

# **Erarbeitung vollständiger Bemessungs- grundlagen im Rahmen bautechnischer Zulassungen für Sandwichbauteile**

**Teil 2: Berücksichtigung zusätzlicher Beanspruchungen  
bei der Bemessung von durchlaufenden  
Sandwichplatten im Zwischenstützbereich**

**T 2712/2**

T 2712/2

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2002

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

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

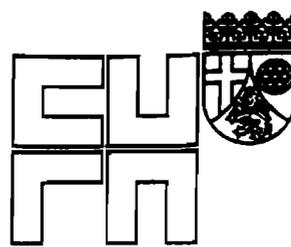
Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

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

e-mail [info@irb.fhg.de](mailto:info@irb.fhg.de)

URL <http://www.IRBbuch.de>



# Forschungsbericht

„Erarbeitung vollständiger Bemessungsgrundlagen im  
Rahmen bautechnischer Zulassungen für Sandwichbauteile“

Teil 2: Berücksichtigung zusätzlicher Beanspruchungen bei  
der Bemessung von durchlaufenden Sandwichplatten  
im Zwischenstützenbereich

Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin  
Projekt-Nr.: IV 1-5-618/90

Prof. Dr.-Ing. K. Berner

November 1995

## Inhaltsverzeichnis

### II. 1. Darstellung der Problematik

#### 2. Untersuchungen zum Trageverhalten im Zwischenstützenbereich bei Beanspruchungen infolge Auflast

- 2.1 Allgemeines
- 2.2 **Experimentelle Untersuchungen**
  - 2.2.1 Versuche zur genauen Bestimmung der Beanspruchungen der Deckbleche und der Kernschicht im unmittelbaren Bereich der Zwischenauflager
    - 2.2.1.1 Ersatzträger-Versuche
    - 2.2.1.2 Zweifeldträger-Versuche
  - 2.2.2 Serienmäßige Ersatzträger-Versuche mit unterschiedlichen Schaumqualitäten, Deckblechgeometrien, Bauteildicken und Auflagerbreiten
- 2.3 **Auswertung der Versuche und theoretische Ansätze**
  - 2.3.1 Darstellung unterschiedlicher Interpretationen der Ergebnisse und Traglastmodelle
    - 2.3.1.1 Biegemomenten/Auflagekraft-Interaktion
    - 2.3.1.2 Interaktion zwischen Deckblech-Beanspruchung und elastischen Verformungen
    - 2.3.1.3 Deckblechbeanspruchungen bei Berücksichtigung von elastisch-plastischen Verformungen im Bereich der Auflager-Ränder
  - 2.3.2 Vergleich der Beanspruchungen bei Ersatzträger- und Zweifeldträger-Versuchen
- 2.4 **Darstellung von Interaktions-Beziehungen für eine praxisgerechte Bemessung.**

### **3. Untersuchungen zum Tragverhalten im Zwischenstützenbereich bei Beanspruchung infolge von abhebenden Lasten**

- 3.1            Allgemeines
- 3.2            Experimentelle Untersuchungen  
              Ersatzträger-Versuche
- 3.3            Auswertung der Versuche
- 3.4            Darstellung von Interaktions-Beziehungen für eine  
              praxisgerechte Bemessung

### **4. Zusammenfassung**

## II. Berücksichtigung zusätzlicher Beanspruchungen bei der Bemessung von durchlaufenden Sandwichplatten im Zwischenstützen-Bereich.

### 1. Darstellung der Problematik

Beim praxisgerechten Einsatz von Sandwich-Dach- und Wandbauteilen werden überwiegend durchlaufende Platten über mehrere Zwischenstützen (Wandriegel oder Dachpfetten) vorgesehen. Dabei werden hinsichtlich der Deckblech-Profilierung zur Zeit ausschließlich Bauteile mit **beidseitig** ebenen oder **quasi-ebenen** (linierte oder gesickte) oder auf der oberen (äußeren) Seite **profilierten** und auf der unteren (inneren) Seite ebenen oder **quasi-ebenen** Deckblechen verwendet.

Wie bereits in Kap. I/2 dargestellt, sind bei den Dach- und Wandbauteilen Einwirkungen aus Eigengewicht, Schnee, Wind und unterschiedlichen Deckblechtemperaturen zu erwarten.

Durch diese Einwirkungen entstehen Beanspruchungen infolge von Biegemomenten und Quer- bzw. Auflagekräften. Es liegt auf der Hand, die Frage zu stellen, inwieweit eine Überlagerung (Interaktion) der Beanspruchungen, insbesondere bei durchlaufenden Sandwichplatten, zu berücksichtigen ist. Dies ist insbesondere im Bereich der Mittelunterstützungen von Bedeutung, da hier sowohl die Momentenbeanspruchung als auch die Quer- bzw. Auflagekräfte am größten sind. Die Beachtung solcher Interaktionen ist bei vergleichbaren Bauelementen, wie z.B. bei Trapezblechen (M/Q-Interaktion), schon immer gefordert.

Bei der Bemessung von Sandwichbauteilen wurde eine Interaktion der Beanspruchungen bisher nicht gefordert. Bemessungsrelevant ist normalerweise die Knitterspannung der gedrückten Deck-

schicht, d.h. bei negativen Biegemoment (Beanspruchung durch Auflast) die untere, bei positiven Biegemoment (Beanspruchung durch abhebende Lasten) die obere Deckschicht.

Die Knitterspannung bzw. der entsprechende Rechenwert wurde im Rahmen von Zulassungsverfahren aufgrund von **Einfeld-Bauteilver-suchen** ermittelt. Hierbei tritt immer Versagen im Bereich des maximalen Biegemomentes auf, d.h. in Feldmitte. Dieser Bereich ist völlig ungestört, d.h. ohne zusätzliche Querbeanspruchungen, wie sie im Bereich von Mittel-Auflagern infolge von Quer- und Auflagerkräfte vorhanden sind.

Eine Bemessung von durchlaufenden Sandwichplatten mit Rechenwerten (Knitterspannungen), die deutlich günstiger sind im Vergleich zu den real erreichbaren Werten bei Interaktion der vorhandenen Beanspruchungen, liegt zunächst immer auf der "unsicheren" Seite. Von Seiten des DIBt wurde deshalb eine pauschale Abminderung der Knitterspannungen um 10 % bzw. 20 % vorgeschrieben. Durch die nachfolgend dargestellte Untersuchungen soll diese Maßnahme bestätigt oder gegebenenfalls durch geeignete Vorschläge relativiert werden.

Bei der Beurteilung des Tragverhaltens von durchlaufenden Sandwichplatten im Bereich der Zwischenunterstützungen sind hinsichtlich der auftretenden Auflagerreaktion grundsätzlich die Beanspruchungen zu unterscheiden, die die Bauteile an die Zwischen-Unterstützungen andrücken (z.B. bei Dachbauteilen durch Schnee) und Beanspruchungen, die die Bauteile von den Zwischen-Unterstützungen abheben (z.B. bei Wandbauteilen durch Windsog).

