen zu finden.

### 2.2.1 MÖHLER und HEMMER, 1981

Für die Herstellung der Körper wurden die Gewindestangen mit einer Längsnut versehen. Dem Vorschlag liegen Kurzzeitversuche mit resorcinharzverleimten Gewindestangen mit metrischem Gewinde ( $d = 16$  und  $30$  mm) und Einleimlängen  $l_g = 10 \cdot d$  und  $16 \cdot d$  zugrunde. Für die empirisch gefundenen Bemessungsgleichungen wurde dabei eine 4-fache Sicherheit gegenüber dem Mittelwert der Bruchlasten gewählt.

Es gilt :

$$zul F = \min \begin{cases} \pi \cdot d \cdot l_g \cdot zul \tau_{\parallel} \\ A_k \cdot zul \sigma_z \end{cases}$$

mit :

$d$	Nenn Durchmesser der Stahlstangen	[mm]
$l_g$	Einleimlänge (Einbindelänge) der Stahlstangen	[mm]
$A_k$	Kernquerschnitt der Stahlstangen	[mm <sup>2</sup> ]
$zul \sigma_z$	zulässige Stahl-Zugspannung der Gewindestangen	[N/mm <sup>2</sup> ]
$zul \tau_{\parallel}$	zulässige Haftspannung der Verbindung	[N/mm <sup>2</sup> ]

mit

$$zul \tau_{\parallel} = \begin{cases} 1,2 \text{ N/mm}^2 & \text{für } d \leq 24 \text{ mm} \\ 1,2 - 0,0667(d - 24) \text{ N/mm}^2 & \text{für } 24 \text{ mm} < d \leq 30 \text{ mm} \end{cases}$$

Nach damaligem Wissensstand wurde vorgeschlagen, die Gewindestangen mindestens über die halbe Trägerhöhe einzuleimen, maximal eine Einleimlänge von  $l_g = 20 \cdot d$  in Rechnung zu stellen und bei axialer Zugbeanspruchung rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes die Werte der zulässigen Haftspannung zu halbieren.

Ein Einfluß der Rohdichte wurde nicht untersucht.

## 2.2.2 RIBERHOLT, 1988 und JOHANSSON, 1995

Diesem Vorschlag liegen Versuche mit Gewindestangen mit metrischem Gewinde zugrunde, welche teilweise mit Resorcinharz und zum Teil mit Epoxidharz- und Polyurethan-Leimen eingeleimt waren. Bei dem Bemessungsvorschlag wurden außerdem die Versuchsergebnisse von MÖHLER und HEMMER (1981 s.o.) und EHLBECK und SIEBERT (1987) mit berücksichtigt.

Der Bemessungsvorschlag basiert auf folgenden Grundlagen :

- zwischen faserparallel und rechtwinklig zur Holzfaserrichtung eingeleimten, axial belasteten Gewindestangen besteht hinsichtlich der Tragfähigkeit kein Unterschied
- die Rohdichte des Holzes wird berücksichtigt
- die Einleimlänge wird berücksichtigt
- zwischen spröden Leimen (Phenol-Resorcinharz-, Epoxidharz- und Aralditleime) und nichtspröden Leimen (Zweikomponenten-Polyurethanleime) wird unterschieden.

RIBERHOLT gibt entsprechend dem neuen Sicherheitskonzept Mittelwerte und charakteristische Tragfähigkeiten an :

Es gilt :

$$R_{ax,k} = f_{ws,k} \cdot \rho_k \cdot d \cdot \sqrt{l_g} \quad \text{für } l_g \geq 200 \text{ mm}$$

$$R_{ax,k} = f_{wl,k} \cdot \rho_k \cdot d \cdot l_g \quad \text{für } l_g < 200 \text{ mm}$$

bzw.

$$R_{ax,m} = f_{ws,m} \cdot \rho_k \cdot d \cdot \sqrt{l_g} \quad \text{für } l_g \geq 200 \text{ mm}$$

$$R_{ax,m} = f_{wl,m} \cdot \rho_k \cdot d \cdot l_g \quad \text{für } l_g < 200 \text{ mm}$$

mit :

$R_{ax,k}$	charakteristische Tragfähigkeit	[N]
$R_{ax,m}$	mittlere Tragfähigkeit	[N]
$\rho_k$	charakteristische Rohdichte des Holzes	[kg/m <sup>3</sup> ]
$d$	Durchmesser der Gewindestangen	[mm]
$l_g$	Einleimlänge (Einbindelänge) der Gewindestangen	[mm]
$f_{ws}$ und $f_{wl}$	Festigkeitsparameter für die unterschiedlichen Leimtypen	

$$\text{mit } f_{wl} = f_{ws} / \sqrt{l_g} = 200 \text{ mm}$$

Parameter	Resorcin- und Epoxidharz- leime	Polyurethan- leime
$f_{ws,k}$	0,520	0,650
$f_{wl,k}$	0,037	0,046
$f_{ws,m}$	0,627	0,784
$f_{wl,m}$	0,044	0,055

In seinem Beitrag zu STEP 1 gibt JOHANSSON (1995) ebenfalls erforderliche Mindestabstände an, welche geringer sind als die von MÖHLER, HEMMER vorgeschlagenen. Außerdem fordert er bei Stabgruppen mit einer statisch unbestimmten Krafteinleitung eine Einleimlänge von :

$$l_g \geq d^2 \quad \text{mit } d \text{ und } l_g \text{ in mm.}$$

### 2.3 Vergleich zwischen Versuchsergebnissen und Bemessungsvorschlag

Um den Bemessungsvorschlag von RIBERHOLT (1988) bzw. JOHANSSON (1995) mit den vorliegenden Versuchsergebnissen vergleichen zu können, wird zur Reduzierung der Parameter die Haftfestigkeit in Abhängigkeit von der Einleimlänge angegeben. Unabhängig von der Tatsache, daß die Haftspannungsverteilung in der Leimfuge entlang der Gewindestange nicht konstant ist und abhängig ist von der Steifigkeit des verwendeten Leimes und der Einleimlänge, werden die Versuchsergebnisse als mittlere Haftfestigkeit angegeben, für die gilt :

$$\tau_m = \frac{F_u}{l_g \cdot \pi \cdot d}$$

mit :

$\tau_m$	mittlere Haftfestigkeit der Verbindung	[N/mm <sup>2</sup> ]
$F_u$	Traglast der Verbindung	[N]
$l_g$	Einleimlänge (Einbindelänge) der Gewindestangen	[mm]
$d$	Nenndurchmesser der Gewindestangen	[mm]

Die Rohdichte aus den Versuchen von RIBERHOLT ( $\rho = \frac{m_0}{V_u}$ ) wurde umgerechnet in die Normalrohndichte.

Es gilt :

$$\rho_N = \frac{112}{\left( \frac{100 + u - 0,85 \cdot u \cdot \rho_u / 1000}{\rho_u \cdot 1000 + 10,2} \right)} \cdot 1000$$

mit :

$$\rho_u = \rho \cdot \left( \frac{u}{100} + 1 \right)$$

$\rho$	Rohdichte nach RIBERHOLT	[kg/m <sup>3</sup> ]
$m_0$	Trockenmasse	[kg]
$V_u$	Volumen bei tatsächlicher Holzfeuchte u	[m <sup>3</sup> ]
$u$	Holzfeuchte	[%]
$\rho_N$	Normalrohddichte des Holzes ( $u \approx 12\%$ )	[kg/m <sup>3</sup> ]

Entsprechend dem Bemessungsvorschlag wurden die vorhandenen Versuchsergebnisse parallel und rechtwinklig zur Holzfaserrichtung eingeleimter Gewindestangen zusammengefaßt und in zwei Gruppen (spröde Leime und nichtspröde Leime) eingeteilt.

Die Ergebnisse für die spröden Leime sind in den **Anlagen 2-1 bis 2-3** (Tabelle A2-1) zusammengestellt. Eine graphische Auswertung der Versuchswerte und Vergleich mit dem Bemessungsvorschlag RIBERHOLT ist in der **Anlage 2-6** (Bild A2-1) dargestellt. In dem Diagramm ist sowohl die Bemessungsgleichung für den Mittelwert der Haftfestigkeit als auch die Bemessungsgleichung für die mittlere charakteristische Haftfestigkeit angegeben. Die entsprechenden Ergebnisse für die nichtspröden Leime sind in **Anlage 2-4 und 2-5** (Tabelle A2-2) und **Anlage 2-6** (Bild A2-2) zusammengefaßt und dargestellt.

In dem Diagramm für die spröden Leime ist zu erkennen, daß die Karlsruher Versuchsergebnisse geringere mittlere Haftfestigkeiten ergaben. Außerdem weisen alle Versuchsergebnisse große Streuungen auf. Es ist anzunehmen, daß diese Streuungen von der Vielzahl der verwendeten Leime, Stangentypen und Gewindeformen, Durchmesser, Einleimlängen und Einleimverfahren herrühren.

## 2.4 Versuche

### 2.4.1 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm wurde so gewählt, daß bereits vorhandene Reihen ergänzt werden konnten. Es wurden ausschließlich Versuche mit rechtwinklig zur Faserichtung des Holzes eingeleimten, auf Herausziehen beanspruchten Gewindestangen durchgeführt. Im Besonderen wurde eine Vielzahl von Versuchen mit geringen Einleimlängen durchgeführt.

Als Parameter wurden variiert :

- Verschiedene Leime :
  - 11r : Resorcinharzleim ( KPRF )
  - 12.2p : Polyurethanleim ( PUR ) technicoll KR2006
  - 13e : Epoxydharz
  - 13.2e : Epoxydharz Fa. Technicoll
  - 13.3e : Epoxydharz Fa. WEVO
  - 14o : ohne Leim
- Verschiedene Einleimlängen :
  - 30 - 60 - 120 - 180 - 240 mm
- Verschiedene Gewinde-/Stangengeometrien :
  - Metrisches Gewinde M 20 - Bohrlochdurchmesser 20 mm
  - Schlüsselschrauben  $d = 20$  mm - Bohrlochdurchmesser 18 mm
  - Spannstahl St 1080/1230 mit Gewinderippen ( Gewindestab )  
 $d = 26$  mm Bohrlochdurchmesser 30 mm

Es wurden insgesamt 321 Versuche durchgeführt.

Eine genaue Aufstellung und Zuordnung der Versuche zu den Versuchsparametern ist in Tabelle 2-1, Tabelle 2-2 und Tabelle 2-3 zusammengestellt.

**Tabelle 2-1 : Versuche mit metrischem Gewinde**

Leim	Einleimlänge [ mm ]					$\Sigma$
	30	60	120	180	240	
11r	10	10	-	-	-	20
12.2p	-	-	15	-	-	15
13e	25	15	-	-	-	40
13.2e	10	5	1	-	-	16
13.3e	14	-	19	5	10	48
$\Sigma$	59	30	35	5	10	139

**Tabelle 2-2 : Versuche mit Holzschrauben**

Leim	Einleimlänge [ mm ]					$\Sigma$
	30	60	120	180	240	
11r	29	20	10	5	-	64
13.3e	9	5	-	-	-	14
14o	9	10	-	-	-	19
$\Sigma$	47	35	10	5	-	97

**Tabelle 2-3 : Versuche mit Gewindestäben**

Leim	Einleimlänge [ mm ]					$\Sigma$
	30	60	120	180	240	
13e	30	20	15	10	5	80
13.2e	-	-	5	-	-	5
$\Sigma$	30	20	20	10	5	85

## 2.4.2 Versuchsmaterial

### 2.4.2.1 Holz

Als Versuchsmaterial wurden Einzellamellen sowie mit Resorcinharz verleimte Lamellen der Sortierklasse MS 10 nach DIN 1052 aus der laufenden Produktion eines BS-Holz - Herstellers verwendet. Alle Lamellen hatten die Abmessungen B/H = 120/30 mm. Die Lagerung aller Hölzer zur Klimatisierung, Herstellung der Prüfkörper und Durchführung der Versuche geschah im Prüflabor bei Normalklima DIN 50014-20/65-2. Von jedem Prüfkörper wurde die Normal-Rohdichte ( $u \approx 12\%$ ) durch Messen und Wiegen bestimmt.

Die Ergebnisse der Rohdichte-Bestimmung sind in nachfolgender Tabelle 2-4 zusammengestellt.

**Tabelle 2-4 : Ergebnisse der Bestimmung der Normal-Rohdichte**

Leimart	Anzahl der Versuche	Normal - Rohdichte			
		Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	5%-Fraktile
		[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]
E und R	287	454	41,2	9,08	398
P	15	415	22,0	5,30	381
ohne	19	449	28,3	6,30	387
Leimart : E = Epoxidharzleim R = Resorcinharzleim P = Polyurethanleim ohne = ohne Leim					

Diese Zusammenstellung und Auswertung der Rohdichte der verwendeten Holzlamellen bestätigt, daß das Versuchsmaterial tatsächlich der Sortierklasse MS 10 entspricht und daß auch die 5%-Fraktile (gleichzusetzen mit dem charakteristischen Wert) der Rohdichte mit dem Rechenwert von  $\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$  gut übereinstimmt.

#### 2.4.2.2 Leime

Für das Einleimen der Gewindestangen wurden unterschiedliche Leime verwendet. Dabei wurden sowohl Restbestände der "Versuchsanstalt" als auch von der begleitenden Arbeitsgruppe vorgeschlagene Komponenten benutzt :

##### Resorcinharzleim ( KPRF )

- Versuchsbezeichnung R-11

##### Polyurethanleim ( PUR )

- Versuchsbezeichnung P-122      technicoll KR2006

##### Epoxydharzleime

- Versuchsbezeichnung E-13
- Versuchsbezeichnung E-132      Fa. Technicoll
- Versuchsbezeichnung E-133      Fa. WEVO

##### ohne Leimzugabe

- Versuchsbezeichnung ohne      diese Variante wurde lediglich bei den Holzschrauben untersucht

#### 2.4.2.3 Gewindestangen

Es wurden insgesamt drei unterschiedliche Gewindestangen verwendet. Bei der Wahl der verschiedenen Stangentypen bzw. Stangengeometrien wurden ausschließlich bereits früher geprüfte Ausführungen eingesetzt :

##### Metrisches Gewinde M20

- Versuchsbezeichnung      M
- Festigkeitsklasse 8.8
- Bohrlochdurchmesser      Ø 20 mm

##### Gewi-Stab $d=26\text{mm}$

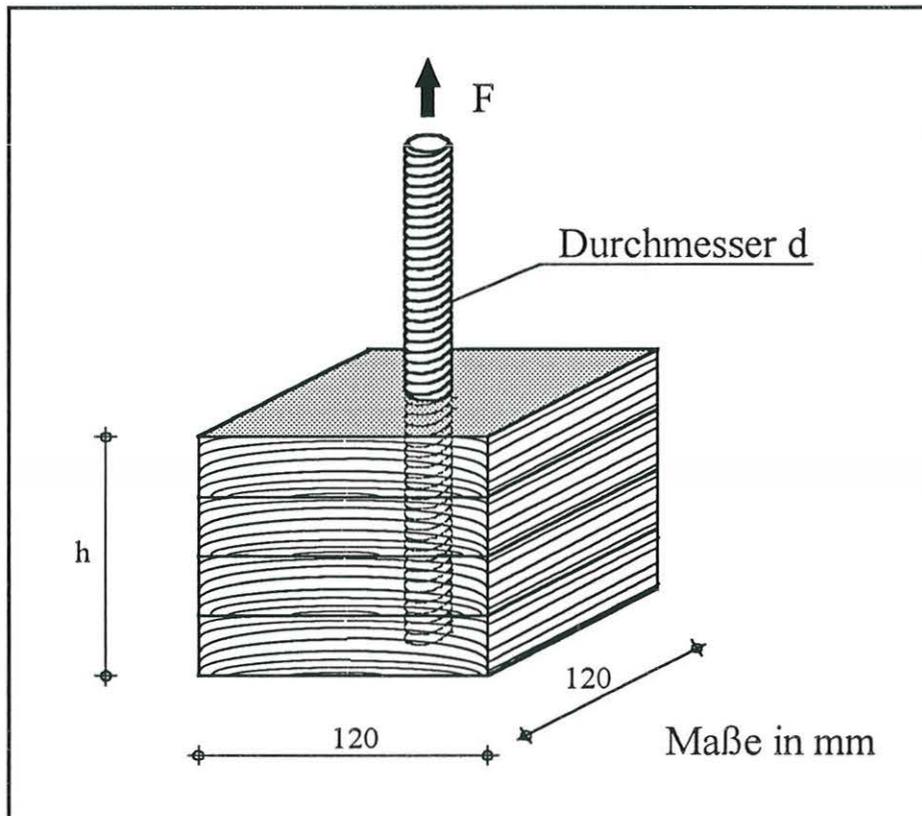
- Versuchsbezeichnung      G
- St 1080/1230 mit Gewinderippen
- Bohrlochdurchmesser      Ø 30 mm

##### Holzschrauben $d=20\text{mm}$

- Versuchsbezeichnung      S
- Bohrlochdurchmesser      Ø 18 mm

### 2.4.3 Geometrie und Herstellung der Versuchskörper

Die Form und Geometrie der Versuchskörper ist in Bild 2-1 dargestellt. Alle Körper hatten die Grundfläche 120 mm x 120 mm. Die Höhe  $h$  wurde wie im Abschnitt 2.4.1 beschrieben variiert.



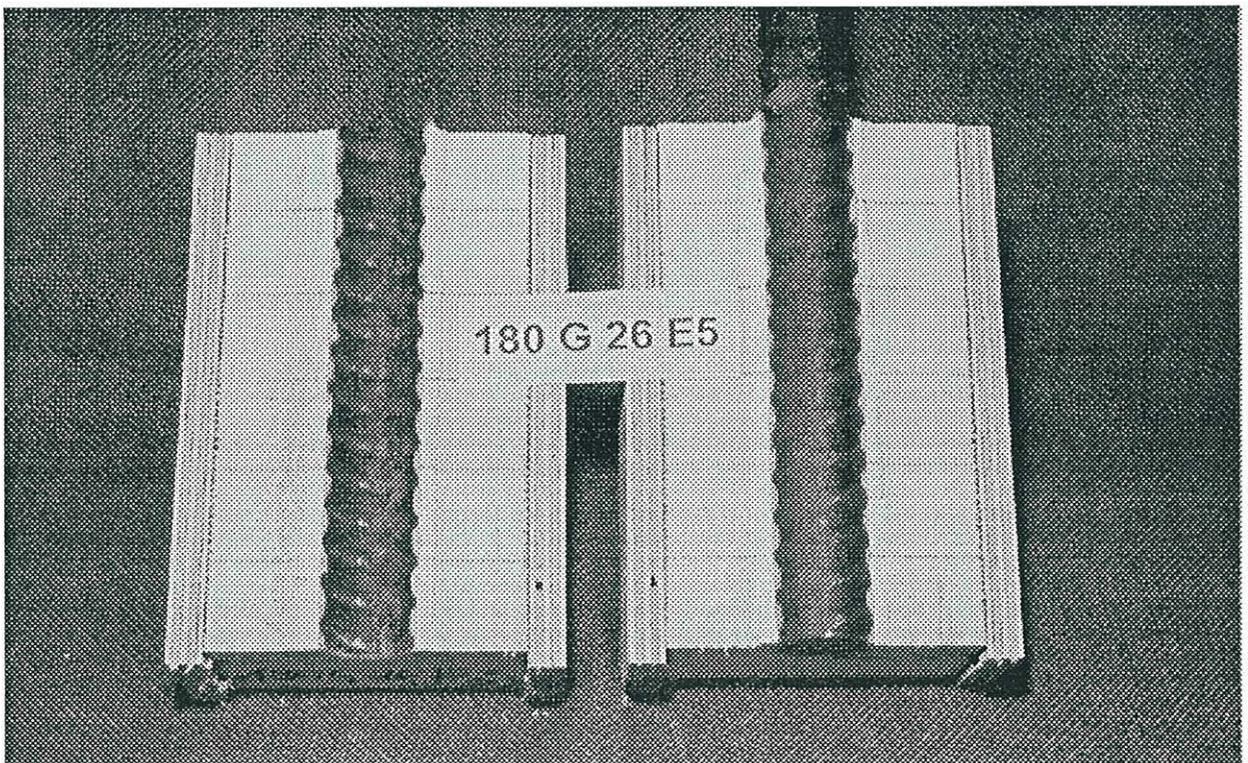
**Bild 2-1 :** Prinzipielle Geometrie der Versuchskörper

Die Herstellung der Versuchskörper erfolgte in folgenden Arbeitsschritten :

- Durchbohren mit dem oben angegebenen Bohrlochdurchmesser
- Aufbringen einer Klebefolie an der Unterseite der Versuchskörper um das Austreten des Leimes zu verhindern
- Leimzugabe in das Bohrloch
- Eindrehen/Einbringen der Gewindestangen, bis sie mit der Unterseite des Holzes bündig waren. Bei den Holzschrauben wurden die Schrauben so weit eingedreht, bis auch an der Unterseite der volle Querschnitt vorhanden war. Die Spitze wurde anschließend abgesägt.
- Ausrichten der Gewindestange und Aushärten des Leimes
- Entfernen der Folie und säubern des Stangenquerschnitts unten

Da bei den ersten Versuchen mit  $h = 180$  und  $240$  mm teilweise ein Querkzugversagen des Holzes auftrat, wurden alle weiteren Versuchskörper dieser Reihen mit zwei aufgeleimten BFU-Platten ( $t = 10$  bzw.  $15$  mm) verstärkt.

Bild 2-2 zeigt einen nach dem Versuch aufgetrennten Versuchskörper eines mit Epoxydharz eingeleimten Gewi-Stabes. Die gleichmäßige und gute Leimverteilung ist deutlich zu erkennen. Zu erkennen ist auch, daß der Gewi - Stab in einem relativ großen Anteil des Umfanges nicht profiliert ist. Da die Oberfläche der Gewi-Stäbe vor dem Einbringen nicht behandelt oder gesäubert wurde (Walzhaut bzw. Zunder wurde nicht abgelöst), war keine Leimverbindung mit der Stahloberfläche vorhanden.

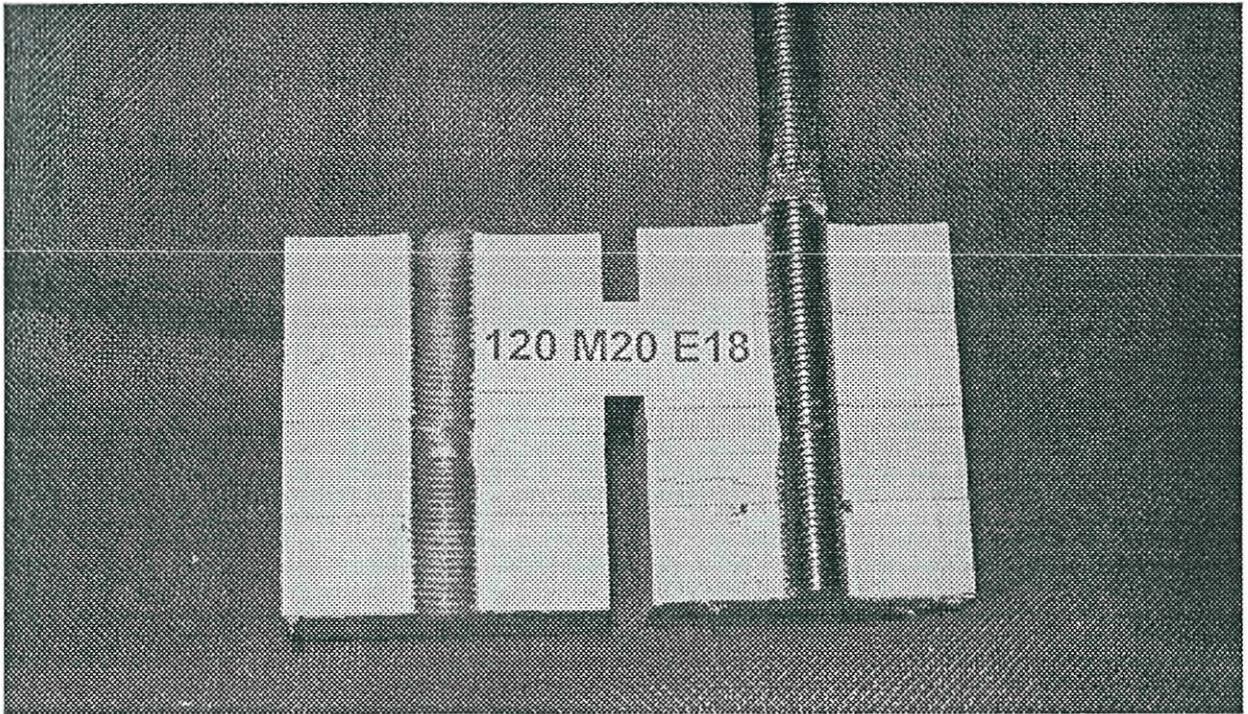


**Bild 2-2 :** Aufgetrennter Versuchskörper 180 G26 E5 nach dem Versuch

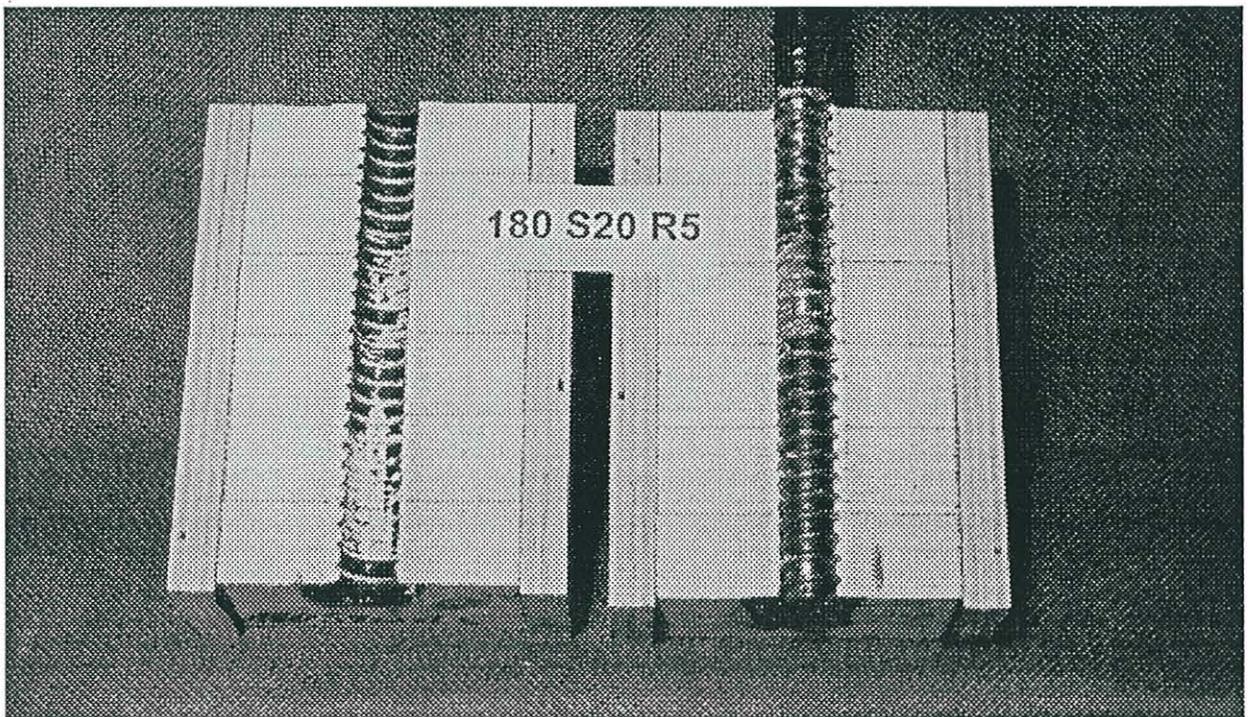
Bild 2-3 zeigt einen nach dem Versuch aufgetrennten Versuchskörper einer mit Epoxydharz eingeleimten Gewindestange mit metrischem Gewinde. Die sehr gleichmäßige und gute Leimverteilung ist deutlich zu erkennen. Wie bei den Gewi-Stangen ist auch hier festzustellen, daß der Leim keine Verbindung mit dem Stahl aufweist.

Bild 2-4 zeigt einen nach dem Versuch aufgetrennten Versuchskörper einer mit Resorcinharz eingeleimten Holzschraube. Es ist zu erkennen, daß hier zusätzlich eine mechanische Verbindung (Verzahnung) vorhanden und die Leimverteilung nicht

gleichmäßig ist. Bei mehreren aufgetrennten Versuchskörpern war festzustellen, daß das "untere" Drittel der Holzschraube nur geringfügig mit Leim umgeben war.



**Bild 2-3 :** Aufgetrennter Versuchskörper 120 M20 E18 nach dem Versuch



**Bild 2-4 :** Aufgetrennter Versuchskörper 180 S20 R5 nach dem Versuch

Bild 2-5 zeigt einen nach dem Versuch aufgetrennten Versuchskörper einer mit Polyurethanleim eingeleimten Gewindestange mit metrischem Gewinde. Deutlich ist zu erkennen, daß der Leim auch eine Verbindung mit der Gewindestange eingegangen ist. Diese Tatsache war bei allen mit dem nichtspröden Polyurethanleim hergestellten Versuchskörpern der Fall.

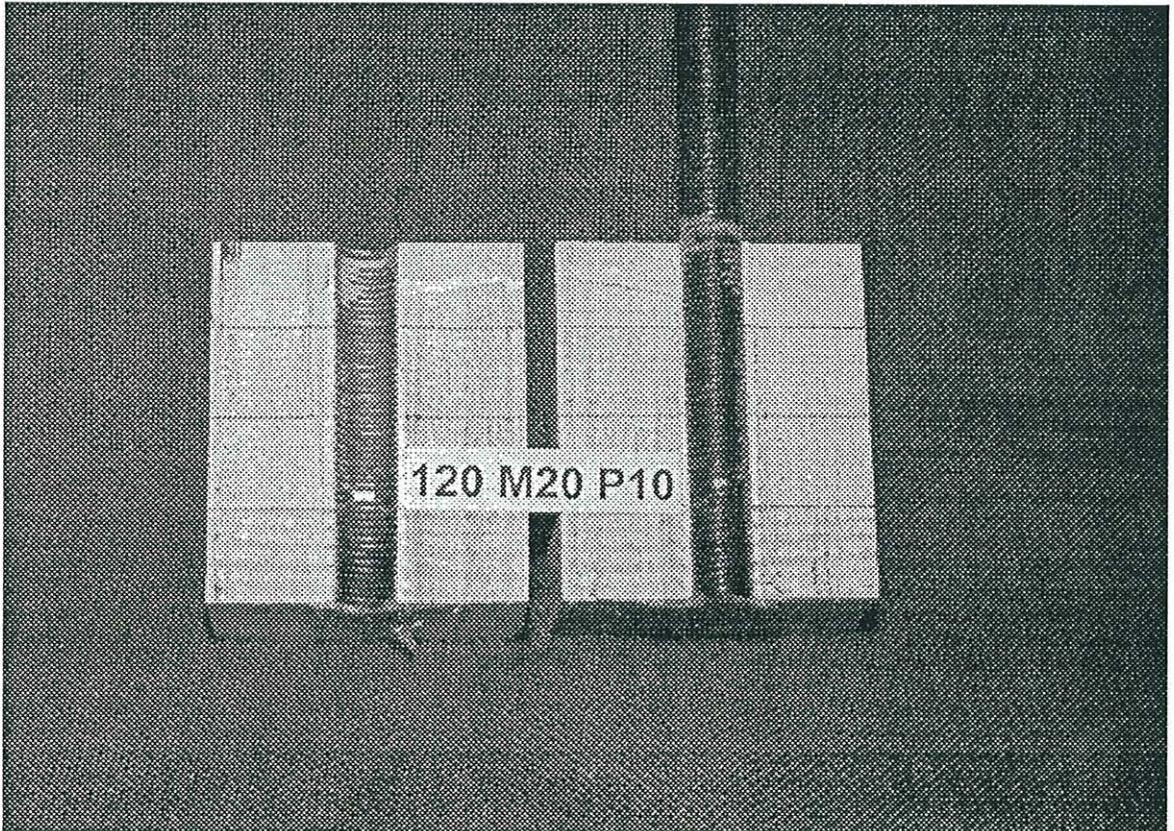


Bild 2-5 : Aufgetrennter Versuchskörper 120 M20 P10 nach dem Versuch

#### 2.4.4 Versuchsaufbau

In Anbetracht der Vielzahl der durchzuführenden Versuche wurde ein spezieller Prüfrahm entwickelt, der relativ kurze Einbau- und Umbauzeiten ermöglichte. Neben der Prüfkraft  $F$  wurde mit einem induktiven Wegaufnehmer der Auszugweg der Stäbe relativ zu der umgebenden Holzoberfläche gemessen. Dazu war der Wegaufnehmer auf einem Dreibein gelagert.

Im Bild 2-6 ist der schematische Versuchsaufbau dargestellt.

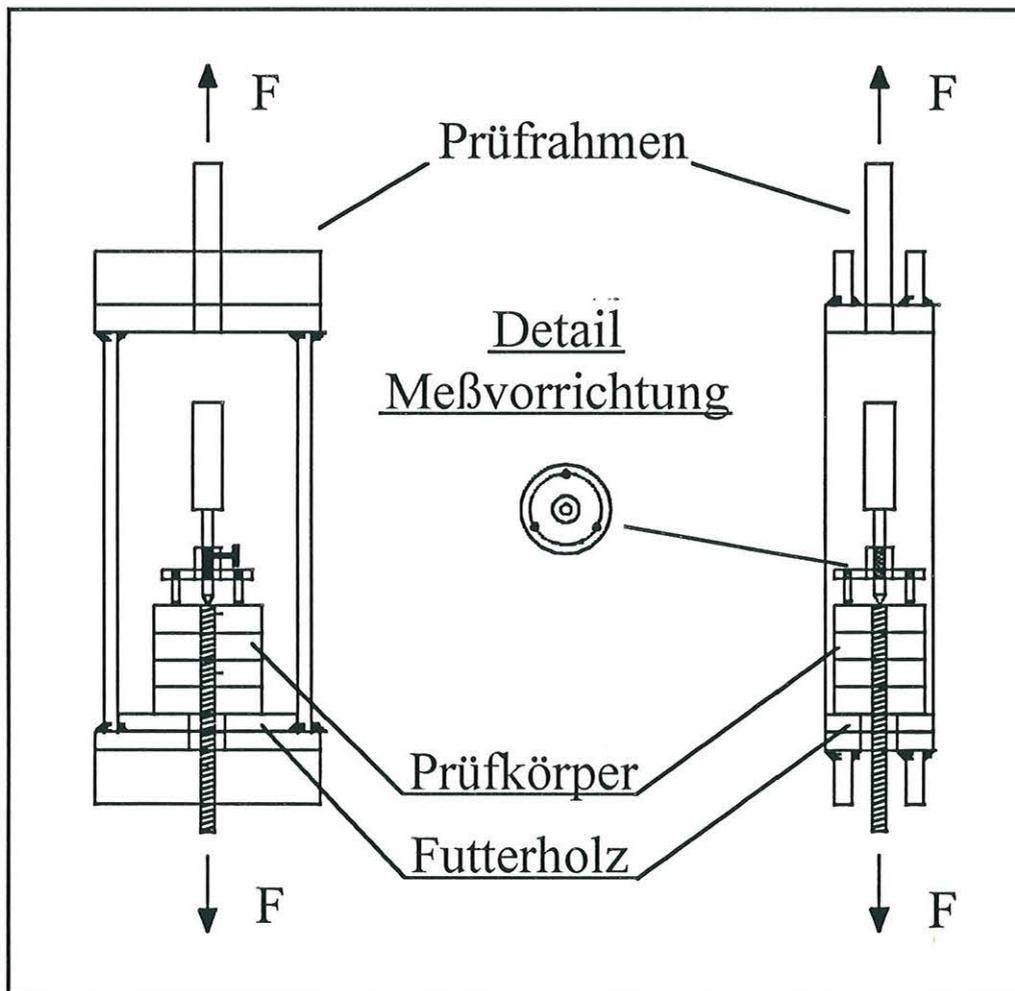
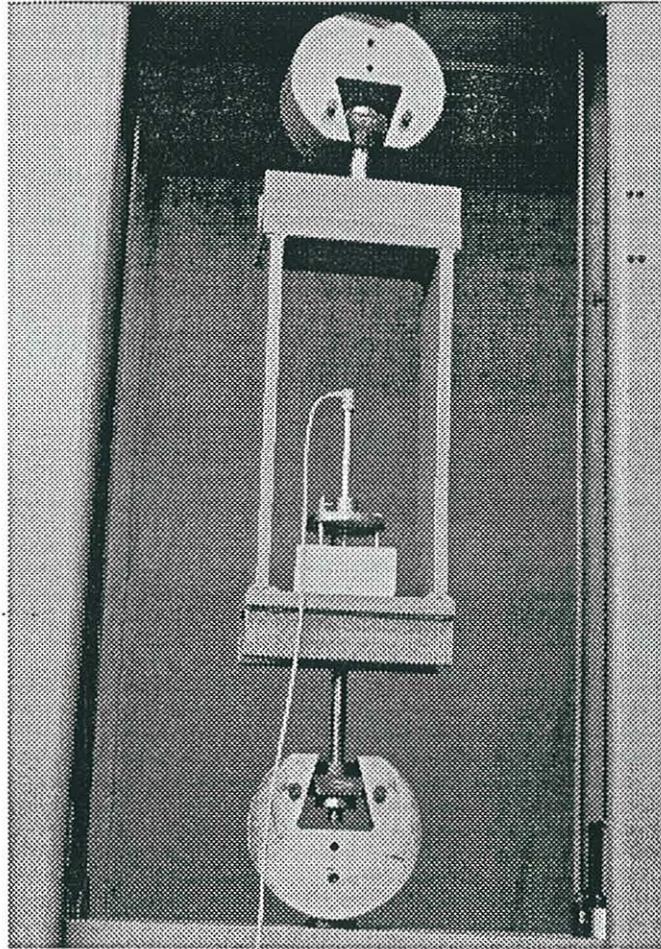


Bild 2-6 : Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

Bild 2-7 zeigt den Versuchsaufbau.



**Bild 2-7 :** Versuchsaufbau

#### **2.4.5 Versuchsdurchführung**

Es wurden ausschließlich Versuche mit rechtwinklig zur Faserrichtung eingebrachten Gewindestangen unter axialer Zugbelastung durchgeführt.

Die Lagerung der Versuchskörper zur Aushärtung des Leimes und die Durchführung der Versuche erfolgte im Prüflabor bei Normalklima DIN 50014 - 20/65-2. Die Versuche wurden mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 1,0 mm/min weggesteuert gefahren.

Die Belastung erfolgte kontinuierlich bis zum Erreichen der Höchstlast.

## 2.4.6 Ergebnisse und Auswertung der Ausziehversuche

### 2.4.6.1 Allgemeines

Eine erste Auswertung hat gezeigt, daß wegen der großen Streuung der Versuchsergebnisse eine separate Auswertung der verschiedenen Versuchsreihen nicht sinnvoll ist. Deshalb werden im weiteren wie bereits im Abschnitt 2.3 die Ergebnisse mit Resorcinharz- und Epoxidharzleimen zu einer Reihe (spröde Leime) zusammengefaßt. Die Versuche mit Polyurethanleimen (nichtspröde Leime) und die Versuche ohne Leim bilden zwei weitere Versuchsreihen.