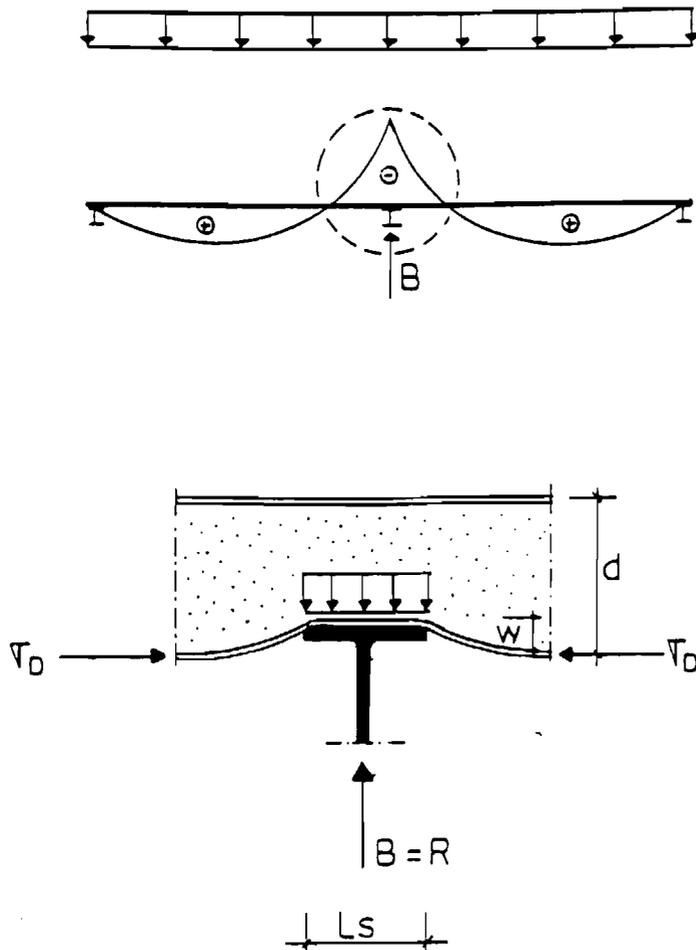
Bei den nachfolgenden Betrachtungen werden deshalb folgende getrennte Lastfälle untersucht:

- a) Beanspruchungen infolge "Auflast"
- b) Beanspruchungen infolge "Abhebende Lasten"

2. Untersuchungen zum Tragverhalten im Zwischenstützenbereich bei Beanspruchungen infolge Auflast

2.1 Allgemeines

Beim Lastfall "Auflast" werden im Zwischenstützen-Bereich die Bauteile auf den Wandriegeln oder Pfetten zusätzlich durch die Auflagerkräfte dadurch beansprucht,



daß Auflagerpressungen entstehen. Wie anfänglich erwähnt, werden zur Zeit ausschließlich Bauteile mit unten- bzw. innenliegenden ebenen oder quasi-ebenen Deckblechen verwendet. Dadurch müssen die auftretenden Pressungen im wesentlichen direkt durch den Hartschaum-Kern aufgenommen werden, da nur eine sehr geringe Biegesteifigkeit bei den dünnen Deckblechen vorhanden ist. Pressungen, d.h. Druckspannungen im relativ weichen Kern, erzeugen in jedem Fall aber Verformungen. Das heißt, daß infolge der Auflagerpressungen im Bereich der Kernschicht entsprechende Zusammendrückungen zu erwarten sind. Diese Verformungen haben einen erheblichen Einfluß auf die im Zwischenstützenbereich (negatives Biegemoment) druckbeanspruchten unteren, auf der Kernschicht elastisch gebetteten Deckbleche. Es ist auf jeden Fall damit zu rechnen, daß bei der Dimensionierung von durchlaufenden Sandwichbauteilen eine Interaktion beider Beanspruchungen - die Druckspannungen infolge äußerem Biegemoment und die Beanspruchung infolge Auflagerpressung - im maßgebenden unteren Deckblech berücksichtigt werden müssen. Es wird allerdings deutlich darauf hingewiesen, daß bei Sandwichbauteilen - im Gegensatz z. B. bei den Trapezblechen - keine Momenten/Querkraft-Interaktion berücksichtigt werden muß, da das Biegemoment im Prinzip ausschließlich von den Deckblechen und die Querkraft ausschließlich vom Kern übernommen wird. Im vorliegenden Fall ist vielmehr eine Interaktion von Druckspannungen und Zusatzbeanspruchung infolge Auflagerpressung in der unteren Deckschicht von ausschlaggebender Bedeutung.

Nach ersten Untersuchungen wurde aufgrund der Ergebnisse und der Erkenntnis, daß auf jeden Fall eine Interaktion im Zwischenstützen-Bereich zu berücksichtigen ist, bei den neueren bauaufsichtlichen Zulassungen eine pauschale Abminderung der Knitterspan-

nung um 10 % vorgeschrieben. Als zusätzliche Maßnahme, die bezüglich dieser Abminderung sehr wichtig ist, wurde eine deutliche Begrenzung der Auflagerpressungen gefordert, die durch folgenden Nachweis bei der Bemessung gewährleistet ist:

$$\text{Auflagerdrücke: } 1,4 \cdot (A_L + A_T) \leq F_A \cdot \beta_d$$

$A_L$  und  $A_T$ : Auflagerkräfte aus äußeren Lasten  
und Temperatur

$F_A$ : Auflagerfläche

$\beta_d$ : Druckfestigkeit des Kerns

Da sich die Beanspruchungen aus Biegemoment und Auflagerdrücke (Pressung) gegenseitig beeinflussen, ist es fraglich, ob die sehr pauschal angesetzte (mehr geschätzte) Abminderung von 10 % bei der bemessungsrelevanten Knitterspannung einerseits und der relativ hohe Sicherheitsfaktor bei dem Nachweis der Auflagerpressung andererseits das reale Trag-Verhalten im Zwischenstützen-Bereich erfassen.

Um etwas genauere Aussagen machen zu können, sollen deshalb durch die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen die gegenseitige Beeinflussung der Beanspruchungen und damit das reale Verhalten geklärt werden.

## 2.2 Experimentelle Untersuchungen

Das für durchlaufende Sandwichbauteile traglastbestimmende Verhalten der unteren Ebenen oder Quasiebenen Deckbleche ist äußerst komplex, da das Versagen der dünnen, auf den Kern elastisch gebetteten Platte von einer Reihe von Parametern abhängt. Hier sind insbesondere die Imperfektionen im Deckblech, Steifigkeit und Festigkeiten der Kernschicht, Haftung am Kern, häufig auftretenden Lunker im Schaumkern im Grenzbereich zum Deckblech, die unterschiedliche Linierung oder leichten Profilierung der Deckbleche und vor allem die im Zwischenstützen-Bereich auftretende zusätzliche Lasteinleitung entsprechend der Ausbildung der Unterkonstruktion zu nennen.

Daß diese Fülle von Einflüssen durch theoretische Betrachtungen ausreichend genau erfaßt werden kann, scheint aussichtslos. Dies ist vor allem auch daran zu erkennen, daß dies selbst für die einfeldrig gespannten Sandwichbauteile bisher nicht gelungen ist. Für diese Bauteile müssen zur Bestimmung der Knitterspannung bis jetzt immer wieder für neue Produkte Bauteilversuche durchgeführt werden. Es ist somit eindeutig, daß auch für mehrfeldrig gespannte Sandwichplatten, bei denen die Problematik der zusätzlichen Beanspruchung infolge Auflagerpressung noch hinzukommt, ebenfalls Versuche zur Klärung der Versagens-Kriterien erforderlich sind.

Es wurden deshalb nachfolgend beschriebene Versuche durchgeführt bzw. ausgewertet, die in zwei Arten eingeteilt werden können:

- a) Versuche zur genauen Bestimmung der Beanspruchungen der Deckbleche und der Kernschicht im unmittelbaren Bereich der Zwischenauflager.

- b) Ersatzträger-Versuchs-Serie zur Bestimmung der Traglasten (Versagensspannungen) bei unterschiedlichen Deckblechgeometrien und Kernqualitäten.