Die Auswertung der Versuche ergab folgende grundsätzlichen Tendenzen :

- Ein Versagen der Gewindestangen oder des Holzes trat nicht auf;
- Die verwendeten spröden Leime (Epoxyd- und Resorcinharz) gingen keine Verbindung mit dem Stahl, sondern nur eine Verbindung mit dem Holz ein;
- Der verwendete nichtspröde Leim (Polyurethanleim) ging sowohl mit dem Stahl als auch mit dem Holz eine Verbindung ein;
- Der eingebrachte Leim füllte die Profilierung der Gewindestangen mehr oder weniger gut. Durch diese "Verzahnung" wird die Last von den Gewindestangen über den Leim in das Holz eingeleitet (und umgekehrt);

Die Auswertung der Versuche wird einheitlich auf der Grundlage folgender Definitionen und Festlegungen vorgenommen :

- Die angegebene Haftfestigkeit stellt immer den Mittelwert über die Einleimlänge nach Abschnitt 2.3 dar;
- Die Haftspannung bzw. Haftfestigkeit wird immer auf den Nenndurchmesser (nicht auf den Bohrlochdurchmesser) bezogen;
- Die Haftfestigkeit wird mit der Versuchshöchstlast (Bruchlast) und der Gleichung 
$$\tau = \frac{F_u}{d \cdot \pi \cdot l_g}$$
 bestimmt;
- Für die Darstellung der Mittelwert - Kurve nach RIBERHOLT wurde für die einzelnen Versuchsreihen der Mittelwert der Rohdichte nach Tabelle 2-4 eingesetzt;
- Für die Darstellung der Kurve für die charakteristische Haftfestigkeit nach RIBERHOLT wurde bei allen Versuchsreihen der Rechenwert von  $\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$  eingesetzt;

#### 2.4.6.2 Haftspannungs-Verformungsverhalten der geprüften Verbindungen

Wie erwartet zeigen die geprüften Verbindungen ein unterschiedliches Haftspannungs-Verformungsverhalten. Die Auswertung der Diagramme erlaubt folgende Schlußfolgerungen :

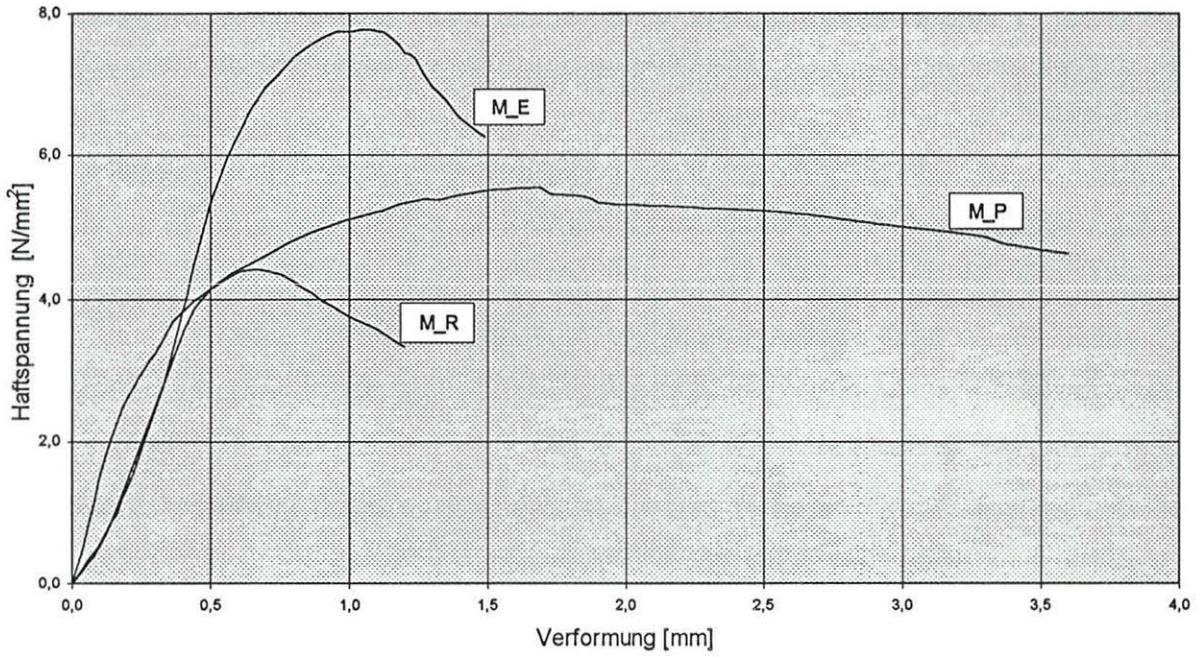
- Versuche mit metrischem Gewinde und Epoxydharz- oder Resorcinharzleimen zeigen ein linear-elastisches, sprödes Verhalten;
- Versuche mit metrischem Gewinde und Polyurethanleim zeigen ein linear-elastisches Verhalten mit ausgeprägten plastischen Verformungen;
- Versuche mit Holzschrauben und Epoxydharz- oder Resorcinharzleimen zeigen ein linear-elastisches, sprödes Verhalten;
- Versuche mit Gewindestäben und Epoxydharzleim zeigen ein linear-elastisches Verhalten mit plastischen Verformungen;
- Versuche mit Holzschrauben ohne Leimzugabe zeigen das erwartete elastisch-plastische Verhalten mit ausgeprägten plastischen Verformungen.

In Bild 2-8 sind exemplarisch typische Haftspannungs-Verformungs-Kurven von Versuchen mit Gewindestangen mit metrischem Gewindestangen dargestellt. Der Unterschied in der Höchstlast zwischen dem Versuch mit Epoxydharz- und Resorcinharzleim ist nicht signifikant, sondern gibt lediglich die auch in Anlage 2-17 (Bild A2-3) zu beobachtende Streuung wieder.

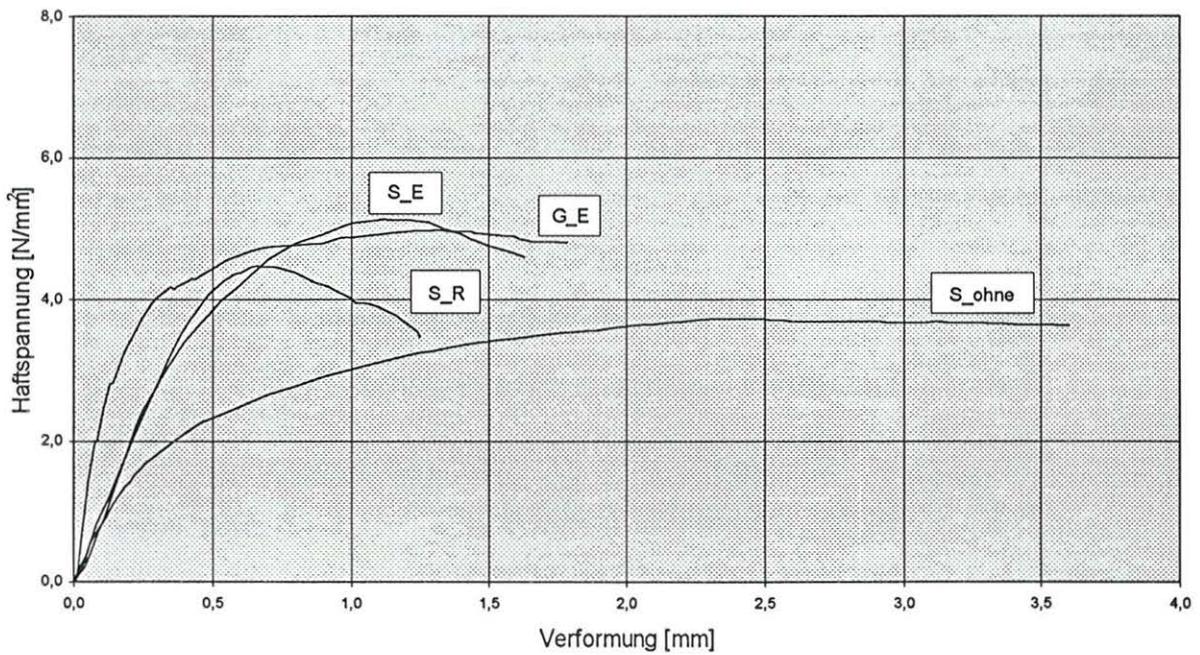
In Bild 2-9 sind exemplarisch typische Kurven von Versuchen mit Holzschrauben und Gewindestäben dargestellt.

Für die Kennzeichnung der Kurven wurden folgende Bezeichnungen gewählt :

- M\_E : metrisches Gewinde und Epoxydharzleim
- M\_R : metrisches Gewinde und Resorcinharzleim
- M\_P : metrisches Gewinde und Polyurethanleim
- G\_E : Gewi-Stab und Epoxydharzleim
- S\_E : Holzschraube und Epoxydharzleim
- S\_R : Holzschraube und Resorcinharzleim
- S\_ohne: Holzschraube ohne Leimzugabe



**Bild 2-8 :** Versuche mit Gewindestangen mit metrischem Gewinde und unterschiedlichen Leimen



**Bild 2-9 :** Versuche mit Gewindestäben und Holzschrauben und unterschiedlichen Leimen / ohne Leim

#### 2.4.6.3 Auswertung der Versuche mit spröden Leimen

Die Einzelergebnisse für die spröden Leime sind in den **Anlagen 2-7 bis 2-16** (Tabelle A2-3) zusammengestellt.

Eine graphische Auswertung der Versuchswerte und der Vergleich mit dem Bemessungsvorschlag RIBERHOLT ist in der **Anlage 2-17** (Bild A2-3) dargestellt. In dem Diagramm ist sowohl die Bemessungsgleichung für den Mittelwert der Haftfestigkeit als auch die Bemessungsgleichung für die mittlere charakteristische Haftfestigkeit angegeben. Trotz der großen Streuungen ist zu erkennen, daß die Ergebnisse gut in den Bemessungsvorschlag von RIBERHOLT passen. Insgesamt 10,8% der Einzelwerte liegen unterhalb der von RIBERHOLT angegebenen charakteristischen Tragfähigkeit.

Die Abhängigkeit der mittleren Haftfestigkeit von der Normal-Rohdichte ist in **Anlage 2-17** (Bild A2-4) dargestellt.

#### 2.4.6.4 Auswertung der Versuche mit nichtspröden Leimen

Die Einzelergebnisse für die nichtspröden Leime sind in den **Anlagen 2-18** (Tabelle A2-4) zusammengestellt.

Eine graphische Auswertung der Versuchswerte und Vergleich mit dem Bemessungsvorschlag RIBERHOLT ist in der **Anlage 2-19** (Bild A2-5) dargestellt. In dem Diagramm ist sowohl die Bemessungsgleichung für den Mittelwert der Haftfestigkeit als auch die Bemessungsgleichung für die mittlere charakteristische Haftfestigkeit angegeben. Es ist zu erkennen, daß die Versuchswerte in der Mehrzahl unter dem charakteristischen Wert nach RIBERHOLT liegen (93,3%).

Die Abhängigkeit der mittleren Haftfestigkeit von der Normal-Rohdichte ist in **Anlage 2-19** (Bild A2-6) dargestellt.

#### 2.4.6.5 Auswertung der Versuche ohne Leim

Die Einzelergebnisse für die Versuche ohne Leim sind in den **Anlagen 2-20** (Tabelle A2-5) zusammengestellt.

Eine graphische Auswertung der Versuchswerte und Vergleich mit den 3-fachen zulässigen Werten nach DIN 1052 ist in der **Anlage 2-21** (Bild A2-7) dargestellt. Bei der Darstellung der Geraden nach DIN 1052 wurde die Tatsache, daß die Mindesteinschraubtiefen deutlich unterschritten sind, nicht berücksichtigt.

Es ist zu erkennen, daß alle Versuchswerte über dem 3-fachen zulässigen Wert nach DIN 1052 liegen.

#### 2.4.6.6 Diskussion der Versuchsergebnisse

Es ist festzustellen, daß sich bei der Verwendung unterschiedlicher Stangentypen keine signifikanten Unterschiede ergaben. Auch für den untersuchten Bereich der Einleimlänge ( $30 \text{ mm} \leq l_g \leq 240 \text{ mm}$ ) konnte keine Abhängigkeit von der Einleimlänge festgestellt werden.

Die Ergebnisse der Versuche mit spröden Leimen stimmen gut mit dem Bemessungsvorschlag von RIBERHOLT überein.

Bei den Versuchen mit nichtsprödem Leim ergaben sich geringere Werte für die Haftfestigkeiten im Vergleich zu den charakteristischen Werten nach RIBERHOLT.

Es ist deshalb zu überlegen, ob nicht auch für die (hier untersuchten) nichtspröden Zweikomponenten-Polyurethanleime die Bemessungsgleichung für die spröden Leime anzuwenden ist. Für Einleimlängen  $l_g > 250 \text{ mm}$  würden sich dann allerdings im Vergleich zu den Ergebnissen älterer Versuche geringere (ungünstigere) Bemessungswerte ergeben.

RIBERHOLT standen nur Versuchsergebnisse mit Einleimlängen  $l_g \geq 180 \text{ mm}$  zur Verfügung. Dennoch war für ihn bereits zu erkennen, daß für geringe Einleimlängen die Annahme eines linearen Verlaufs der Haftfestigkeit in Abhängigkeit von der Einleimlänge die Tragfähigkeit der Verbindung besser beschreibt. RIBERHOLT legte diese Grenze bei der Einleimlänge von  $l_g = 200 \text{ mm}$  fest.

### 2.4.7 Bemessungsvorschlag

Unter Beachtung und Berücksichtigung der neueren Versuchsergebnisse wird der Bemessungsvorschlag von RIBERHOLT modifiziert und neu formuliert :

$$R_{ax,k} = f_{ws,k} \cdot \rho_k \cdot d \cdot \sqrt{l_g} \quad \text{für } l_g \geq 250 \text{ mm}$$

$$R_{ax,k} = f_{wl,k} \cdot \rho_k \cdot d \cdot l_g \quad \text{für } l_g < 250 \text{ mm}$$

bzw.

$$R_{ax,m} = f_{ws,m} \cdot \rho_k \cdot d \cdot \sqrt{l_g} \quad \text{für } l_g \geq 250 \text{ mm}$$

$$R_{ax,m} = f_{wl,m} \cdot \rho_k \cdot d \cdot l_g \quad \text{für } l_g < 250 \text{ mm}$$

mit :

$R_{ax,k}$  charakteristische Tragfähigkeit [N]

$R_{ax,m}$  mittlere Tragfähigkeit [N]

$\rho_k$  charakteristische Rohdichte des Holzes [kg/m<sup>3</sup>]

$d$  Durchmesser der Gewindestangen [mm]

$l_g$  Einleimlänge (Einbindelänge) der Gewindestangen [mm]

$f_{ws}$  und  $f_{wl}$  Festigkeitsparameter für alle Leimarten

$$\text{mit } f_{wl} = f_{ws} / \sqrt{l_g = 250 \text{ mm}}$$

Parameter	alle Leimarten
$f_{ws,k}$	0,520
$f_{wl,k}$	0,033
$f_{ws,m}$	0,627
$f_{wl,m}$	0,040

Die Werte der Festigkeitsparameter  $f_{ws}$  werden von RIBERHOLT übernommen. Für den Festigkeitsparameter  $f_{wl}$  ergeben sich wegen der geänderten Grenze bei der Einleimlänge von  $l_g = 200 \text{ mm}$  auf  $l_g = 250 \text{ mm}$  andere Werte.

## 2.5 Zusammenfassung

Zur Bestimmung der Haftfestigkeit von rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes eingeleimten, axial belasteten Gewindestangen wurden Grundlagenversuche (Kurzzeitversuche) mit Einleimlängen  $l_g = 30$  bis 240 mm unter Verwendung unterschiedlicher Leime und Gewindestangen unterschiedlicher Stahlsorten, Durchmesser und Gewindeausbildungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuche wurden mit Versuchen aus der Literatur und dem Bemessungsvorschlag von RIBERHOLT (1988) bzw. JOHANSSON (1995) verglichen.

RIBERHOLT hat anhand der wenigen ihm zur Verfügung stehenden Versuche bereits erkannt, daß für geringe Einleimlängen eine Reduzierung der Haftfestigkeit vorzunehmen ist. Er legte die Grenze bei der Einleimlänge von  $l_g = 200$  mm fest.

Die hier durchgeführten Versuche bestätigen die Überlegungen von RIBERHOLT. Aufgrund der Ergebnisse wird jedoch vorgeschlagen, diese Grenze bei einer Einleimlänge von  $l_g = 250$  mm neu festzulegen.

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß es möglich und sinnvoll ist, sowohl unterschiedliche Leimarten als auch unterschiedliche Gewindestangen in einer Bemessungsgleichung zusammenzufassen.

Eine graphische Auswertung aller Versuche (Versuche aus der Literatur und Versuchswerte aus dem Forschungsvorhaben) und ein Vergleich mit dem neuen Bemessungsvorschlag ist in der **Anlage 2-22** (Bild A2-8) dargestellt. In dem Diagramm ist sowohl die Bemessungsgleichung für den Mittelwert der Haftfestigkeit als auch die Bemessungsgleichung für die mittlere charakteristische Haftfestigkeit angegeben. Es ist zu erkennen, daß die Versuchswerte gut zu dem Bemessungsvorschlag passen. Bei einer Anzahl von insgesamt 438 Versuchen liegen nur 23 Werte unter der Kurve für die charakteristische mittlere Haftfestigkeit nach dem Bemessungsvorschlag. Dies entspricht einem Anteil von 5,25 %.

### 3 Rechtwinklig ausgeklinkte BS-Holz-Träger

#### 3.1 Grundlagen

Nachdem ein häufiges Auftreten von Schadensfällen bei Biegeträgern mit unten ausgeklinkten Endauflagern eine nähere Untersuchung dieses Problems erforderlich machte, wurden in Deutschland erstmals von MÖHLER und MISTLER (1978) umfangreiche systematische experimentelle Untersuchungen an Vollholz- und BS-Holz-Trägern durchgeführt. Diese Untersuchungen bestätigten die theoretischen Untersuchungen von MISTLER (1979). Danach ist wegen der im Kerbgrund gleichzeitig wirkenden Schub- und Querkzugspannungsspitzen mit einer Abminderung der scheinbaren Schubfestigkeit des Restquerschnittes zu rechnen. Diese Abminderung wird nach DIN 1052 durch den experimentell gefundenen Faktor  $k_A$  bestimmt.

Die gewonnenen Forschungsergebnisse wurden bei der Neubearbeitung der DIN 1052 (1988) übernommen und sind dort als Bemessungsvorschrift im Abschnitt 8.2.2.1 zusammengestellt.

#### 3.2 Bemessung von Ausklinkungen

Bei Ausklinkungen ohne Verstärkung ist die zulässige Querkraft nach Gleichung (12) der DIN 1052 zu bestimmen :

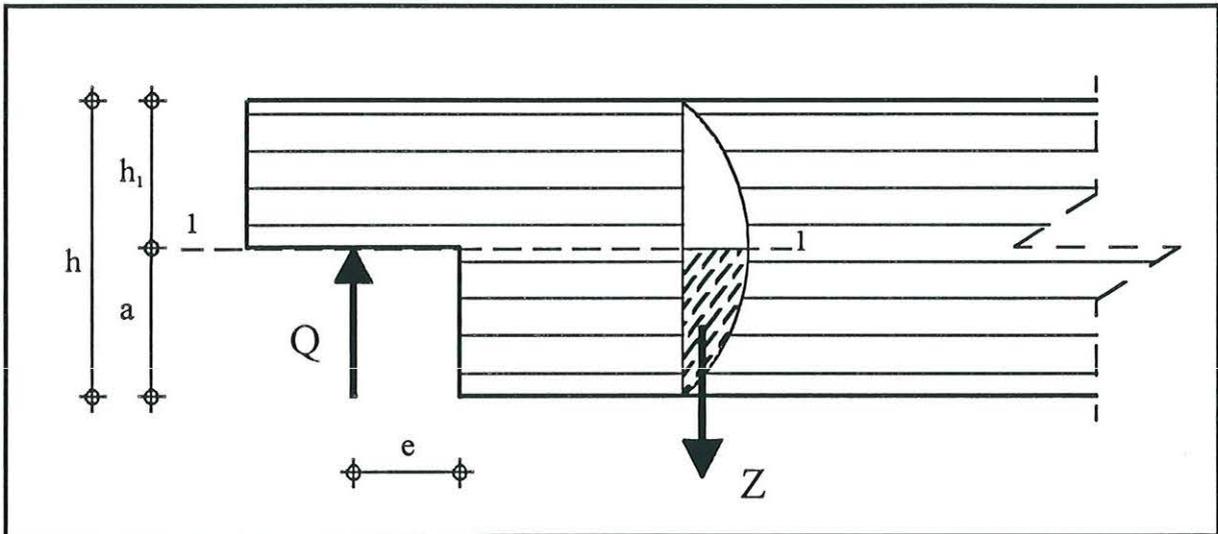
$$\text{zul } Q = \frac{2}{3} \cdot b \cdot h_1 \cdot k_A \cdot \text{zul } \tau_Q$$

$$\text{mit : } k_A = \max \left\{ \begin{array}{l} 1 - 2,8 \cdot \frac{a}{h} \\ 0,3 \end{array} \right.$$

Bei Ausklinkungen mit Verstärkungen darf der Beiwert  $k_A = 1,0$  gesetzt werden. Die Verstärkung ist dann für eine Zugkraft  $Z$  zu bemessen, die dem 1,3-fachen Querkraftanteil entspricht, der im vollen Trägerquerschnitt unterhalb der Linie 1-1 auftritt :

$$Z = 1,3 \cdot Q \cdot \left[ 3 \cdot \left( \frac{a}{h} \right)^2 - 2 \cdot \left( \frac{a}{h} \right)^3 \right]$$

Die Geometrie der ausgeklinkten Träger kann dem Bild 3-1 entnommen werden.



**Bild 3-1 :** Trägergeometrie

### 3.3 Verstärkungsmethoden

Schon bei geringeren Ausklinkungen ist die berechnete zulässige Querkraft relativ gering. Um die Aufnahme größerer Querkräfte zu ermöglichen, werden deshalb Verstärkungsmaßnahmen erforderlich. Mögliche Verstärkungsmethoden sind :

- (a) Bolzen;
- (b) eingeleimte Gewindestangen, Bolzen oder Schrauben;
- (c) aufgenagelte Stahlbleche bzw Nagelplatten;
- (d) aufgeleimte Platten aus Bau-Furniersperrholz;
- (e) Verstärkungen mit Glasfasern.

In Tabelle 3-1 werden die Methoden genauer beschrieben und deren Vor- und Nachteile einander gegenübergestellt.

**Tabelle 3-1 :** Gegenüberstellung der Verstärkungsmethoden

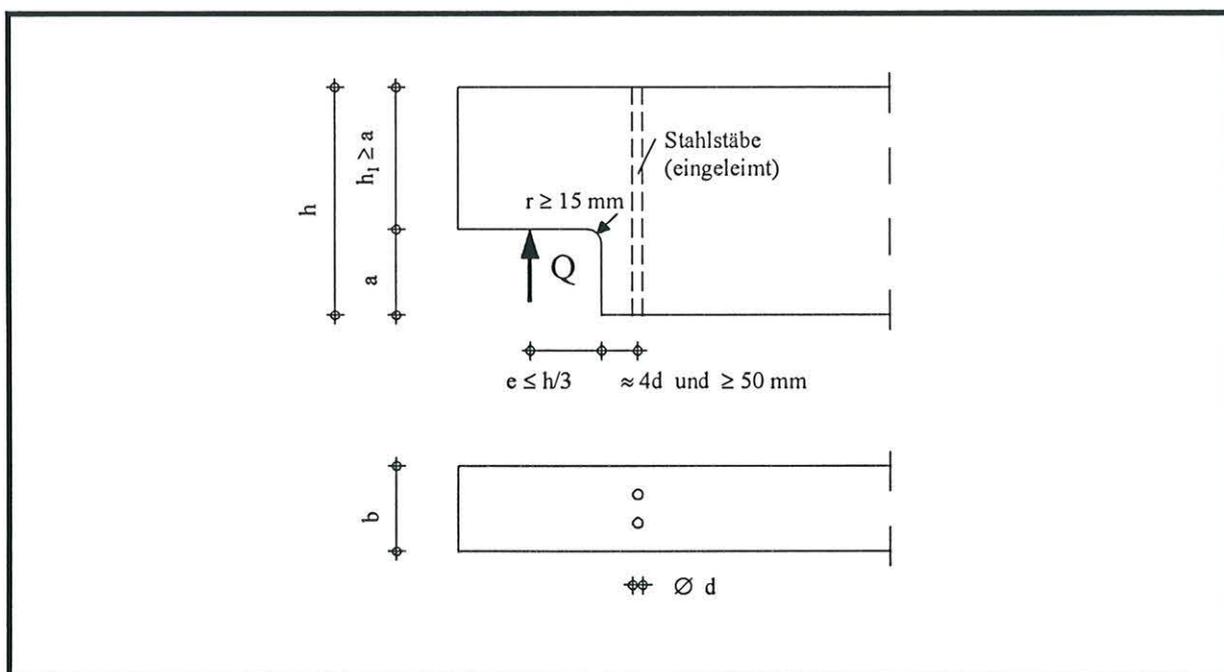
	Verstärkungsmaßnahme	Bemessung	Optik	Abmessungen des Bauteils	Brandschutz
(a)	Bolzen	nicht geeignet	sichtbar	unverändert	zu beachten
(b)	eingeleimte Gewindestangen, Bolzen oder Schrauben	nicht geregelt	nicht sichtbar	unverändert	entfällt
(c)	aufgenagelte Stahlbleche	geregelt	sichtbar	verändert	problematisch
(d)	aufgeleimte Platten aus Bau-Furniersperrholz	geregelt	sichtbar	verändert	zu beachten
(e)	Verstärkungen mit Glasfasern	nicht geregelt	sichtbar	verändert	problematisch

Grundsätzlich unterscheiden sich die Verstärkungsmethoden dadurch, daß sie entweder mit dem Holz zusammenwirken und dadurch die Anrißlast erheblich erhöhen (b, d, und e) oder aber erst aktiviert werden, wenn das Holz bereits angerissen ist (a oder c).

Da die Variante (b) entscheidende Vorteile hinsichtlich des Brandschutzes, der (Nicht-)Sichtbarkeit und der endgültigen Abmessungen des verstärkten Bauteiles besitzt, wird diese Methode von den Planern und Konstrukteuren favorisiert.

Die Bemessung und Ausbildung solcher Verstärkungen wird bisher nach MÖHLER und HEMMER (1981) durchgeführt, wobei für die zulässige Haftspannung der Wert  $zul \tau = 0,60 \text{ N/mm}^2$  vorgeschlagen wurde. In die DIN 1052 wurde dieser Bemessungsvorschlag noch nicht aufgenommen, da weder genügend Erfahrungswerte noch Versuchsergebnisse in ausreichender Anzahl vorlagen. Lediglich die Erläuterungen zur DIN 1052 weisen auf diese Verstärkungsmethode hin und machen Angaben zur konstruktiven Ausbildung solcher Ausklinkungen.

Danach sollen die in Bild 3-2 dargestellten geometrischen Bedingungen eingehalten werden.



**Bild 3-2 :** Trägergeometrie nach Erläuterungen zu DIN 1052

## 3.4 Versuche

### 3.4.1 Versuchsprogramm und -material

Dieser Teil des Forschungsvorhabens wurde erst nachträglich in den Arbeitsplan aufgenommen. Die Ausklinkungen wurden im Gegensatz zur DIN 1052 bzw. deren Erläuterungen ohne Ausrundung und mit nur einer Gewindestange ausgeführt. Ziel der Versuche war es, zu zeigen, daß diese Ausführung, die in der Praxis eine bedeutende Erleichterung darstellen würde, ausreichend ist. Außerdem sollte auch untersucht werden, welchen Einfluß eine Reduzierung des Randabstandes  $a_1$  von 50 mm auf 40 mm auf die Tragfähigkeit hat.

Die Anzahl der durchgeführten Versuche, sowie die variierten Parameter sind in Tabelle 3-2 zusammengestellt.

**Tabelle 3-2 : Versuchsbezeichnungen und -parameter**

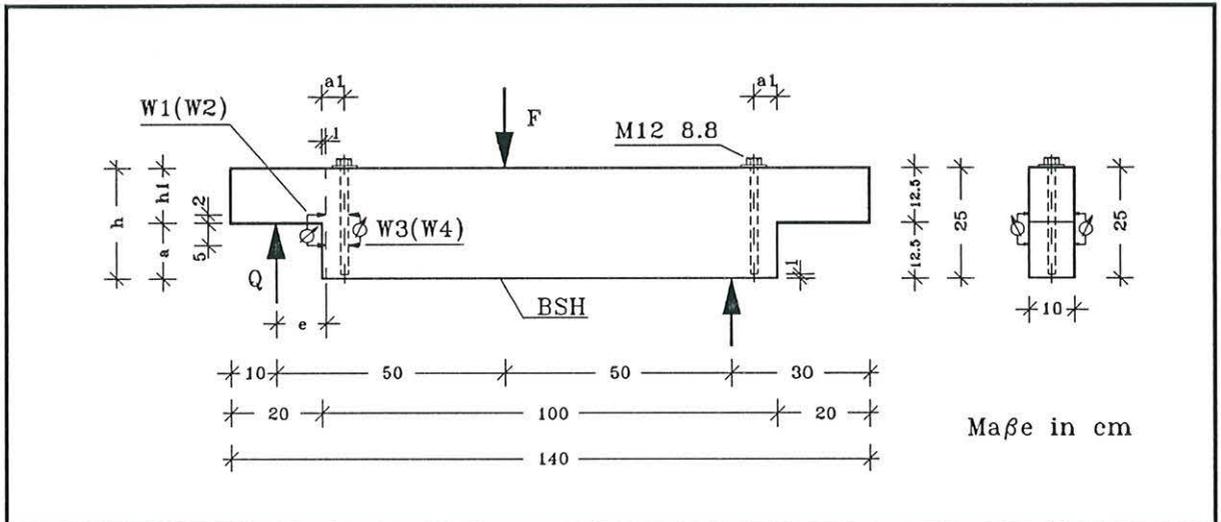
Versuchsbezeichnung	Anzahl der Versuche	Randabstand $a_1$ [mm]
I/1 ÷ I/6	6	40
II/1 ÷ II/6	6	50

Das Versuchsmaterial sowie die Herstellung der Probekörper war bei allen Versuchen unverändert :

- BS-Holz der Güteklasse II nach DIN 1052
- 1 Schraube mit metrischem Gewinde M 12 der Güte 8.8
- Bohrlochdurchmesser  $d = 14 \text{ mm}$
- Epoxidharz

### 3.4.2 Versuchskörper- und aufbau

Die Abmessungen der Versuchskörper sowie der Versuchsaufbau sind in Bild 3-3 dargestellt.



**Bild 3-3 :** Schematische Darstellung des Versuchsaufbaues

Für alle Versuchskörper nach Bild 3-3 gilt :

- Trägerbreite  $b = 10 \text{ cm}$
- Trägerhöhe  $h = 25 \text{ cm}$
- Höhe der Ausklinkung  $a = 12,5 \text{ cm}$
- Ausklinkungsverhältnis  $\frac{a}{h} = 0,5$
- Wegaufnehmer W1 und W2 1,0 cm von der Ausklinkung
- Wegaufnehmer W3 und W4 4,0 bzw. 5,0 cm von der Ausklinkung (über Gewindestange)
- Die Rißaufweitung wurde über einen Bereich von 7 cm gemessen
- Gemessen wurde die Prüfkraft  $F$  sowie die Auflagerkraft  $Q$

### 3.4.3 Versuchsdurchführung

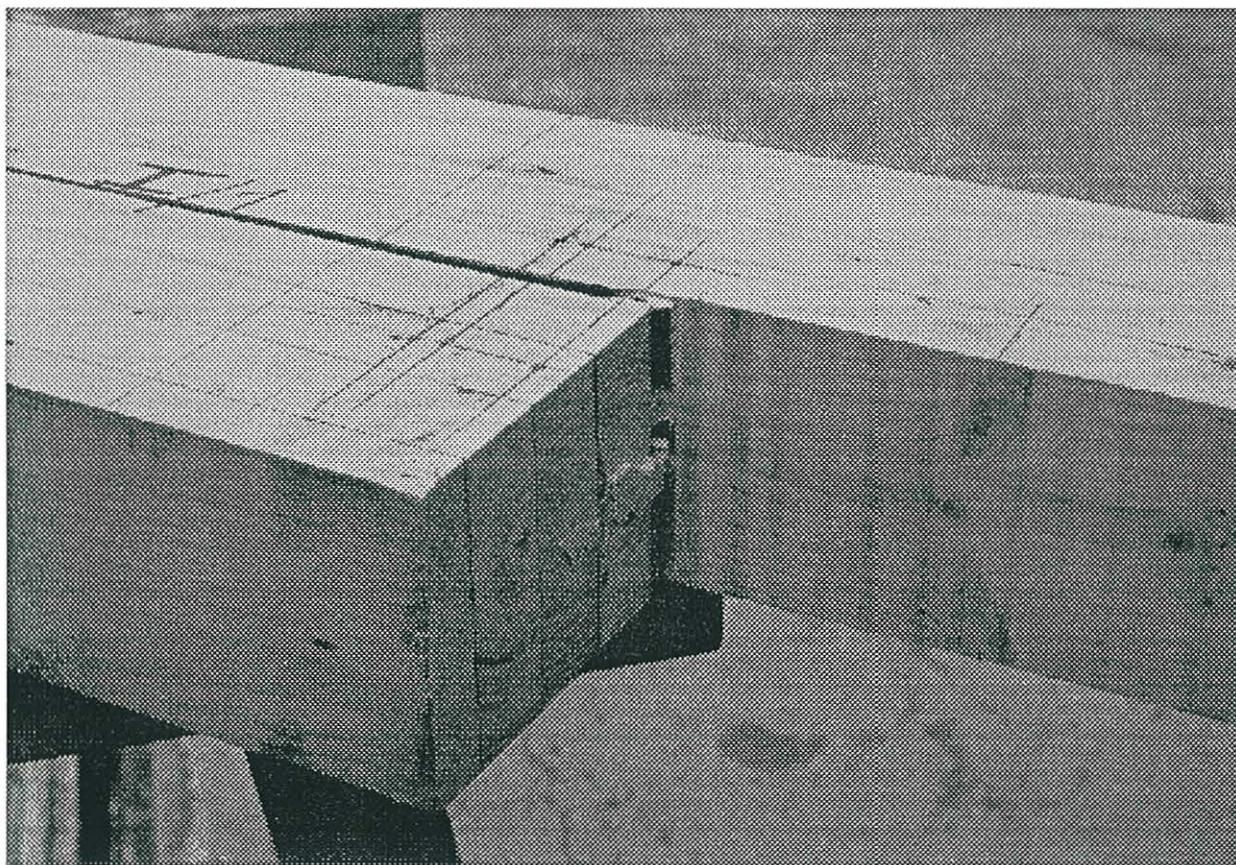
Die Herstellung und Lagerung der Hölzer und Versuchskörper geschah im Prüflabor bei Normalklima DIN 50014 - 20/65-2.

Die Versuche wurden mit 1,5 mm/min weggesteuert bis zum Erreichen der Höchstlast gefahren.

### 3.4.4 Versuchsergebnisse

Die Last-Rißaufweitungsdiagramme aller durchgeführten Tragfähigkeitsversuche sind in den **Anlagen 3-1 ÷ 3-6** (Bilder A3-1 ÷ A3-12) dargestellt.

Die Versuche bestätigen die Versuche von MÖHLER und MISTLER (1978) sowie MÖHLER und SIEBERT (1983) und zeigten ebenfalls, daß das Versagen rechtwinklig ausgeklinkter Träger durch Anrisse, ausgehend von der einspringenden Ecke, eingeleitet wird. Die eingeleimten Gewindestangen können nicht verhindern, daß ein Querkzug-Anriß auftritt. Sie verhindern jedoch ein plötzliches Versagen und erlauben eine weitere Laststeigerung bis zu einer Bruchlast, die etwa der 3-fachen Anrißlast entspricht. Bei allen 6 Versuchen der Versuchsreihe I (Randabstand  $a_1 = 40 \text{ mm}$ ) war ein örtliches Schubversagen wie in **Bild 3-4** dargestellt erkennbar. Bei der Versuchsreihe II mit größerem Randabstand trat dieses Versagen nicht mehr auf.



**Bild 3-4 :**      Örtliches Schubversagen - Versuch I/1

Als Bruchursache wurde bei allen durchgeführten Versuchen die Überschreitung der Haftfestigkeit zwischen Gewindestab und Holz in der unteren Trägerhälfte und ein Herausziehen des Stabes festgestellt.

Die Einzelergebnisse der Versuche sind in nachfolgender Tabelle 3-3 zusammengefaßt.

**Tabelle 3-3 : Versuchsergebnisse**

Versuch	Randabstand $a_1$ [cm]	Anrißlast Q [kN]	Bruchlast $Q_u$ [kN]	Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Brucherschei- nungen 1)
1	2	3	4	5	6
I/1	4,0	13,0	44,6	432	Q, S, V
I/2		12,5	38,8	417	Q, S, V
I/3		13,0	31,9	428	Q, S, V
I/4		14,0	44,8	445	Q, S, V
I/5		18,5	41,3	476	Q, S, V
I/6		18,0	49,6	452	Q, S, V
Mittelwert Reihe I	4,0	14,8	41,8	442	
II/1	5,0	13,0	41,2	454	Q, V
II/2		13,5	42,1	424	Q, V
II/3		13,5	36,9	419	Q, V
II/4		13,0	42,6	430	Q, V
II/5		16,5	45,5	457	Q, V
II/6		12,0	45,9	425	Q, V
Mittelwert Reihe II	5,0	13,6	42,4	435	
<b>Mittelwert Reihen I+II</b>		<b>14,2</b>	<b>42,1</b>	<b>438</b>	
1) Brucherscheinungen:					
Q Quersugrisse					
S Schubrisse (örtlich)					
V Zerstörung der Verbundschicht; Gewindestange ausgezogen					

### 3.4.5 Versuchsauswertung

Die Ergebnisse zeigen hinsichtlich der Anriß- und Bruchlast keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Versuchsreihen. Deshalb werden im folgenden die Ergebnisse zusammengefaßt. Dabei wurde die 5%-Fraktile wegen der geringen Versuchsanzahl unter der Annahme einer Student-t-Verteilung ermittelt. Die wichtigsten statistischen Kenngrößen sind in Tabelle 3-4 zusammengefaßt.

**Tabelle 3-4 : Statistische Auswertung der Versuchsergebnisse**

Kenngröße			Anrißlast	Bruchlast
Mittelwert	$X_m$	[kN]	14,2	42,1
Standardabweichung	$s_x$	[kN]	2,19	4,67
Variationskoeffizient	$v$	[%]	15,4	11,1
5%-Fraktile	$X_5$	[kN]	10,3	33,7

Unter Benutzung von Gleichung (14) der DIN 1052 wird von den tatsächlich ermittelten Tragfähigkeiten auf die übertragene Zugkraft zurückgerechnet.

Damit ergibt sich bei der mittleren Bruchlast  $\bar{Q}_u$  :

$$Z_u = 1,3 \cdot 42,1 \cdot \left[ 3 \cdot \left( \frac{12,5}{25} \right)^2 - 2 \cdot \left( \frac{12,5}{25} \right)^3 \right] = 27,4 \text{ kN}$$

mit der mittleren Haftfestigkeit :

$$\tau_{u,m} = \frac{F}{d \cdot \pi \cdot l_E} = \frac{27400}{12 \cdot \pi \cdot 125} = 5,81 \text{ N/mm}^2$$

und für den 5%-Fraktilwert  $Z_5$  :

$$Z_5 = 1,3 \cdot 33,7 \cdot \left[ 3 \cdot \left( \frac{12,5}{25} \right)^2 - 2 \cdot \left( \frac{12,5}{25} \right)^3 \right] = 21,9 \text{ kN}$$

mit der 5%-Fraktile der Haftfestigkeit :

$$\tau_{u,5} = \frac{F}{d \cdot \pi \cdot l_E} = \frac{21900}{12 \cdot \pi \cdot 125} = 4,65 \text{ N/mm}^2$$

Eine Bemessung nach DIN 1052 ergibt bei der gewählten Trägergeometrie :

- für den unverstärkten Träger :

$$zul\ Q = \frac{2}{3} \cdot 100 \cdot 125 \cdot 0,3 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} = 3,00\ kN$$

- für den verstärkten Träger :

$$zul\ Q = \frac{2}{3} \cdot 100 \cdot 125 \cdot 1,0 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} = 10,0\ kN$$

$$Z = 1,3 \cdot 10,0 \cdot \left[ 3 \cdot \left( \frac{12,5}{25} \right)^2 - 2 \cdot \left( \frac{12,5}{25} \right)^3 \right] = 6,50\ kN$$

Verglichen mit den nach DIN 1052 zulässigen Werten, deren Bemessungsgleichungen ebenfalls empirisch gefunden wurden, ergeben sich folgende Verhältniswerte zwischen 5%-Fraktilwerten und zulässigen Werten :

- unverstärkter Träger  $\gamma = 3,43$
- verstärkter Träger  $\gamma = 3,37$

### 3.5 Zusammenfassung

Obwohl nur eine geringe Anzahl von Versuchen durchgeführt wurde, zeigen die Ergebnisse, daß die Ausklinkungen im Widerspruch zu den Erläuterungen der DIN 1052 ohne Ausrundung ausgeführt werden können. Um die Gefahr von Schubversagen auszuschließen, sollte auf eine Reduzierung des Randabstandes  $a_1$  von 50 mm auf 40 mm verzichtet werden.

Die aus den Versagenslasten ermittelten Haftfestigkeiten stimmen sehr gut mit den im Teil 1 dieses Forschungsberichtes in den Grundlagenversuchen gefundenen Werten überein.

## **4 Entwicklung eines Bemessungsvorschlages für mit eingeleimten Gewindestangen verstärkte Bauteile**

### **4.1 Allgemeines**

Ähnlich wie im Stahlbetonbau kann die geringe Querkzugfestigkeit des Holzes durch eine Bewehrung ausgeglichen werden. Durch eingeleimte Gewindestangen, Betonstähle (besonders Gewi-Stäbe), aufgeleimte Laschen aus Holz oder Bau-Furniersperrholz sowie Nagelplatten kann man die Tragfähigkeit bei Querkzugbeanspruchung der Träger erhöhen. Dabei wird - entsprechend dem Stahlbetonbau - die Rißbildung nicht ganz verhindert, aber die Rißbreite wird auf ein akzeptables Maß begrenzt, ein weiteres Aufreißen des Trägers wird vermieden. Ein Teil der Querkzugbelastung wird vom Holz auf die Bewehrung übertragen.

In früheren Arbeiten wurde davon ausgegangen, daß die Verstärkungen die gesamte Querkzugkraft aufnehmen sollten. Das hat aber oft dazu geführt, daß viele Gewindestangen eingebaut wurden, oft auch in Trägerbereichen, in denen sie gar nicht nötig waren. Es gab keine allgemein anwendbaren Bemessungsverfahren, die Wahl der Anzahl und Anordnung der Gewindestangen basierte auf subjektiven Annahmen. Ein Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es deshalb, ein Verfahren zu entwickeln, mit dem die maximalen Querspannungen im verstärkten Träger abgeschätzt werden können und danach ein Bemessungsverfahren für die Verstärkungen zu entwickeln. Dabei soll auch untersucht werden, welche Einflüsse die geometrischen Größen und die Anordnung der Verstärkungen haben. Durch eingeleimte Gewindestangen wird die Tragfähigkeit erhöht, oder aber es können durch die geringeren Querspannungen im Holz kleinere Trägerquerschnitte gewählt werden, was zu insgesamt wirtschaftlicheren Bemessungsergebnissen führt.

### **4.2 Frühere Untersuchungen**

VINCENT und GOPU (1985) entwickelten mit Hilfe von Finite-Elemente-Berechnungen und Regressionsrechnungen einen Bemessungsvorschlag, mit dem eingeleimte Gewindestangen dimensioniert werden können. Sie fanden, daß radial eingeleimte Gewindestangen keinen signifikanten Einfluß auf die Längs- und Schubspannungen haben, die Querspannungen und deren Verteilung jedoch erheblich beeinflussen. Die Größe der Spannungsabminderung stellten sie als Funktion der Trägergeometrie und der Größe und Anordnung der Verstärkungen dar.

VON ROTH und LÖBER (1987) erarbeiteten aufbauend auf der Arbeit von VINCENT und GOPU ein Verfahren zur rechnerischen Ermittlung der Querkzugbewehrung unter

Beachtung der DIN 1052. Sie untersuchten ca. 70 verschiedene Trägervarianten, die sich unterschieden in Dachneigung, Stützweite, Trägerbreite, Differenz der Neigungen von Ober- und Untergurt, Traufquerschnittshöhe, Länge des gekrümmten Bereichs mit einer Gleichstreckenlast auf dem Trägerobergurt. Wie VINCENT und GOPU gaben VON ROTH und LÖBER in einem Anwendungsbeispiel einen Weg zur Bestimmung der erforderlichen Bewehrung an:

Die Spannungen werden wie für unbewehrte Träger bestimmt. Falls  $\sigma_{\perp}$  größer ist als *zul*  $\sigma_{\perp}$  (nach DIN 1052) wird der erforderliche Spannungsreduktionsfaktor (SRF) bestimmt. Daraus wird in Abhängigkeit des Stabdurchmessers der erforderliche Stababstand  $s$  berechnet.

Beide Verfahren haben jedoch den Nachteil, daß sie ausschließlich auf mehr oder weniger umfangreichen FE-Berechnungen basieren und nichts über die Anforderungen an die Haftfestigkeit der eingeleimten Gewindestangen aussagen.

### 4.3 Mechanisches Modell

#### 4.3.1 Allgemeines

Es wird ein mechanischer Ansatz gewählt, in dem angenommen wird, daß die Dehnungen im Holz und in den Gewindestangen gleich groß sind. Dieser Ansatz, der bereits von BRÜNINGHOFF und SCHMIDT (1991) gewählt wurde, hat den Vorteil, daß der Einfluß jeder mechanischen oder geometrischen Kenngröße direkt erkennbar ist.

#### 4.3.2 Verwendete Formelzeichen

$A_H$	- Querszugbeanspruchte Holzquerschnittsfläche
$A_{St}$	- Stahlspannungsquerschnitt
$A_{s1}$	- Spannungsquerschnittsfläche einer Gewindestange
$b$	- Trägerbreite
$D$	- Druckkraft
$d$	- Gewindestangenaußendurchmesser
$d_s$	- Durchmesser des Spannungsquerschnitts
$ds$	- Länge des gekrümmten Bereichs
$e$	- Abstand der Gewindestangen
$E_{\perp,H}$	- E-Modul des Holzes senkrecht zur Faserrichtung

$E_{St}$	- E-Modul des Stahls
$\varepsilon$	- Dehnung
$\varphi$	- Öffnungswinkel des gekrümmten Trägerbereichs
$\psi$	- Winkel zwischen zwei Gewindestangen
$F_{\perp}$	- Querkraft
$F_{\perp,ges}$ bzw. $maxF_{\perp}$	- Gesamte Querkraft
$F_{\perp,H}$	- Querkraft im Holz
$F_{\perp,H,max}$	- maximale Querkraft im Holz
$h$	- Höhe des Trägers
$I$	- Flächenmoment 2. Grades (Trägheitsmoment)
$I_g$	- Einleimlänge
$M$	- Moment (Biegemoment)
$r_a$	- Krümmungsradius, bezogen auf die Trägeroberkante
$r_m$	- Krümmungsradius, bezogen auf die Schwerlinie des Trägers
$\sigma_{\perp}$	- Querkraftspannung
$\sigma_B$	- Biegespannung
$\sigma_{\perp,H}$	- Querkraftspannung im Holz
$\sigma_{St}$	- Stahlspannung
$\tau_{Leim}$	- Spannung im Leim zwischen Holz und Stahl
$V$	- Durch Querkraft beanspruchtes Volumen
$W$	- Widerstandsmoment
$z$	- Koordinate
$\xi$	- Integrationsgrenze

### 4.3.3 Herleitung der Gleichungen für die größte vorhandene Querkraft (im unverstärkten Träger)

Betrachtet wird ein konzentrisch gekrümmter Biegeträger konstanter Höhe (ohne Firstkeil). Als Belastung wirkt ein Biegemoment, das im Krümmungsbereich Querkraftspannungen verursacht. Die Längsspannungsverteilung über die Querschnittshöhe wird als linear angenommen. Die Herleitung liefert die aus der DIN 1052 bekannten Gleichungen

$$\max F_{\perp} = V \cdot \frac{M}{W} \cdot \frac{1}{4 \cdot r_m} \quad (1)$$

$$\text{und} \quad \max \sigma_{\perp} = \frac{M}{W} \cdot \frac{h}{4 \cdot r_m} \quad (2)$$

Es handelt sich hierbei um die maximale Gesamtquerkraft bzw. -spannung die im Träger wirkt, sowohl im unverstärkten als auch im verstärkten Zustand.

### 4.3.4 Entwicklung eines Rechenmodells zur Berechnung der Verstärkung durch Gewindestangen

Die Berechnung erfolgt unter der Annahme, daß die Dehnungen im Holz und in den Gewindestangen gleich groß sind. Eine Herleitung liefert die Beziehung

$$\sigma_{\perp, H} \cdot \frac{E_{St}}{E_{\perp, H}} = \sigma_{St} \quad (3)$$

bzw. für die Spannungen im Holz und im Stahl

$$\sigma_{\perp, H} = E_{H\perp, H} \cdot \varepsilon = \frac{F_{\perp, H, \max}}{A_H} = \frac{3}{2} \cdot \frac{M}{b \cdot h \cdot r_m} \cdot (1 - \eta) \quad (4)$$

$$\sigma_{St} = E_{St} \cdot \varepsilon = \frac{F_{\perp, \text{maßgebend}}}{A_{St}} \quad (5)$$

Der in Gleichung (4) verwendete Wert  $\eta$  stellt eine Verhältniszahl dar, die angibt, welcher Anteil der wirksamen Gesamtquerkraft vom Holz auf die Gewindestangen übertragen werden soll.

Es gilt  $\eta = \frac{F_{St}}{\max F_{\perp}}$  wobei:  $F_{St}$  - In den Gewindestangen wirksame Zugkraft

$\max F_{\perp}$  - Gesamtquerkraft

#### 4.3.4.1 Bestimmung der Verhältniszahl $\eta$

Mit der Annahme, daß die Dehnungen im Holz und im Stahl gleich groß sein sollen, läßt sich eine Formel zur Bestimmung von  $\eta$  herleiten. Darin kommen nur geometrische Größen und die E-Moduln von Holz und Stahl vor. Die Belastung und zulässige Spannungen bleiben zunächst noch unberücksichtigt.

Für die Kräfte in Holz und Stahl gelten die Gleichungen

$$F_{H,\perp} = \sigma_{\perp,H} \cdot A_H \quad (6)$$

und 
$$F_{St} = \sigma_{St} \cdot A_{St} \quad (7)$$

- wobei
- $F_{\perp,H}$  - Im Holz wirksame Querkzugkraft
  - $F_{St}$  - Kraft in den Gewindestangen
  - $\sigma_{\perp,H}$  - Querkzugspannung im Holz
  - $\sigma_{St}$  - Spannung in den Gewindestangen
  - $A_{St}$  - Gewindestangenspannungsquerschnittsfläche
  - $A_H$  - Querkzugbeanspruchte Holzfläche

a) genau: 
$$A_H = b \cdot r_m \cdot \varphi - A_{St} \quad (8)$$

b) vereinfacht: 
$$A_H = b \cdot r_m \cdot \varphi \quad (9)$$

Wie eine Vergleichsrechnung mit realistischen Werten gezeigt hat, unterscheiden sich die beiden Ansätze (Gleichung (8) und (9)) nur um ca. 2%, so daß im weiteren nur der vereinfachte Ansatz weiter verfolgt wird.

Nach einigen Umformungen und Gleichsetzen erhält man die Beziehung

$$\eta = \frac{1}{\frac{E_{\perp,H}}{E_{St}} \cdot \frac{b \cdot r_m \cdot \varphi}{A_{St}} + 1} \quad (10)$$

Die im gekrümmten Bereich des Trägers wirksame Querkzugkraft  $F_{\perp,ges}$  setzt sich zusammen aus dem Anteil, der im verstärkten Träger im Holz wirksam bleibt und dem Anteil, der von den Gewindestangen aufgenommen wird.

$$F_{\perp,ges} = F_{\perp,H} + F_{St} \quad (11)$$

Durch die Verhältniszahl  $\eta$  lassen sich die Kräfte im Holz und in den Gewindestangen in Abhängigkeit von der Gesamtquerkzugkraft darstellen

$$F_{\perp,H} = (1 - \eta) \cdot F_{\perp,ges} \quad (12)$$

$$\text{und } F_{St} = \eta \cdot F_{\perp,ges} \quad (13)$$

Es ergibt sich

$$F_{\perp,H} = (1 - \eta) \cdot V \cdot \frac{M}{W} \cdot \frac{1}{4 \cdot r_m} \quad (14)$$

Daraus ergibt sich nach einigen Umformungen

$$\eta = 1 - \frac{2}{3} \cdot \sigma_{\perp,H} \cdot \frac{b \cdot h \cdot r_m}{M} \quad (15)$$

bzw.

$$\eta = \sigma_{H,\perp} \cdot \frac{E_{St}}{E_{\perp,H}} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{h \cdot A_{St}}{\varphi \cdot M} \quad (16)$$

Der Winkel  $\varphi$  ist als der Öffnungswinkel des gesamten gekrümmten Bereichs des Trägers definiert. Um nun den Abstand der einzelnen Gewindestäbe in das Rechenmodell einzubringen, wird dieser Abstand  $e$  wie folgt definiert :

$$e = \psi \cdot r_m \quad (17)$$

- mit
- $\psi$  - Winkel zwischen zwei Gewindestäben
  - $e$  - Abstand zweier Gewindestäbe, bezogen auf die Trägerlängsachse, gemessen entlang der Trägerschwerelinie
  - $r_m$  - Krümmungsradius der Schwerlinie des Trägers

Durch die Tatsache, daß bei gleichmäßig gekrümmten Brettschichtholzträgern die Querkzugspannung im gesamten gekrümmten Bereich gleich groß ist, spielt es für die Ermittlung der Verhältniszahl  $\eta$  keine Rolle, ob der Winkel des gekrümmten Bereiches oder der Winkel zwischen zwei Gewindestäben verwendet wird. In den Gleichungen wird daher der Gesamtöffnungswinkel  $\varphi$  ersetzt durch den 'Staböffnungswinkel'  $\psi$ , gleichzeitig wird die Gesamtstahlspannungsquerschnittsfläche  $A_{St}$  ersetzt durch die Spannungsquerschnittsfläche  $A_{St}$  eines Gewindestabes. Die maximale vorhandene Querkzugkraft ändert sich durch die Verwendung des kleineren Winkels  $\psi$ , weil ab jetzt jeweils ein Trägerabschnitt betrachtet wird, der von zwei Gewindestangen begrenzt wird. Die maximale Querkzugkraft ist die Resultierende, die im Einflußbereich einer Gewindestange wirkt (Einflußfläche :  $e \cdot b$ , wobei  $b$  - Trägerbreite,  $e$  - Gewindestangenabstand).

Im Folgenden sind alle hergeleiteten Gleichungen für  $\eta$ , die maximale Querkzugspannung und -kraft und die Beziehung zwischen Holz- und Stahlspannung zusammengestellt. Der Gewindestababstand  $e$  ist hier bereits eingearbeitet.

#### 4.3.4.2 Zusammenstellung der Gleichungen

Bei Berücksichtigung der vereinfachten beanspruchten Holzfläche

$A_H = b \cdot r_m \cdot \psi$  ergibt sich :

$$\eta = \frac{1}{\frac{E_{\perp,H}}{E_{st}} \cdot \frac{b \cdot e}{A_{s1}} + 1} \quad (18)$$

$$\eta = 1 - \frac{2}{3} \cdot \sigma_{\perp,H} \cdot \frac{b \cdot h \cdot r_m}{M} \quad (19)$$

$$\eta = \sigma_{\perp,H} \cdot \frac{E_{st}}{E_{\perp,H}} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{h \cdot A_{s1} \cdot r_m}{e \cdot M} \quad (20)$$

#### 4.3.5 Rechenmodell zur Bestimmung der erforderlichen Trägerverstärkungen

Die Berechnung erfolgt in drei Hauptabschnitten:

##### 1) Bemessung des Trägers ohne Berücksichtigung der Querkzugnachweises

Wie weiter oben schon beschrieben, beeinflusst eine Verstärkung mit eingeleimten Gewindestangen nur die Querkzugspannungen. Die übrigen Spannungen und die Gebrauchstauglichkeit bleiben weitgehend unbeeinflusst. Daher sind bei diesem ersten Teil in der Regel folgende Nachweise zu führen:

1. Schubspannungsnachweis im Auflagerbereich
2. Längsspannungsnachweis im Firstbereich
3. Nachweis der angeschnittenen Fasern (bei Trägern mit veränderlicher Höhe)
4. Gebrauchstauglichkeitsnachweis (Durchbiegung)
5. Nachweis der vorhandenen Auflagerpressung
6. Stabilitätsnachweis (Kippen)

## II) Ermittlung des Gewindestangenabstandes und -durchmessers

### 1. Ermittlung der **maximalen Querkzugspannung ohne Verstärkung**

$$\max \sigma_{\perp} = \frac{M}{W} \cdot \frac{h}{4 \cdot r_m} \quad (\text{R1})$$

### 2. Ermittlung der **Verhältniszahl $\eta$** mit Gleichung (19)

$$\eta = 1 - \frac{2}{3} \cdot \text{zul} \sigma_{\perp, H} \cdot \frac{b \cdot h \cdot r_m}{M} \quad (\text{R2})$$

Wobei:  $b, h, r_m$  - Aus Abschnitt I vorhandene Trägergeometrie

$\text{zul} \sigma_{\perp, H}$  - Zulässige Holzquerzugspannung

### 3. Ermittlung des **erforderlichen Gewindestababstands $e$**

Aus Gleichung (18) folgt

$$\frac{e}{A_{s1}} = \frac{(1-\eta)}{\eta} \cdot \frac{E_{St}}{E_{\perp, H}} \cdot \frac{1}{b} \quad (\text{R3})$$

Nach Wahl eines Stabdurchmessers  $d_s$  (Durchmesser des Spannungsquerschnitts) folgt dann für den einzuhaltenden Gewindestababstand

$$e = \frac{(1-\eta)}{\eta} \cdot \frac{E_{St}}{E_{\perp, H}} \cdot \frac{d_s^2 \cdot \pi}{4 \cdot b} \quad (\text{R4})$$

## III) Nachweise der Verstärkungsmaßnahme

Das Rechenmodell beinhaltet drei Nachweise:

- Nachweis der vorhandenen Holzquerzugspannung im verstärkten Träger
- Nachweis der Spannung in den Gewindestangen
- Nachweis der Spannung in der Leimfuge zwischen Holz und Gewindestange

#### 1. Nachweis Holzquerzugspannung

Die Holzquerzugspannung  $\sigma_{\perp, H}$  folgt aus der weiter oben aufgestellten Gleichung

$$\sigma_{\perp,H,vorh.} = (1-\eta) \cdot \max \sigma_{\perp} = (1-\eta) \cdot \frac{M}{W} \cdot \frac{h}{4 \cdot r_m} \leq \text{zul } \sigma_{\perp,H} \quad (\text{R5})$$

## 2. Nachweis Stahlspannung

Die Stahlspannung  $\sigma_{St}$  berechnet sich mit einer der folgenden Gleichungen

$$\sigma_{St} = \frac{F_{St}}{A_{St}} = \frac{\eta \cdot e \cdot b \cdot \frac{M}{W} \cdot \frac{h}{r_m}}{d_s^2 \cdot \pi} \leq \text{zul } \sigma_{St} \quad (\text{R6})$$

$$\text{oder } \sigma_{St} = \frac{E_{St}}{E_{\perp,H}} \cdot \sigma_{\perp,H,vorh.} \leq \text{zul } \sigma_{St} \quad (\text{R7})$$

## 3. Nachweis Leimfugenspannung

Die vorhandene Leimfugenspannung  $\tau_{L,vorh}$  wird wie folgt berechnet :

$$\tau_{L,vorh} = \frac{\max F_{\perp,St}}{l_g \cdot d \cdot \pi} = \frac{3 \cdot \eta \cdot e \cdot M}{2 \cdot h \cdot l_g \cdot d \cdot \pi \cdot r_m} \leq \text{zul } \tau_L \quad (\text{R8})$$

Die Leimfugenspannung wird hier mit dem Außendurchmesser der Gewindestangen berechnet.

## 4.4 Untersuchung der verschiedenen Einflußparameter des Rechenmodells

### 4.4.1 Mögliche Stabdurchmesser und -abstände, Anwendungsbereiche des Rechenmodells (bzw. der Verstärkungen)

Für die Praxis gibt es Grenzen, außerhalb derer eine Verstärkung nicht mehr durchführbar ist. Die möglichen Gewindestangendurchmesser liegen zwischen 12 mm und 24 mm (Gewindestangen M12, M16, M20, M22, M24). Bei kleineren Durchmessern ist das Bohren der Löcher nicht möglich (sehr lange Bohrer sind sehr empfindlich). Die Gewindestabdurchmesser sollten auch unter Berücksichtigung der vorhandenen Trägerbreite gewählt werden. Es wird vorgeschlagen, den Durchmesser der Gewindestange auf 20% der Trägerbreite zu begrenzen. Ebenso gibt es in der Praxis eine "Ausführbarkeitsgrenze" für die Gewindestababstände. Als absolutes Mindestmaß sollten hier 250 mm angesetzt werden, kleinere Abstände sind nur unter sehr großem Arbeits- und damit Zeitaufwand realisierbar. Die Abstände der Gewindestangen müssen allerdings auch nach oben begrenzt werden, da die Quer-

zugspannungen im dazwischenliegenden Holz bei zu großem Abstand nicht mehr wesentlich reduziert werden. Um eine möglichst gleichmäßige Querspannungsreduktion zu erreichen, sollte der größtmögliche Gewindestangenabstand auf höchstens den Wert von  $0,75 \cdot h$  begrenzt werden.

Ein Vorteil des hier verwendeten Rechenmodells liegt darin, daß in der Gleichung zur  $\eta$ -Berechnung (Gleichung R2) eine zulässige Holzquerzugspannung gewählt werden kann. Das bedeutet, daß jeder, der mit dem angegebenen Bemessungsentwurf eine Trägerverstärkung bemißt, frei wählen kann, welche Querzugspannung er dem Holz "zumuten" will (Maximalwert nach DIN 1052-1/A1).

Ein oberer Grenzwert für die Belastung ergibt sich nur aus den kleinstmöglichen Stababständen und den größtmöglichen Gewindestabdurchmessern.

#### 4.4.2 Untersuchung zur Variation des Gewindestangendurchmessers und -abstands

- Viele Gewindestangen, kleiner Durchmesser oder wenige Gewindestangen, großer Durchmesser ?

Für die praktische Ausführung der Verstärkungen an den Brettschichtholzträgern wäre es am einfachsten, nur eine oder zwei Gewindestangen einbauen zu müssen. Dieser Einbau (Vorbohren, Leim einfüllen, Gewindestange einbringen, Erhärtungswartezeit) ist sehr zeit- und damit auch kostenintensiv. Es ist aber offensichtlich, daß für eine möglichst gleichmäßige Verteilung und Reduktion der Querzugspannung des Holzes eine ebenfalls möglichst gleichmäßige Verteilung und Anordnung der Gewindestangen erforderlich ist. Ähnlich wie bei anderen Verbindungsmitteln des Holzbaus, wie z.B. Nägel, ist es auch bei der Verstärkung sinnvoller, viele kleinere Gewindestangen einzubauen als wenige große.

Die Untersuchung dieses Problems mit dem Rechenmodell ergab folgendes:

Das Rechenmodell liefert einen bestimmten Wert für den Term  $e/A_{s1}$ . Daraus ergibt sich, daß die einzuhaltenden Stababstände umso größer werden, je größer der gewählte Gewindestangendurchmesser wird. Bei doppeltem Stabdurchmesser ergibt sich ein viermal größerer Abstand ( $d_s$  geht quadratisch in  $e$  ein). Betrachtet man damit die resultierenden Spannungen in Holz, Stahl und Leim, ergibt sich aus den Gleichungen der Nachweise des Rechenmodells, daß die Wahl verschiedener Gewindestangendurchmesser auf die Holzquerzug- und die Stahlspannungen keinen Einfluß hat, weil die Verhältniszahl  $\eta$  unverändert bleibt.

Bei den Spannungen in der Leimfuge ergibt sich ein anderes Bild. Bei doppelt so großem Gewindestabdurchmesser wird auch die Spannung im Leim doppelt so groß.

Die Leimspannungen hängen linear vom gewählten Durchmesser ab. Die Ergebnisse zeigen außerdem, daß die Leimspannungen mit steigender Trägerhöhe kleiner werden und daß für eine bestimmte Trägerhöhe und für einen bestimmten Krümmungsradius die Holz-, Stahl- und Leimspannungen durch die Verstärkung nach dem Rechenmodell konstant bleiben - unabhängig von Belastung und Trägerbreite.

Die Auswertung ergab außerdem, daß Holzquerzug- und Stahlspannung in verstärkten Trägern bei gleicher Brettschichtholzgüte immer konstant bleiben, die Leimspannung jedoch nicht. Sie hängt ab von der Trägerhöhe, vom  $E_{L,H}$ -Modul und - siehe oben - vom Gewindestangendurchmesser. Je höher ein Träger, desto kleiner die Leimspannung, je größer der Durchmesser, desto größer wird die Spannung im Leim und je größer der Holz- $E_{L,H}$ -Modul, desto kleiner wird die Leimspannung (und auch die Stahlspannung).

Man kann aus der Auswertung erkennen, daß die rechnerischen Leimspannungen trotz ihrer recht großen Schwankungen durch die verschiedenen oben beschriebenen Abhängigkeiten nie größer werden als ca.  $0,8 \text{ N/mm}^2$ . Das bedeutet, daß die Leimspannung bei der Tragfähigkeit der Verstärkungen selten maßgebend wird, da beim Leim von einer zulässigen Spannung von mindestens  $0,94 \text{ N/mm}^2$  (Siehe Teil 2 dieses Berichtes, Einleimlänge  $1000\text{mm}$ ) ausgegangen werden kann.

Die Frage, ob grundsätzlich kleine Gewindestangen mit kleinem Abstand gewählt werden sollten, kann hier nicht eindeutig geklärt werden. Solange aber die in Abschnitt 4.4.2 genannten Mindeststababstände nicht unterschritten werden, ist es wohl sinnvoller, kleinere Durchmesser und kleinere Abstände zu wählen, als große Durchmesser und große Abstände ( $\approx 0,75 \cdot h$ ). Ein Wert zwischen den beiden Grenzwerten für den Stababstand und darauf abgestimmter Stabdurchmesser stellen ein gutes und realisierbares Ergebnis dar.

#### 4.4.3 Einfluß verschiedener Brettschichtholzgüten

Verwendet man nicht BS11, sondern BS14, BS16 oder BS18, ergibt sich durch das Rechenmodell ein kleinerer Gewindestangenabstand. Betrachtet man die resultierenden Spannungen, stellt man fest, daß sich die Holzquerzugspannungen nicht verändern, da die Dimensionierung der Verstärkung darauf aufbaut, die Holzquerzugspannungen auf den am Anfang gewählten Wert zu reduzieren. Die Stahlspannungen werden mit steigender Brettschichtholzgüte kleiner, da das Holz bei größerem  $E_{L,H}$  steifer wird und einen größeren Teil der Querzugkraft aufnehmen kann. Die Leimspannungen ändern sich genauso wie die Stahlspannungen, weil sie im Rechenmodell mit Gleichung (R8) aus den Spannungen im Stahl berechnet werden. Die prozentuale Änderung der Stahl- und Leimspannungen sind im übrigen völlig

unabhängig von der vorhandenen Trägerbreite, von der Trägerhöhe und vom Gewindestangendurchmesser.

## 4.5 Bemessung

### I) Bemessung des Trägers ohne Berücksichtigung der Querkzugnachweise

In der Regel sind folgende Nachweise zu führen:

1. Schubspannungsnachweis im Auflagerbereich
2. Längsspannungsnachweis im Firstbereich
3. Nachweis der angeschnittenen Fasern (bei Trägern mit veränderlicher Höhe)
4. Gebrauchstauglichkeitsnachweis (Durchbiegung)
5. Nachweis der vorhandenen Auflagerpressung
6. Stabilitätsnachweis (Kippen)

### II) Ermittlung des Gewindestangenabstands und -durchmessers

1. Ermittlung der **maximalen Querkzugspannung**

$$\max \sigma_{\perp} = \frac{M}{W} \cdot \frac{h}{4 \cdot r_m} \quad (\text{B1})$$

2. Ermittlung der **Verhältniszahl**  $\eta$  mit Gleichung (19)

$$\eta = 1 - \frac{2}{3} \cdot \text{zul} \sigma_{\perp, H} \cdot \frac{b \cdot h \cdot r_m}{M} \quad (\text{B2})$$

Wobei:  $b, h, r_m$  - Aus Abschnitt I vorhandene Trägergeometrie

$\text{zul} \sigma_{\perp, H}$  - Gewählte zulässige Holzquerkzugspannung

Für  $\text{zul} \sigma_{\perp, H}$  wird der Wert 0,15 N/mm<sup>2</sup> empfohlen

3. Ermittlung des **erforderlichen Gewindestababstands e**

Aus Gleichung (18) folgt

$$\frac{e}{A_{St}} = \frac{(1-\eta)}{\eta} \cdot \frac{E_{St}}{E_{\perp, H}} \cdot \frac{1}{b} \quad (\text{B3})$$

4. Nach Wahl eines Stabdurchmessers  $d_s$  (Durchmesser des Spannungsquerschnitts) folgt dann für den einzuhaltenden Gewindestababstand

$$e = \frac{(1-\eta)}{\eta} \cdot \frac{E_{st}}{E_{\perp,H}} \cdot \frac{d_s^2 \cdot \pi}{4 \cdot b} \quad (\text{B4})$$

### III) Nachweise

Das Rechenmodell beinhaltet drei Nachweise:

- Nachweis der Holzquerzugspannung im verstärkten Träger
- Nachweis der Spannung in den Gewindestangen
- Nachweis der Spannung in der Leimfuge zwischen Holz und Gewindestange

#### 1. Nachweis Holzquerzugspannung

Die Holzquerzugspannung  $\sigma_{\perp,H}$  errechnet man mit der weiter oben aufgestellten Gleichung

$$\sigma_{H,\perp,verh.} = (1-\eta) \cdot \max \sigma_{\perp} = (1-\eta) \cdot \frac{M}{W} \cdot \frac{h}{4 \cdot r_m} \leq \text{zul } \sigma_{\perp,H} \quad (\text{B8})$$

#### 2. Nachweis Stahlspannung:

Die Stahlspannung  $\sigma_{st}$  berechnet sich mit einer der folgenden Gleichungen:

$$\sigma_{st} = \frac{F_{st}}{A_{st}} = \frac{\eta \cdot e \cdot b \cdot \frac{M}{W} \cdot \frac{h}{r_m}}{d_s^2 \cdot \pi} \leq \text{zul } \sigma_{st} \quad (\text{B9})$$

oder 
$$\sigma_{st} = \frac{E_{st}}{E_{\perp,H}} \cdot \sigma_{\perp} \leq \text{zul } \sigma_{st} \quad (\text{B10})$$

#### 3. Nachweis Leimfugenspannung

Die Leimfugenspannung  $\tau_L$  berechnet man mit der folgenden Gleichung:

$$\tau_L = \frac{\max F_{\perp,st}}{l_g \cdot d \cdot \pi} = \frac{3 \cdot \eta \cdot e \cdot M}{2 \cdot h \cdot l_g \cdot d \cdot \pi \cdot r_m} \leq \text{zul } \tau_L \quad (\text{B11})$$

## 5 Versuche mit verstärkten, gekrümmten BS-Holz-Trägern zur Überprüfung des Rechenmodells

### 5.1 Allgemeines

Zur Überprüfung der in den Grundlagenversuchen (Abschnitt 2) ermittelten Einflüsse sowie des Rechenmodells (Abschnitt 4) wurden abschließend Versuche mit verstärkten Trägern aus BS-Holz durchgeführt. Bei den geprüften Trägern handelte es sich um Satteldachträger mit gekrümmten Untergurten ohne Firstkeil. Die Versuche dienten außerdem zur Kontrolle ob, die Dehnungen im Holz und in den Gewindestangen etwa gleich groß sind. Aus Kosten- und Zeitgründen wurde jedoch darauf verzichtet, die Gewindestangen mit Nuten zu versehen und Dehnungsmessstreifen (DMS) einzukleben. Es wurden ausschließlich Verformungen an der Bauteiloberfläche gemessen. Anschließend wurden die verstärkten Träger mit dem hier dargestellten Bemessungsvorschlag nachgerechnet und die Ergebnisse den Versuchsergebnissen gegenübergestellt.

### 5.2 Versuchsprogramm und -material

Es wurden insgesamt  $3 \times 2 = 6$  Versuche mit verstärkten Trägern durchgeführt. Die Geometrie der Versuchskörper wurde dabei so gewählt, daß der Quotient  $\frac{h_m}{R_m}$  konstant war (= 0,2). Die Belastung erfolgte durch zwei Einzellasten, so daß der gesamte gekrümmte Bereich querkraftfrei war und nur durch ein konstantes Moment beansprucht wurde.

Das Versuchsmaterial sowie die Herstellung der Träger war bei allen Versuchskörpern gleich :

- BS-Holz der Güteklasse II nach DIN 1052 (BS 11); Die Einzellamellen der Träger wurden aus der laufenden Produktion (mit maschineller Holzsortierung) eines BS-Holz-Herstellers entnommen und zu einem homogenen Träger mit Harnstoff verleimt.
- Gewindestangen mit metrischem Gewinde M20; Festigkeitsklasse 5.6; Die Güte der Gewindestangen wurde durch einen Zugversuch überprüft und bestätigt.
- Epoxydharz
- Dem Hersteller wurden keine weiteren Vorgaben zum Einbau der Gewindestangen mitgeteilt. Damit sollte eine möglichst praxisnahe Einleimmethode (Bohrlochdurchmesser, Arbeitsgänge des Einleimens) erzielt werden.

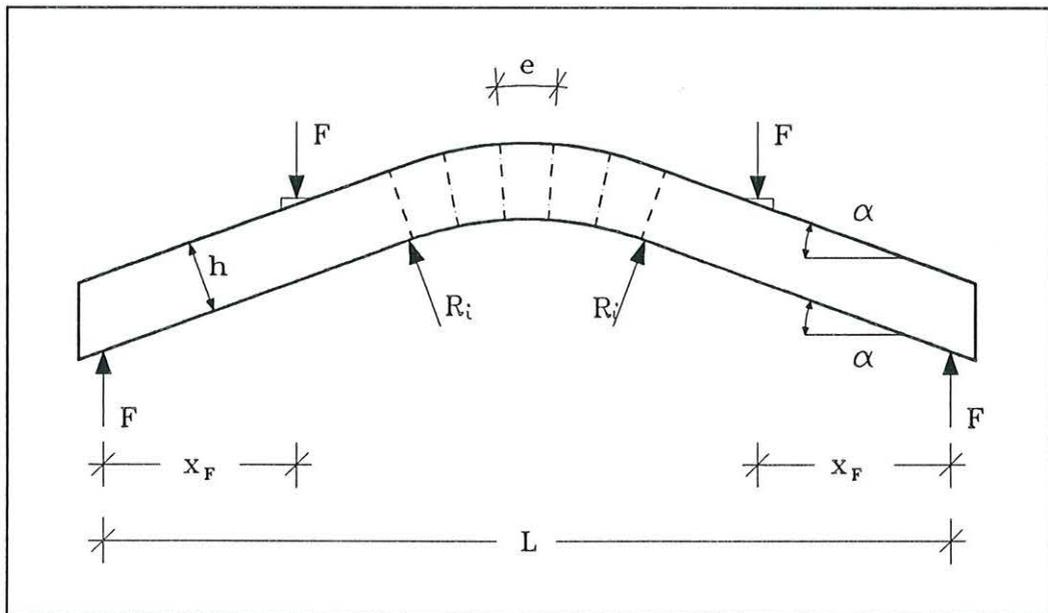
- An der Oberseite (Obergurt) wurde eine runde Unterlagscheibe 80/23/8 mm eingebaut.
- Bohrlochdurchmesser  $\varnothing$  20mm
- Einleimlänge  $l_g = h - 30\text{mm}$

Die Abmessungen und die Geometrie der Versuchskörper sind zusammen mit Angaben über die Verstärkungsmaßnahme in der **Tabelle 5-1** zusammengestellt.

**Tabelle 5-1 :** Abmessungen und Geometrie der Versuchskörper

Vers.- Bez.	Stütz- weite	Last- angriffs- punkt	Breite	Höhe	$\alpha$	Krüm- mungs- radius	$\frac{h_m}{R_m}$	Lamel- lendicke	Abstand der Ver- stärkung
	$L$	$x_F$	$b$	$h$		$R_m$		$a$	$e$
	[ m ]	[ cm ]	[ cm ]	[ cm ]	[ ° ]	[ cm ]	[ - ]	[ mm ]	[ cm ]
GV1	11,0	250	12	100	20	450,0	0,2	25	75
GV2	9,24	231	12	20	346,5	0,2	20	58	
GV3	6,36	159	12	53	20	238,5	0,2	15	40

Die Geometrie der Versuchskörper sowie Stützweiten und Lasteinleitungspunkte sind in **Bild 5-1** dargestellt.



**Bild 5-1 :** Geometrie der geprüften Träger

### 5.3 Versuchsaufbau und Lage der Meßeinrichtungen

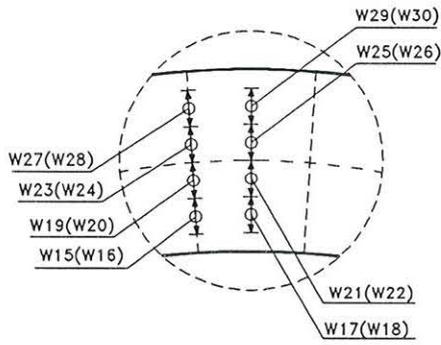
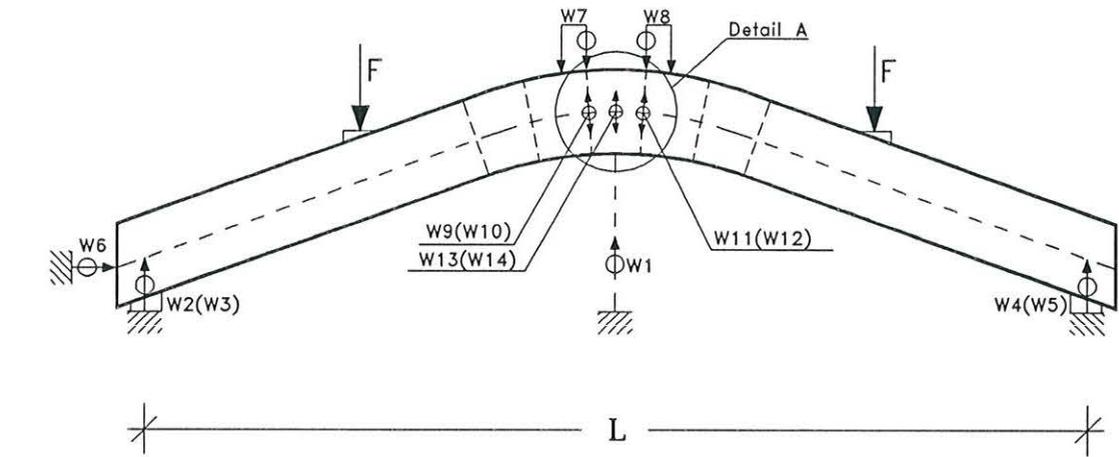
Wie bereits ausgeführt, wurde aus Kosten- und Zeitgründen darauf verzichtet, die Gewindestangen mit Nuten zu versehen und Dehnungsmeßstreifen (DMS) einzukleben. Es wurden deshalb ausschließlich Durchbiegungen und Dehnungen an der Bauteiloberfläche gemessen. Zur Erfassung der Meßdaten wurden folgende Meßeinrichtungen angeordnet :

- Kraftmessungen
  - Kolbenkraft der Prüfzylinder zur Lasteinleitung
  - Kraftmeßdosen zur Messung der Auflagerreaktionen
- Verformungsmessungen mit induktiven Wegaufnehmern

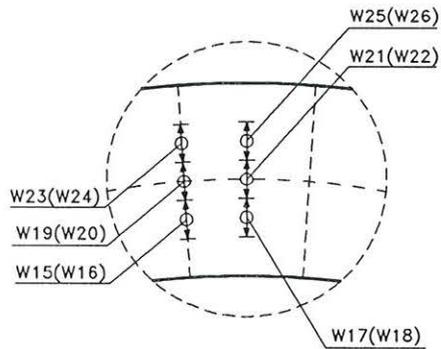
Die in (..) stehende Bezeichnung der Wegaufnehmer bezieht sich auf die Trägerrückseite.

- |   |                     |
|---|---------------------|
| • Gesamtdurchbiegung des Trägers  | W1                  |
| • vertikale Auflagerverformungen links/rechts   | W2(W3) / W4(W5)     |
| • horizontale Auflagerverschiebung  | W6                  |
| • Eindrückung der Unterlagscheibe an der Trägeroberkante links/rechts                   | W7 / W8             |
| • Dehnung auf der Systemlinie (Meßlänge 20mm) über der Gewindestange links/rechts       | W9(W10) / W11(W12)  |
| • Dehnung auf der Systemlinie (Meßlänge 20mm) zwischen den Gewindestangen (Trägermitte) | W13(W14)            |
| • Dehnung über der Gewindestange links/Trägermitte (Meßlänge 200mm; 1. Reihe von unten) | W15(W16) / W17(W18) |
| • Dehnung über der Gewindestange links/Trägermitte (Meßlänge 200mm; 2. Reihe von unten) | W19(W20) / W21(W22) |
| • Dehnung über der Gewindestange links/Trägermitte (Meßlänge 200mm; 3. Reihe von unten) | W23(W24) / W25(W26) |
| • Dehnung über der Gewindestange links/Trägermitte (Meßlänge 200mm; 4. Reihe von unten) | W27(W28) / W29(W30) |

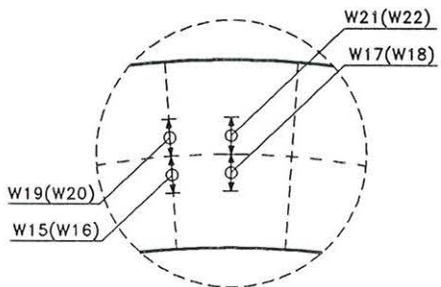
Die Lage aller Wegaufnehmer ist auf der folgenden Seite in **Bild 5-2** dargestellt.



Wegaufnehmer der Versuchsreihe GV1



Wegaufnehmer der Versuchsreihe GV2



Wegaufnehmer der Versuchsreihe GV3

**Bild 5-2 :** Lage und Bezeichnung der Wegaufnehmer

## 5.4 Versuchsdurchführung

Die Lagerung der Versuchskörper und Durchführung der Versuche erfolgte im Prüflabor bei Normalklima DIN 50014 - 20/65-2.

Die Versuche wurden mit 1,5 mm/min weggesteuert bis zum Erreichen der Höchstlast gefahren.

Die Versuchsdauer betrug ca. 15 Minuten.

## 5.5 Ergebnisse und Auswertung der Bauteilversuche

Als Ergebnisse liegen für alle durchgeführten Versuche die Bruchlast  $F_u$ , die relative Durchbiegung in Trägermitte  $v$ , die Horizontalverschiebung  $u$ , die Eindrückung der Unterlagscheiben  $w$  sowie die Dehnungen  $\varepsilon$  in Abhängigkeit von der Versuchslast  $F$  vor. Diese Ergebnisse sind in Diagrammform in den **Anlagen 5-1 bis 5-17** zusammengestellt. Dafür wurde bei Meßstellen auf der Vorder- und Rückseite des Trägers immer der Mittelwert gebildet.