### 2.2.1 Versuche zur genauen Bestimmung der Beanspruchungen der Deckbleche und der Kernschicht im unmittelbaren Bereich der Zwischenaufleger

Um Ursache und Ort des Versagens der druckbeanspruchten unteren Deckschicht zu untersuchen, wurden zunächst zwei Ersatzträger- und ein Zweifeldträger-Versuch mit einem erheblichen Aufwand von Dehnmeßstreifen (DMS)-Messungen durchgeführt. Dabei wurden ca. 24 DMS in unterschiedlichen Abständen am unteren druckbeanspruchten Deckblech in der Art angeordnet, daß im Abstand von ca. 10 bis 140 mm vom Rand des Zwischenaufleger-Trägers die Dehnungen (bzw. Spannungen) im Deckblech in der Hoch- und Tiefsicke ermittelt werden konnten (s. Anhang 1). Da es sich um sehr aufwendige und dementsprechend teure Versuche handelte, konnten mit dem vorgegebenen finanziellen Rahmen nur wenige Versuche in dieser Art durchgeführt werden. Es wurden deshalb alle Versuche mit einem Bauteiltyp (von einem Hersteller und einer Charge) durchgeführt. Genaue Bauteilabmessungen und Angaben zu den Werkstoffkenngrößen sind auf Abb. 1 dargestellt. Variiert wurde bei den Ersatzträger-Versuchen die Auflagerbreite und damit die Auflagerpressung und das statische System (Ersatzträger und Zweifeldträger).

BAUTEILABMESSUNGEN

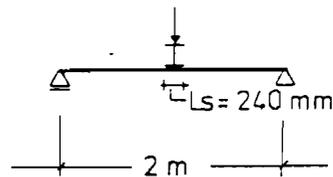


WERKSTOFF - KENNGRÖSSEN

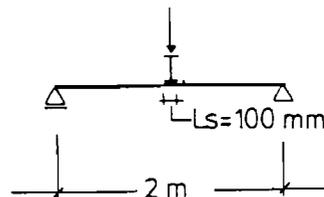
$G = 3,86 \text{ N/mm}^2$  ;  $E_D = 3,52 \text{ N/mm}^2$  ;  $\beta_D = 0,144 \text{ N/mm}^2$

ERSATZTRÄGERVERSUCHE

Ersatzträgerversuch I



Ersatzträgerversuch II



ZWEIFELDTRÄGERVERSUCH

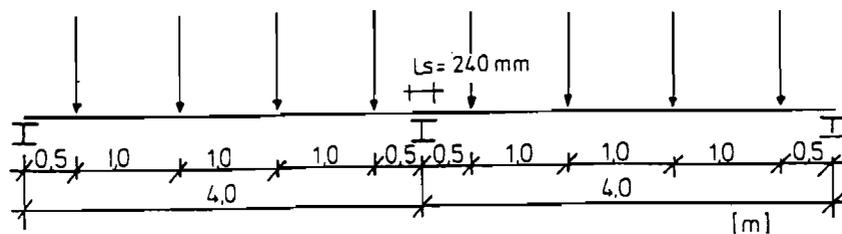


Abb. 1: Abmessungen der Bauteile und Systeme für „DMS-Versuche“

### 2.2.1.1 Ersatzträger-Versuche

Ersatzträger-Versuche dienen zur Untersuchung des Tragverhaltens im Zwischenstützenbereich von durchlaufenden Bauteilen und sollen Ersatz für Zweifeldträger-Versuche darstellen, die vom Versuchsaufbau deutlich aufwendiger sind.

Es werden dabei im Prinzip ähnliche Beanspruchungen wie im Mittelstützenbereich durch eine Einzellast (Linienlast) am Einfeldträger simuliert, indem der mittlere Bereich eines Durchlaufträgers mit negativem Biegemoment bis zu den Momenten-Nullpunkten und den zugehörigen Quer- und Auflagerkräften über der Stütze umgedreht als Einfeldträger konzipiert und die Auflagerkraft als Belastung angesetzt wird.

Ersatzträgerversuche wurden im Rahmen von Zulassungsanträgen in großer Anzahl durchgeführt. Die Stützweiten wurden dabei im Prinzip immer als Abstand der Momenten-Nullpunkte festgelegt. Als Auflagerbreite der Zwischenunterstützung bzw. im Ersatzträgerversuch die Breite des Lasteinleitungsträgers wurde dabei die Mindestbreite ( $L_S = 60 \text{ mm}$ ) gewählt. Bei dem vorgegebenen Bauteil (s. Abb. 1) würde unter diesen Voraussetzungen ein Ersatzträgerversuch mit einer Stützweite von ca. 1,60 m bei einer Lasteinleitungsbreite von 60 mm vorgesehen werden. Würde dieser Versuch unter diesen Bedingungen durchgeführt werden, würde eine Pressung unter dem Lasteinleitungsträger von ca.  $\beta = 0,5 \text{ N/mm}^2$  auftreten, die deutlich höher als die Druckfestigkeit des Kerns ist. Eine solch hohe Pressung ist aber, vorausgesetzt man hält die Grenzen aufgrund der geforderten Nachweise für die Auflagerpressung gemäß Zulassung ein, nicht zulässig. Die ermittelten

Traglasten in solch einem Ersatzträger-Versuch wären somit für die Bemessung nicht relevant.

Für die vorgesehenen Versuche wurden deshalb unter diesen Aspekten Stützweiten und Breiten der Auflager- bzw. Lasteinleitungsträger in der Art gewählt, daß voraussichtlich beim Erreichen der Traglast Auflagerpressungen auftreten, die in der Größenordnung der Druckfestigkeiten der Kernschicht liegen. Somit ergaben sich folgende wesentliche Versuchsparameter:

Ersatzträger I: Stützweite  $L = 2,0$  m  
Breite des Lasteinleitungsträgers:  $L_S = 100$  mm

Ersatzträger II: Stützweite  $L = 2,0$  m  
Breite des Lasteinleitungsträgers:  $L_S = 240$  mm

Der Versuchsaufbau und die Versuchsergebnisse sind im Anhang dargestellt.

#### **2.2.1.2 Zweifeldträger-Versuche**

Als Ergänzung zu den Ersatzträger-Versuchen wurde mit dem gleichen Aufwand insbesondere hinsichtlich der DMS-Messungen eine über zwei Felder durchlaufende Sandwichplatte experimentell untersucht. Die Stützweite wurde, auch aus versuchstechnischen Gründen, zu  $L_1 = L_2 = 4,0$  m gewählt. Die Stützweiten entsprechen etwa den in der Praxis auftretenden Spannweiten und bei einer Auflagerbreite von  $L_S = 240$  mm waren auch die zu erwartenden Auflagerpressungen über der Mittelstütze in der Größenordnung der Druckfestigkeit des Schaumkerns. Es war allerdings von Be-

ginn an klar, daß ein direkter Vergleich der Ergebnisse aus den Ersatzträger- und Zweifeldträger-Versuchen nicht direkt möglich ist, da hierbei gleiche Verhältnisse bezüglich der Momenten / Auflagerpressungen vorliegen müßten. Dies hätte beim Zweifeldträger-Versuch noch größere Stützweiten erforderlich gemacht. Der Vergleich der Ergebnisse kann aber, wie nachfolgend gezeigt wird, durch entsprechende Darstellungen der DMS-Messungen erfolgen. Der Zweifeldträger-Versuch war im Prinzip ausschließlich zum Vergleich mit den Ersatzträger-Versuchen konzipiert. Anhand der Dehnungs- bzw. Spannungsmessungen soll gezeigt werden, daß vergleichbare Beanspruchungen bei beiden Versuchstypen im Bereich der Mittelstützen von durchlaufenden Sandwichplatten vorhanden sind. Der Versuchsaufbau und die Ergebnisse sind im Anhang dargestellt.