Die relative Durchbiegung in Trägermitte  $v$  wird bestimmt aus der absoluten Durchbiegung ( $W1$ ) abzüglich dem Mittelwert der vertikalen Auflagerverformungen ( $W2$  bis  $W5$ ):

$$v = W1 - \left( \frac{W2 + W3 + W4 + W5}{4} \right)$$

Der E-Modul des Trägers wird näherungsweise im linear-elastischen Bereich aus der relativen Durchbiegung in Trägermitte  $v$  und der Versuchslast  $F$  bestimmt.

Zur Bestimmung der Dehnungen  $\varepsilon$  werden die gemessenen Verformungen auf die jeweilige Meßlänge bezogen und in ‰ angegeben.

Aus allen Kraft-Dehnungs-Diagrammen ist zu entnehmen, daß die Annahme gleicher Dehnungen über und zwischen den Gewindestangen bestätigt wird.

Die wichtigsten Versuchsergebnisse sind in **Tabelle 5-2** zusammengestellt.

**Tabelle 5-2 : Versuchsergebnisse**

Kenngröße		Dimen- sion	Versuch					
			GV1A	GV1B	GV2A	GV2B	GV3A	GV3B
Bruchlast	$F_u$	[ kN ]	199,1	195,0	153,5	152,5	124,7	111,6
Mittelwert	$F_{u,m}$	[ kN ]	197,05		153,00		118,15	
Biegespannung	$\sigma_{B,u}$	[ N/mm <sup>2</sup> ]	24,9	24,4	29,9	29,7	35,3	31,6
Mittelwert	$\sigma_{B,u,m}$	[ N/mm <sup>2</sup> ]	24,65		29,80		33,45	
rechn. Querkzugspannung	$\sigma_{\perp,u}$	[ N/mm <sup>2</sup> ]	1,24	1,22	1,50	1,49	1,77	1,58
Mittelwert	$\sigma_{\perp,u,m}$	[ N/mm <sup>2</sup> ]	1,23		1,50		1,68	
Schubspannung	$\tau_{Q,u}$	[ N/mm <sup>2</sup> ]	2,5	2,4	2,5	2,5	2,9	2,6
Mittelwert	$\tau_{Q,u,m}$	[ N/mm <sup>2</sup> ]	2,45		2,50		2,75	
Bruchursache			Q	Q	Q	S	KZ	Q
Bruchursachen :								
Q - Querkzugversagen								
S - Schubversagen								
KZ - Versagen einer Keilzinkenverbindung in der untersten Lamelle								

## 6 Vergleich der Versuchsergebnisse mit dem Rechenmodell

### 6.1 Biege- und Schubspannungsnachweis

Der Vergleich des Rechenmodells mit den Versuchsergebnissen wird auf der Grundlage des "alten" Sicherheitskonzeptes geführt. Dazu wird, ausgehend von den geprüften Trägerabmessungen, aus den zulässigen Beanspruchungen für den Biegespannungsnachweis (Biegemoment) und den Schubspannungsnachweis (Querkraft) das maximal zulässige Biegemoment bei der vorgegebenen Belastungsanordnung bestimmt (s. Tabelle 6-1).

**Tabelle 6-1 :** maximal zulässige Momente und daraus berechnete Querkzugspannung im Holz

		Versuchsreihe		
		GV1	GV2	GV3
max. Moment aus zul $\sigma_B$	[kNm]	201,1	119,2	56,4
max. Moment aus zul $\tau_Q$	[kNm]	240,0	170,8	80,9
rechn. Querkzugspannung $\sigma_L$	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,505		

### 6.2 Nachweis der Verstärkungsmaßnahme

Für die Auswertung und den Vergleich mit dem Rechenmodell werden aus den jeweiligen Trägerabmessungen mit

$$\eta = \frac{1}{\frac{E_{\perp,H}}{E_{St}} \cdot \frac{b \cdot e}{A_{St}} + 1}$$

die Verhältniszahlen der einzelnen Versuche bestimmt.

Dann werden für die nach DIN 1052-1 bzw. dem Vorschlag in diesem Bericht zulässigen Spannungen im Holz, Stahl und der Leimverbindung das zulässige Moment berechnet.

Dazu dienen die folgenden Gleichungen :

$$\text{Holz:} \quad M_{zul\_H} = \frac{2 \cdot zul\sigma_{\perp H} \cdot b \cdot h \cdot r_m}{3 \cdot (1 - \eta)}$$

$$\text{Stahl:} \quad M_{zul\_St} = \frac{2 \cdot zul\sigma_{St} \cdot A_{St} \cdot h \cdot r_m}{3 \cdot e \cdot \eta}$$

$$\text{Leim:} \quad M_{zul\_L} = \frac{2 \cdot zul\tau_{Leim} \cdot h \cdot r_m \cdot l_g \cdot d \cdot h}{3 \cdot e \cdot \eta}$$

Dabei werden die zulässigen Werte für die Leimverbindung bestimmt mit dem charakteristischen Wert nach Abschnitt 2 geteilt durch einen globalen Sicherheitsbeiwert von  $\nu = 2,28$ . In Anlehnung an das NAD zu Eurocode 5 gilt für  $\nu$  :

$$\nu = \frac{\gamma_F}{\frac{k_{mod}}{\gamma_m}} = \frac{1,4}{\frac{0,8}{1,3}} = 2,28$$

Daraus ergibt sich als das maßgebende zulässige Moment nach dem Rechenmodell als kleinste Wert der drei oben berechneten Werte  $M_{zul}$ . Aus den Bruchlasten der Versuche und den Angaben zum Lastangriff werden die in den Versuchen wirksamen Bruchmomente ermittelt. Der vorhandene Sicherheitsbeiwert bei Verwendung des Rechenmodells ergibt sich aus dem Quotienten von Bruchmoment/zulässiges Moment,  $M_u / M_{zul}$ . Diese Auswertung ist in der nachfolgenden Tabelle 6-2 mit den wichtigsten Zwischenergebnissen zusammengestellt.

Wie aus der Tabelle ersichtlich, wird nur für die Versuchsreihe GV1 der Nachweis der Verstärkung maßgebend (Nachweis 1, Holzquerzug). Bei den beiden anderen Versuchsreihen wird wegen dem höher gewählten Bewehrungsgrad  $\eta$  die Biege-längsspannung maßgebend.

Es ergab sich im Mittel ein Quotient  $M_u / M_{zul}$  von 2,9.

Läßt man im Rechenmodell - wie empfohlen - nur eine Holzquerzugspannung von  $zul\sigma_{\perp H} = 0,15 \text{ N/mm}^2$  zu, erhöht sich dieser Wert auf etwa 3,33. Dann wird bei den Versuchsreihen GV1 und GV2 der Nachweis der Verstärkung maßgebend (Nachweis 1, Holzquerzug), und zwar die Spannungen im Holz.

**Tabelle 6-2 : Auswertung der Versuche**

Kenngröße	Dimen- sion	Versuch					
		GV1A	GV1B	GV2A	GV2B	GV3A	GV3B
geometrische Größen		siehe <b>Tabelle 5-1</b>					
Einleimlänge $l_g$	[ mm ]	970		740		500	
zul. Leimspannung	[ N/mm <sup>2</sup> ]	0,89		1,02		1,24	
zul. $\sigma_{L,H}$	[ N/mm <sup>2</sup> ]	0,20					
E-Modul Holz $E_{H,\perp}$	[ N/mm <sup>2</sup> ]	380					
E-Modul Stahl $E_{St}$	[ N/mm <sup>2</sup> ]	210 000					
Bewehrungsgrad $\eta$	[ - ]	0,601		0,660		0,738	
maßg $M_{zul}$ (Tab 6-1)	[ kNm ]	201,1		<b><u>119,2</u></b>		<b><u>56,4</u></b>	
$M_{zul,H}$	[ kNm ]	<b><u>200,3</u></b>		139,7		85,8	
$M_{zul,St}$	[ kNm ]	271,9		189,6		116,5	
$M_{zul,Leim}$	[ kNm ]	409,6		251,3		128,5	
Bruchlast $F_u$	[ kN ]	199,1	195,0	153,5	152,5	124,7	111,6
Bruchmoment $M_u$	[ kNm ]	497,8	487,5	354,8	352,3	198,3	177,4
Quotient $\nu$	[ - ]	2,48	2,43	2,98	2,96	3,52	3,15

Das Rechenmodell und die Verstärkung der Träger nach dieser Methode stellen damit eine zuverlässige Methode zur Verstärkung gekrümmter Brettschicht-holzträger dar.

## 7 Zusammenfassung

In gekrümmten BS-Holz-Trägern sowie bei Verstärkungen von Trägersausklinkungen und Trägerdurchbrüchen werden die Querkraftkräfte, die durch Umlenkungen der inneren Kräfte entstehen, indirekt in die zur Verstärkung eingeleimten Gewindestangen eingetragen.

Ziel des Forschungsvorhabens war es, ein Rechenmodell zur Beschreibung der Wirkungsweise von eingeleimten Gewindestangen in verstärkten gekrümmten BS-Holz-Trägern zu entwickeln. Neben ergänzenden Grundlagenversuchen zur Bestimmung der Haftfestigkeit von rechtwinklig zur Faserrichtung eingebrachten, axial beanspruchten Gewindestangen wurden dazu auch Bauteilversuche sowohl mit ausgeklinkten als auch mit gekrümmten BS-Holz-Trägern durchgeführt.

Mit den Grundlagenversuchen wurden bereits vorhandene Versuchsergebnisse durch weitere Versuchsreihen ergänzt. Im Besonderen wurden erstmalig geringere Einleimlängen ( $30 \div 240$  mm) geprüft und insgesamt 321 Versuche durchgeführt. Die Untersuchungen beschränkten sich entsprechend der Zielsetzung des Forschungsvorhabens auf rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes eingebrachte Gewindestangen bei Verwendung unterschiedlicher Leime und Gewindestangen unterschiedlicher Stahlsorten, Durchmesser und Gewindeausbildungen. Die Versuchsergebnisse zeigen, daß es möglich und sinnvoll ist, sowohl unterschiedliche Leimarten als auch unterschiedliche Gewindestangen in einer Bemessungsgleichung zusammenzufassen. Zur Beschreibung des Tragverhaltens wird die von RIBERHOLT und JOHANSSON gefundene Beziehung in modifizierter Form benutzt.

Die Ergebnisse der Bauteilversuche mit ausgeklinkten BS-Holz-Trägern zeigen trotz der geringen Anzahl von Versuchen, daß die Ausklinkungen im Widerspruch zu den Erläuterungen der DIN 1052 ohne Ausrundung ausgeführt werden können. Die aus den Versagenslasten ermittelten Haftfestigkeiten stimmen sehr gut mit den im Teil 1 dieses Forschungsberichtes in den Grundlagenversuchen gefundenen Werten überein.

Es gibt bisher keine allgemein anwendbaren Bemessungsverfahren, die das Tragverhalten von, als Verstärkungsmaßnahme eingeleimten Gewindestangen beschreibt. Ein Ziel des Forschungsvorhabens war es deshalb, ein Verfahren zu entwickeln, mit dem die maximalen Querspannungen im verstärkten Träger abgeschätzt

werden können und danach ein Bemessungsverfahren für die Verstärkungen zu entwickeln. Zur Beschreibung des Tragverhaltens wurde ein mechanischer Ansatz gewählt, in dem angenommen wird, daß die Dehnungen im Holz und in den Gewindestangen gleich groß sind. Dieser Ansatz, der bereits von BRÜNINGHOFF und SCHMIDT (1991) gewählt wurde, hat den Vorteil, daß der Einfluß jeder mechanischen oder geometrischen Kenngröße direkt erkennbar ist.

Das entwickelte Verfahren ermöglicht es, abhängig von der gewählten Festigkeitsklasse des Holzes und der Gewindestange, der Einleimlänge und der vom Anwender gewählten zulässigen Holzquerzugspannung die Verstärkung zu dimensionieren.

Die sechs abschließend durchgeführten Versuche ergaben den Quotienten von Bruchmoment/zulässiges Moment,  $M_u / M_{zul}$  von im Mittel 2,9. Das Rechenmodell und die Verstärkung der Träger nach dieser Methode stellen damit eine zuverlässige Methode zur Verstärkung gekrümmter Brettschichtholzträger dar.

## 8 Literatur

BRÜNINGHOFF, H. und SCHMIDT, K. (1991). Praxisnahe Empfehlungen zur Reduzierung von Quersugrissen bei geleimten Satteldachträgern aus Brettschichtholz. Lehr- und Forschungsgebiet Ingenieurholzbau, Bergische Universität Wuppertal; unveröffentlicht.

EHLBECK, J., BELCHIOR-GASPARD, P. und GEROLD, M. (1992). Eingeleimte Gewindestangen unter Axialbelastung bei Übertragung von Kräften und bei Aufnahme von Quersugkräften in Biegeträgern. Teil 2: Einfluß von Klimaeinwirkungen und Langzeitbelastung. Forschungsbericht, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe (TH).

EHLBECK, J und EHRHARDT, W. (1994). Ermittlung der Tragfähigkeit von eingeleimten Gewindestangen nach Langzeitbelastung. Forschungsbericht, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe (TH).

EHLBECK, J. und SIEBERT, W. (1987). Praktikable Einleimmethoden und Wirkungsweise von eingeleimten Gewindestangen unter Axialbelastung bei Übertragung von großen Kräften und bei Aufnahme von Quersugkräften in Biegeträgern. Teil 1: Einleimmethoden, Meßverfahren, Haftspannungsverlauf. Forschungsbericht, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe (TH).

HEISER, M. (1996). Eingeleimte Gewindestangen als Verstärkungsmaßnahme bei Satteldachbindern aus BS-Holz unter Momentenbelastung. Vertieferarbeit, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe (TH); unveröffentlicht.

JOHANSSON, C.J. (1995). Eingeleimte Stäbe. Kapitel C14, STEP 1, Bemessung und Baustoffe, Informationsdienst Holz.

MISTLER, H.-L. (1979). Die Tragfähigkeit des am Endauflager unten rechtwinklig ausgeklügelten Brettschichtträgers. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH).

MÖHLER, K. und HEMMER, Kl. (1981). Eingeleimte Gewindestangen. Holzbau-Statik-Aktuell, Folge 6: 4-6.

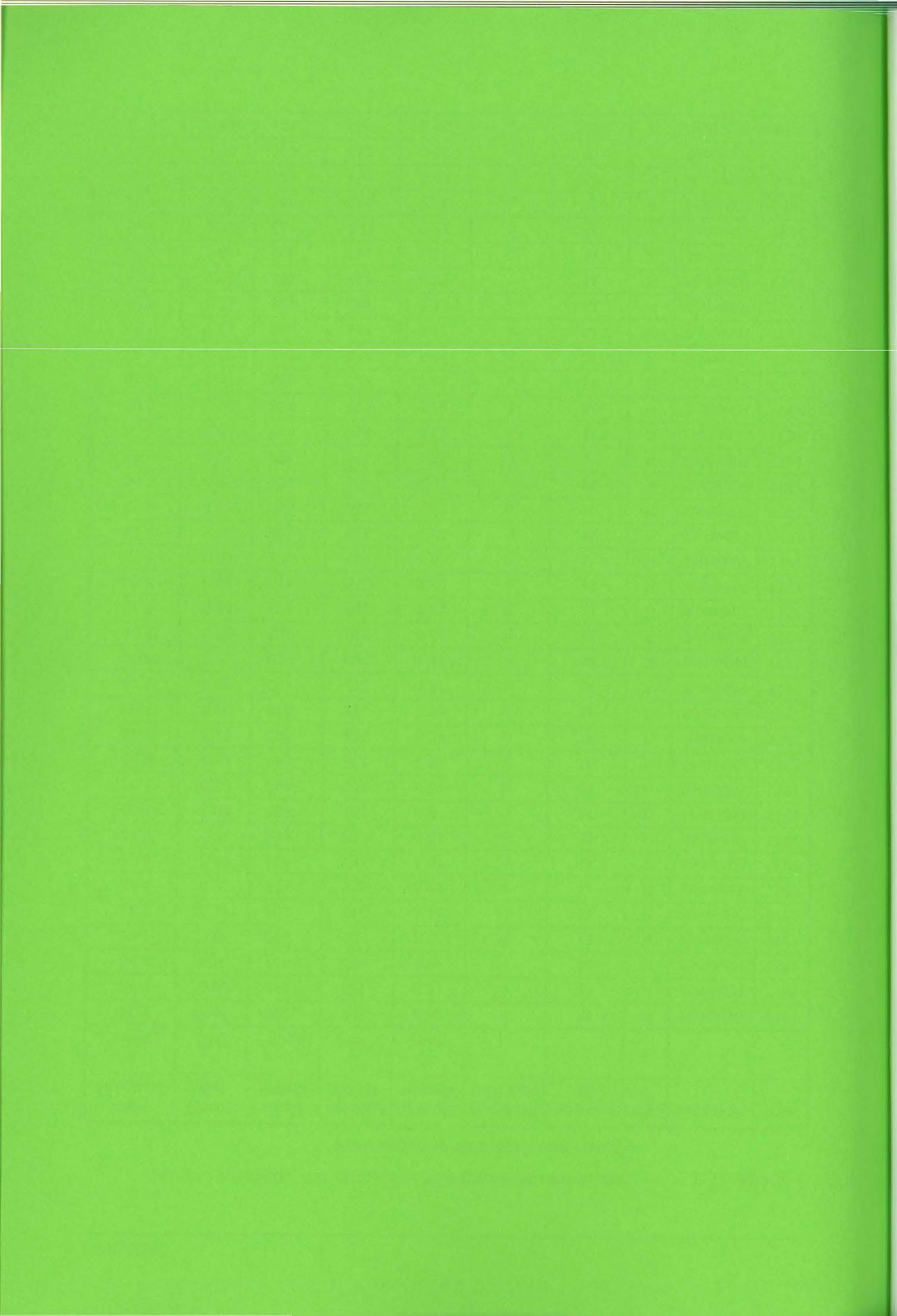
MÖHLER, K. und MISTLER, H.-L. (1978). Ausklügelungen am Endauflager von Biegeträgern. Holzbau-Statik-Aktuell, Folge 4: 5-6.

MÖHLER, K. und SIEBERT, W. (1983). Erhöhung der Querkrafttragfähigkeit in gefährdeten Bereichen. Forschungsbericht, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe (TH).

RIBERHOLT, H. (1988). Glued Bolts in Glulam - Proposals for CIB Code. CIB W18 Meeting. Parksville, Vancouver Island, Canada. Paper 21-7-2.

ROTH, W. und LÖBER, R. (1987). Rechnerische Ermittlung der Querkraftbewehrung symmetrischer, satteldachförmiger BSH-Träger mit gekrümmter Unterseite nach Vincent/Gopu unter Beachtung der DIN 1052. Holz als Roh- und Werkstoff 45: 251-254.

VINCENT, T.A. und GOPU, V.K.A. (1985). Rational design of radial reinforcement in pitch-cambered glulam beams. Forest Products Journal, Vol. 35, No. 1: 61-67.



**Tabelle A2-1 : Zusammenstellung der Versuche mit spröden Leimen**  
(Daten aus Literatur entnommen)

Jahr	Forscher	Leim	Stangen- typ	Richtung zum Holz	Durch-	Einleim-	Roh-	Bruch-	Haft-
					d [mm]	länge $l_g$ [mm]	dichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	last $F_U$ [kN]	festigkeit $\tau$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1977	Riberholt	R	M	r	15,8	156	525	56,1	7,24
1977	Riberholt	R	M	r	15,8	155	546	56,6	7,36
1977	Riberholt	R	M	r	15,8	160	491	54,0	6,80
1977	Riberholt	R	M	r	15,8	322	470	48,8	3,05
1977	Riberholt	R	M	r	15,8	318	528	115,5	7,32
1977	Riberholt	R	M	r	15,8	322	459	78,0	4,88
1977	Riberholt	R	M	p	15,8	150	394	52,0	6,98
1977	Riberholt	R	M	p	15,8	155	584	57,8	7,51
1977	Riberholt	R	M	p	15,8	155	585	58,7	7,63
1977	Riberholt	R	M	p	15,8	152	449	52,9	7,01
1977	Riberholt	R	M	p	15,8	155	440	48,5	6,30
1977	Riberholt	R	M	p	15,8	315	381	68,8	4,40
1977	Riberholt	R	M	p	15,8	315	435	75,9	4,85
1977	Riberholt	R	M	p	15,8	315	492	79,7	5,10
1977	Riberholt	R	M	p	15,8	320	469	79,4	5,00
1977	Riberholt	R	M	p	15,8	320	502	80,9	5,09
1977	Riberholt	R	M	p	23,8	242	512	112,0	6,19
1977	Riberholt	R	M	p	23,8	248	478	110,5	5,96
1977	Riberholt	R	M	p	23,8	243	458	86,0	4,73
1977	Riberholt	R	M	p	23,8	255	458	109,0	5,72
1977	Riberholt	R	M	p	23,8	238	446	111,8	6,28
1977	Riberholt	R	M	p	23,8	482	434	165,0	4,58
1977	Riberholt	R	M	p	23,8	473	469	179,3	5,07
1977	Riberholt	R	M	p	23,8	484	445	168,3	4,65
1977	Riberholt	R	M	p	23,8	475	468	180,0	5,07
1977	Riberholt	R	M	p	23,8	480	456	193,2	5,38
1977	Riberholt	R	M	p	15,8	142	402	37,6	5,33
1977	Riberholt	R	M	p	15,8	149	589	42,9	5,80
1977	Riberholt	R	M	p	15,8	146	436	37,5	5,17
1977	Riberholt	R	M	p	15,8	147	468	39,0	5,34
1977	Riberholt	R	M	p	15,8	149	423	48,4	6,54
1983	Riberholt	A	M	p	40,0	500	493	281,0	4,47
1986	Riberholt	A	M	p	20,0	290	483	79,0	4,34
1986	Riberholt	A	M	p	20,0	294	494	82,0	4,44
1986	Riberholt	A	M	p	20,0	297	450	99,5	5,33
1986	Riberholt	A	M	p	20,0	297	427	88,5	4,74

**Tabelle A2-1 : Zusammenstellung der Versuche mit spröden Leimen**  
(Daten aus Literatur entnommen)

Jahr	Forscher	Leim	Stangen- typ	Richtung zum Holz	Durch- messer	Einleim- länge	Roh- dichte	Bruch- last	Haft- festigkeit
					d [mm]	l <sub>g</sub> [mm]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>U</sub> [kN]	τ [N/mm <sup>2</sup> ]
1986	Riberholt	A	M	p	20,0	293	461	90,0	4,89
1986	Riberholt	A	M	p	20,0	296	448	96,5	5,19
1986	Riberholt	A	M	p	20,0	293	528	86,0	4,67
1986	Riberholt	A	M	p	20,0	294	450	99,0	5,36
1986	Riberholt	A	M	p	20,0	293	415	80,0	4,35
1986	Riberholt	A	M	p	20,0	293	484	89,0	4,83
1986	Riberholt	A	M	p	12,0	172	492	49,6	7,65
1986	Riberholt	A	M	p	12,0	176	458	47,7	7,19
1986	Riberholt	A	M	p	12,0	170	493	44,2	6,90
1986	Riberholt	A	M	p	12,0	171	459	43,0	6,67
1986	Riberholt	A	M	p	12,0	173	457	40,8	6,26
1986	Riberholt	A	M	p	12,0	173	469	42,1	6,46
1986	Riberholt	A	M	p	12,0	172	481	42,3	6,52
1986	Riberholt	A	M	p	12,0	175	459	43,4	6,58
1986	Riberholt	A	M	p	12,0	172	457	40,2	6,20
1986	Riberholt	A	M	p	12,0	175	513	46,2	7,00
1981	Mö/He	R	M	p	16,0	160	440	42,6	5,30
1981	Mö/He	R	M	p	16,0	160	440	45,1	5,61
1981	Mö/He	R	M	p	16,0	160	440	32,0	3,98
1981	Mö/He	R	M	p	16,0	160	440	48,4	6,02
1981	Mö/He	R	M	p	16,0	160	440	42,0	5,22
1981	Mö/He	R	M	p	16,0	160	440	48,4	6,02
1981	Mö/He	R	M	p	16,0	160	440	45,3	5,63
1981	Mö/He	R	M	p	16,0	160	440	32,6	4,05
1981	Mö/He	R	M	p	16,0	160	440	47,6	5,92
1981	Mö/He	R	M	p	16,0	160	440	43,6	5,42
1981	Mö/He	R	M	p	16,0	160	440	43,2	5,37
1981	Mö/He	R	M	p	16,0	160	440	38,7	4,81
1981	Mö/He	R	M	p	16,0	160	440	39,4	4,90
1981	Mö/He	R	M	p	16,0	160	440	31,6	3,93
1981	Mö/He	R	M	p	16,0	256	440	77,0	5,98
1981	Mö/He	R	M	p	16,0	256	440	62,5	4,86
1981	Mö/He	R	M	p	16,0	256	440	62,0	4,82
1981	Mö/He	R	M	p	16,0	256	440	57,6	4,48
1981	Mö/He	R	M	p	30,0	300	440	78,4	2,77
1981	Mö/He	R	M	p	30,0	300	440	100,0	3,54

**Tabelle A2-1 : Zusammenstellung der Versuche mit spröden Leimen**  
(Daten aus Literatur entnommen)

Jahr	Forscher	Leim	Stangen- typ	Richtung zum Holz	Durch- messer	Einleim- länge	Roh- dichte	Bruch- last	Haft- festigkeit
					d [mm]	$l_g$ [mm]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$F_U$ [kN]	$\tau$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1981	Mö/He	R	M	p	30,0	300	440	98,5	3,48
1981	Mö/He	R	M	p	30,0	300	440	100,0	3,54
1981	Mö/He	R	M	r	16,0	160	440	43,8	5,45
1981	Mö/He	R	M	r	16,0	160	440	45,0	5,60
1981	Mö/He	R	M	r	16,0	160	440	25,7	3,20
1981	Mö/He	R	M	r	16,0	160	440	36,7	4,56
1981	Mö/He	R	M	r	16,0	160	440	25,4	3,16
1981	Mö/He	R	M	r	16,0	160	440	40,7	5,06
1981	Mö/He	R	M	r	16,0	256	440	63,7	4,95
1981	Mö/He	R	M	r	16,0	256	440	49,2	3,82
1981	Mö/He	R	M	r	30,0	300	440	80,7	2,85
1981	Mö/He	R	M	r	30,0	300	440	81,7	2,89
1987	Eh/Sb	R	M	r	16,0	140	440	36,2	5,14
1987	Eh/Sb	R	M	p	16,0	150	440	36,0	4,77
1987	Eh/Sb	R	M	p	20,0	300	440	98,6	5,23
1987	Eh/Sb	R	G	r	26,5	500	440	130,0	3,12
1987	Eh/Sb	R	G	r	26,5	750	440	100,0	1,60
1987	Eh/Sb	R	G	r	26,5	750	440	166,0	2,66
1987	Eh/Sb	R	G	r	26,5	1000	440	217,0	2,61
1987	Eh/Sb	R	G	r	32,0	750	440	230,0	3,05
1987	Eh/Sb	R	G	r	32,0	1000	440	319,0	3,17

Jahr : Jahr der Veröffentlichung  
Forscher : Eh = Ehlbeck  
He = Hemmer  
Mö = Möhler  
Sb = Siebert  
Leim : A = Aralditleim  
E = Epoxidharzleim  
PU = Zweikomponenten-Polyurethanleim  
R = Phenol-Resorcinharzleim  
Stangentyp : o = ohne Leim (nur Holzschrauben)  
G = Gewindestab (Gewi-Stab)  
M = Metrisches Gewinde  
S = Holzschraube  
Richtung zum Holz : p = Gewindestab parallel zur Faserrichtung des Holzes  
r = Gewindestab senkrecht zur Faserrichtung des Holzes  
Durchmesser : Nenndurchmesser Gewindestange/Gewindestab/Holzschraube  
Rohdichte : Normal-Rohdichte bei 20°/65%;  $u \approx 12\%$   
Haftfestigkeit : mittlere Haftfestigkeit nach Abschnitt 2.3

**Tabelle A2-2 : Zusammenstellung der Versuche mit nichtspröden Leimen  
(Daten aus Literatur entnommen)**

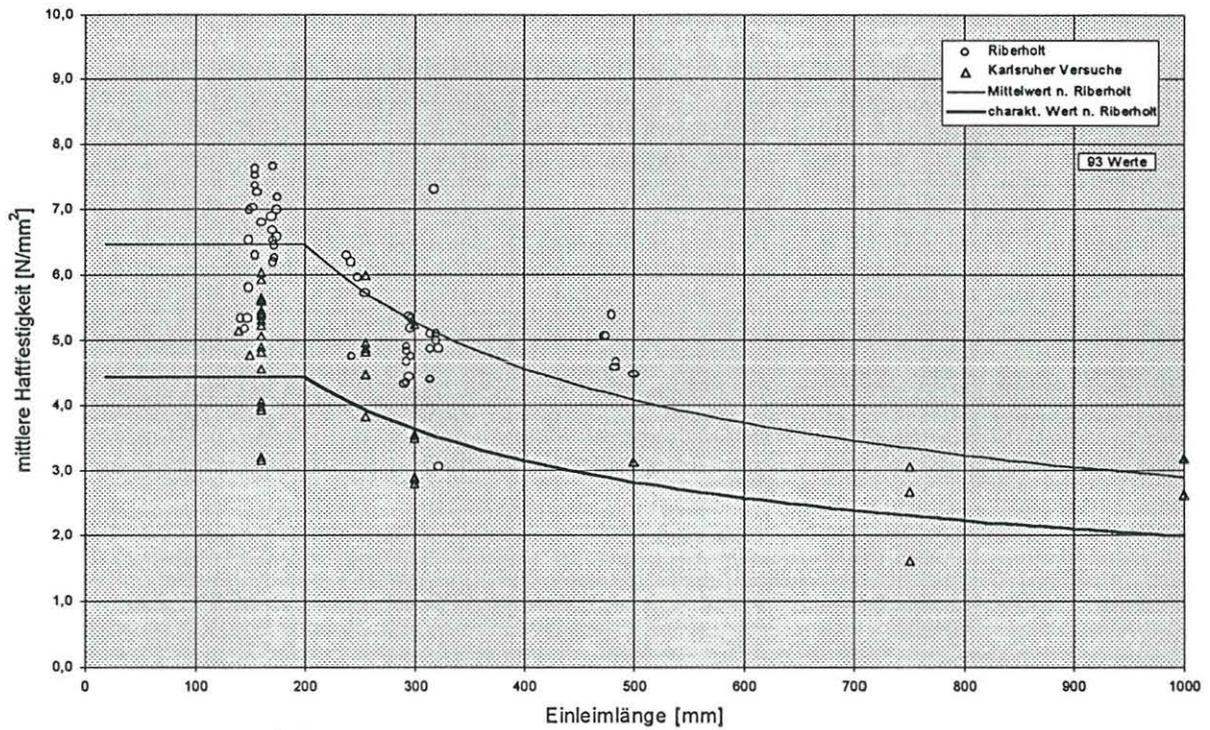
Jahr	Forscher	Leim	Stangen- typ	Richtung zum Holz	Durch- messer	Einleim- länge	Roh- dichte	Bruch- last	Haft- festigkeit
					d [mm]	l <sub>g</sub> [mm]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>U</sub> [kN]	τ [N/mm <sup>2</sup> ]
1986	Riberholt	PU	M	p	20,0	195	358	83,0	6,77
1986	Riberholt	PU	M	p	20,0	195	358	83,0	6,77
1986	Riberholt	PU	M	p	20,0	190	349	84,0	7,04
1986	Riberholt	PU	M	p	20,0	192	443	96,0	7,96
1986	Riberholt	PU	M	p	20,0	186	358	87,0	7,44
1986	Riberholt	PU	M	p	20,0	185	418	75,0	6,45
1986	Riberholt	PU	M	p	20,0	298	431	117,5	6,28
1986	Riberholt	PU	M	p	20,0	293	450	141,0	7,66
1986	Riberholt	PU	M	p	20,0	294	417	132,5	7,17
1986	Riberholt	PU	M	p	20,0	287	460	110,0	6,10
1986	Riberholt	PU	M	p	20,0	291	420	115,5	6,32
1986	Riberholt	PU	M	p	20,0	300	418	102,0	5,41
1986	Riberholt	PU	M	p	20,0	299	299	95,0	5,06
1986	Riberholt	PU	M	p	20,0	300	290	100,0	5,31
1986	Riberholt	PU	M	p	20,0	300	309	93,0	4,93
1986	Riberholt	PU	M	p	20,0	297	409	140,0	7,50
1986	Riberholt	PU	M	p	20,0	295	431	101,0	5,45
1986	Riberholt	PU	M	p	20,0	297	423	125,0	6,70
1986	Riberholt	PU	M	p	20,0	290	503	131,0	7,19
1986	Riberholt	PU	M	p	20,0	295	412	120,5	6,50
1986	Riberholt	PU	M	p	20,0	295	415	119,0	6,42
1986	Riberholt	PU	M	p	20,0	505	380	155,0	4,88
1986	Riberholt	PU	M	p	20,0	502	371	125,0	3,96
1986	Riberholt	PU	M	p	20,0	502	427	152,5	4,83
1986	Riberholt	PU	M	p	20,0	505	406	156,5	4,93
1986	Riberholt	PU	M	p	20,0	502	428	155,0	4,91
1986	Riberholt	PU	M	p	12,0	160	429	56,5	9,37
1986	Riberholt	PU	M	p	12,0	167	411	46,7	7,42
1986	Riberholt	PU	M	p	12,0	166	420	47,4	7,57
1986	Riberholt	PU	M	p	12,0	173	451	49,2	7,54
1986	Riberholt	PU	M	p	12,0	174	461	49,4	7,53
1986	Riberholt	PU	M	p	12,0	167	451	48,5	7,70
1986	Riberholt	PU	M	p	12,0	165	411	42,5	6,83
1986	Riberholt	PU	M	p	12,0	165	421	49,0	7,88
1986	Riberholt	PU	M	p	12,0	166	440	52,5	8,39
1986	Riberholt	PU	M	p	12,0	165	411	45,0	7,23

**Tabelle A2-2 : Zusammenstellung der Versuche mit nichtspröden Leimen**  
**Fortsetzung (Daten aus Literatur entnommen)**

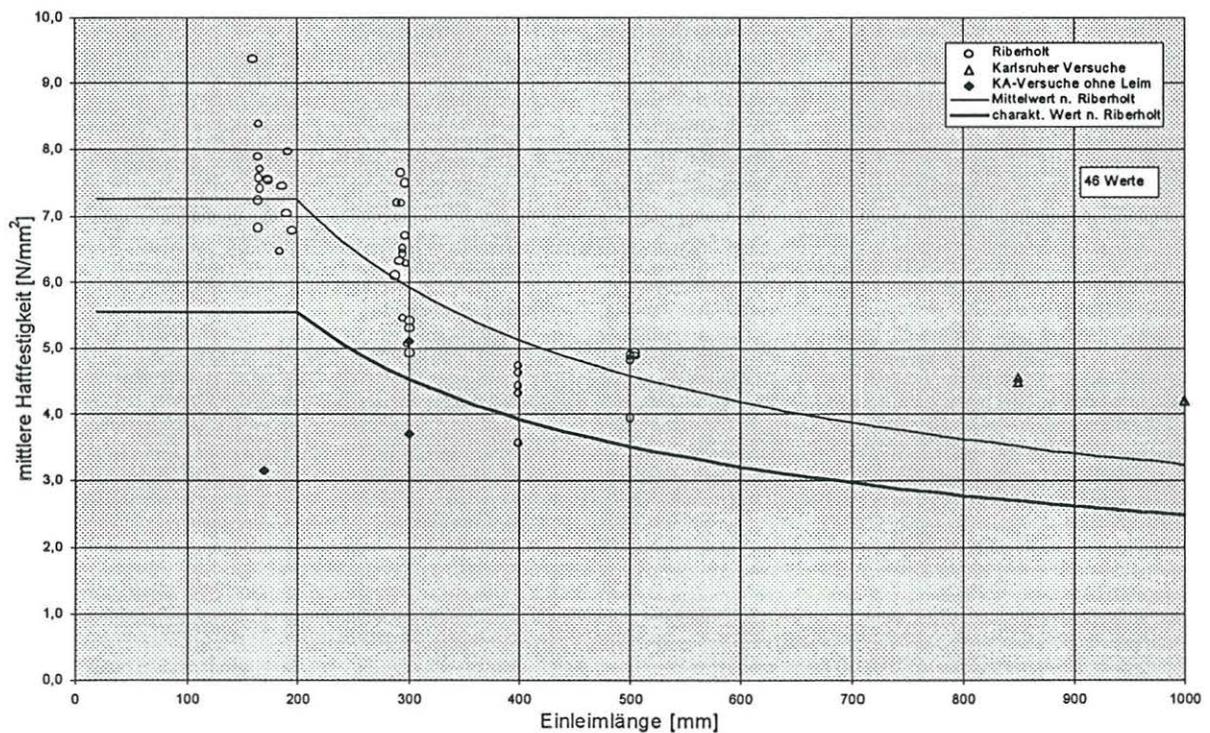
Jahr	Forscher	Leim	Stangen- typ	Richtung zum Holz	Durch- messer	Einleim- länge	Roh- dichte	Bruch- last	Haft- festigkeit
					d [mm]	l <sub>g</sub> [mm]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>u</sub> [kN]	τ [N/mm <sup>2</sup> ]
1988	Riberholt	PU	M	p	20,0	400	474	116,5	4,64
1988	Riberholt	PU	M	p	20,0	400	308	111,5	4,44
1988	Riberholt	PU	M	p	20,0	400	357	90,0	3,58
1988	Riberholt	PU	M	p	20,0	400	388	119,0	4,73
1988	Riberholt	PU	M	p	20,0	400	407	108,5	4,32
1987	Eh/Sb	PU	G	r	26,5	850	440	317,0	4,48
1987	Eh/Sb	PU	G	r	26,5	1000	440	350,0	4,20
1987	Eh/Sb	PU	G	r	32,0	850	440	389,0	4,55
1987	Eh/Sb	ohne	M	r	16,0	170	440	27,0	3,16
1987	Eh/Sb	ohne	S	r	20,0	300	440	70,0	3,71
1987	Eh/Sb	ohne	S	r	27,0	300	440	130,0	5,11

Jahr :	Jahr der Veröffentlichung
Forscher :	Eh = Ehlbeck He = Hemmer Mö = Möhler Sb = Siebert
Leim :	A = Aralditleim E = Epoxidharzleim PU = Zweikomponenten-Polyurethanleim R = Phenol-Resorcinharzleim o = ohne Leim (nur Holzschrauben)
Stangentyp :	G = Gewindestab M = Metrisches Gewinde S = Holzschraube
Richtung zum Holz :	p = Gewindestab parallel zur Faserrichtung des Holzes r = Gewindestab senkrecht zur Faserrichtung des Holzes
Durchmesser :	Nenn Durchmesser Gewindestab/Gewindestange /Holzschraube
Rohdichte :	Normal-Rohdichte bei 20°/65%; u ≈ 12%
Haftfestigkeit :	mittlere Haftfestigkeit nach Abschnitt 2.3



**Bild A2-1 :** Mittlere Haftfestigkeit in Abhängigkeit von der Einleimlänge bei Verwendung von spröden Leimen und Vergleich mit Bemessungsvorschlag Riberholt



**Bild A2-2 :** Mittlere Haftfestigkeit in Abhängigkeit von der Rohdichte bei Verwendung von nichtspröden Leimen und Vergleich mit Bemessungsvorschlag Riberholt

**Tabelle A2-3 : Zusammenstellung der Versuche mit spröden Leimen**

Jahr	Forscher	Leim	Stangen- typ	Richtung zum Holz	Durch- messer	Einleim- länge	Roh- dichte	Bruch- last	Haft- festigkeit
					d [mm]	l <sub>g</sub> [mm]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>U</sub> [kN]	τ [N/mm <sup>2</sup> ]
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	473	20,0	8,16
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	488	20,3	8,28
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	459	19,5	7,96
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	452	22,0	8,98
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	474	18,6	7,59
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	461	21,5	8,77
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	459	19,5	7,96
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	457	20,4	8,33
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	513	22,8	9,30
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	432	20,4	8,33
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	494	22,0	8,98
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	447	16,9	6,90
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	445	19,2	7,84
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	492	15,8	6,45
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	454	13,8	5,63
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	453	16,0	6,53
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	477	17,7	7,22
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	527	19,0	7,75
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	477	17,9	7,30
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	491	17,9	7,30
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	467	17,5	7,14
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	471	18,1	7,39
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	484	16,1	6,57
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	501	20,7	8,45
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	492	17,5	7,14
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	471	28,0	11,43
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	458	20,7	8,45
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	463	19,5	7,96
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	510	23,3	9,51
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	30	467	23,1	9,43

**Tabelle A2-3 : Zusammenstellung der Versuche mit spröden Leimen**  
**Fortsetzung**

Jahr	Forscher	Leim	Stangen- typ	Richtung zum Holz	Durch- messer	Einleim- länge	Roh- dichte	Bruch- last	Haft- festigkeit
					d [mm]	l <sub>g</sub> [mm]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>U</sub> [kN]	τ [N/mm <sup>2</sup> ]
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	60	429	32,4	6,61
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	60	446	37,2	7,59
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	60	453	32,5	6,63
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	60	440	32,8	6,69
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	60	431	34,2	6,98
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	60	447	30,0	6,12
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	60	431	28,6	5,84
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	60	429	32,8	6,69
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	60	434	31,9	6,51
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	60	475	34,6	7,06
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	60	423	37,3	7,61
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	60	447	39,4	8,04
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	60	435	31,9	6,51
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	60	451	37,6	7,67
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	60	434	30,9	6,30
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	60	393	24,4	4,98
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	60	426	32,5	6,63
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	60	408	23,4	4,77
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	60	411	23,8	4,86
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	60	403	23,3	4,75
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	120	414	72,0	7,35
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	120	412	68,0	6,94
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	120	447	75,1	7,66
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	120	418	69,0	7,04
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	120	414	72,6	7,41
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	120	419	61,0	6,22
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	120	430	68,2	6,96
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	120	435	68,1	6,95
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	120	416	52,9	5,40
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	120	427	57,1	5,83
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	120	430	73,0	7,45
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	120	417	65,5	6,68

**Tabelle A2-3 : Zusammenstellung der Versuche mit spröden Leimen**  
**Fortsetzung**

Jahr	Forscher	Leim	Stangen- typ	Richtung zum Holz	Durch- messer	Einleim- länge	Roh- dichte	Bruch- last	Haft- festigkeit
					d [mm]	l <sub>g</sub> [mm]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>U</sub> [kN]	τ [N/mm <sup>2</sup> ]
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	120	418	68,2	6,96
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	120	412	66,4	6,77
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	120	415	69,8	7,12
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	180	459	97,8	6,65
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	180	436	116,0	7,89
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	180	442	117,0	7,96
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	180	448	108,0	7,35
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	180	437	102,0	6,94
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	180	449	78,9	5,37
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	180	453	84,0	5,71
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	180	440	95,3	6,48
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	180	454	98,7	6,71
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	180	458	93,5	6,36
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	240	453	88,5	4,51
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	240	426	74,8	3,82
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	240	433	77,0	3,93
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	240	436	80,0	4,08
1993	Eh/Ge	E-13	G	r	26	240	437	86,5	4,41
1993	Eh/Ge	E-132	G	r	26	120	385	39,3	4,01
1993	Eh/Ge	E-132	G	r	26	120	445	46,1	4,70
1993	Eh/Ge	E-132	G	r	26	120	405	41,6	4,24
1993	Eh/Ge	E-132	G	r	26	120	413	39,6	4,04
1993	Eh/Ge	E-132	G	r	26	120	402	36,9	3,76
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	30	476	17,1	9,07
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	30	503	16,9	8,97
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	30	488	14,0	7,43
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	30	493	14,7	7,80
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	30	485	15,5	8,22
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	30	496	14,5	7,69
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	30	506	17,2	9,12
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	30	495	15,7	8,33
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	30	480	23,8	12,63

**Tabelle A2-3 : Zusammenstellung der Versuche mit spröden Leimen**  
**Fortsetzung**

Jahr	Forscher	Leim	Stangen- typ	Richtung zum Holz	Durch- messer	Einleim- länge	Roh- dichte	Bruch- last	Haft- festigkeit
					d [mm]	l <sub>g</sub> [mm]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>U</sub> [kN]	τ [N/mm <sup>2</sup> ]
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	30	494	17,8	9,44
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	30	466	16,5	8,75
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	30	477	16,5	8,75
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	30	491	17,1	9,07
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	30	504	16,1	8,54
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	30	473	16,4	8,70
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	30	484	16,8	8,91
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	30	481	14,1	7,48
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	30	456	18,4	9,76
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	30	461	16,5	8,75
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	30	450	16,9	8,97
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	30	500	18,1	9,60
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	30	442	17,6	9,34
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	30	451	18,1	9,60
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	30	449	19,4	10,29
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	30	446	19,3	10,24
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	60	433	26,2	6,95
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	60	457	32,7	8,67
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	60	474	30,3	8,04
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	60	434	28,3	7,51
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	60	417	24,1	6,39
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	60	401	24,8	6,58
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	60	402	21,4	5,68
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	60	437	25,5	6,76
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	60	441	29,0	7,69
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	60	447	25,6	6,79
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	60	437	27,9	7,40
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	60	469	30,4	8,06
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	60	412	21,2	5,62
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	60	453	28,0	7,43
1993	Eh/Ge	E-13	M	r	20	60	431	25,1	6,66

**Tabelle A2-3 : Zusammenstellung der Versuche mit spröden Leimen**  
**Fortsetzung**

Jahr	Forscher	Leim	Stangen- typ	Richtung zum Holz	Durch- messer	Einleim- länge	Roh- dichte	Bruch- last	Haft- festigkeit
					d [mm]	l <sub>g</sub> [mm]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>U</sub> [kN]	τ [N/mm <sup>2</sup> ]
1993	Eh/Ge	E-132	M	r	20	28	465	13,8	7,84
1993	Eh/Ge	E-132	M	r	20	30	419	13,5	7,16
1993	Eh/Ge	E-132	M	r	20	30	410	12,8	6,79
1993	Eh/Ge	E-132	M	r	20	30	436	12,0	6,37
1993	Eh/Ge	E-132	M	r	20	30	427	12,1	6,42
1993	Eh/Ge	E-132	M	r	20	30	421	12,3	6,53
1993	Eh/Ge	E-132	M	r	20	30	413	11,4	6,05
1993	Eh/Ge	E-132	M	r	20	30	412	11,2	5,94
1993	Eh/Ge	E-132	M	r	20	30	468	17,6	9,34
1993	Eh/Ge	E-132	M	r	20	30	456	12,0	6,37
1993	Eh/Ge	E-132	M	r	20	60	391	18,7	4,96
1993	Eh/Ge	E-132	M	r	20	60	394	19,5	5,17
1993	Eh/Ge	E-132	M	r	20	60	396	20,3	5,38
1993	Eh/Ge	E-132	M	r	20	60	410	18,2	4,83
1993	Eh/Ge	E-132	M	r	20	60	444	27,8	7,37
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	28	540	14,6	8,30
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	30	553	15,5	8,22
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	30	550	15,4	8,17
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	30	564	16,1	8,54
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	30	538	13,7	7,27
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	30	546	14,5	7,69
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	30	550	15,4	8,17
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	30	530	14,5	7,69
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	30	530	13,8	7,32
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	30	525	13,6	7,22
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	30	466	17,6	9,34
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	30	413	14,6	7,75
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	30	441	13,7	7,27
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	30	413	13,4	7,11

**Tabelle A2-3 : Zusammenstellung der Versuche mit spröden Leimen**  
**Fortsetzung**

Jahr	Forscher	Leim	Stangen- typ	Richtung zum Holz	Durch- messer	Einleim- länge	Roh- dichte	Bruch- last	Haft- festigkeit
					d [mm]	l <sub>g</sub> [mm]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>U</sub> [kN]	τ [N/mm <sup>2</sup> ]
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	120	395	32,2	4,27
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	120	382	27,3	3,62
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	120	394	29,4	3,90
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	120	387	31,1	4,12
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	120	397	31,8	4,22
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	120	390	36,9	4,89
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	120	411	42,4	5,62
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	120	383	36,2	4,80
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	120	407	40,6	5,38
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	120	383	32,5	4,31
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	120	550	48,0	6,37
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	120	545	42,7	5,66
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	120	544	42,3	5,61
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	120	537	43,4	5,76
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	120	536	39,5	5,24
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	120	543	40,0	5,31
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	120	551	44,5	5,90
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	120	551	44,7	5,93
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	120	551	42,1	5,58
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	120	548	44,9	5,96
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	180	454	75,2	6,65
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	180	448	74,8	6,61
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	180	439	62	5,48
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	180	446	63,6	5,62
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	180	457	78,4	6,93
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	240	431	79	5,24
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	240	438	75	4,97
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	240	442	54	3,58
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	240	444	79,5	5,27
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	240	444	83,5	5,54
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	240	554	93	6,17
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	240	552	89,5	5,94

**Tabelle A2-3 : Zusammenstellung der Versuche mit spröden Leimen**  
**Fortsetzung**

Jahr	Forscher	Leim	Stangen- typ	Richtung zum Holz	Durch- messer	Einleim- länge	Roh- dichte	Bruch- last	Haft- festigkeit
					d [mm]	l <sub>g</sub> [mm]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>U</sub> [kN]	τ [N/mm <sup>2</sup> ]
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	240	543	99,5	6,60
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	240	549	101	6,70
1993	Eh/Ge	E-133	M	r	20	240	546	100,5	6,66
1993	Eh/Ge	R-11	M	r	20	30	467	9,9	5,25
1993	Eh/Ge	R-11	M	r	20	30	457	9,4	4,99
1993	Eh/Ge	R-11	M	r	20	30	492	12,5	6,63
1993	Eh/Ge	R-11	M	r	20	30	497	10,5	5,57
1993	Eh/Ge	R-11	M	r	20	30	497	11,2	5,94
1993	Eh/Ge	R-11	M	r	20	30	480	9,8	5,20
1993	Eh/Ge	R-11	M	r	20	30	488	9,5	5,04
1993	Eh/Ge	R-11	M	r	20	30	486	12,9	6,84
1993	Eh/Ge	R-11	M	r	20	30	459	15,2	8,06
1993	Eh/Ge	R-11	M	r	20	30	538	16,4	8,70
1993	Eh/Ge	R-11	M	r	20	60	480	26,7	7,08
1993	Eh/Ge	R-11	M	r	20	60	408	17,0	4,51
1993	Eh/Ge	R-11	M	r	20	60	408	18,0	4,77
1993	Eh/Ge	R-11	M	r	20	60	416	22,3	5,92
1993	Eh/Ge	R-11	M	r	20	60	406	17,1	4,54
1993	Eh/Ge	R-11	M	r	20	60	402	16,7	4,43
1993	Eh/Ge	R-11	M	r	20	60	404	16,5	4,38
1993	Eh/Ge	R-11	M	r	20	60	428	16,6	4,40
1993	Eh/Ge	R-11	M	r	20	60	501	18,2	4,83
1993	Eh/Ge	R-11	M	r	20	60	410	17,5	4,64
1993	Eh/Ge	E-133	S	r	20	24	443	6,5	4,31
1993	Eh/Ge	E-133	S	r	20	30	426	7,6	4,03
1993	Eh/Ge	E-133	S	r	20	30	434	10,4	5,52
1993	Eh/Ge	E-133	S	r	20	30	452	8,9	4,72
1993	Eh/Ge	E-133	S	r	20	30	440	10,4	5,52
1993	Eh/Ge	E-133	S	r	20	30	467	10,3	5,46
1993	Eh/Ge	E-133	S	r	20	30	470	11,0	5,84
1993	Eh/Ge	E-133	S	r	20	30	500	12,1	6,42
1993	Eh/Ge	E-133	S	r	20	30	425	8,6	4,56

**Tabelle A2-3 : Zusammenstellung der Versuche mit spröden Leimen**  
**Fortsetzung**

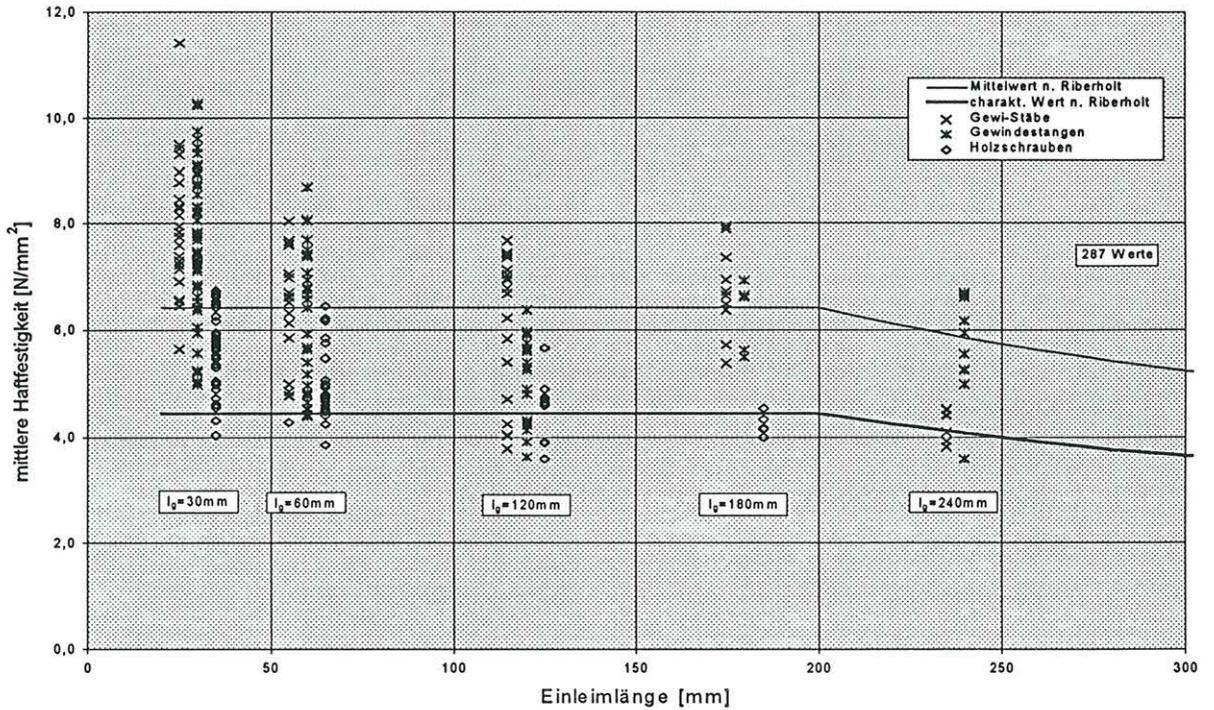
Jahr	Forscher	Leim	Stangen- typ	Richtung zum Holz	Durch- messer	Einleim- länge	Roh- dichte	Bruch- last	Haft- festigkeit
					d [mm]	l <sub>g</sub> [mm]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>U</sub> [kN]	τ [N/mm <sup>2</sup> ]
1993	Eh/Ge	E-133	S	r	20	60	403	18,6	4,93
1993	Eh/Ge	E-133	S	r	20	60	392	18,8	4,99
1993	Eh/Ge	E-133	S	r	20	60	407	19,1	5,07
1993	Eh/Ge	E-133	S	r	20	60	426	23,4	6,21
1993	Eh/Ge	E-133	S	r	20	60	450	23,3	6,18
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	449	12,3	6,53
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	446	10,6	5,62
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	501	10,1	5,36
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	458	10,8	5,73
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	473	12,5	6,63
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	453	11,1	5,89
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	462	10,8	5,73
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	448	10,6	5,62
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	467	11,0	5,84
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	452	11,2	5,94
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	572	12,2	6,47
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	444	10,8	5,73
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	447	9,4	4,99
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	444	11,8	6,26
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	434	8,9	4,72
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	438	10,9	5,78
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	439	11,1	5,89
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	435	9,2	4,88
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	449	11,2	5,94
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	484	11,6	6,15
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	509	12,7	6,74
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	463	8,7	4,62
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	534	9,5	5,04
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	472	12,6	6,68
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	459	10,9	5,78
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	449	11,1	5,89
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	448	12,3	6,53

**Tabelle A2-3 : Zusammenstellung der Versuche mit spröden Leimen**  
**Fortsetzung**

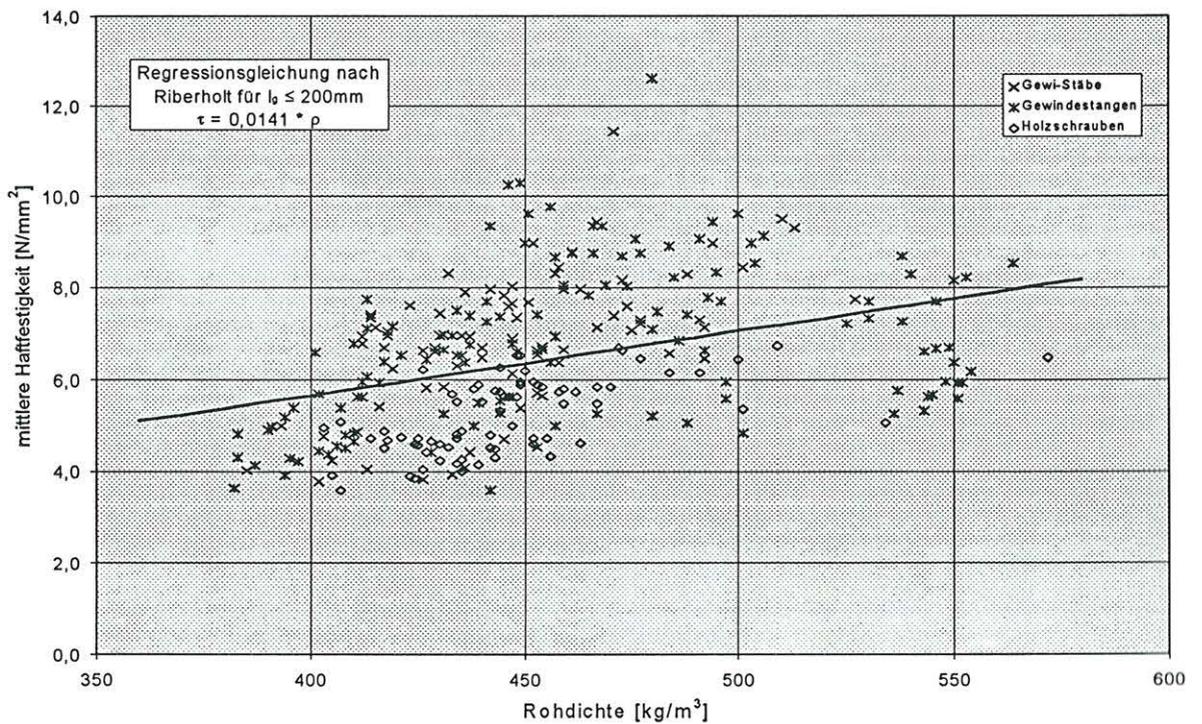
Jahr	Forscher	Leim	Stangen- typ	Richtung zum Holz	Durch- messer	Einleim- länge	Roh- dichte	Bruch- last	Haft- festigkeit
					d [mm]	l <sub>g</sub> [mm]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>U</sub> [kN]	τ [N/mm <sup>2</sup> ]
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	433	10,7	5,68
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	30	444	10,0	5,31
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	50	435	13,4	4,27
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	52	432	14,8	4,53
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	60	427	16,6	4,40
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	60	452	17,3	4,59
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	60	442	17,0	4,51
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	60	455	17,8	4,72
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	60	459	20,6	5,46
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	60	477	24,3	6,45
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	60	417	17,0	4,51
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	60	417	17,0	4,51
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	60	430	16,0	4,24
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	60	418	17,6	4,67
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	60	443	16,9	4,48
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	60	454	22,0	5,84
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	60	434	18,1	4,80
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	60	424	14,5	3,85
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	60	491	23,2	6,15
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	60	442	18,0	4,77
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	60	430	17,3	4,59
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	60	443	21,7	5,76
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	120	414	35,5	4,71
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	120	421	35,7	4,73
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	120	445	42,6	5,65
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	120	424	34,6	4,59
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	120	423	29,3	3,89
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	120	417	36,8	4,88
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	120	425	35,5	4,71
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	120	405	29,4	3,90
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	120	428	35,0	4,64
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	120	407	27,0	3,58

**Tabelle A2-3 : Zusammenstellung der Versuche mit spröden Leimen**  
**Fortsetzung**

Jahr	Forscher	Leim	Stangen- typ	Richtung zum Holz	Durch- messer	Einleim- länge	Roh- dichte	Bruch- last	Haft- festigkeit
					d [mm]	l <sub>g</sub> [mm]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>U</sub> [kN]	τ [N/mm <sup>2</sup> ]
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	180	442	51,2	4,53
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	180	434	47,1	4,16
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	180	435	45,2	4,00
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	180	439	46,9	4,15
1993	Eh/Ge	R-11	S	r	20	180	456	49,0	4,33
<p>Jahr : Jahr der Veröffentlichung  Forscher : Eh = Ehlbeck  Ge = Gerold  Leim : E-13 = Epoxydharzleim  E-132 = Epoxydharzleim Fa. Technicoll  E-133 = Epoxydharzleim Fa. Wevo  P-122 = Polyurethankleber  R-11 = Resorcinharzleim  ohne = ohne Leim (nur Holzschrauben)  Stangentyp : G = Gewindestab (Gewi-Stab)  M = Metrisches Gewinde  S = Holzschraube  Richtung zum Holz : p = Gewindestange parallel zur Faserrichtung des Holzes  r = Gewindestange rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes  Durchmesser : Nenndurchmesser Gewindestab/Gewindestange /Holzschraube  Rohdichte : Normal-Rohdichte bei 20°/65%; u ≈ 12%  Haftfestigkeit : mittlere Haftfestigkeit nach Abschnitt 2.3</p>									



**Bild A2-3:** Mittlere Haftfestigkeit in Abhängigkeit von der Einleimlänge bei Verwendung von spröden Leimen und Vergleich mit Bemessungsvorschlag Ribeholt

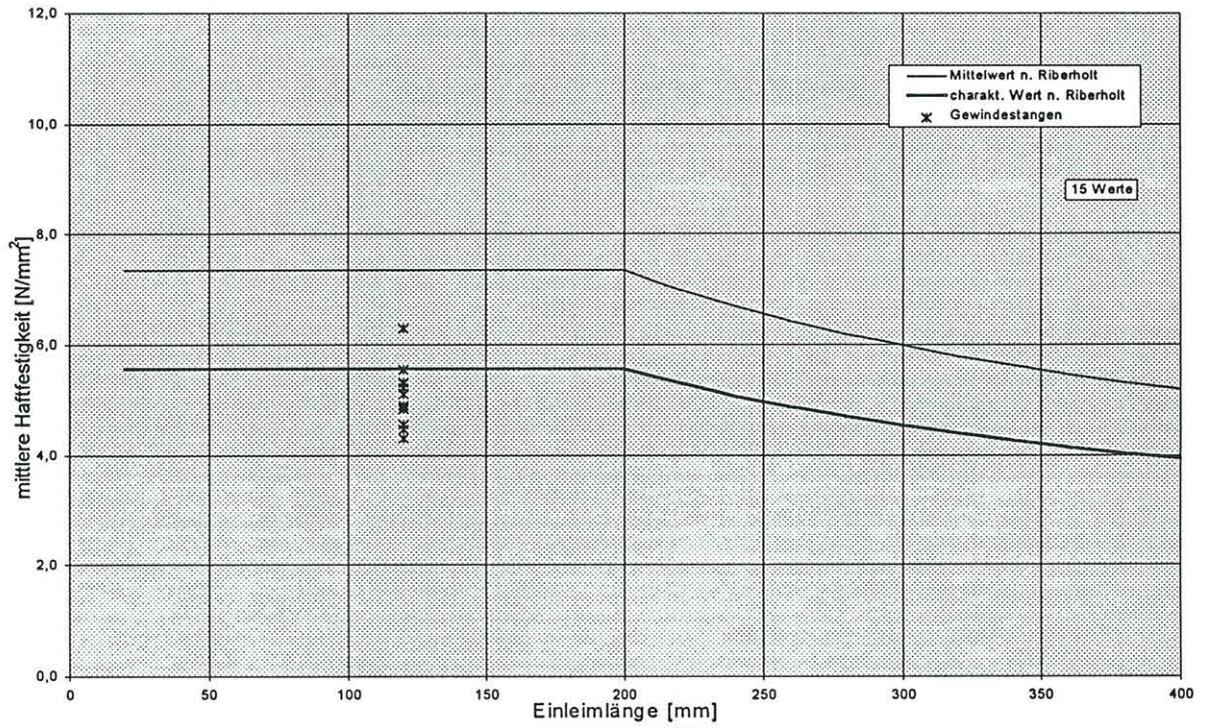


**Bild A2-4:** Mittlere Haftfestigkeit in Abhängigkeit von der Rohdichte bei Verwendung von spröden Leimen und Regressionsgleichung nach Ribeholt

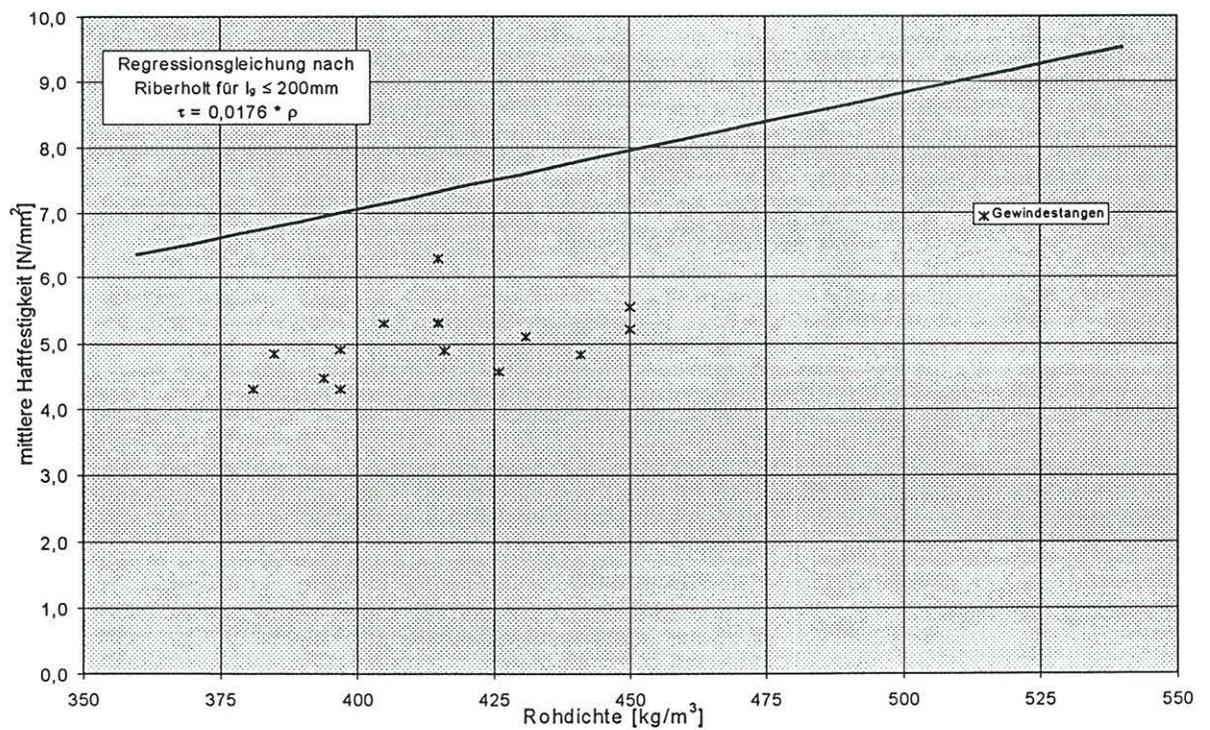
**Tabelle A2-4 : Zusammenstellung der Versuche mit nichtspröden Leimen**

Jahr	Forscher	Leim	Stangen- typ	Richtung zum Holz	Durch- messer	Einleim- länge	Roh- dichte	Bruch- last	Haft- festigkeit
					d [mm]	l <sub>g</sub> [mm]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>U</sub> [kN]	τ [N/mm <sup>2</sup> ]
1993	Eh/Ge	P-122	M	r	20	120	416	36,8	4,88
1993	Eh/Ge	P-122	M	r	20	120	415	47,5	6,30
1993	Eh/Ge	P-122	M	r	20	120	415	40,1	5,32
1993	Eh/Ge	P-122	M	r	20	120	431	38,5	5,11
1993	Eh/Ge	P-122	M	r	20	120	450	41,8	5,54
1993	Eh/Ge	P-122	M	r	20	120	450	39,3	5,21
1993	Eh/Ge	P-122	M	r	20	120	426	34,4	4,56
1993	Eh/Ge	P-122	M	r	20	120	415	40,0	5,31
1993	Eh/Ge	P-122	M	r	20	120	385	36,5	4,84
1993	Eh/Ge	P-122	M	r	20	120	381	32,5	4,31
1993	Eh/Ge	P-122	M	r	20	120	441	36,4	4,83
1993	Eh/Ge	P-122	M	r	20	120	394	33,7	4,47
1993	Eh/Ge	P-122	M	r	20	120	397	32,4	4,30
1993	Eh/Ge	P-122	M	r	20	120	405	40,0	5,31
1993	Eh/Ge	P-122	M	r	20	120	397	37,0	4,91

Jahr :	Jahr der Veröffentlichung
Forscher :	Eh = Ehlbeck Ge = Gerold
Leim :	E-13 = Epoxydharzleim E-132 = Epoxydharzleim Fa. Technicoll E-133 = Epoxydharzleim Fa. Wevo P-122 = Polyurethankleber R-11 = Resorcinharzleim
Stangentyp :	ohne = ohne Leim (nur Holzschrauben) G = Gewindestab (Gewi-Stab) M = Metrisches Gewinde S = Holzschraube
Richtung zum Holz :	p = Gewindestange parallel zur Faserrichtung des Holzes r = Gewindestange rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes
Durchmesser :	Nenn Durchmesser Gewindestab/Gewindestange /Holzschraube
Rohdichte :	Normal-Rohdichte bei 20°/65%; u ≈ 12%
Haftfestigkeit :	mittlere Haftfestigkeit nach Abschnitt 2.3



**Bild A2-5 :** Mittlere Haftfestigkeit in Abhängigkeit von der Einleimlänge bei Verwendung von nichtspröden Leimen und Vergleich mit Bemessungsvorschlag Riberholt

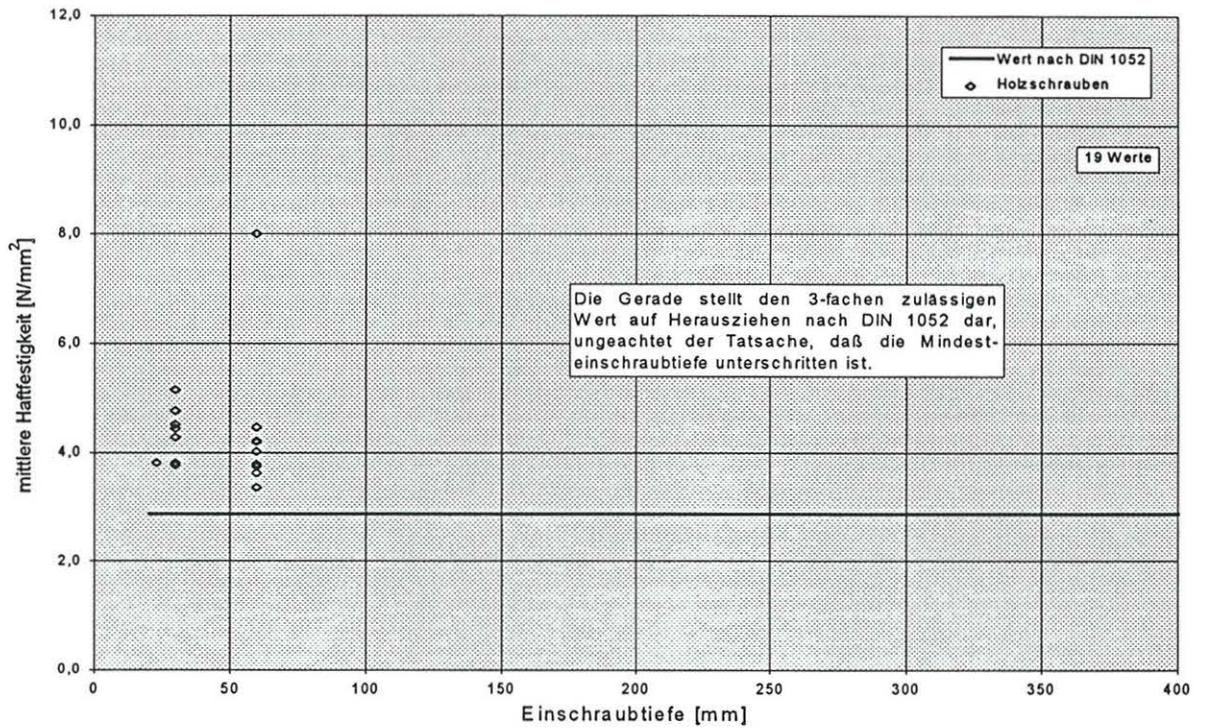


**Bild A2-6 :** Mittlere Haftfestigkeit in Abhängigkeit von der Rohdichte bei Verwendung von nichtspröden Leimen und Regressionsgleichung nach Riberholt

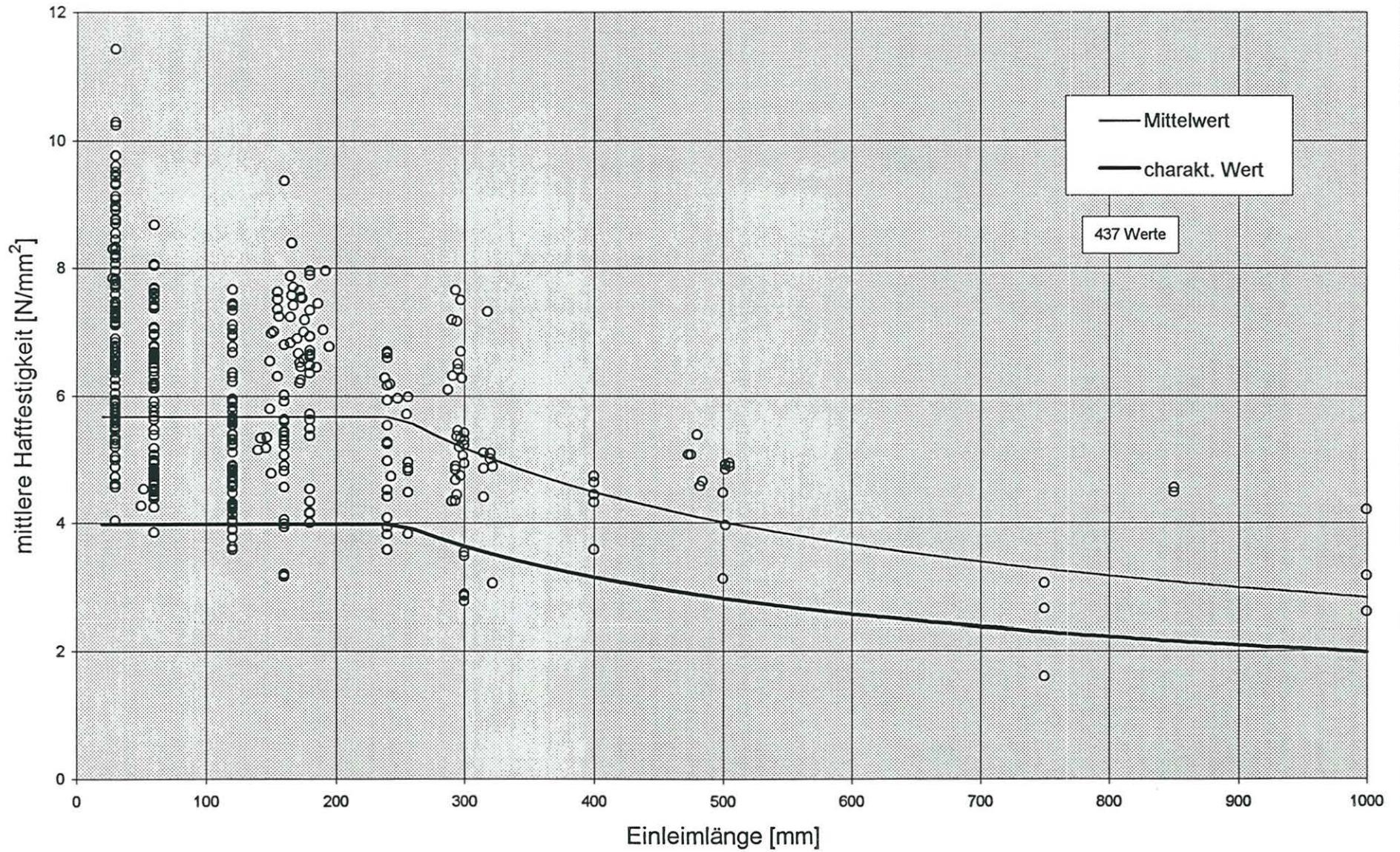
**Tabelle A2-5 : Zusammenstellung der Versuche ohne Leim**

Jahr	Forscher	Leim	Stangen- typ	Richtung zum Holz	Durch- messer	Einleim- länge	Roh- dichte	Bruch- last	Haft- festigkeit
					d [mm]	l <sub>g</sub> [mm]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	F <sub>U</sub> [kN]	τ [N/mm <sup>2</sup> ]
1993	Eh/Ge	ohne	S	r	20	23	473	5,5	3,81
1993	Eh/Ge	ohne	S	r	20	30	455	7,2	3,82
1993	Eh/Ge	ohne	S	r	20	30	462	7,1	3,77
1993	Eh/Ge	ohne	S	r	20	30	487	8,1	4,30
1993	Eh/Ge	ohne	S	r	20	30	482	8,4	4,46
1993	Eh/Ge	ohne	S	r	20	30	462	8,5	4,51
1993	Eh/Ge	ohne	S	r	20	30	460	8,5	4,51
1993	Eh/Ge	ohne	S	r	20	30	475	9,7	5,15
1993	Eh/Ge	ohne	S	r	20	30	459	9,0	4,77
1993	Eh/Ge	ohne	S	r	20	60	409	14,1	3,74
1993	Eh/Ge	ohne	S	r	20	60	434	15,9	4,22
1993	Eh/Ge	ohne	S	r	20	60	457	14,3	3,79
1993	Eh/Ge	ohne	S	r	20	60	415	12,6	3,34
1993	Eh/Ge	ohne	S	r	20	60	426	15,1	4,01
1993	Eh/Ge	ohne	S	r	20	60	407	13,7	3,63
1993	Eh/Ge	ohne	S	r	20	60	416	16,9	4,48
1993	Eh/Ge	ohne	S	r	20	60	443	15,8	4,19
1993	Eh/Ge	ohne	S	r	20	60	413	15,8	4,19
1993	Eh/Ge	ohne	S	r	20	60	497	30,2	8,01

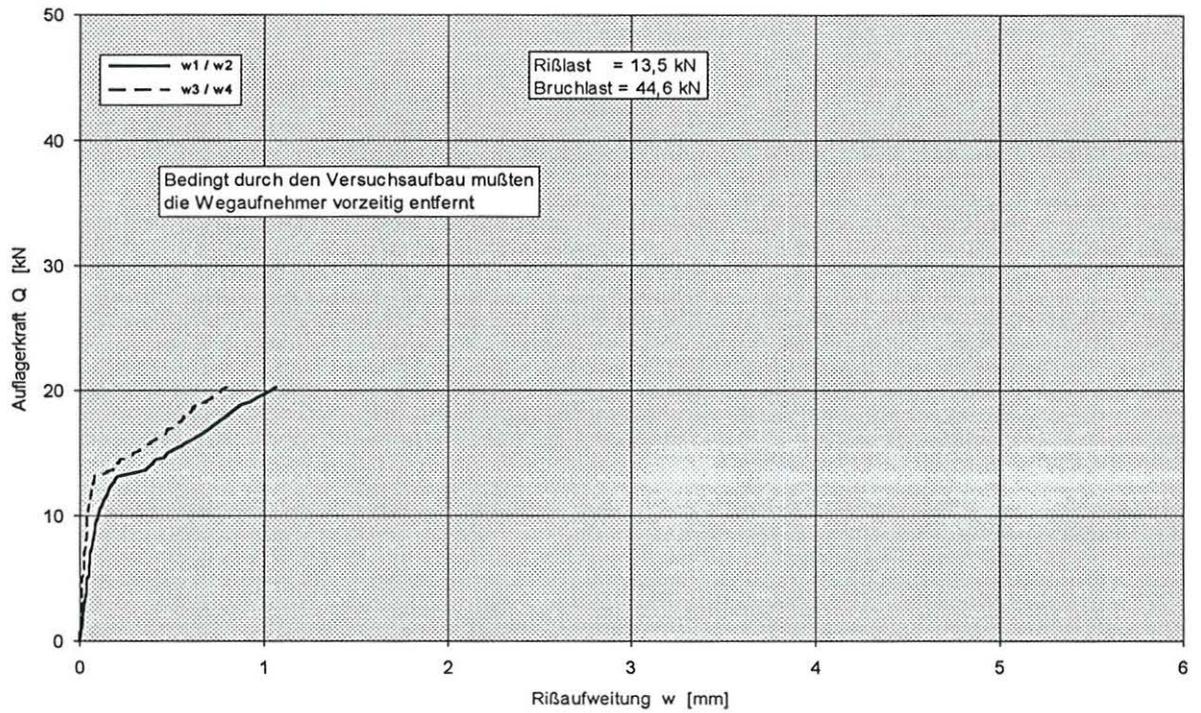
Jahr : Jahr der Veröffentlichung  
 Forscher : Eh = Ehlbeck  
           Ge = Gerold  
 Leim : E-13 = Epoxydharzleim  
        E-132 = Epoxydharzleim Fa. Technicoll  
        E-133 = Epoxydharzleim Fa. Wevo  
        P-122 = Polyurethankleber  
        R-11 = Resorcinharzleim  
        ohne = ohne Leim (nur Holzschrauben)  
 Stangentyp : G = Gewindestab (Gewi-Stab)  
               M = Metrisches Gewinde  
               S = Holzschraube  
 Richtung zum Holz : p = Gewindestange parallel zur Faserrichtung des Holzes  
                       r = Gewindestange rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes  
 Durchmesser : Nenndurchmesser Gewindestab/Gewindestange /Holzschraube  
 Rohdichte : Normal-Rohdichte bei 20°/65%; u ≈ 12%  
 Haftfestigkeit : mittlere Haftfestigkeit nach Abschnitt 2.3