### **2.2.2 Serienmäßige Ersatzträger-Versuche mit unterschiedlichen Schaumqualitäten, Deckblechgeometrien, Bauteildicken und Auflagerbreiten**

In Zusammenarbeit mit mehreren Sandwichbauteil-Herstellern wurden in den letzten Jahren, meist im Rahmen von Versuchsserien von Zulassungsanträgen, eine größere Anzahl von Ersatzträger-Versuchen durchgeführt. Zur Untersuchung des Tragverhaltens im Zwischenstützenbereich wurden, in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Einflüssen, folgende Parameter variiert:

- Hersteller bzw. Schaumkernqualität
- Bauteiltyp bzw. Deckblechgeometrie der quasi-ebenen Deckbleche
- Bauteildicke
- Ersatzträger-Stützweite
- Auflagerbreite

Eine Übersicht über die einzelnen Versuchsparameter ist in Tab. 1 dargestellt.

Es ist besonders beachtenswert und für eine genaue Auswertung der Ergebnisse von großer Bedeutung, daß für alle Varianten auch die Ergebnisse von Einfeldträger-Versuchen (Knitterspannungen im ungestörten Bereich) und den zugehörigen Schaumkern-Untersuchungen, z.B. Druckfestigkeiten, Elastizitäts- und Schubmoduli, Schub- und Zugfestigkeiten, vorliegen. Damit können die Versuchsergebnisse aus den Ersatzträger-Versuchen jeweils auf die direkten Materialkennwerte bezogen werden. Insgesamt wurden 92 Ersatzträger-Versuche auf der Basis der Ergebnisse aus den Material- und Einfeldträger-Versuchen ausgewertet. Alle erforderlichen Angaben sind in Tab. 1 zusammenfassend dargestellt.

Hersteller	Typ	Nr.	Stützweite (mm)	$t_k$ (mm)	$l_s$ (mm)	$d$ (mm)	$e$ (mm)	$A_D$ (cm <sup>2</sup> )	$I_D$ (mm <sup>4</sup> /mm)	$E_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\beta_D$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_U$ (KN)
A	S	1	2000	0,52	240	120	117,3	5,2	1,3704	3,52	0,144	21,12
A	S	2	2000	0,52	100	120	117,3	5,2	1,3704	3,52	0,144	18,02
B	S	3	1600	0,52	60	35	33,78	4,91	0,2671	4,61	0,186	6,48
B	S	4	1600	0,52	60	35	33,78	4,91	0,2671	4,61	0,186	6,98
B	S	5	1600	0,52	60	35	33,78	4,91	0,2671	4,61	0,186	6,88
B	S	6	1600	0,52	60	35	33,78	4,91	0,2671	4,61	0,186	6,58
B	S	7	1600	0,52	80	35	33,78	4,91	0,2671	4,61	0,186	8,00
B	S	8	1600	0,52	80	35	33,78	4,91	0,2671	4,61	0,186	7,40
B	S	9	1600	0,52	60	60	59,78	4,91	0,2671	5,6	0,199	10,23
B	S	10	1600	0,52	60	60	59,78	4,91	0,2671	5,6	0,199	10,23
B	S	11	1600	0,52	60	60	59,78	4,91	0,2671	5,6	0,199	10,43
B	S	12	1600	0,52	100	60	59,78	4,91	0,2671	5,6	0,199	12,93
B	S	13	1600	0,52	100	60	59,78	4,91	0,2671	5,6	0,137	12,73
B	S	14	1600	0,52	120	100	100,8	4,91	0,2671	3,92	0,137	13,38
B	S	15	1600	0,52	120	100	100,8	4,91	0,2671	3,92	0,137	14,28
B	S	16	1600	0,52	120	100	100,8	4,91	0,2671	3,92	0,137	14,28
B	05/05	17	1600	0,52	60	35	34,6	4,9	0,0228	4,81	0,185	6,31
B	05/05	18	1600	0,52	60	35	34,6	4,9	0,0228	4,81	0,185	5,71
B	05/05	19	1600	0,52	60	35	34,6	4,9	0,0228	4,81	0,185	6,21
B	05/05	20	1600	0,52	80	35	34,6	4,9	0,0228	4,81	0,185	6,90
B	05/05	21	1600	0,52	80	35	34,6	4,9	0,0228	4,81	0,185	6,70
B	05/05	22	1600	0,52	60	60	61,2	4,9	0,0228	5,405	0,202	9,49
B	05/05	23	1600	0,52	60	60	61,2	4,9	0,0228	5,405	0,202	9,59
B	05/05	24	1600	0,52	60	60	61,2	4,9	0,0228	5,405	0,202	9,79
B	05/05	25	1600	0,52	100	60	61,2	4,9	0,0228	5,405	0,202	11,83
B	05/05	26	1600	0,52	100	60	61,2	4,9	0,0228	5,405	0,152	12,93
B	05/05	27	1600	0,52	60	100	101,1	4,9	0,0228	4,59	0,152	9,37
B	05/05	28	1600	0,52	60	100	101,1	4,9	0,0228	4,59	0,152	9,07
B	05/05	29	1600	0,52	60	100	101,1	4,9	0,0228	4,59	0,152	10,67
B	05/05	30	1600	0,52	120	100	101,1	4,9	0,0228	4,59	0,152	12,55
B	05/05	31	1600	0,52	120	100	101,1	4,9	0,0228	4,59	0,152	12,35
B	V/05	32	1600	0,52	60	35	33,4	4,9	0,0228	3,68	0,157	6,14
B	V/05	33	1600	0,52	60	35	33,4	4,9	0,0228	3,68	0,157	6,04
B	V/05	34	1600	0,52	60	35	33,4	4,9	0,0228	3,68	0,157	6,04
B	V/05	35	1600	0,52	80	35	33,4	4,9	0,0228	3,68	0,195	7,30
B	V/05	36	1600	0,52	80	35	33,4	4,9	0,0228	4,455	0,195	6,10
B	V/05	37	1600	0,52	60	60	59,4	4,9	0,0228	4,455	0,195	9,76
B	V/05	38	1600	0,52	60	60	59,4	4,9	0,0228	4,455	0,195	10,06
B	V/05	39	1600	0,52	60	60	59,4	4,9	0,0228	4,455	0,195	9,66
B	V/05	40	1600	0,52	100	60	59,4	4,9	0,0228	4,455	0,125	12,18
B	V/05	41	1600	0,52	100	60	59,4	4,9	0,0228	4,455	0,125	13,08
B	V/05	42	1600	0,52	60	100	101,1	4,9	0,0228	3,495	0,125	8,97
B	V/05	43	1600	0,52	60	100	101,1	4,9	0,0228	3,495	0,125	9,57
B	V/05	44	1600	0,52	60	100	101,1	4,9	0,0228	3,495	0,125	9,67
B	V/05	45	1600	0,52	120	100	101,1	4,9	0,0228	3,495	0,125	12,18
B	V/05	46	1600	0,52	120	100	101,1	4,9	0,0228	3,495	0,125	11,98

Tabelle 1,I: Versuchparameter für Ersatzträger-Versuche „Auflast“

Hersteller	Typ	Nr.	Stützweite (mm)	tk (mm)	ls (mm)	d (mm)	e (mm)	A (cm <sup>2</sup> )	I (mm <sup>4</sup> /mm)	Es (N/mm <sup>2</sup> )	beta d (N/mm <sup>2</sup> )	Fu (KN)
C	S	47	1100	0,54	60	50	49,4	5,427	0,02262	3,51	0,1517	9,67
C	S	48	1100	0,54	60	50	49,4	5,427	0,02262	3,51	0,1517	9,34
C	S	49	1100	0,54	60	50	49,4	5,427	0,02262	3,51	0,1517	9,38
C	S	50	1100	0,54	80	50	49,4	5,427	0,02262	3,51	0,1517	8,84
C	S	51	1500	0,54	60	50	49,4	5,427	0,02262	3,51	0,1517	6,83
C	S	52	1500	0,54	60	50	49,4	5,427	0,02262	3,51	0,1517	6,88
C	S	53	1500	0,54	60	50	49,4	5,427	0,02262	3,51	0,1517	7,34
C	S	54	1900	0,54	60	50	49,4	5,427	0,02262	3,51	0,1517	6,46
C	S	55	1900	0,54	60	50	49,4	5,427	0,02262	3,51	0,15518	6,46
C	S	56	1900	0,54	60	50	49,4	5,427	0,02262	3,51	0,15518	6,42
C	S	57	1100	0,54	60	80	77,12	5,427	0,02262	2,349	0,15518	11,35
C	S	58	1100	0,54	60	80	77,12	5,427	0,02262	2,349	0,15518	11,60
C	S	59	1100	0,54	60	80	77,12	5,427	0,02262	2,349	0,15518	11,35
C	S	60	1100	0,54	80	80	77,12	5,427	0,02262	2,349	0,15518	11,90
C	S	61	1500	0,54	60	80	77,12	5,427	0,02262	2,349	0,15518	8,90
C	S	62	1500	0,54	60	80	77,12	5,427	0,02262	2,349	0,15518	8,94
C	S	63	1500	0,54	60	80	77,12	5,427	0,02262	2,349	0,15518	9,21
C	S	64	1900	0,54	60	80	77,12	5,427	0,02262	2,349	0,15518	7,52
C	S	65	1900	0,54	60	80	77,12	5,427	0,02262	2,349	0,15518	7,72
C	S	66	1900	0,54	60	80	77,12	5,427	0,02262	2,349	0,15518	7,45
C	V	67	1100	0,54	60	50	49,4	5,427	0,02262	3,691	0,1465	9,35
C	V	68	1100	0,54	60	50	49,4	5,427	0,02262	3,691	0,1465	8,87
C	V	69	1100	0,54	60	50	49,4	5,427	0,02262	3,691	0,1465	9,34
C	V	70	1100	0,54	80	50	49,4	5,427	0,02262	3,691	0,1465	9,44
C	V	71	1500	0,54	60	50	49,4	5,427	0,02262	3,691	0,1465	7,42
C	V	72	1500	0,54	60	50	49,4	5,427	0,02262	3,691	0,1465	7,38
C	V	73	1500	0,54	60	50	49,4	5,427	0,02262	3,691	0,1465	7,56
C	V	74	1900	0,54	60	50	49,4	5,427	0,02262	3,691	0,15518	6,86
C	V	75	1900	0,54	60	50	49,4	5,427	0,02262	3,691	0,15518	6,55
C	V	76	1900	0,54	60	50	49,4	5,427	0,02262	3,691	0,15518	6,86
C	V	77	1100	0,54	60	80	76,8	5,427	0,02262	3,691	0,15518	10,90
C	V	78	1100	0,54	60	80	76,8	5,427	0,02262	3,691	0,15518	11,30
C	V	79	1100	0,54	60	80	76,8	5,427	0,02262	3,691	0,15518	11,30
C	V	80	1100	0,54	80	80	76,8	5,427	0,02262	4,178	0,15518	11,40
C	V	81	1500	0,54	60	80	76,8	5,427	0,02262	4,178	0,15518	8,83
C	V	82	1500	0,54	60	80	76,8	5,427	0,02262	4,178	0,15518	9,25
C	V	83	1500	0,54	60	80	76,8	5,427	0,02262	4,178	0,15518	9,34
C	V	84	1900	0,54	60	80	76,8	5,427	0,02262	4,178	0,15518	7,85
C	V	85	1900	0,54	60	80	76,8	5,427	0,02262	4,178	0,15518	8,57
C	V	86	1900	0,54	60	80	76,8	5,427	0,02262	4,178	0,15518	8,49
D	LL	87	1930	0,56	80	40	40,11	5,644	0,1532	3,671	0,1578	5,59
D	LL	88	1930	0,56	80	40	40,41	5,644	0,1532	3,671	0,1578	5,71
D	LL	89	1930	0,56	80	40	40,42	5,644	0,1532	3,671	0,1578	6,01
D	LL	90	2730	0,5	80	80	81,75	4,938	0,1341	1,502	0,0723	6,55
D	LL	91	2730	0,5	80	80	80,97	4,398	0,1341	1,502	0,0723	6,37
D	LL	92	2730	0,5	80	80	82,12	4,398	0,1341	1,502	0,0723	6,42

Tabelle 1,II: Versuchsparmeter für Ersatzträger-Versuche „Auflast“

## 2.3 Auswertung der Versuche und theoretische Ansätze

### 2.3.1 Darstellung unterschiedlicher Interpretationen der Ergebnisse und Traglastmodelle

Wie anfänglich bereits erläutert, ist das Tragverhalten durchlaufender Sandwichbauteile im Zwischenstützenbereich relativ schwierig zu beurteilen, da das ausschlaggebende Versagen der unteren, auf Druck beanspruchten ebenen oder quasi-ebenen Deckschicht von einer Reihe von Parametern abhängt, die insgesamt nur schwer theoretisch erfaßt werden können. Hierbei ist im wesentlichen folgendes zu beachten:

- Das Deckblech ist auf der Kernschicht elastisch gebettet und wird zusätzlich durch die Auflagerkräfte (Pressungen) über der Mittelstütze beansprucht.
- Es ist keine gleichmäßige Verteilung der Pressungen zu erwarten, da auch aufgrund der Bauteilkrümmungen eher eine punktuelle Abstützung auf den Auflagerträger-Rändern zu erwarten ist.
- Durch die Auflagerkräfte und den Pressungen im Schaumkern entstehen Eindrückungen, die eine zusätzliche Biegemomentenbeanspruchung in den Deckblechen zur Folge haben.
- In der Praxis kommen fast ausschließlich linierte oder leicht profilierte (quasi-ebene) Deckbleche zur Anwendung. Durch die unterschiedliche Geometrie bzw. Eigenbiegesteifigkeit der Deckbleche ergeben sich stark unterschiedliche Spannungsverteilungen im Deckblech.

- Die elastische Bettung durch die Kernschicht wird teilweise deutlich durch Lunker und Fehlstellen im Grenzbereich Kern/Deckschicht gestört, so daß eine relativ große Streuung bei den Versuchsergebnissen vorliegt.
- Durch das Walzen der Deckbleche sind Eigenspannungen und durch das Schäumen in der Fertigungsstraße Imperfektion in der Deckschicht vorhanden, die eine experimentelle Bestimmung der reinen Normalkraft-Spannungen und eine vergleichende Betrachtung mit den theoretischen Werten erschweren.
- Die Annahme eines isotropen Halbraumes bei der theoretischen Erfassung der elastischen Bettung entspricht nicht der Realität, da z.B. keine gleichmäßige Dichte im Schaumkern vorhanden ist und die gegenüberliegende Deckschicht, zumindest bei dünnen Bauteilen, den Halbraum begrenzt.