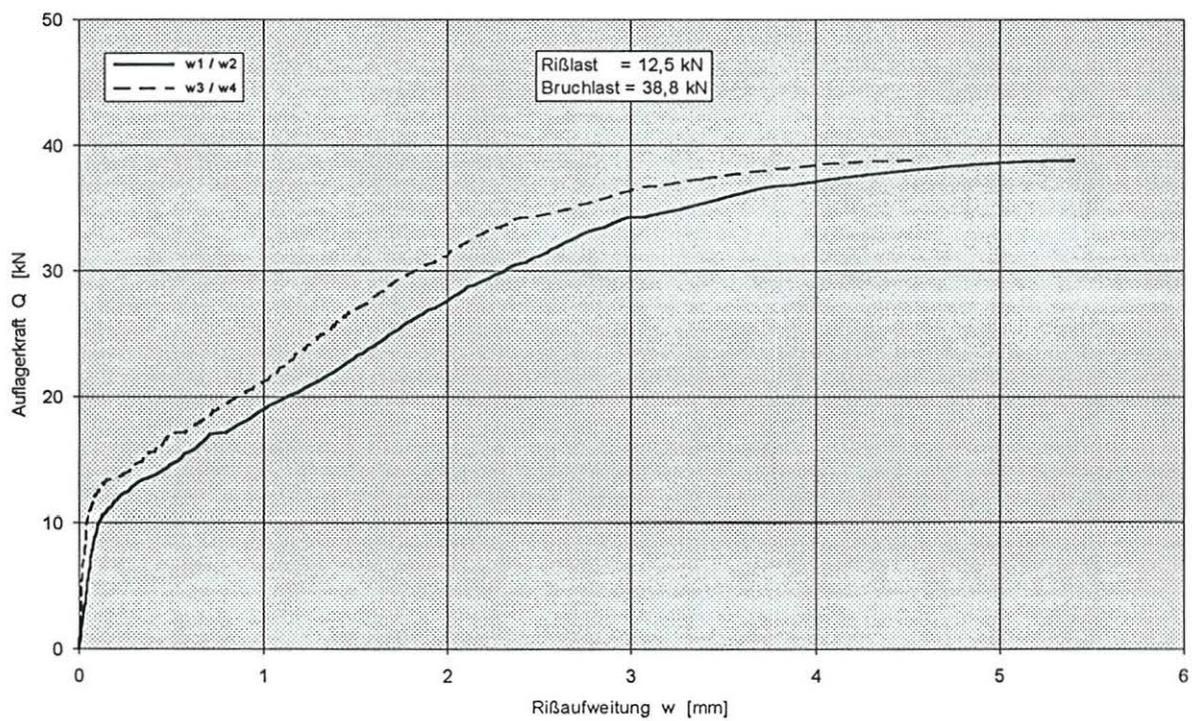
**Bild A2-7 :** Mittlere Haftfestigkeit in Abhängigkeit von der Einschraubtiefe ohne Leim und Gleichung nach DIN 1052



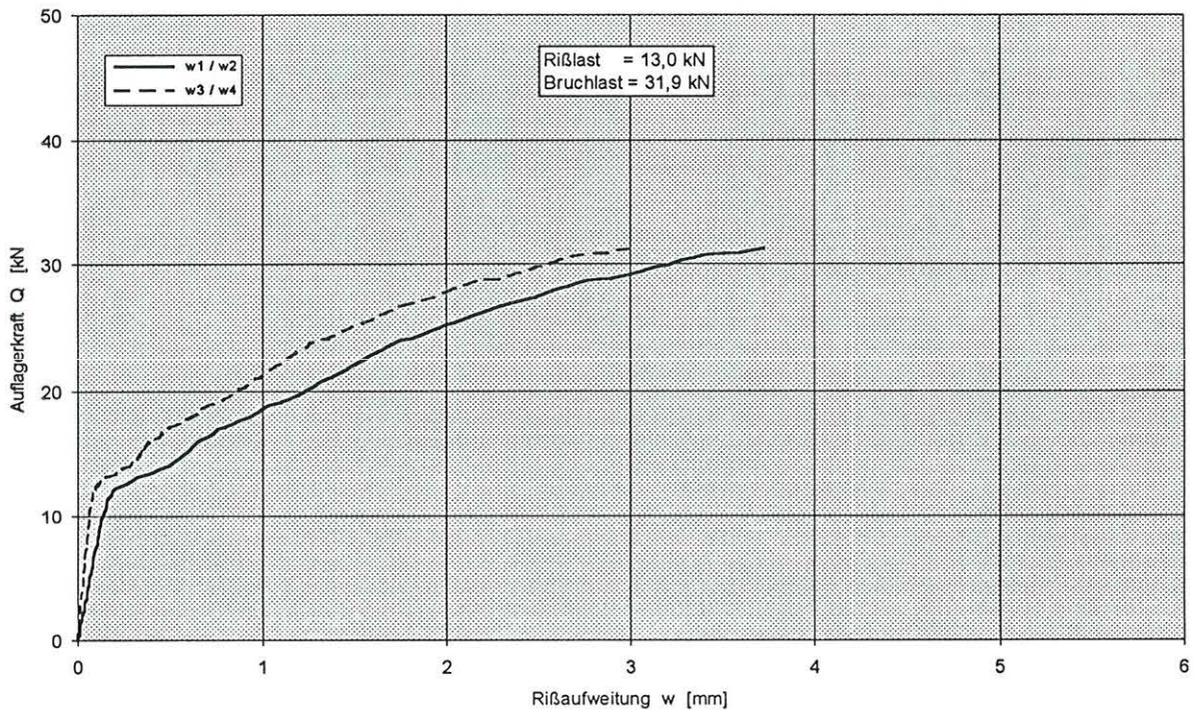
**Bild A2-8 :** Zusammenstellung aller Versuchsergebnisse und Vergleich mit dem neuen Bemessungsvorschlag



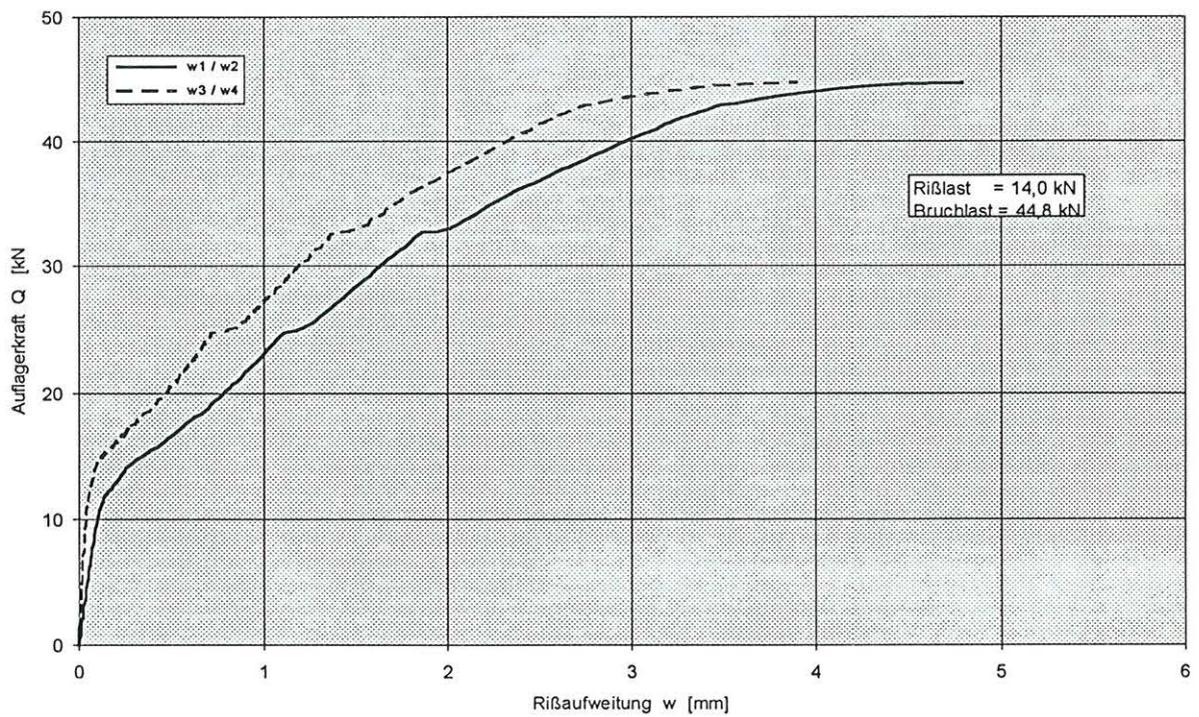
**Bild A3-1:** Last-Rißaufweitungsdiagramm Versuch I / 1



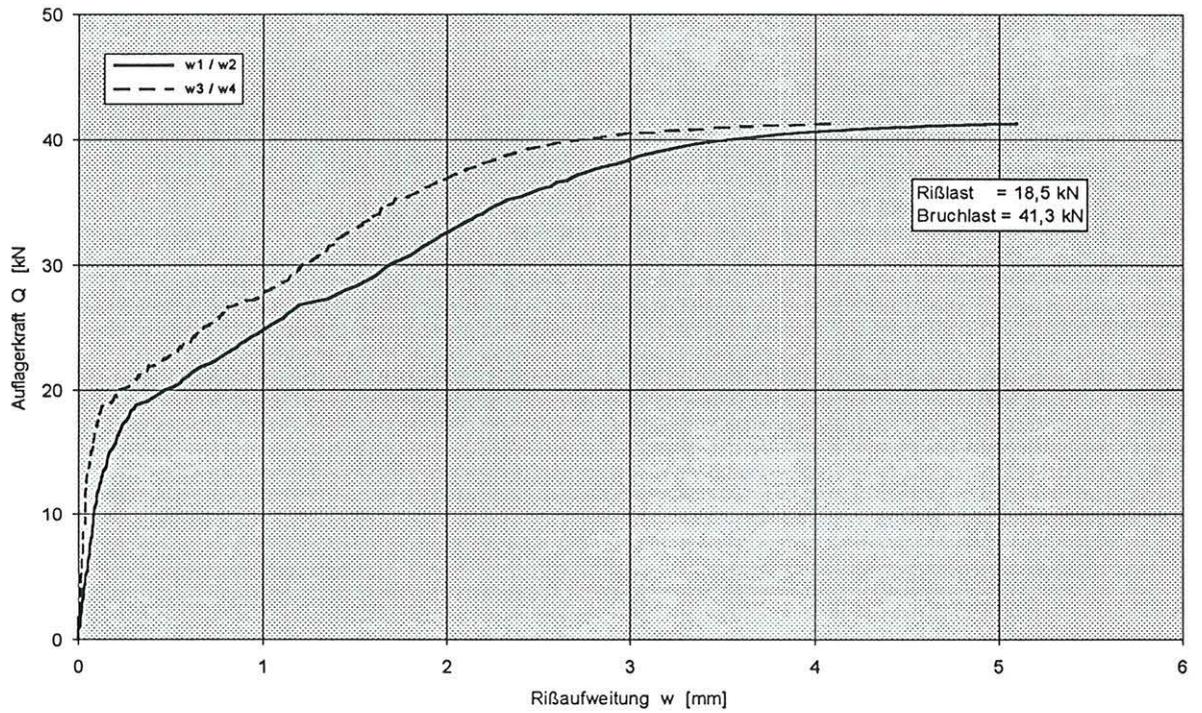
**Bild A3-2:** Last-Rißaufweitungsdiagramm Versuch I / 2



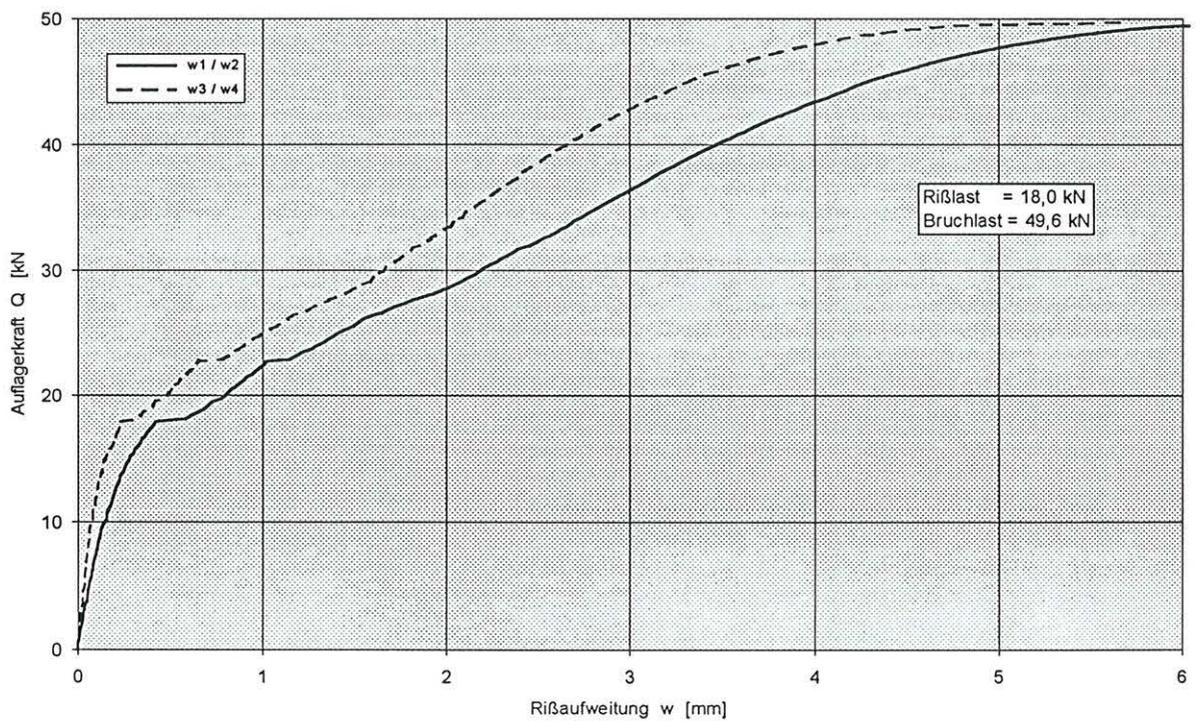
**Bild A3-3 :** Last-Rißaufweitungsdiagramm Versuch I / 3



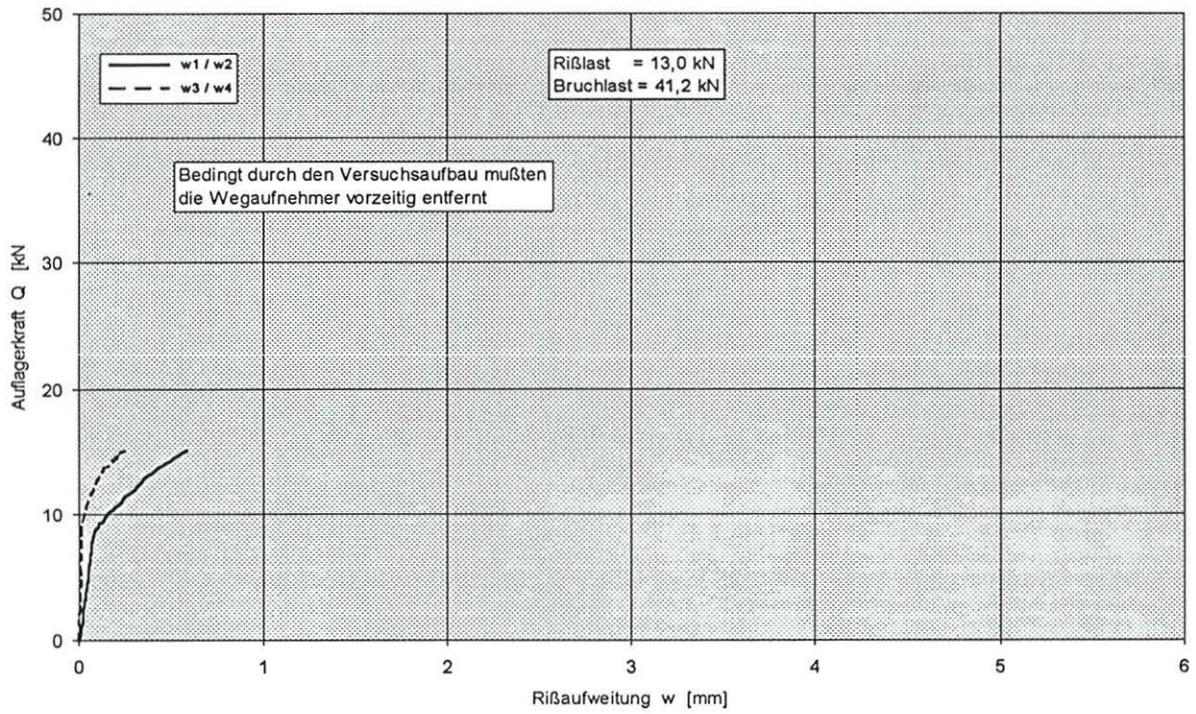
**Bild A3-4 :** Last-Rißaufweitungsdiagramm Versuch I / 4



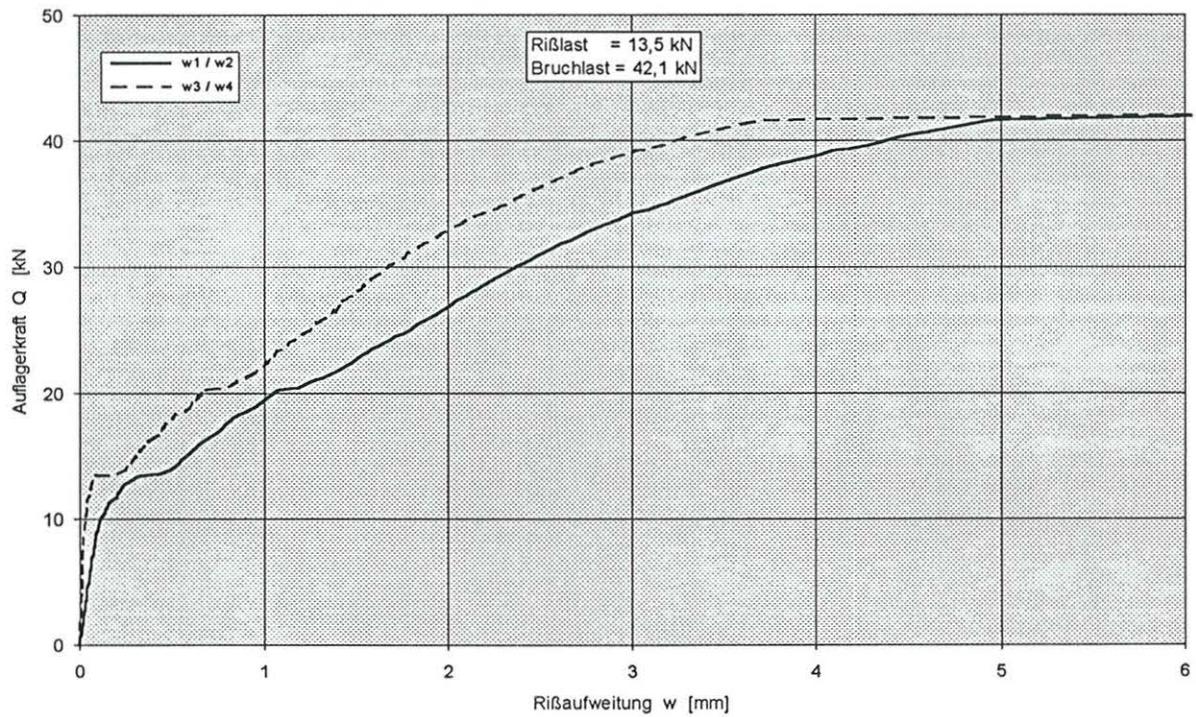
**Bild A3-5 :** Last-Rißaufweitungsdiagramm Versuch I / 5



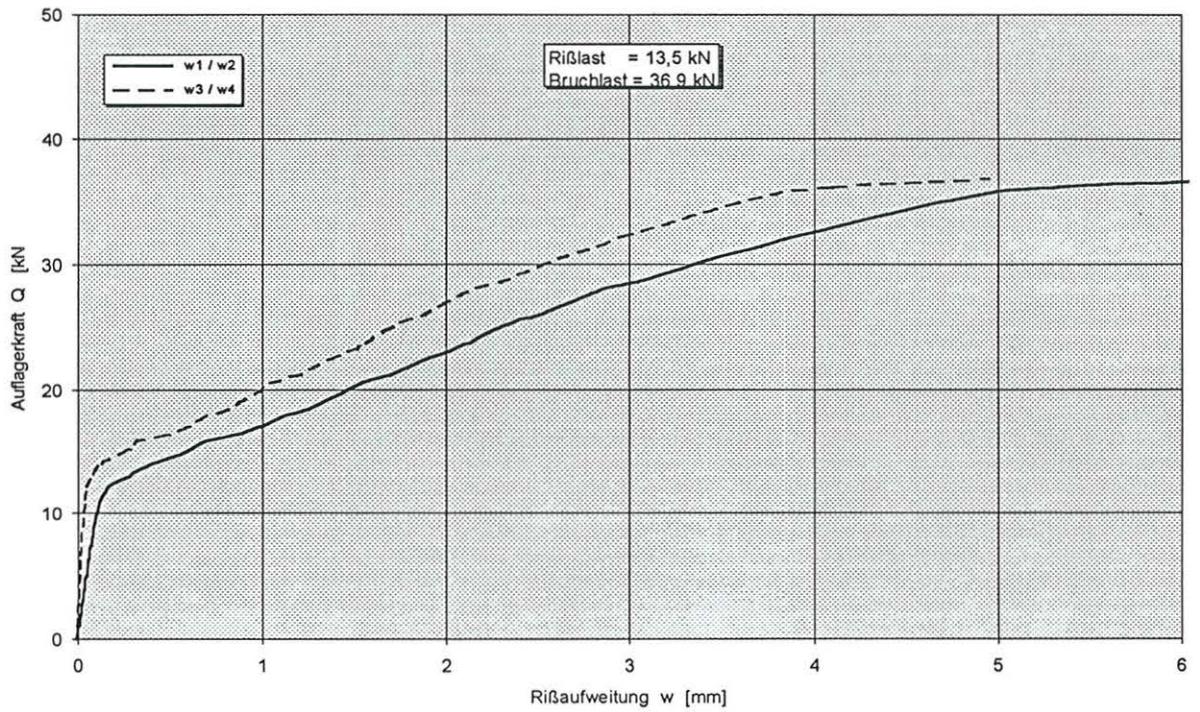
**Bild A3-6 :** Last-Rißaufweitungsdiagramm Versuch I / 6



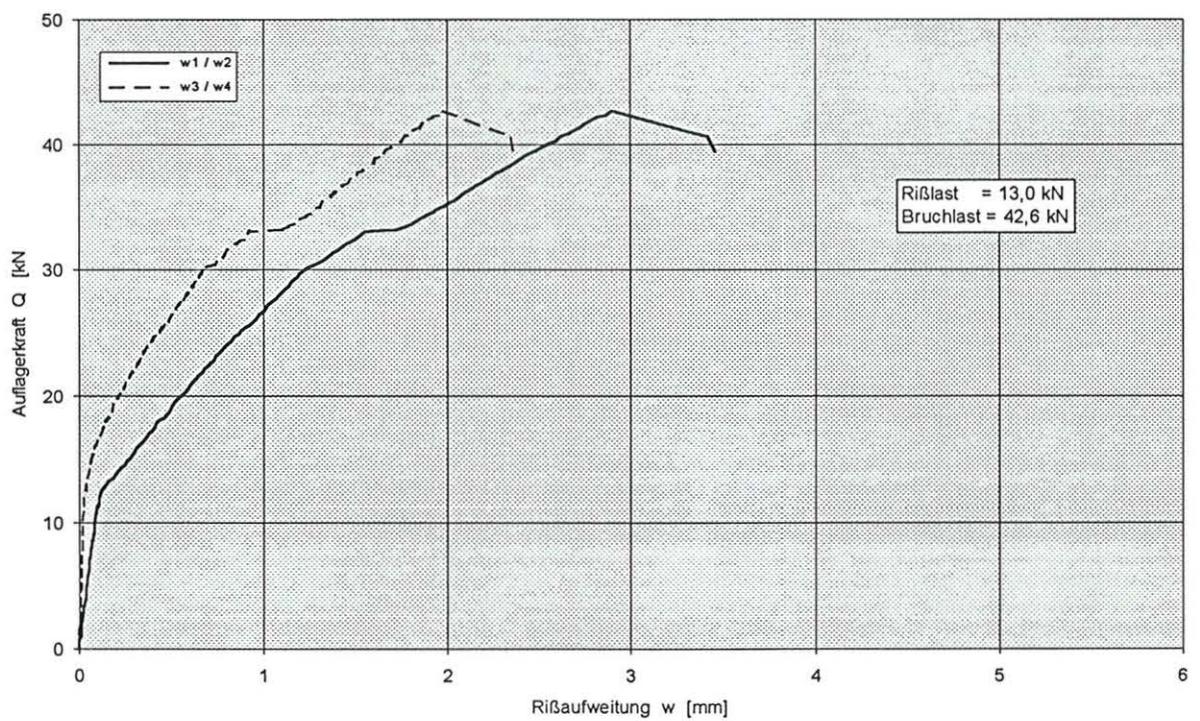
**Bild A3-7 :** Last-Rißaufweitungsdiagramm Versuch II / 1



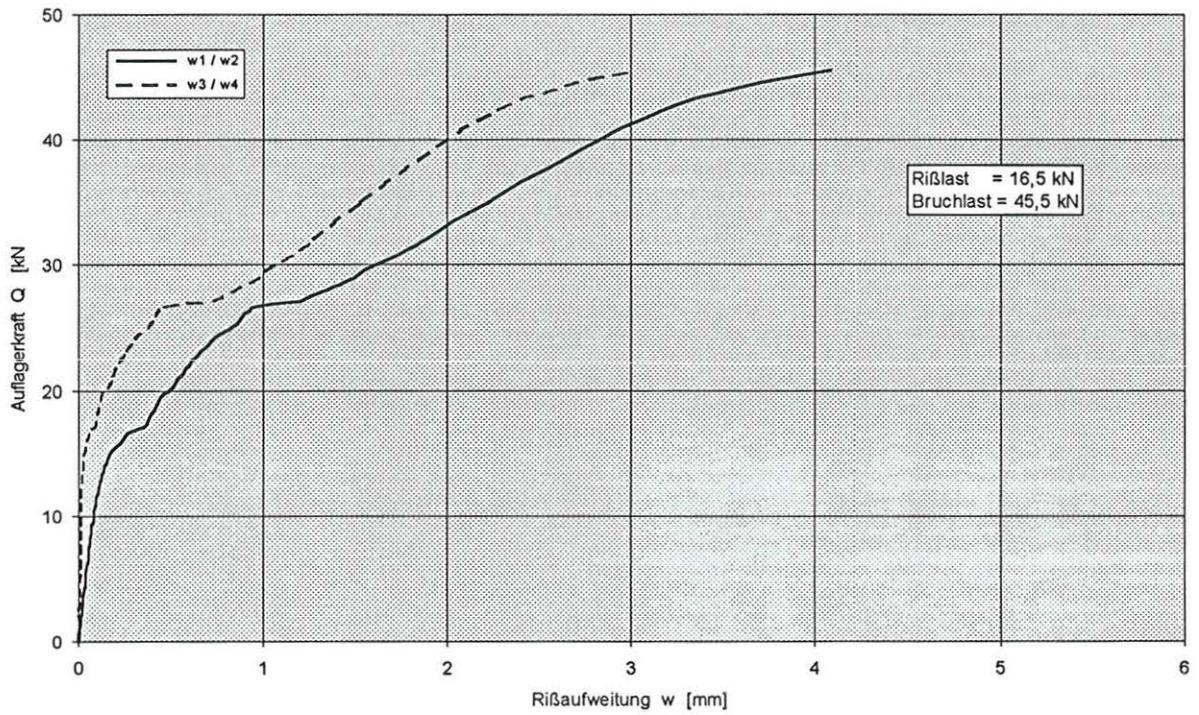
**Bild A3-8 :** Last-Rißaufweitungsdiagramm Versuch II / 2



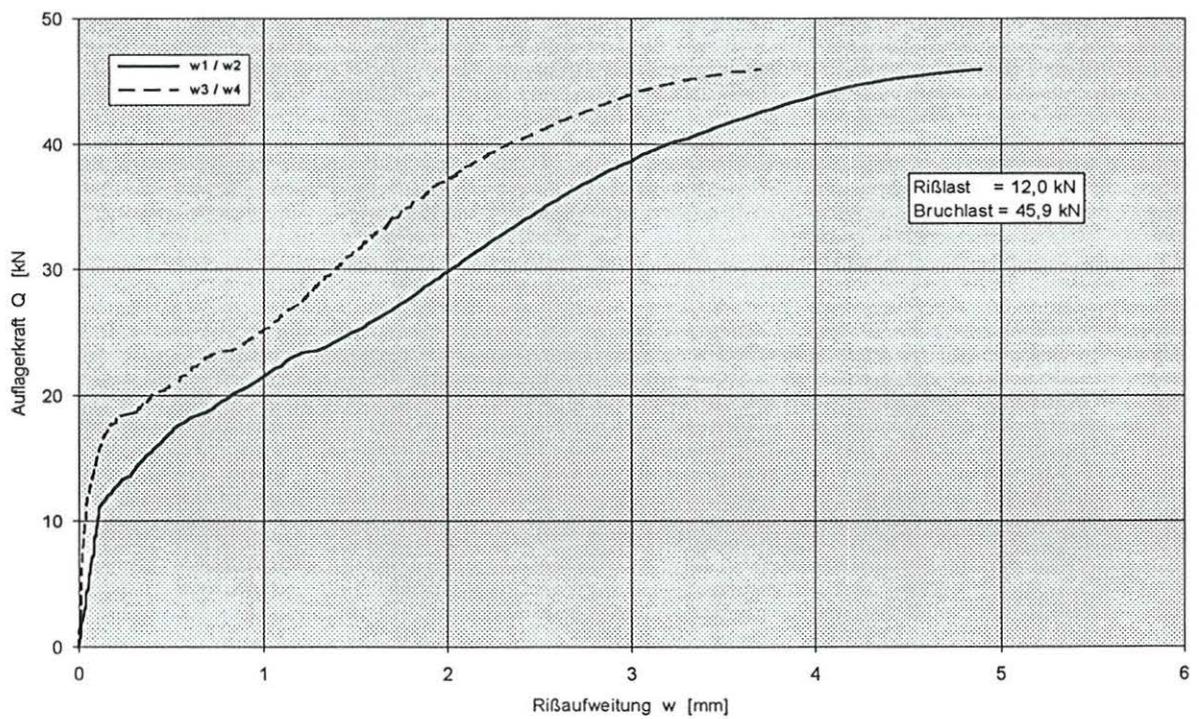
**Bild A3-9 :** Last-Rißaufweitungsdiagramm Versuch II / 3



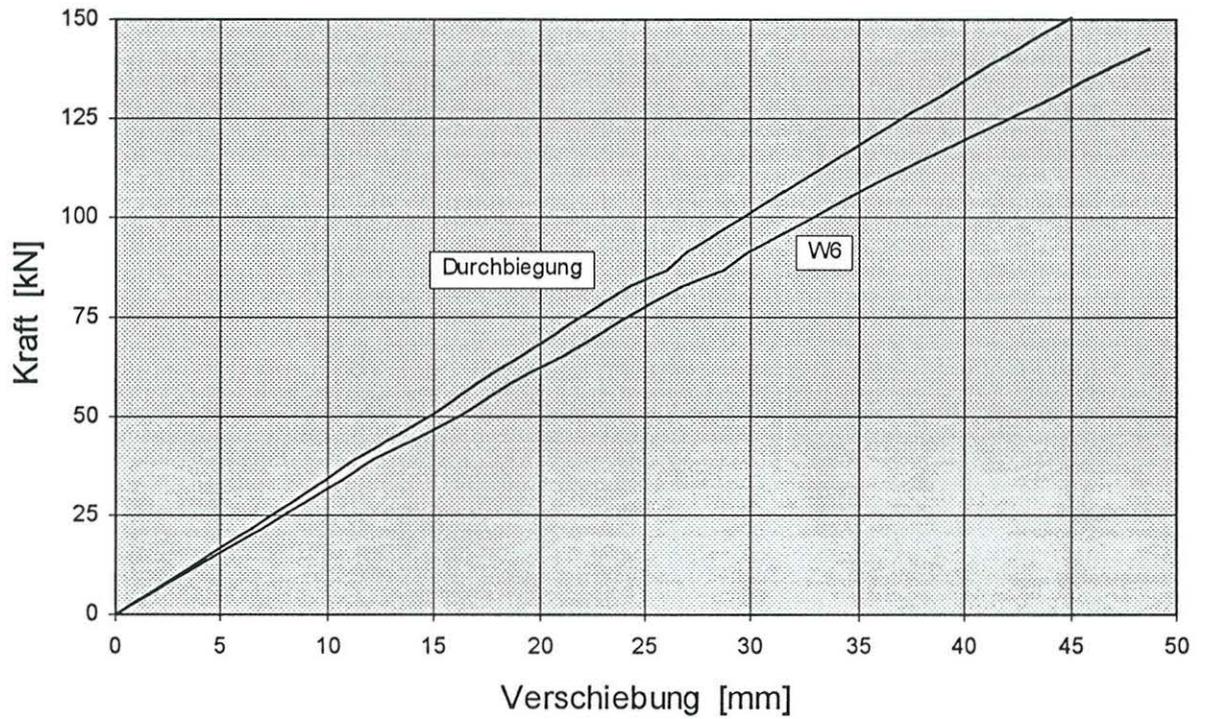
**Bild A3-10 :** Last-Rißaufweitungsdiagramm Versuch II / 4



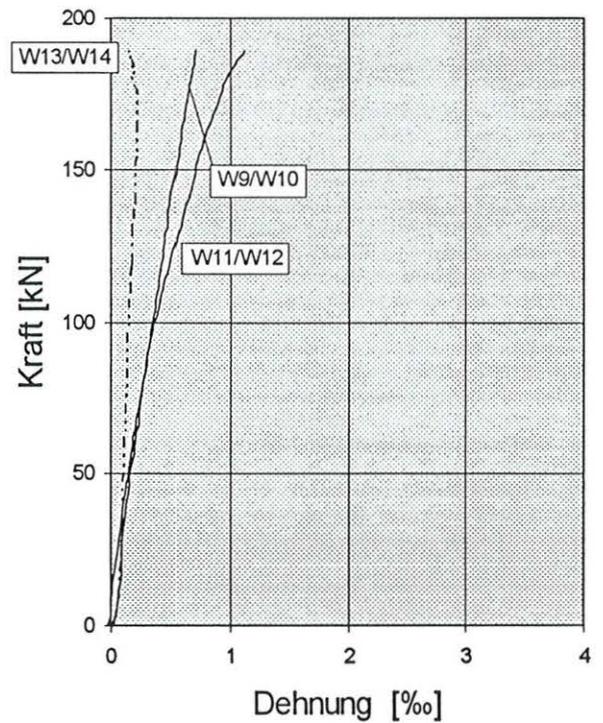
**Bild A3-11 :** Last-Rißaufweitungsdiagramm Versuch II / 5



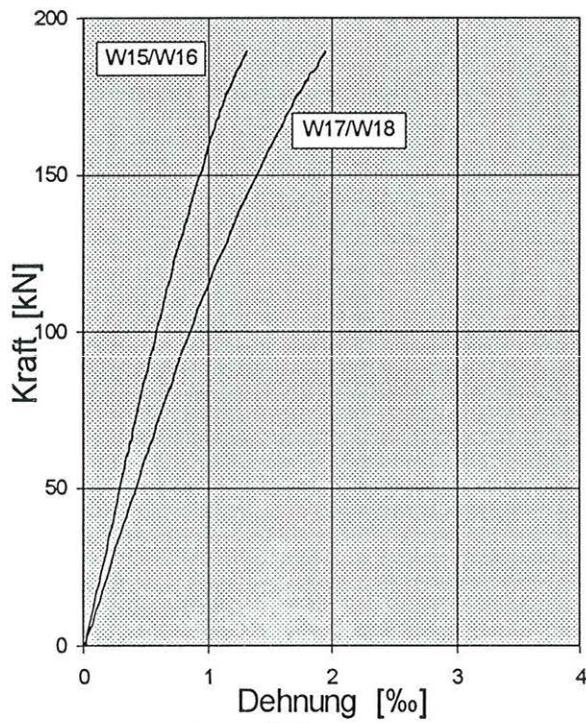
**Bild A3-12 :** Last-Rißaufweitungsdiagramm Versuch II / 6



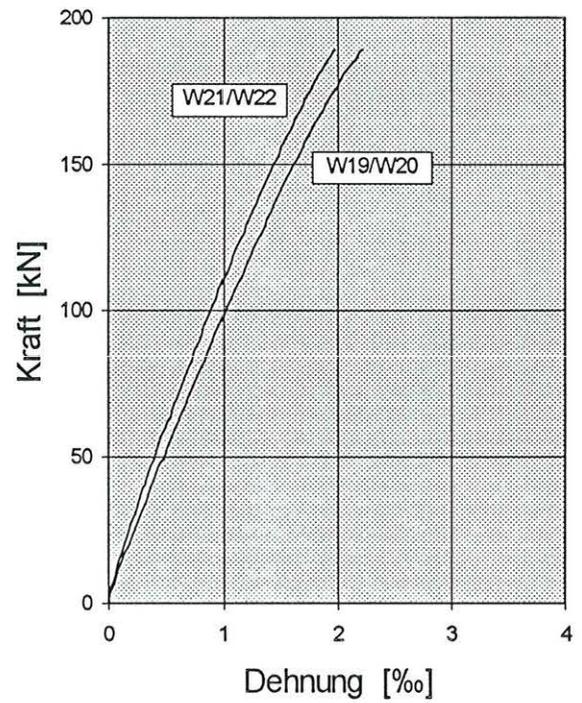
**Bild A5-1 :** Gesamtdurchbiegung des Trägers und Horizontalverschiebungen des Auflagers in Abhängigkeit von der Versuchslast - Versuch GV1A



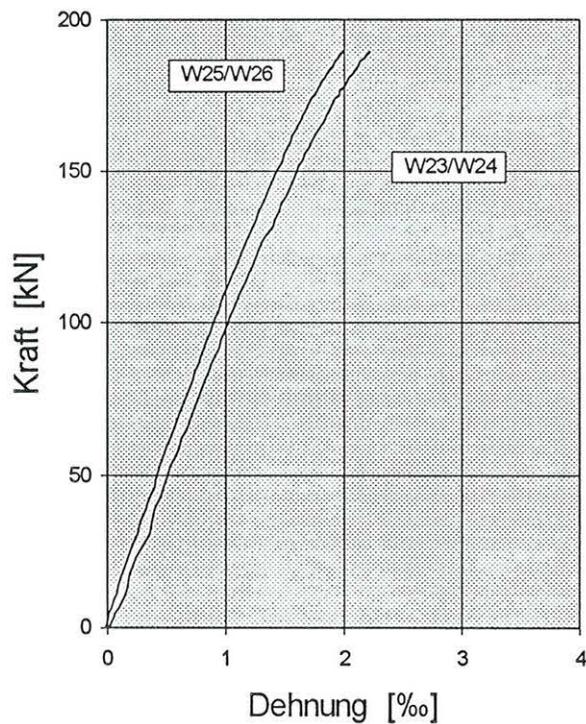
**Bild A5-2 :** Dehnungen auf der Systemlinie - Versuch GV1A



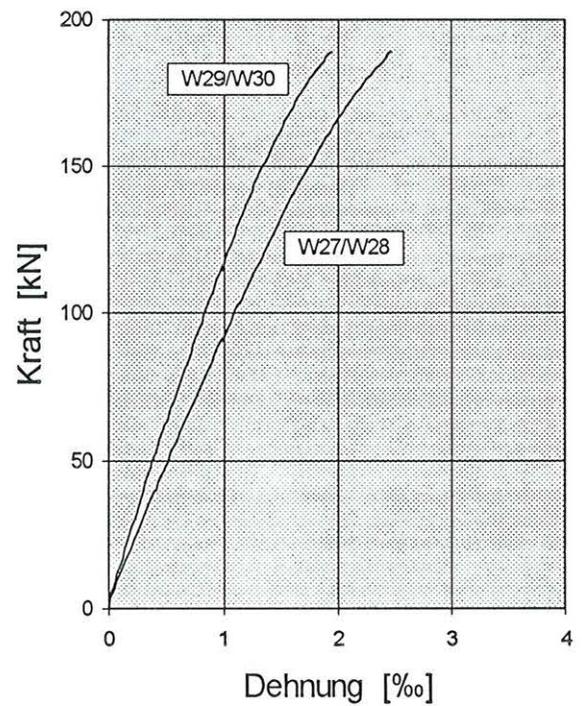
**Bild A5-3 :** Dehnungen der Meßpunkte in der ersten Reihe  
Versuch GV1A