Bei Betrachtung der dargestellten, schwierig zu erfassenden Einflüsse war zunächst das Ziel, ein Traglastmodell zu finden, das das Verhalten im Zwischenstützenbereich zumindest qualitativ so weit erfaßt, daß Ursache des Versagens und die Relation der Einflüsse erkannt werden können. Bei der Darstellung aller Ergebnisse wurde deshalb folgende Form gewählt:

In Diagrammen ist auf der Ordinate das Verhältnis der Versagensspannungen aus den Ersatzträger-Versuchen ( $\sigma_u$ ) zu den Knitterspannungen aus den Einfeldträger-Versuchen ( $\sigma_k$ ) aufgetragen ( $\sigma_u/\sigma_k$ ).

Diese Vorgehensweise hat vorallem den Vorteil, daß auf die abgesicherten Werte im ungestörten Bereich (Knitterspannung in Feld-

mitte der Einfeldträger) bezogen werden kann. Es ist somit einerseits der Einfluß der Zusatzbeanspruchungen direkt zu erkennen. Andererseits werden die durch umfangreiche Versuche festgelegten Werte der Einfeldträgerwerte als Basis mitherrangezogen.

Auf der Abszisse sind dann in einer sinnvollen Art o.g. Einflüsse aufzutragen, um daraus das Verhalten über der Stütze in Abhängigkeit der maßgebenden Parameter zu erkennen.

Nachfolgend werden einige theoretische Ansätze beschrieben, die noch nicht in der genannten Form vorliegen, um Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Interpretationen der Ergebnisse aufzuzeigen.

#### **2.3.1.1 Biegemomenten/Auflagerkraft-Interaktion**

In Anlehnung an die Vorgehensweise bei Stahltrapezblechen (s. DIN 18807) wurde vor allem in Gutachten im Rahmen von Zulassungs-Anträgen, aber auch in der Literatur /2/, durch Darstellung der Versuchsergebnisse in einem Biegemomenten ( $M_B$ )/Auflagerkraft ( $B$ ) (oder Querkraft ( $Q_B$ ))- Interaktionsdiagramm versucht, das Verhalten der Sandwichplatten im Mittelstützenbereich zu erfassen.

Dies ist m. E. nicht sinnvoll. Abgesehen davon, daß bei der Angabe des "Bruchmomentes  $M_B$ " die Aussagen abhängig von der Bauteildicke und Deckblech-Geometrie werden, liegt der große Nachteil bei der ausschließlichen Angabe der Auflagerkraft bzw. Querkraft. Wie bereits erwähnt, ist der Einfluß der Eindrückung des unteren Deckbleches über dem Auflager infolge der Pressung

bzw. Druckspannung im Kern von ausschlaggebender Bedeutung. Die vorhandene Auflagerkraft ist somit auf jeden Fall auf die Auflagerbreite zu beziehen, da bei einer großen Auflagerkraft und einer großen Auflagerbreite dieselbe Pressung bzw. Eindrückung auftreten kann wie bei einer kleinen Auflagerkraft bei einem schmalen Auflager. Ein weiterer Nachteil ist, daß nicht erkannt werden kann, inwieweit die "zulässigen" Druckspannungen im Kern überschritten sind und man somit außerhalb des bemessungsrelevanten Bereichs liegt.

#### **2.3.1.2 Interaktion zwischen Deckblech-Beanspruchung bei elastischen Verformungen**

Aus der Erkenntnis, daß insbesondere die Verformungen (Eindrückungen) im Bereich der Mittelunterstützungen infolge der Pressungen bzw. Druckspannungen im Kern deutliche Zusatzbeanspruchungen im Deckblech erzeugen, ist, gegenüber einer  $M_B/B$ -Beziehung, die Erfassung dieser Zusatzbeanspruchungen bei Interaktions-Beziehung sicherlich der bessere Weg. Dabei gibt es eine Reihe von denkbaren Möglichkeiten die Zusatzbeanspruchungen auf Verformungsgrößen (s. z.B. auch in /1/ und /3/) oder den daraus resultierenden Beanspruchungen zu beziehen.

Nachfolgend wird deshalb eine Auswertung der unter 2.2.2 beschriebenen Versuche auf der Basis einer Interaktion zwischen den Versagensspannungen und der Verformungen (Eindrückungen bzw. der daraus resultierenden Biegemomente im Deckblech) im Bereich der Mittelstütze dargestellt. Verformungen und Zusatzbeanspruchungen wurden durch Berechnung einer elastisch gebetteten Platte (untere Deckschicht) abgeleitet. In Tabelle 2 sind die Aus-

Hersteller	Typ	Nr.	tk	d	E s	l	B	l <sub>g</sub>	k <sub>w</sub>	β	R	M ( x )	M <sub>w</sub>	M(x)/M <sub>w</sub>	sigma (u/k )
			(mm)	(mm)	(N/mm <sup>2</sup> )	(mm <sup>4</sup> /mm)	(nmm)	(mm)	(N/mm <sup>3</sup> )	(-)	(kN)	(Nm/m)	(Nm/m)	(-)	(-)
A	S	1	0,52	120	3,52	1,3704	287784,0	240	0,02933	0,01263	20,8	194,843	185,200	1,05	0,86
A	S	2	0,52	120	3,52	1,3704	287784,0	100	0,02933	0,01263	17,7	142,910	185,200	0,77	0,73
B	S	3	0,52	35	4,610	0,2671	56091,0	60	0,13171	0,02768	6,48	23,226	69,920	0,33	0,86
B	S	4	0,52	35	4,610	0,2671	56091,0	60	0,13171	0,02768	6,96	25,018	69,920	0,36	0,93
B	S	5	0,52	35	4,610	0,2671	56091,0	60	0,13171	0,02768	6,88	24,660	69,920	0,35	0,92
B	S	6	0,52	35	4,610	0,2671	56091,0	60	0,13171	0,02768	6,58	23,584	69,920	0,34	0,88
B	S	7	0,52	35	4,610	0,2671	56091,0	80	0,13171	0,02768	8,00	30,603	69,920	0,44	1,07
B	S	8	0,52	35	4,610	0,2671	56091,0	80	0,13171	0,02768	7,40	28,308	69,920	0,40	0,99
B	S	9	0,52	60	5,600	0,2671	56091,0	60	0,09333	0,02540	10,23	39,909	69,920	0,57	0,74
B	S	10	0,52	60	5,600	0,2671	56091,0	60	0,09333	0,02540	10,22	39,870	69,920	0,57	0,74
B	S	11	0,52	60	5,600	0,2671	56091,0	60	0,09333	0,02540	10,43	40,689	69,920	0,58	0,76
B	S	12	0,52	60	5,600	0,2671	56091,0	80	0,09333	0,02540	12,93	52,457	69,920	0,75	0,94
B	S	13	0,52	60	5,600	0,2671	56091,0	80	0,09333	0,02540	12,73	51,645	69,920	0,74	0,92
B	S	14	0,52	100	3,920	0,2671	56091,0	120	0,03920	0,02044	13,38	71,903	69,920	1,03	0,76
B	S	15	0,52	100	3,920	0,2671	56091,0	120	0,03920	0,02044	14,28	76,739	69,920	1,10	0,81
B	S	16	0,52	100	3,920	0,2671	56091,0	120	0,03920	0,02044	14,28	76,739	69,920	1,10	0,81
B	05/05	17	0,52	35	4,810	0,0228	4788,0	60	0,13743	0,05176	6,31	14,533	17,936	0,81	0,90
B	05/05	18	0,52	35	4,810	0,0228	4788,0	60	0,13743	0,05176	5,71	13,151	17,936	0,73	0,81
B	05/05	19	0,52	35	4,810	0,0228	4788,0	60	0,13743	0,05176	6,21	14,302	17,936	0,80	0,88
B	05/05	20	0,52	35	4,810	0,0228	4788,0	80	0,13743	0,05176	6,90	16,744	17,936	0,93	0,98
B	05/05	21	0,52	35	4,810	0,0228	4788,0	80	0,13743	0,05176	6,70	16,259	17,936	0,91	0,95
B	05/05	22	0,52	60	5,405	0,0228	4788,0	60	0,09008	0,04657	9,49	23,477	17,936	1,31	0,84
B	05/05	23	0,52	60	5,405	0,0228	4788,0	60	0,09008	0,04657	9,59	23,724	17,936	1,32	0,84
B	05/05	24	0,52	60	5,405	0,0228	4788,0	60	0,09008	0,04657	9,79	24,219	17,936	1,35	0,86
B	05/05	25	0,52	60	5,405	0,0228	4788,0	100	0,09008	0,04657	11,83	32,038	17,936	1,79	1,04
B	05/05	26	0,52	60	5,405	0,0228	4788,0	100	0,09008	0,04657	11,93	32,308	17,936	1,80	1,05
B	05/05	27	0,52	100	4,590	0,0228	4788,0	60	0,04590	0,03935	9,37	25,796	17,936	1,44	0,65
B	05/05	28	0,52	100	4,590	0,0228	4788,0	60	0,04590	0,03935	9,07	24,970	17,936	1,39	0,63
B	05/05	29	0,52	100	4,590	0,0228	4788,0	60	0,04590	0,03935	10,67	29,375	17,936	1,64	0,74
B	05/05	30	0,52	100	4,590	0,0228	4788,0	120	0,04590	0,03935	12,55	40,229	17,936	2,24	0,88
B	05/05	31	0,52	100	4,590	0,0228	4788,0	120	0,04590	0,03935	12,35	39,588	17,936	2,21	0,86
B	V/05	32	0,52	35	3,680	0,0228	4788,0	60	0,10514	0,04841	6,14	14,807	17,936	0,83	0,91
B	V/05	33	0,52	35	3,680	0,0228	4788,0	60	0,10514	0,04841	6,04	14,566	17,936	0,81	0,89
B	V/05	34	0,52	35	3,680	0,0228	4788,0	60	0,10514	0,04841	6,04	14,566	17,936	0,81	0,89
B	V/05	35	0,52	35	3,680	0,0228	4788,0	80	0,10514	0,04841	6,30	16,243	17,936	0,91	0,93
B	V/05	36	0,52	35	3,680	0,0228	4788,0	80	0,10514	0,04841	6,10	15,727	17,936	0,88	0,90
B	V/05	37	0,52	60	4,455	0,0228	4788,0	60	0,07425	0,04437	9,79	24,984	17,936	1,39	0,75
B	V/05	38	0,52	60	4,455	0,0228	4788,0	60	0,07425	0,04437	10,08	25,873	17,936	1,43	0,77
B	V/05	39	0,52	60	4,455	0,0228	4788,0	60	0,07425	0,04437	9,66	24,652	17,936	1,37	0,74
B	V/05	40	0,52	60	4,455	0,0228	4788,0	100	0,07425	0,04437	12,18	34,592	17,936	1,93	0,93
B	V/05	41	0,52	60	4,455	0,0228	4788,0	100	0,07425	0,04437	13,08	37,148	17,936	2,07	1,00
B	V/05	42	0,52	100	3,495	0,0228	4788,0	60	0,03495	0,03675	8,97	25,805	17,936	1,44	0,80
B	V/05	43	0,52	100	3,495	0,0228	4788,0	60	0,03495	0,03675	9,57	27,532	17,936	1,53	0,64
B	V/05	44	0,52	100	3,495	0,0228	4788,0	60	0,03495	0,03675	9,67	27,819	17,936	1,55	0,65
B	V/05	45	0,52	100	3,495	0,0228	4788,0	120	0,03495	0,03675	12,18	41,755	17,936	2,33	0,82
B	V/05	46	0,52	100	3,495	0,0228	4788,0	120	0,03495	0,03675	11,98	41,069	17,936	2,29	0,81

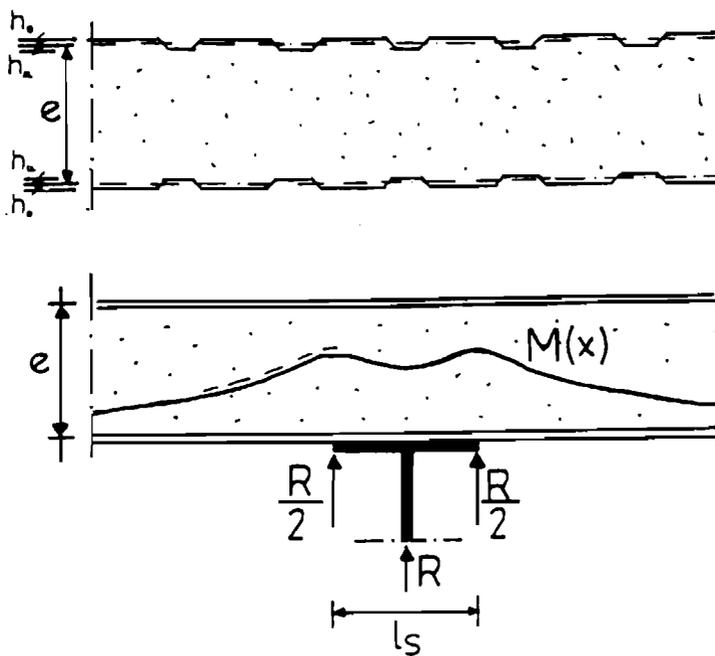
Tabelle 2,I: Auswertung der Versuche auf der Basis von elastischen Verformungen