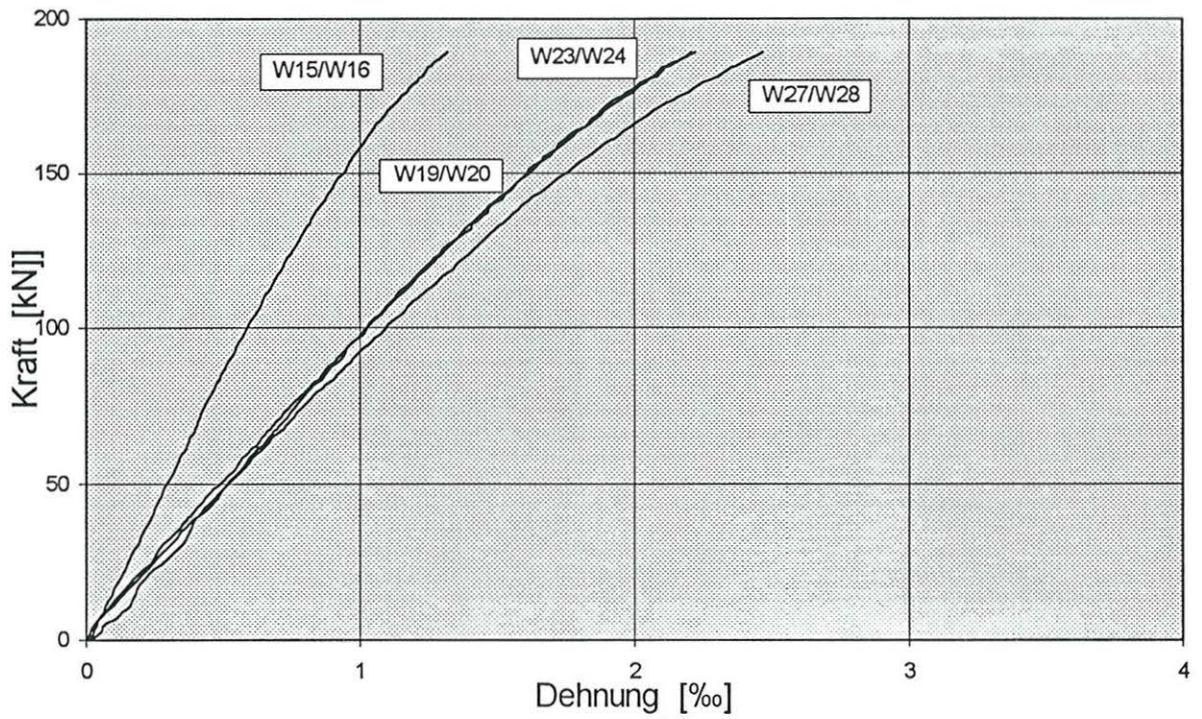
**Bild A5-4 :** Dehnungen der Meßpunkte in der zweiten Reihe  
Versuch GV1A



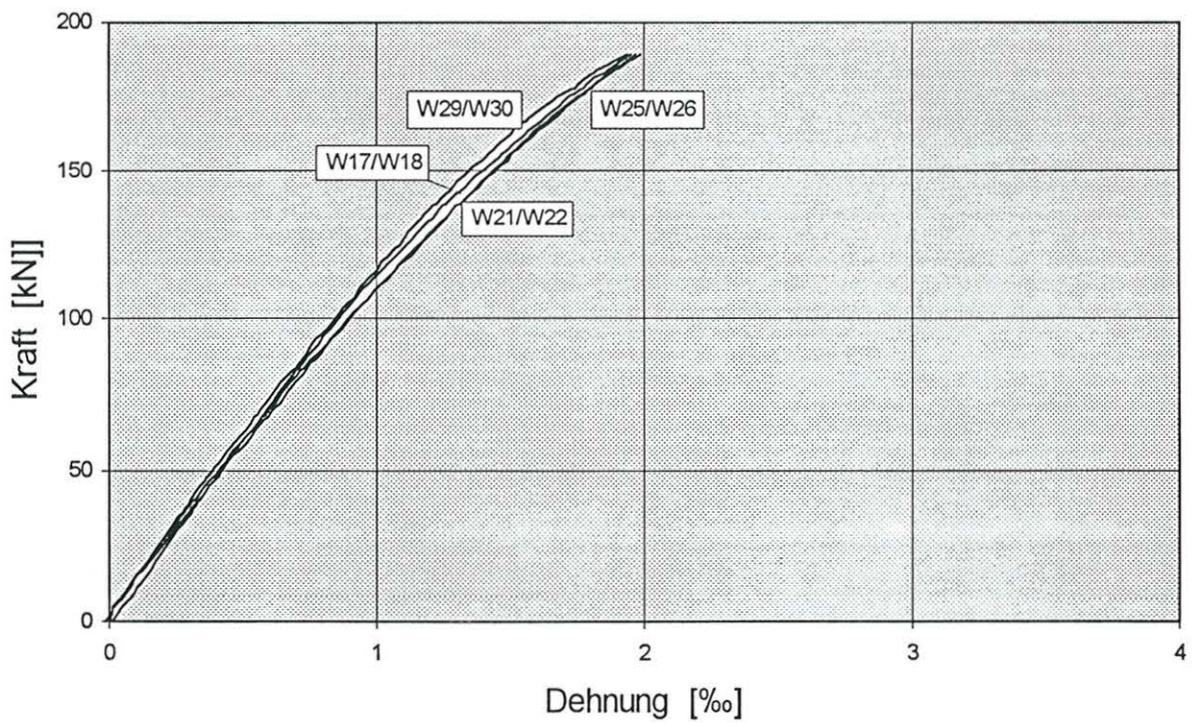
**Bild A5-5 :** Dehnungen der Meßpunkte in der dritten Reihe  
Versuch GV1A



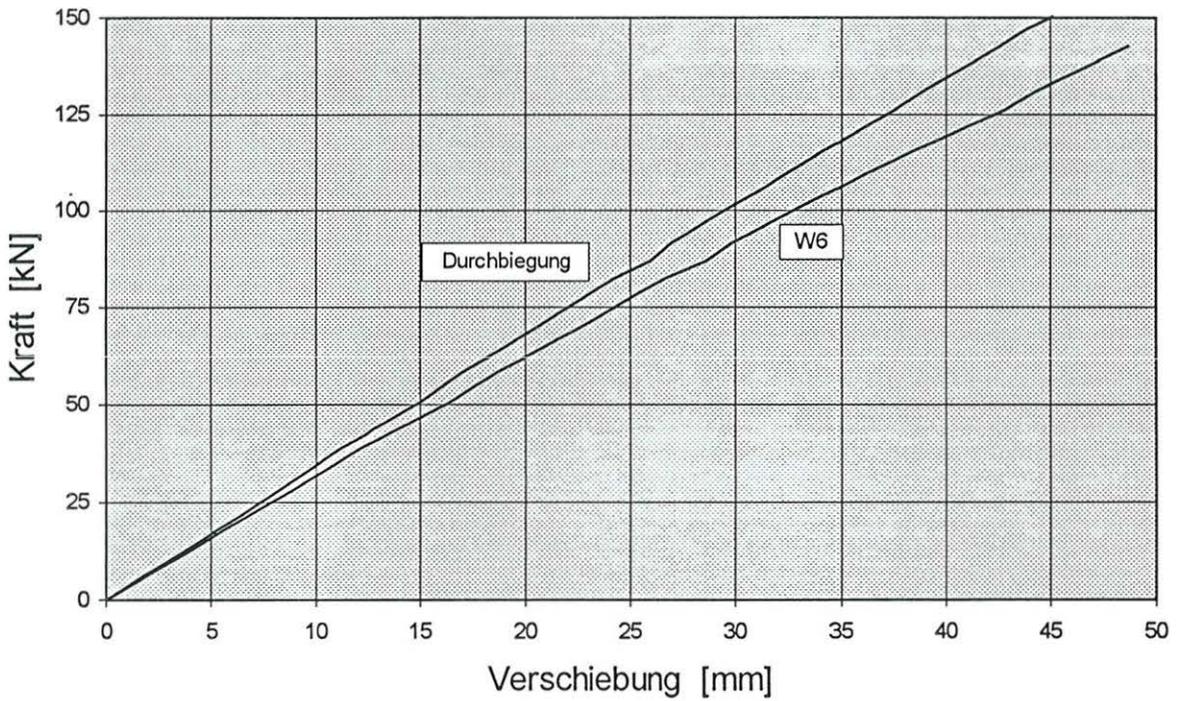
**Bild A5-6 :** Dehnungen der Meßpunkte in der vierten Reihe  
Versuch GV1A



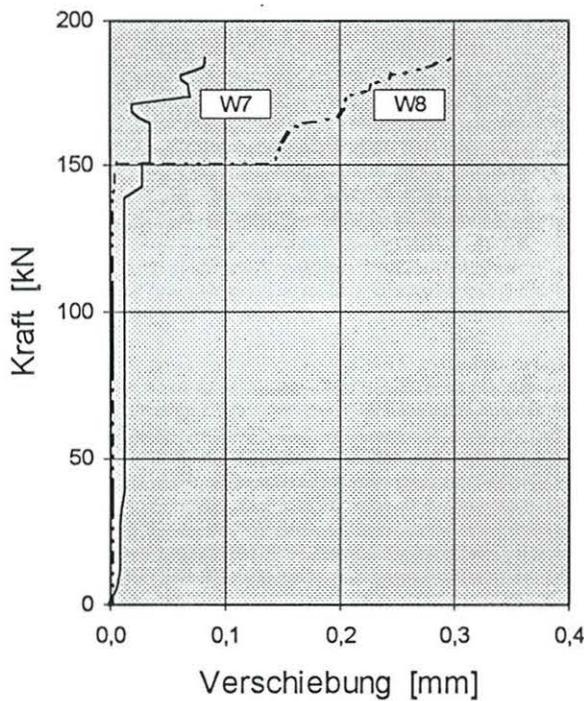
**Bild A5-7 :** Dehnungen über der Gewindestange (Reihen 1 ÷ 4) - Versuch GV1A



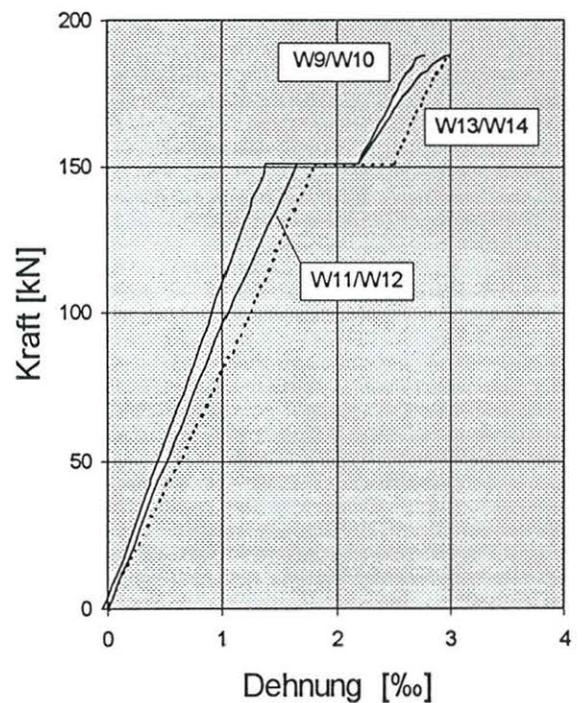
**Bild A5-8 :** Dehnungen in Trägermitte (Reihen 1 ÷ 4) - Versuch GV1A



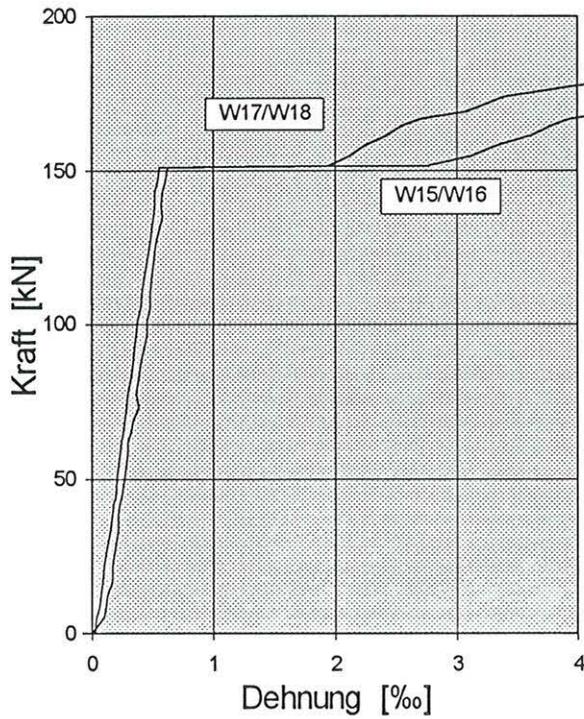
**Bild A5-9 :** Gesamtdurchbiegung des Trägers und Horizontalverschiebungen des Auflagers in Abhängigkeit von der Versuchslast - Versuch GV1B



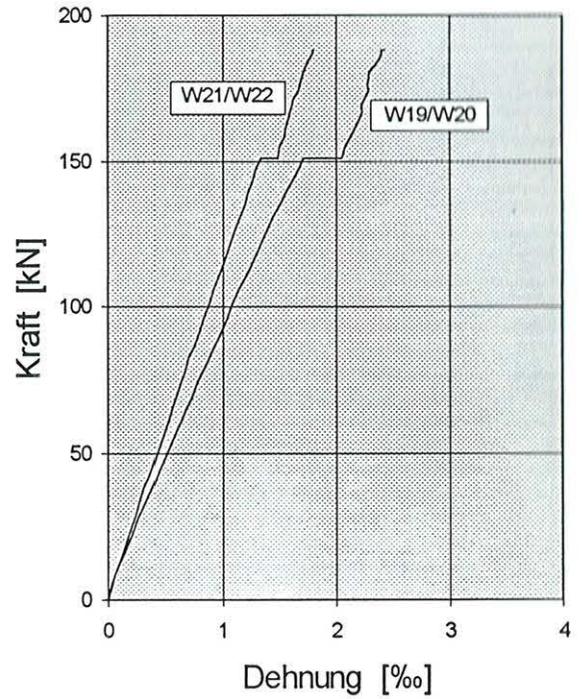
**Bild A5-10 :** Eindrückung der Unterlagscheiben - Versuch GV1B



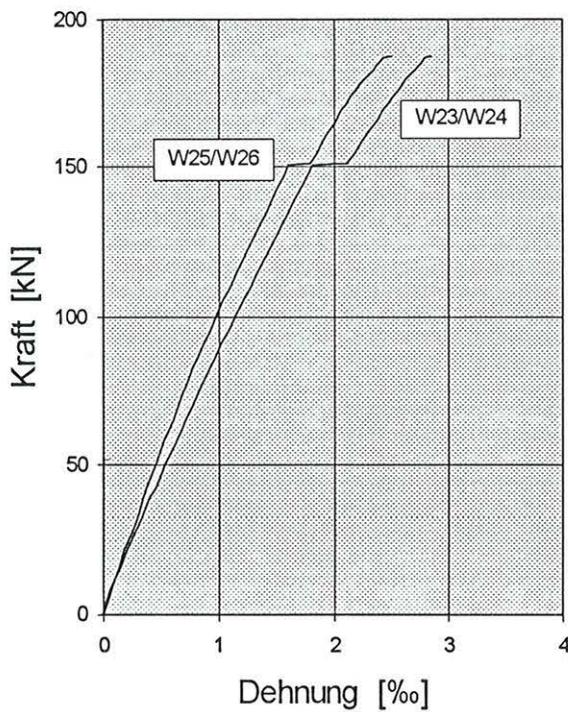
**Bild A5-11 :** Dehnungen auf der Systemlinie - Versuch GV1B



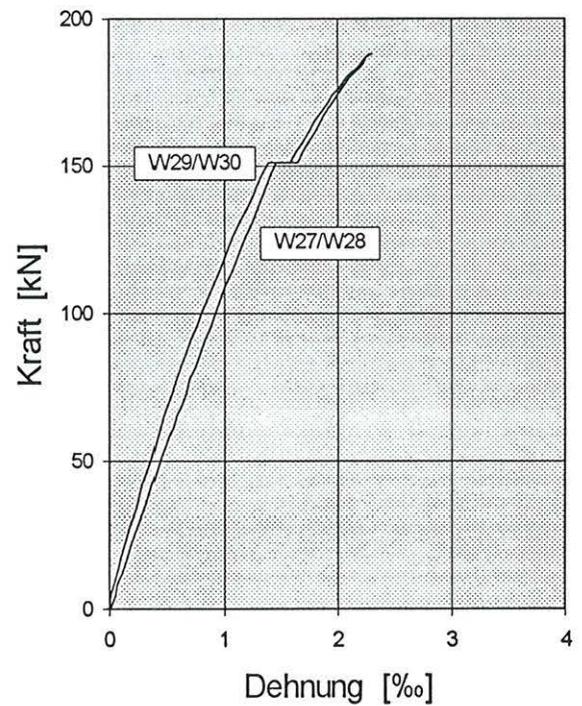
**Bild A5-12 :** Dehnungen der Meßpunkte in der ersten Reihe Versuch GV1B



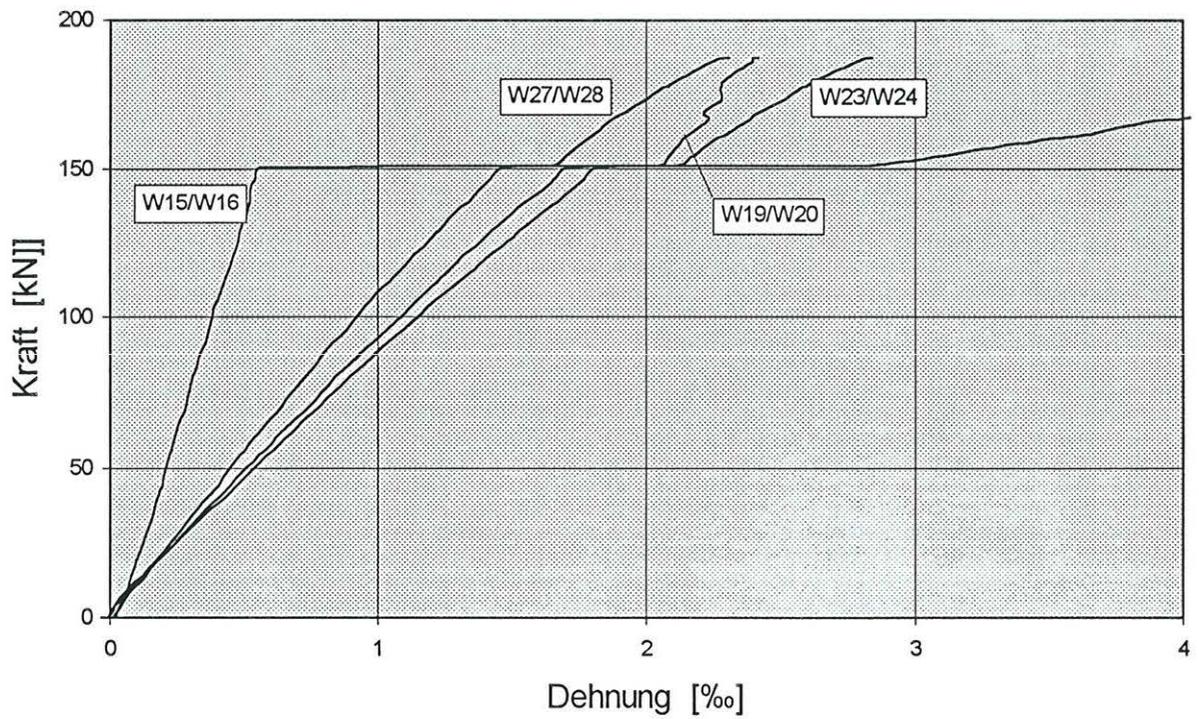
**Bild A5-13 :** Dehnungen der Meßpunkte in der zweiten Reihe Versuch GV1B



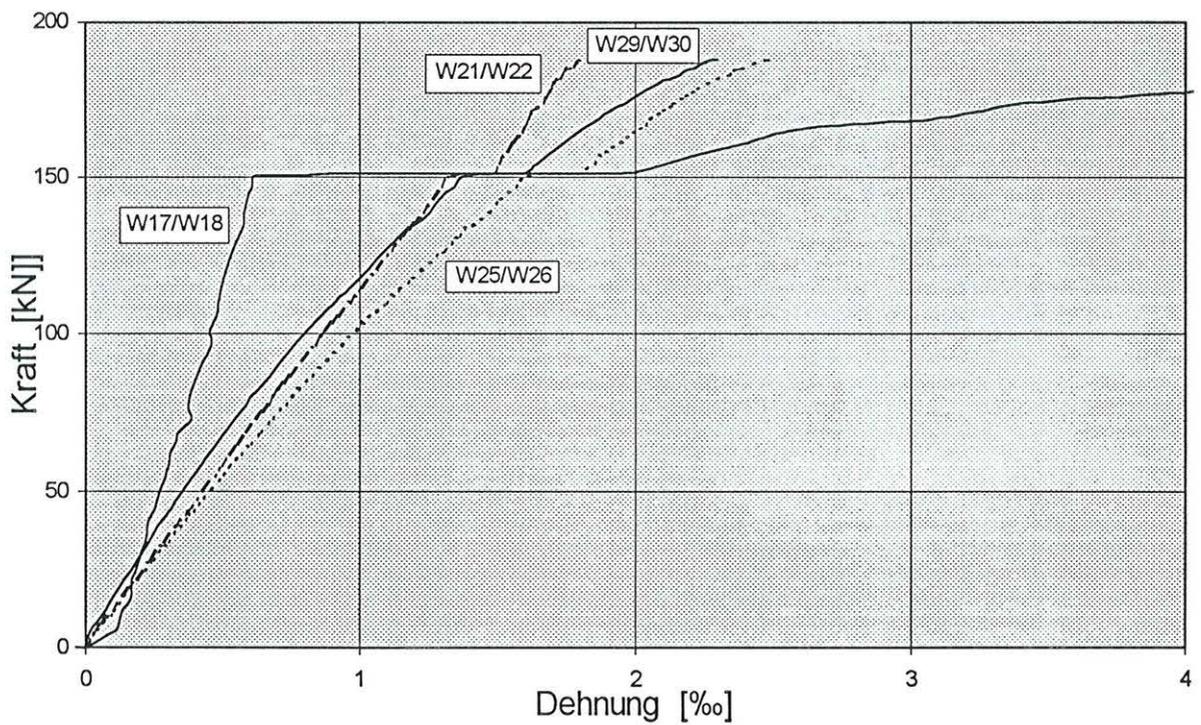
**Bild A5-14 :** Dehnungen der Meßpunkte in der dritten Reihe Versuch GV1B



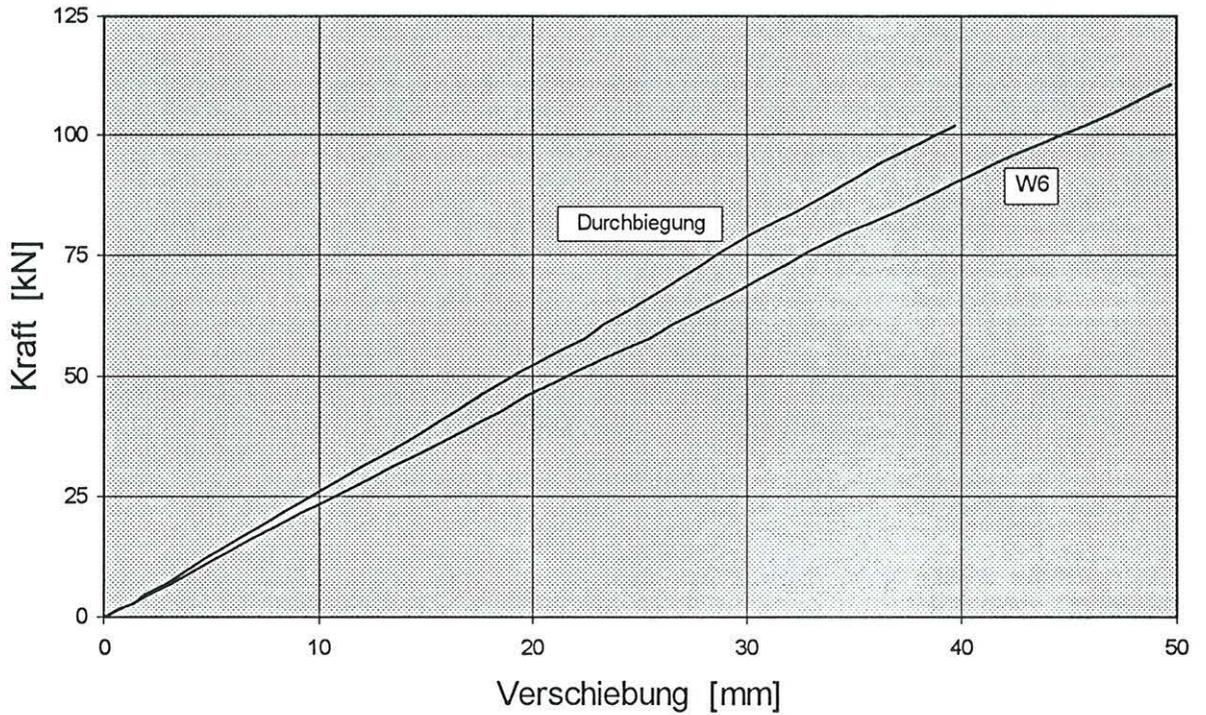
**Bild A5-15 :** Dehnungen der Meßpunkte in der vierten Reihe Versuch GV1B



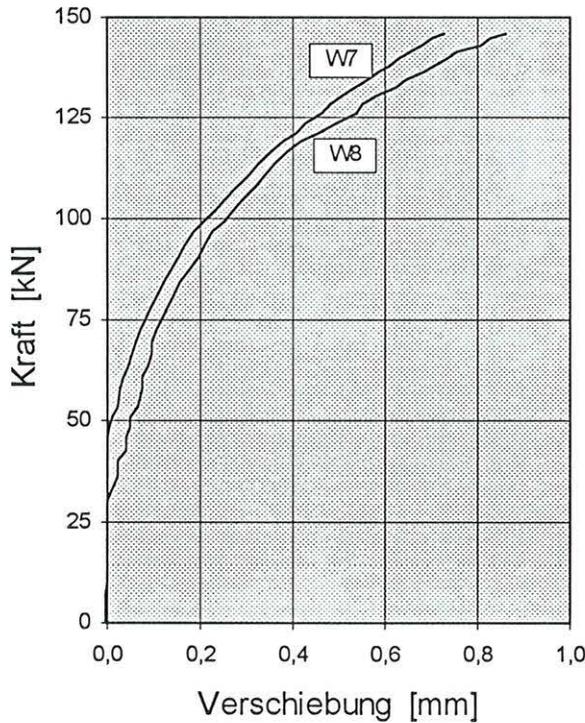
**Bild A5-16 :** Dehnungen über der Gewindestange (Reihen 1 ÷ 4) - Versuch GV1B



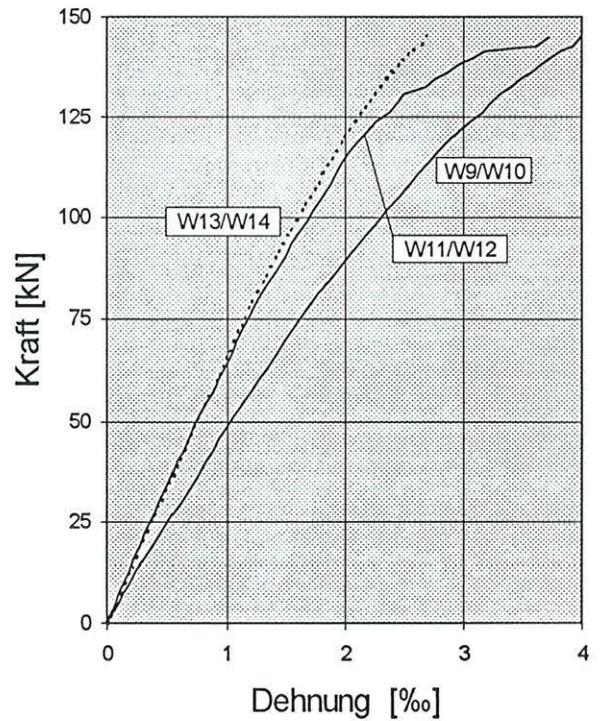
**Bild A5-17 :** Dehnungen in Trägermitte (Reihen 1 ÷ 4) - Versuch GV1B



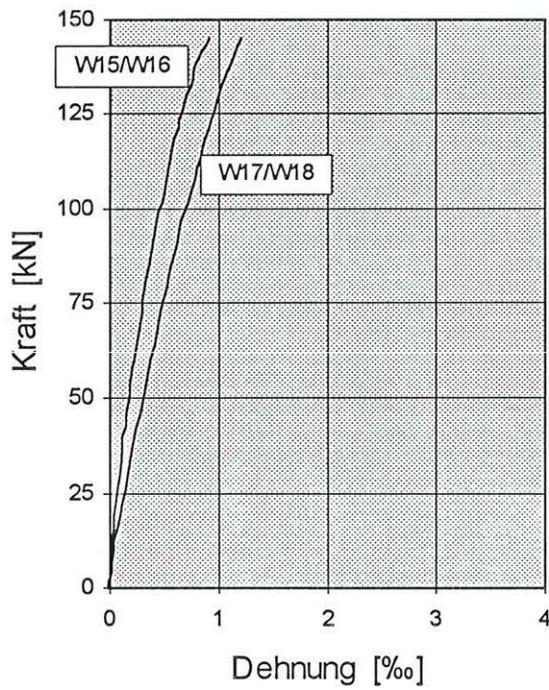
**Bild A5-18 :** Gesamtdurchbiegung des Trägers und Horizontalverschiebungen des Auflagers in Abhängigkeit von der Versuchslast - Versuch GV2A



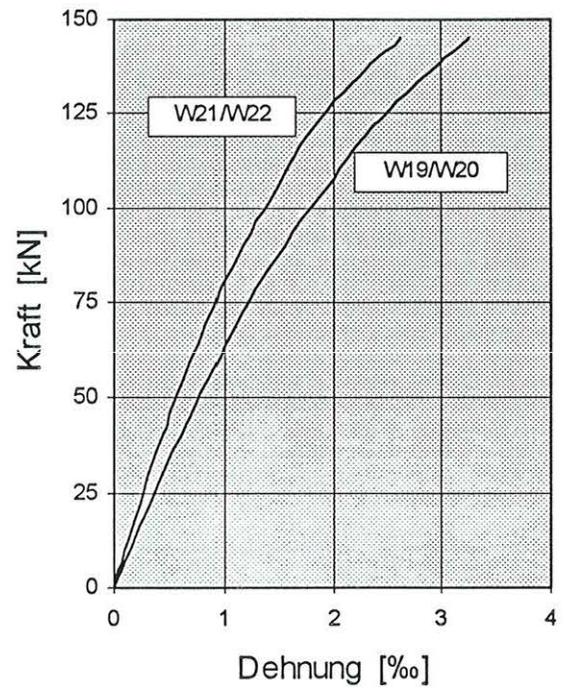
**Bild A5-19 :** Eindrückung der Unterlagsscheiben - Versuch GV2A



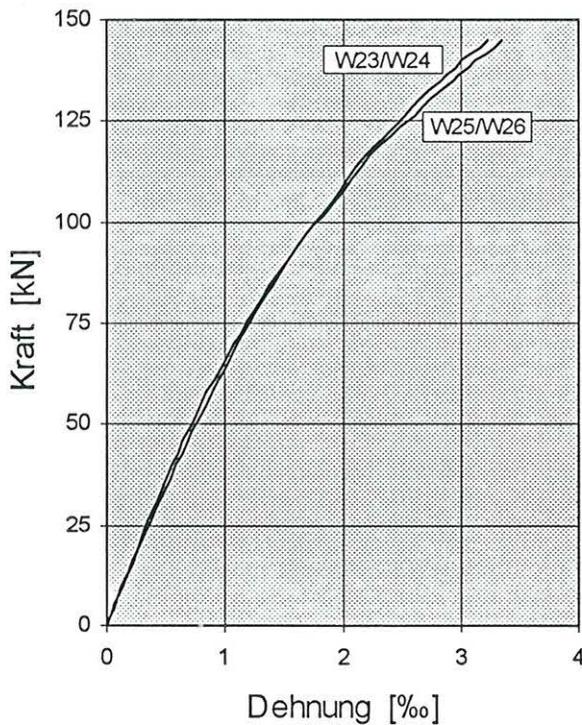
**Bild A5-20 :** Dehnungen auf der Systemlinie - Versuch GV2A



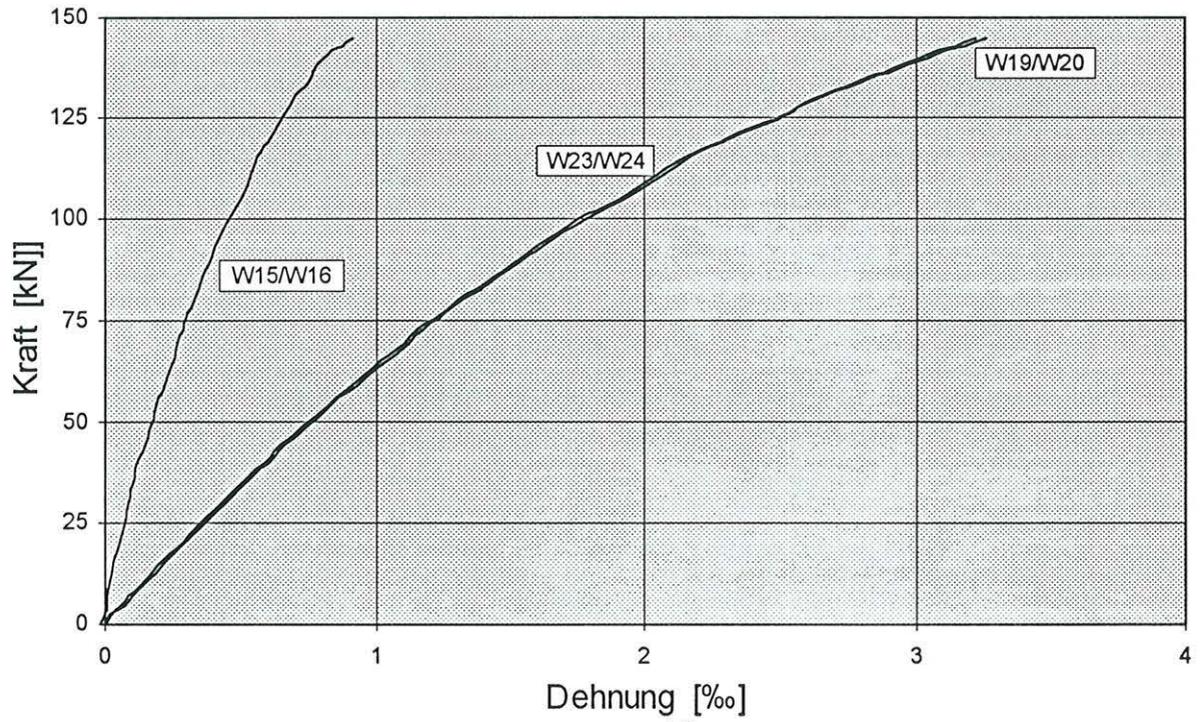
**Bild A5-21 :** Dehnungen der Meßpunkte  
in der ersten Reihe  
Versuch GV2A



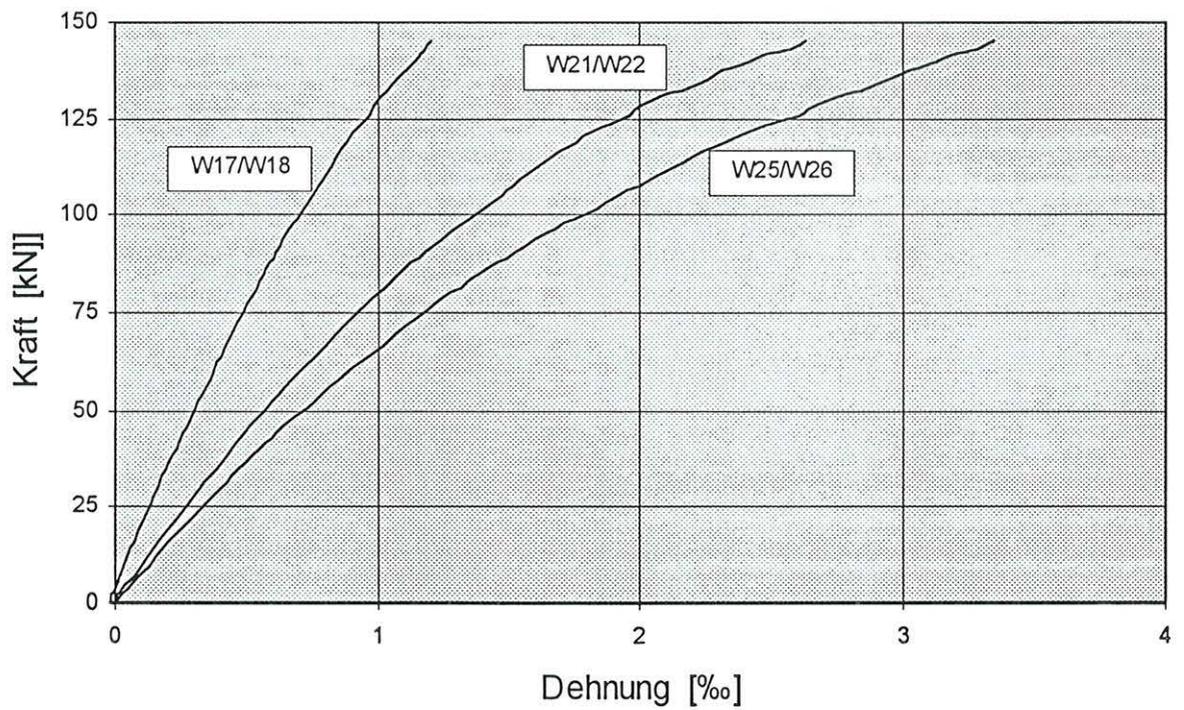
**Bild A5-22 :** Dehnungen der Meßpunkte  
in der zweiten Reihe  
Versuch GV2A



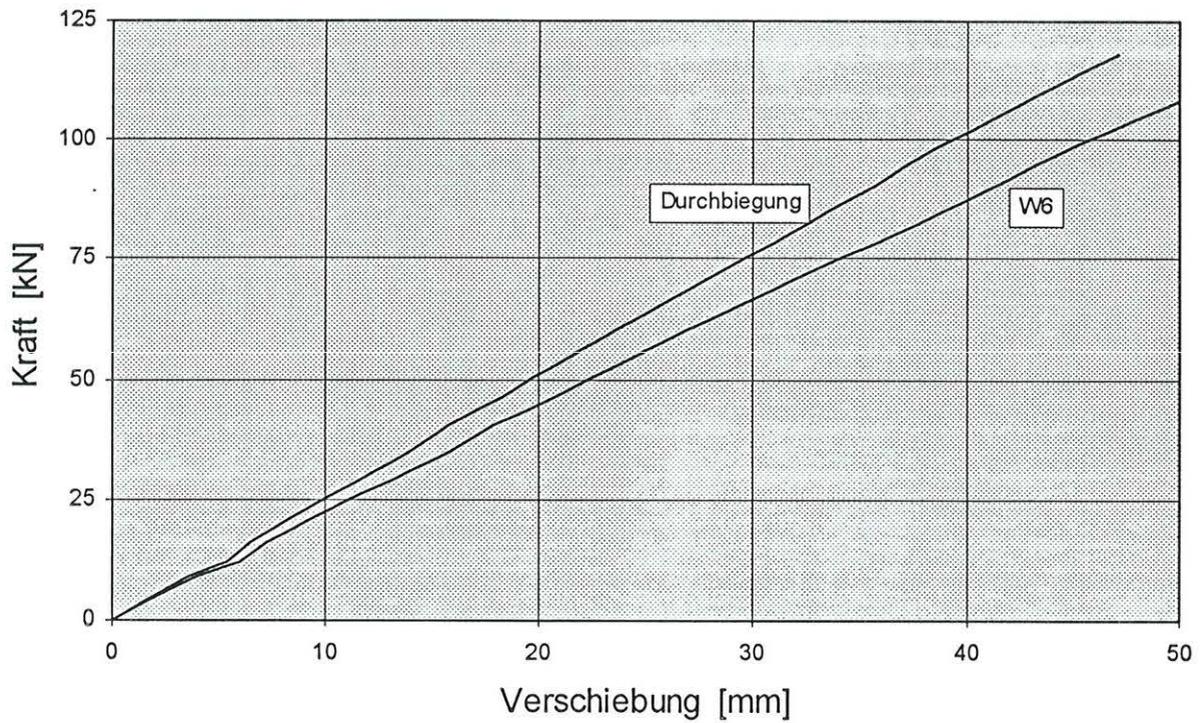
**Bild A5-23 :** Dehnungen der Meßpunkte  
in der dritten Reihe  
Versuch GV2A



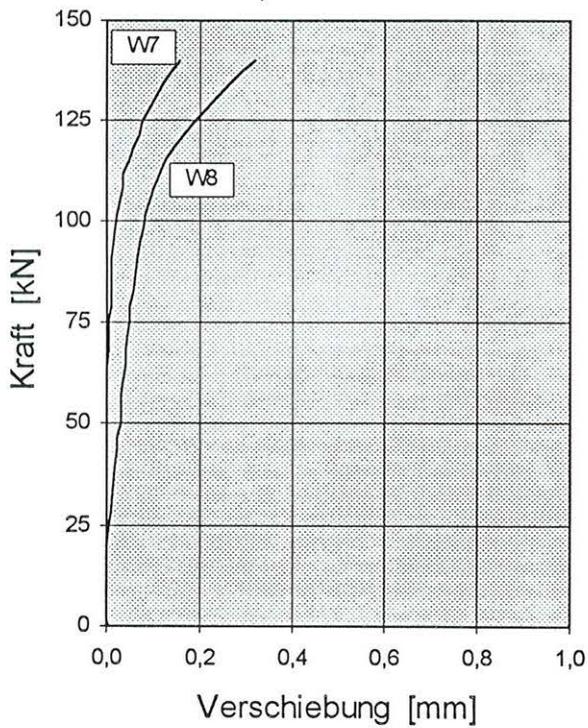
**Bild A5-24 :** Dehnungen über der Gewindestange (Reihen 1 ÷ 4) - Versuch GV2A



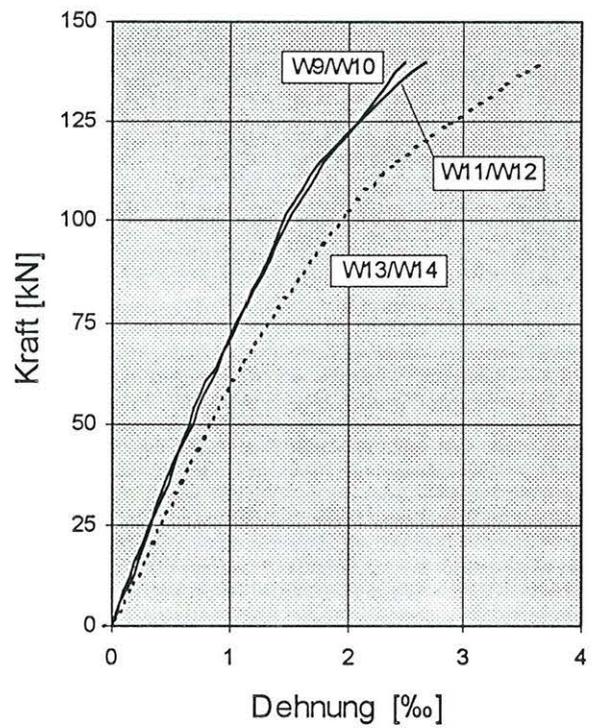
**Bild A5-25 :** Dehnungen in Trägermitte (Reihen 1 ÷ 4) - Versuch GV2A



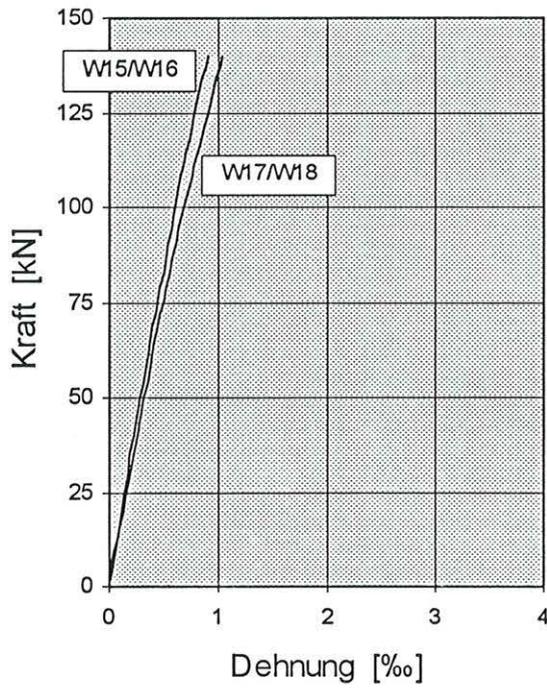
**Bild A5-26 :** Gesamtdurchbiegung des Trägers und Horizontalverschiebungen des Auflagers in Abhängigkeit von der Versuchslast - Versuch GV2B



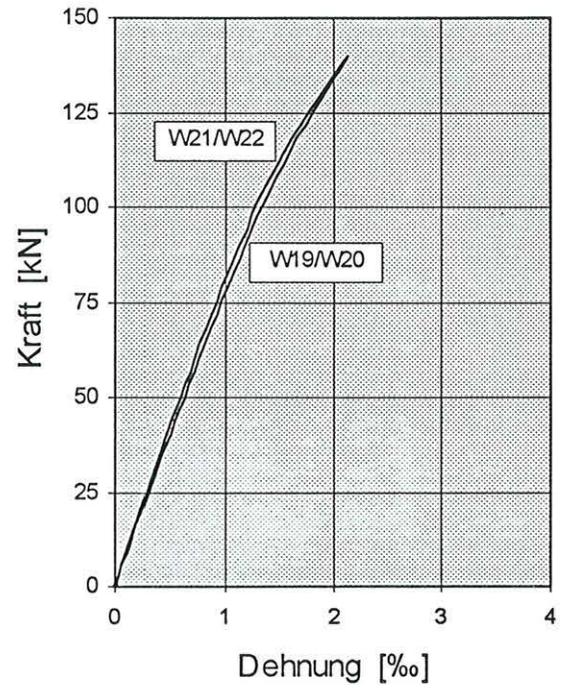
**Bild A5-27 :** Eindrückung der Unterlag-scheiben - Versuch GV2B



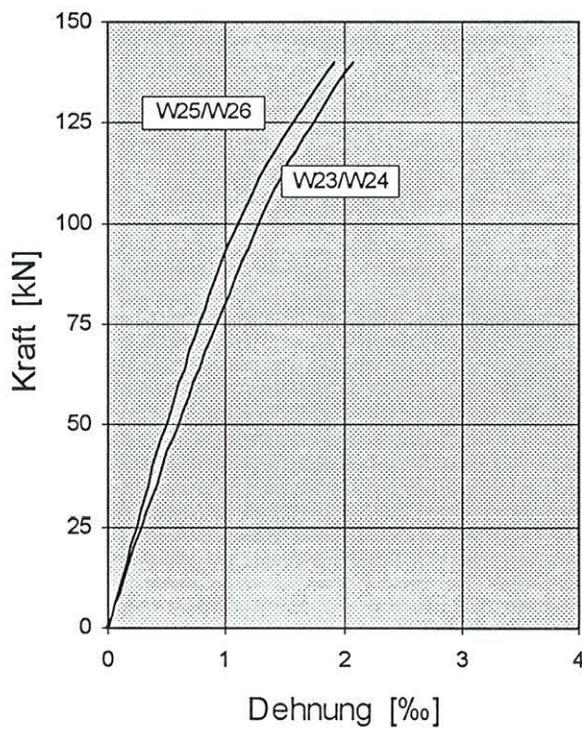
**Bild A5-28 :** Dehnungen auf der System-linie - Versuch GV2B



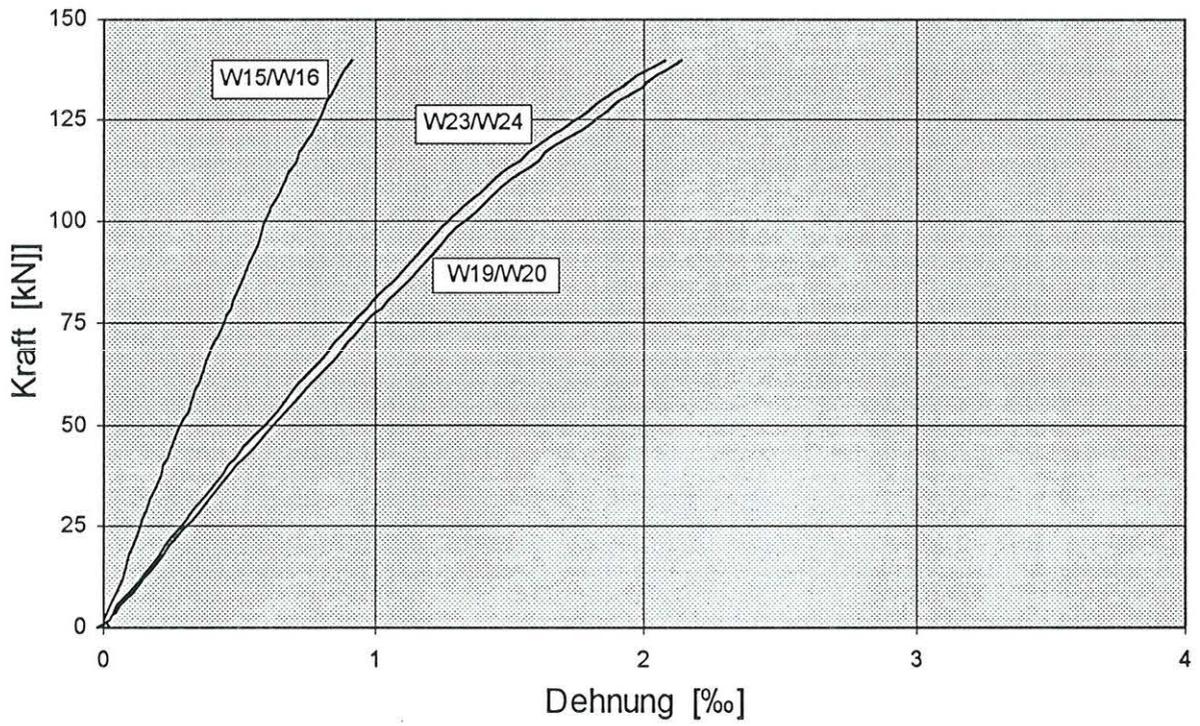
**Bild A5-29 :** Dehnungen der Meßpunkte in der ersten Reihe Versuch GV2B



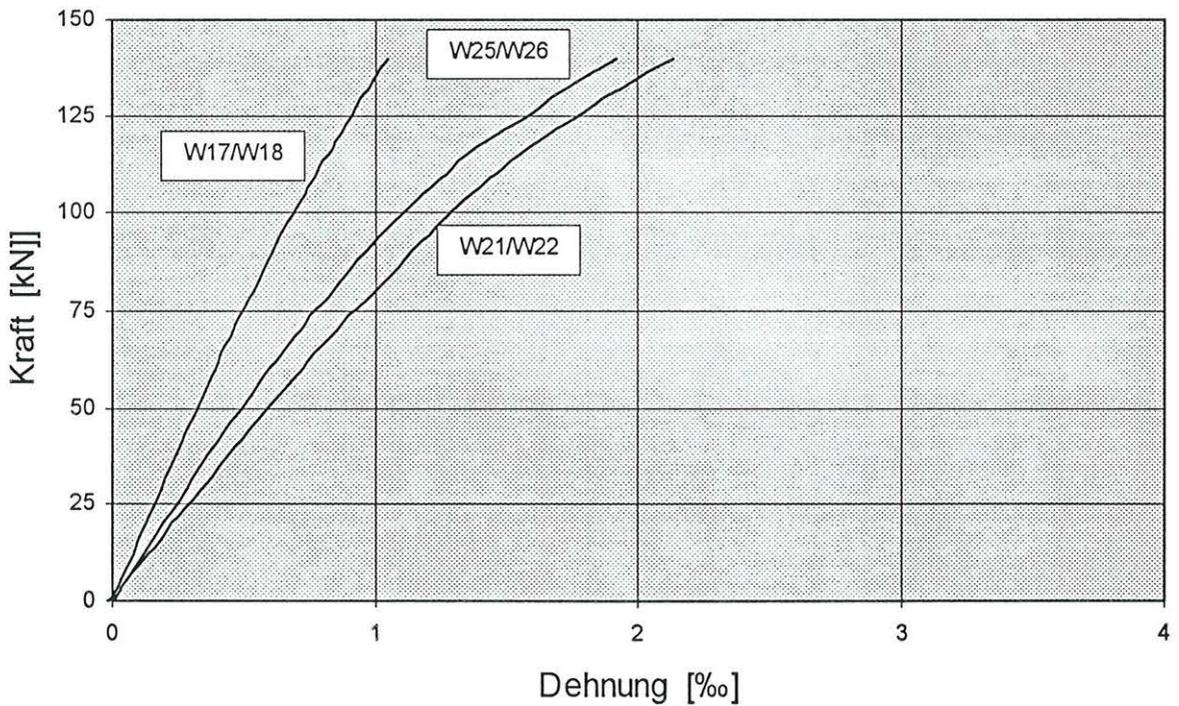
**Bild A5-30 :** Dehnungen der Meßpunkte in der zweiten Reihe Versuch GV2B



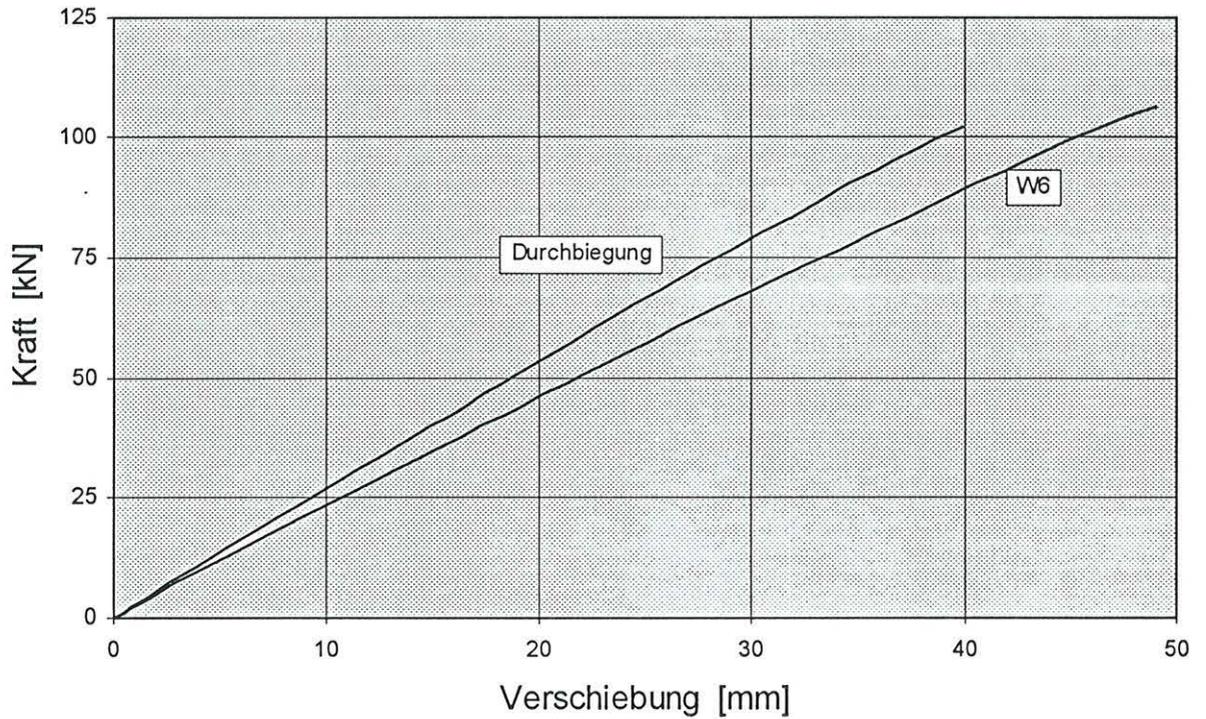
**Bild A5-31 :** Dehnungen der Meßpunkte in der dritten Reihe Versuch GV2B



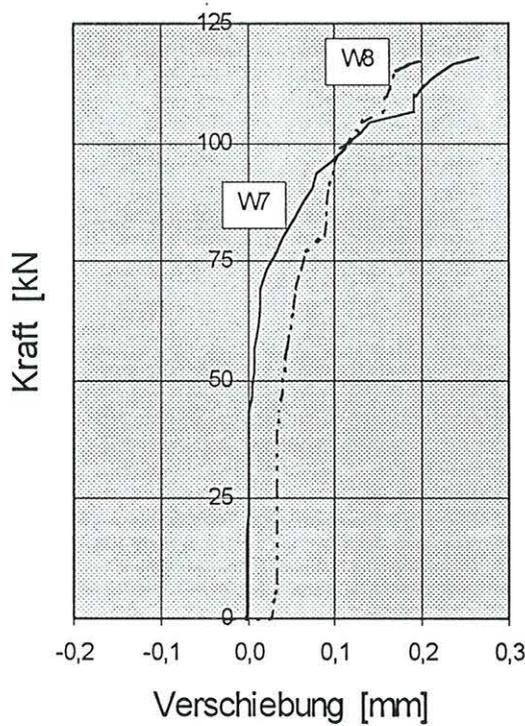
**Bild A5-32 :** Dehnungen über der Gewindestange (Reihen 1 ÷ 4) - Versuch GV2B



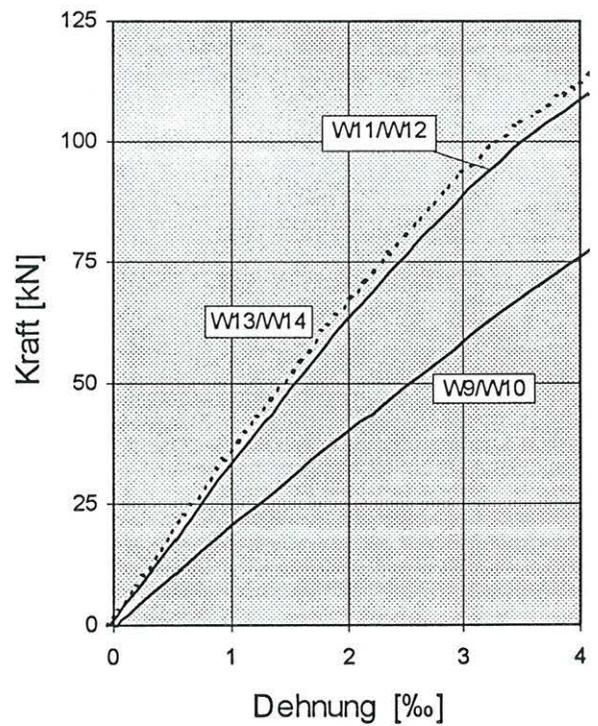
**Bild A5-33 :** Dehnungen in Trägermitte (Reihen 1 ÷ 4) - Versuch GV2B



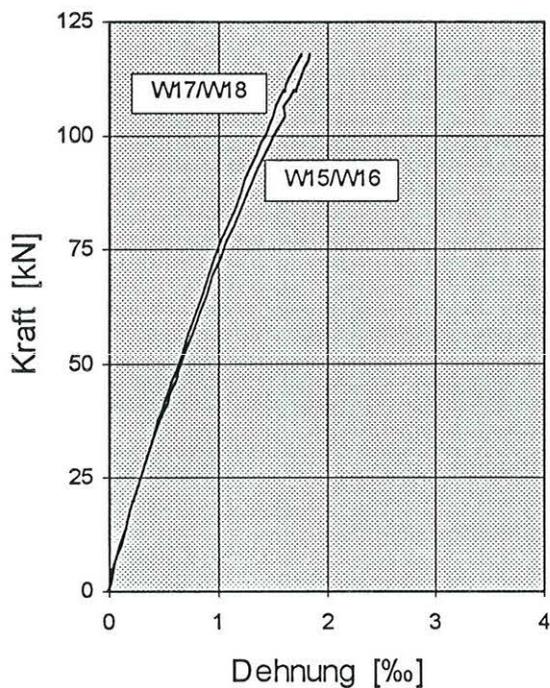
**Bild A5-34 :** Gesamtdurchbiegung des Trägers und Horizontalverschiebungen des Auflagers in Abhängigkeit von der Versuchslast - Versuch GV3A



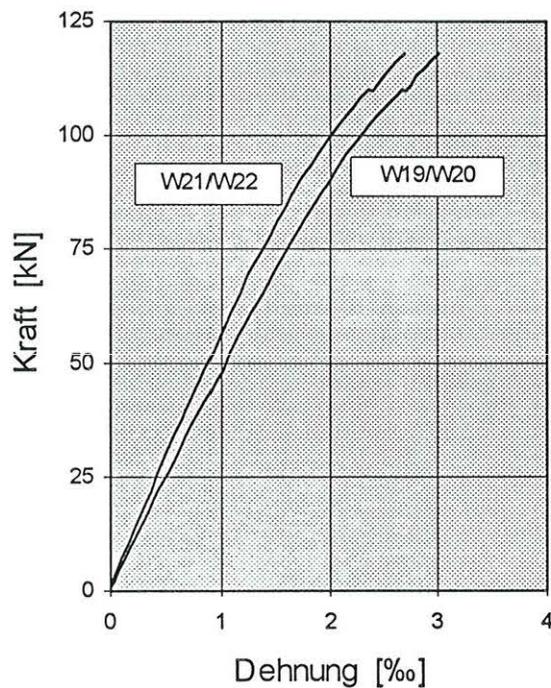
**Bild A5-35 :** Eindrückung der Unterlag-scheiben - Versuch GV3A



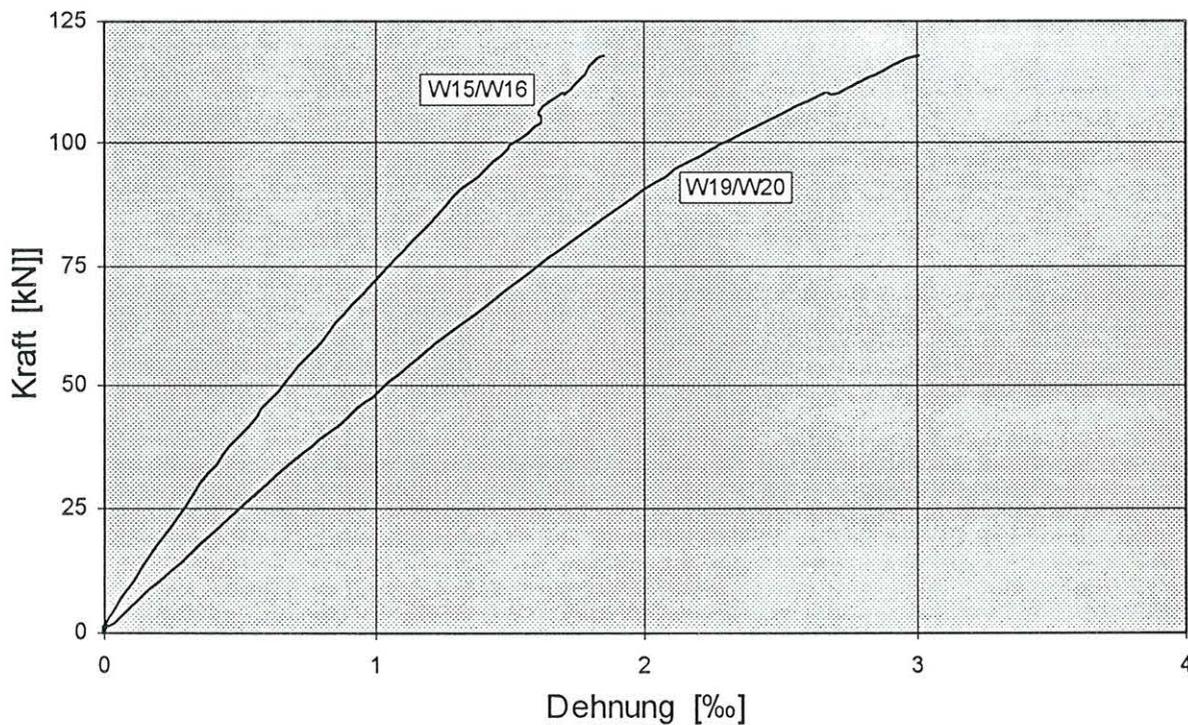
**Bild A5-36 :** Dehnungen auf der System-linie - Versuch GV3A



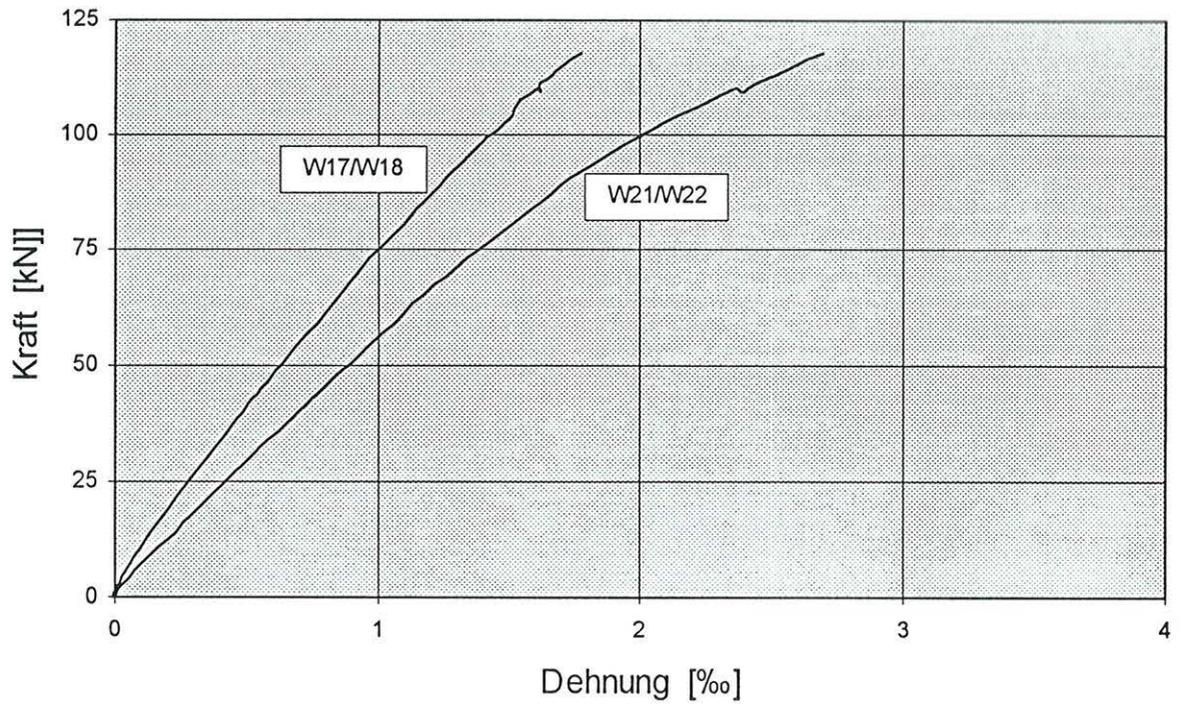
**Bild A5-37 :** Dehnungen der Meßpunkte  
in der ersten Reihe  
Versuch GV3A



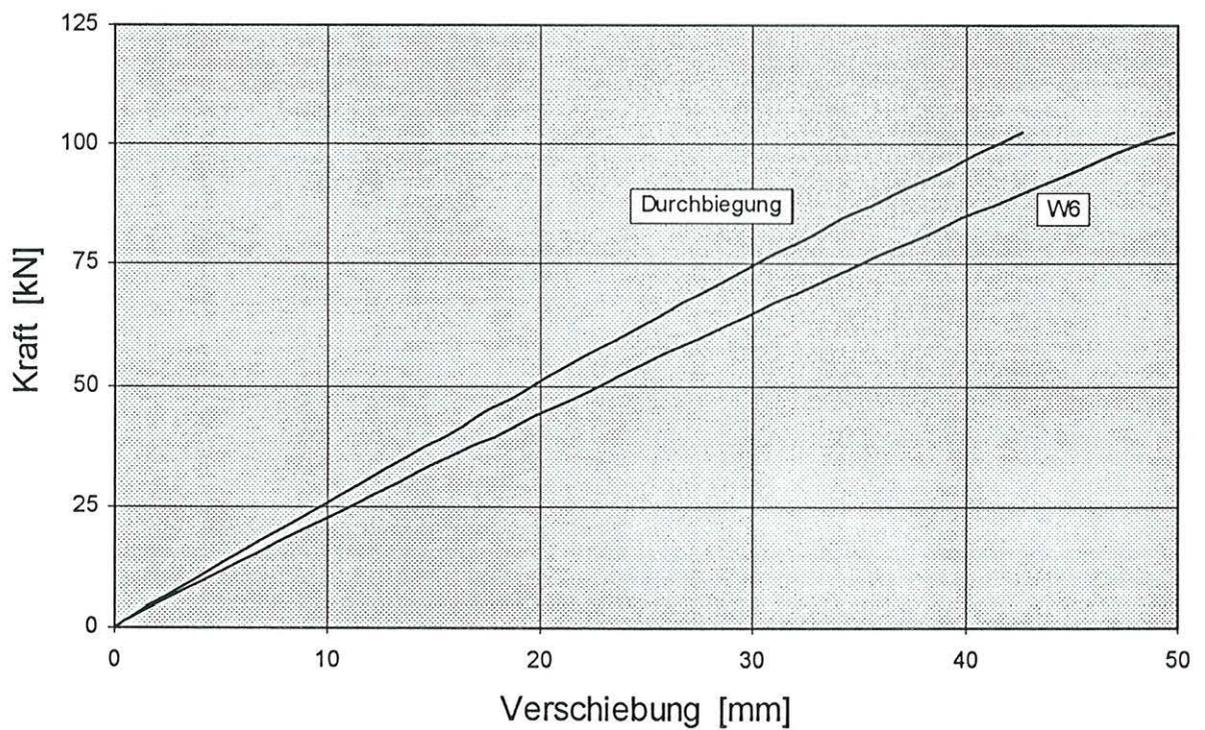
**Bild A5-38 :** Dehnungen der Meßpunkte  
in der zweiten Reihe  
Versuch GV3A



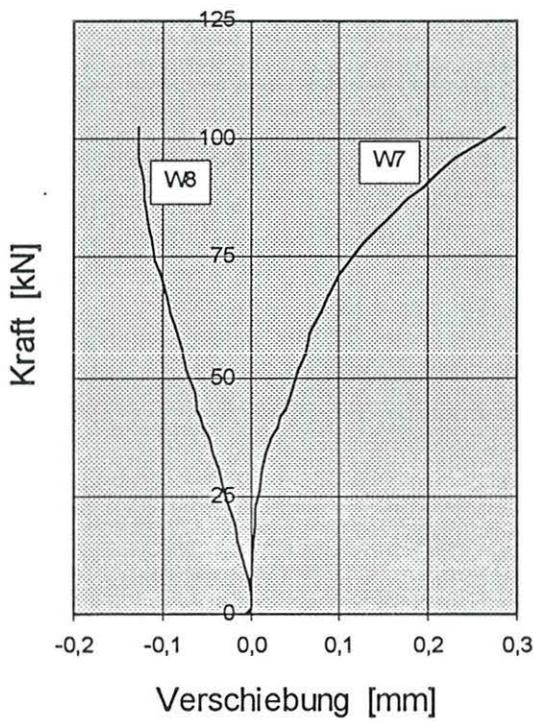
**Bild A5-39 :** Dehnungen über der Gewindestange (Reihen 1 ÷ 4) - Versuch GV3A



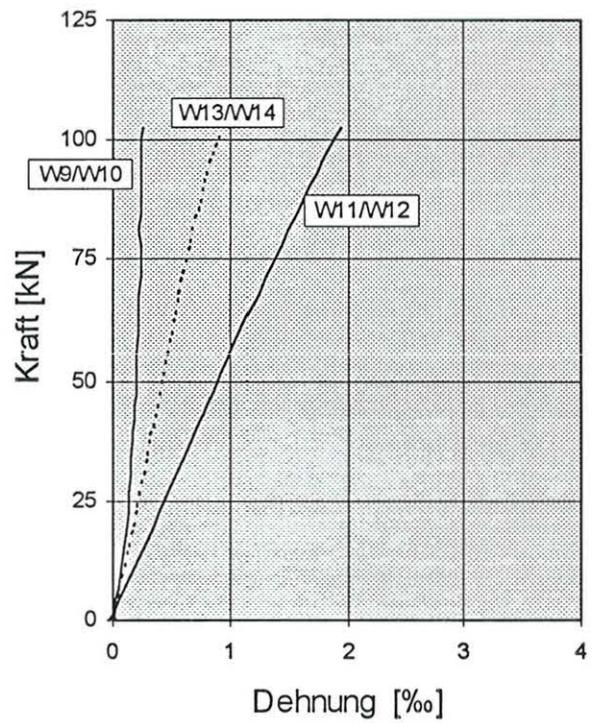
**Bild A5-40 :** Dehnungen in Trägermitte (Reihen 1 ÷ 4) - Versuch GV3A



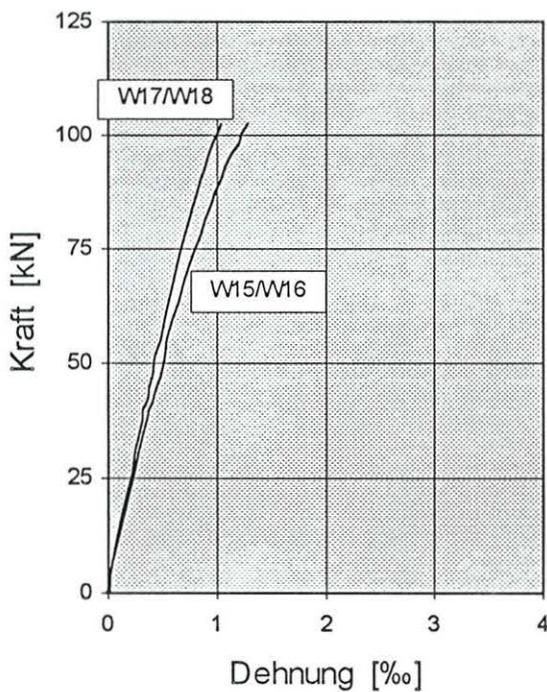
**Bild A5-41 :** Gesamtdurchbiegung des Trägers und Horizontalverschiebungen des Auflagers in Abhängigkeit von der Versuchslast - Versuch GV3B



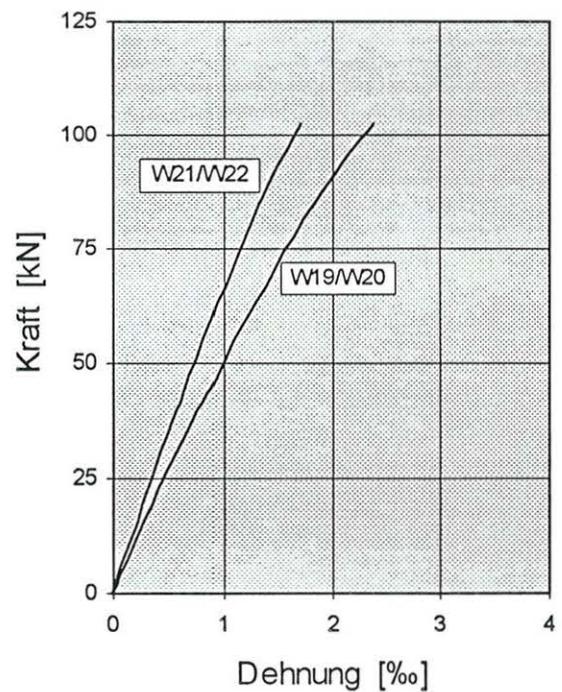
**Bild A5-42 :** Eindrückung der Unterlag-scheiben - Versuch GV3B



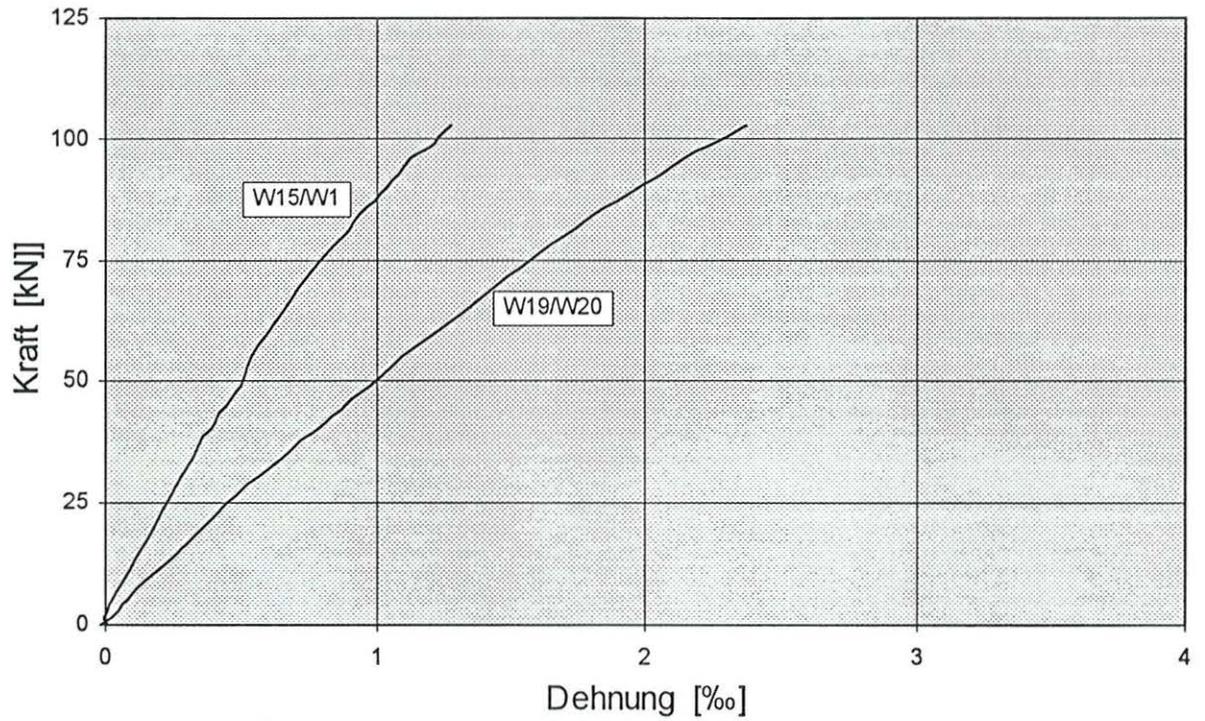
**Bild A5-43 :** Dehnungen auf der System-linie - Versuch GV3B



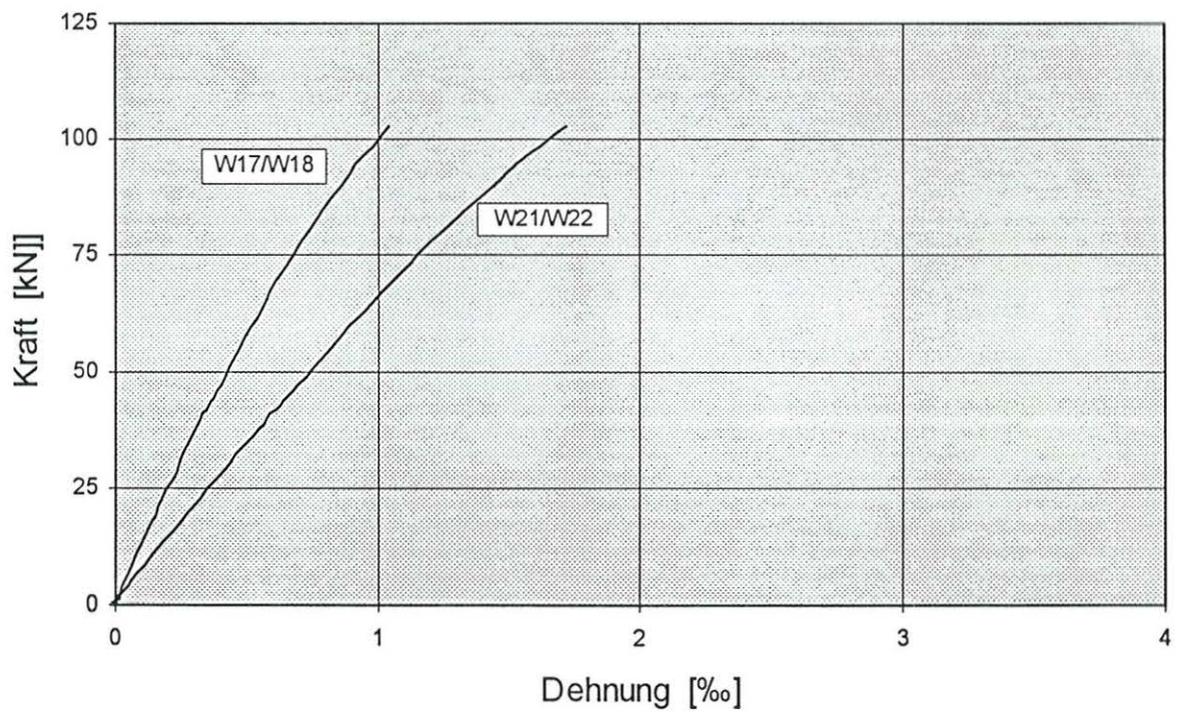
**Bild A5-44 :** Dehnungen der Meßpunkte in der ersten Reihe Versuch GV3B



**Bild A5-45 :** Dehnungen der Meßpunkte in der zweiten Reihe Versuch GV3B



**Bild A5-46 :** Dehnungen über der Gewindestange (Reihen 1 ÷ 4) - Versuch GV3B



**Bild A5-47 :** Dehnungen in Trägermitte (Reihen 1 ÷ 4) - Versuch GV3B