Hersteller	Typ	Nr.	tk (mm)	d (mm)	E <sub>s</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	I (mm <sup>4</sup> /mm)	B (nmm)	I <sub>z</sub> (mm)	K <sub>w</sub> (N/mm <sup>3</sup> )	β (-)	R (kN)	M(x) (Nm/m)	M <sub>el</sub> (Nm/m)	M(x)/M <sub>el</sub> (-)	sigma (u/k ) (-)
C	S	47	0,54	50	3,510	0,0346	7266,0	60	0,07020	0,03942	9,67	26,589	30,770	0,86	0,80
C	S	48	0,54	50	3,510	0,0346	7266,0	60	0,07020	0,03942	9,34	25,682	30,770	0,83	0,77
C	S	49	0,54	50	3,510	0,0346	7266,0	60	0,07020	0,03942	9,38	25,792	30,770	0,84	0,77
C	S	50	0,54	50	3,510	0,0346	7266,0	80	0,07020	0,03942	8,84	26,848	30,770	0,87	0,73
C	S	51	0,54	50	3,510	0,0346	7266,0	80	0,07020	0,03942	6,83	18,780	30,770	0,61	0,77
C	S	52	0,54	50	3,510	0,0346	7266,0	80	0,07020	0,03942	6,88	18,918	30,770	0,61	0,77
C	S	53	0,54	50	3,510	0,0346	7266,0	80	0,07020	0,03942	7,34	20,182	30,770	0,66	0,82
C	S	54	0,54	50	3,510	0,0346	7266,0	80	0,07020	0,03942	6,46	17,763	30,770	0,58	0,92
C	S	55	0,54	50	3,510	0,0346	7266,0	60	0,07020	0,03942	6,46	17,763	30,770	0,58	0,92
C	S	56	0,54	50	3,510	0,0346	7266,0	60	0,07020	0,03942	6,42	17,653	30,770	0,57	0,91
C	S	57	0,54	80	2,349	0,0346	7266,0	60	0,02936	0,03170	11,4	36,262	29,670	1,22	0,75
C	S	58	0,54	80	2,349	0,0346	7266,0	60	0,02936	0,03170	11,6	37,061	29,670	1,25	0,76
C	S	59	0,54	80	2,349	0,0346	7266,0	60	0,02936	0,03170	11,4	36,262	29,670	1,22	0,75
C	S	60	0,54	80	2,349	0,0346	7266,0	80	0,02936	0,03170	11,9	41,751	29,670	1,41	0,78
C	S	61	0,54	80	2,349	0,0346	7266,0	80	0,02936	0,03170	8,90	28,435	29,670	0,96	0,81
C	S	62	0,54	80	2,349	0,0346	7266,0	80	0,02936	0,03170	8,94	28,563	29,670	0,96	0,80
C	S	63	0,54	80	2,349	0,0346	7266,0	80	0,02936	0,03170	9,21	29,425	29,670	0,99	0,83
C	S	64	0,54	80	2,349	0,0346	7266,0	80	0,02936	0,03170	7,52	24,026	29,670	0,81	0,86
C	S	65	0,54	80	2,349	0,0346	7266,0	80	0,02936	0,03170	7,72	24,665	29,670	0,83	0,86
C	S	66	0,54	80	2,349	0,0346	7266,0	60	0,02936	0,03170	7,45	23,802	29,670	0,80	0,85
C	V	67	0,54	50	3,691	0,0346	7266,0	80	0,07382	0,03992	9,35	25,505	26,280	0,97	0,80
C	V	68	0,54	50	3,691	0,0346	7266,0	80	0,07382	0,03992	8,87	24,196	26,280	0,92	0,76
C	V	69	0,54	50	3,691	0,0346	7266,0	80	0,07382	0,03992	9,34	25,478	26,280	0,97	0,80
C	V	70	0,54	50	3,691	0,0346	7266,0	80	0,07382	0,03992	9,44	28,410	26,280	1,08	0,81
C	V	71	0,54	50	3,691	0,0346	7266,0	60	0,07382	0,03992	7,42	20,241	26,280	0,77	0,87
C	V	72	0,54	50	3,691	0,0346	7266,0	60	0,07382	0,03992	7,38	20,132	26,280	0,77	0,86
C	V	73	0,54	50	3,691	0,0346	7266,0	60	0,07382	0,03992	7,56	20,623	26,280	0,78	0,89
C	V	74	0,54	50	3,691	0,0346	7266,0	60	0,07382	0,03992	8,86	18,713	26,280	0,71	1,01
C	V	75	0,54	50	3,691	0,0346	7266,0	80	0,07382	0,03992	6,55	17,867	26,280	0,68	0,97
C	V	76	0,54	50	3,691	0,0346	7266,0	80	0,07382	0,03992	6,86	18,713	26,280	0,71	1,01
C	V	77	0,54	80	4,178	0,0346	7266,0	60	0,05223	0,03661	10,9	31,438	25,840	1,22	0,75
C	V	78	0,54	80	4,178	0,0346	7266,0	80	0,05223	0,03661	11,3	32,591	25,840	1,26	0,78
C	V	79	0,54	80	4,178	0,0346	7266,0	60	0,05223	0,03661	11,3	32,649	25,840	1,26	0,78
C	V	80	0,54	80	4,178	0,0346	7266,0	80	0,05223	0,03661	11,4	36,289	25,840	1,40	0,78
C	V	81	0,54	80	4,178	0,0346	7266,0	60	0,05223	0,03661	8,83	25,488	25,840	0,99	0,83
C	V	82	0,54	80	4,178	0,0346	7266,0	60	0,05223	0,03661	9,25	26,679	25,840	1,03	0,87
C	V	83	0,54	80	4,178	0,0346	7266,0	60	0,05223	0,03661	9,43	27,198	25,840	1,05	0,89
C	V	84	0,54	80	4,178	0,0346	7266,0	60	0,05223	0,03661	7,85	22,641	25,840	0,88	0,94
C	V	85	0,54	80	4,178	0,0346	7266,0	60	0,05223	0,03661	8,57	24,718	25,840	0,96	1,02
C	V	86	0,54	80	4,178	0,0346	7266,0	60	0,05223	0,03661	8,49	24,487	25,840	0,95	1,01
D	LL	87	0,56	40	3,671	0,1530	32130,0	80	0,09178	0,02907	5,59	20,717	74,240	0,28	0,92
D	LL	88	0,56	40	3,671	0,1530	32130,0	80	0,09178	0,02907	5,71	21,181	74,240	0,29	0,93
D	LL	89	0,56	40	3,671	0,1530	32130,0	80	0,09178	0,02907	6,01	22,273	74,240	0,30	0,98
D	LL	90	0,5	80	1,502	0,1340	28140,0	80	0,01878	0,02021	6,55	32,109	67,580	0,48	0,78
D	LL	91	0,5	80	1,502	0,1340	28140,0	80	0,01878	0,02021	6,37	31,227	67,580	0,46	0,87
D	LL	92	0,5	80	1,502	0,1340	28140,0	80	0,01878	0,02021	6,42	31,472	67,580	0,47	0,86

Tabelle 2,II: Auswertung der Versuche auf der Basis von elastischen Verformungen

wertungen dargestellt. Grundlage sind Beziehungen, die in /1/ aufgrund der Differentialgleichung der elastisch gebetteten Platte abgeleitet und in Abb. 2 dargestellt sind.

Mit den angegebenen Beziehungen wurden die Werte auf der Abszisse dadurch ermittelt, daß für jeden Versuch das maximale Biegemoment  $M_{(x)}$  unter der Lasteinleitung als Zusatzbeanspruchung errechnet und auf das maximal aufnehmbare "elastische" Biegemoment ( $M_{el} = \beta_s \cdot J_D / h_0$ , s. Abb. 3) der Deckschicht bezogen wurde.



$E_s$  = Elastizitätsmodul Schaum

$I_D$  = Trägheitsmoment der Deckschicht

$B = E \cdot I_D$

$k_w = E_s / e$

$\beta = (k_w / (4 \cdot B))^{0.25}$

Verformung :  $w(x) = \frac{R \cdot \beta}{4 \cdot k_w} \cdot \exp(-\beta \cdot x) \cdot (\cos(\beta \cdot x) + \sin(\beta \cdot x))$

Verdrehung :  $\phi(x) = \frac{R \cdot \beta^2}{2 \cdot k_w} \cdot \exp(-\beta \cdot x) \cdot \sin(\beta \cdot x)$

Biegemoment :  $M(x) = \frac{R}{8 \cdot \beta} \cdot \exp(-\beta \cdot x) \cdot (\cos(\beta \cdot x) - \sin(\beta \cdot x))$

Querkraft :  $Q(x) = -\frac{R}{4} \cdot \exp(-\beta \cdot x) \cdot \cos(\beta \cdot x)$

Pressung über dem Auflager :  $r(x) = \frac{R \cdot \beta}{4} \cdot \exp(-\beta \cdot x) \cdot (\cos(\beta \cdot x) + \sin(\beta \cdot x))$

Abb. 2: Beziehungen zur Ermittlung der Beanspruchungen und Verformungen von elastisch gebetteten Platten

Interaktionsdiagramm bei "Auflast"

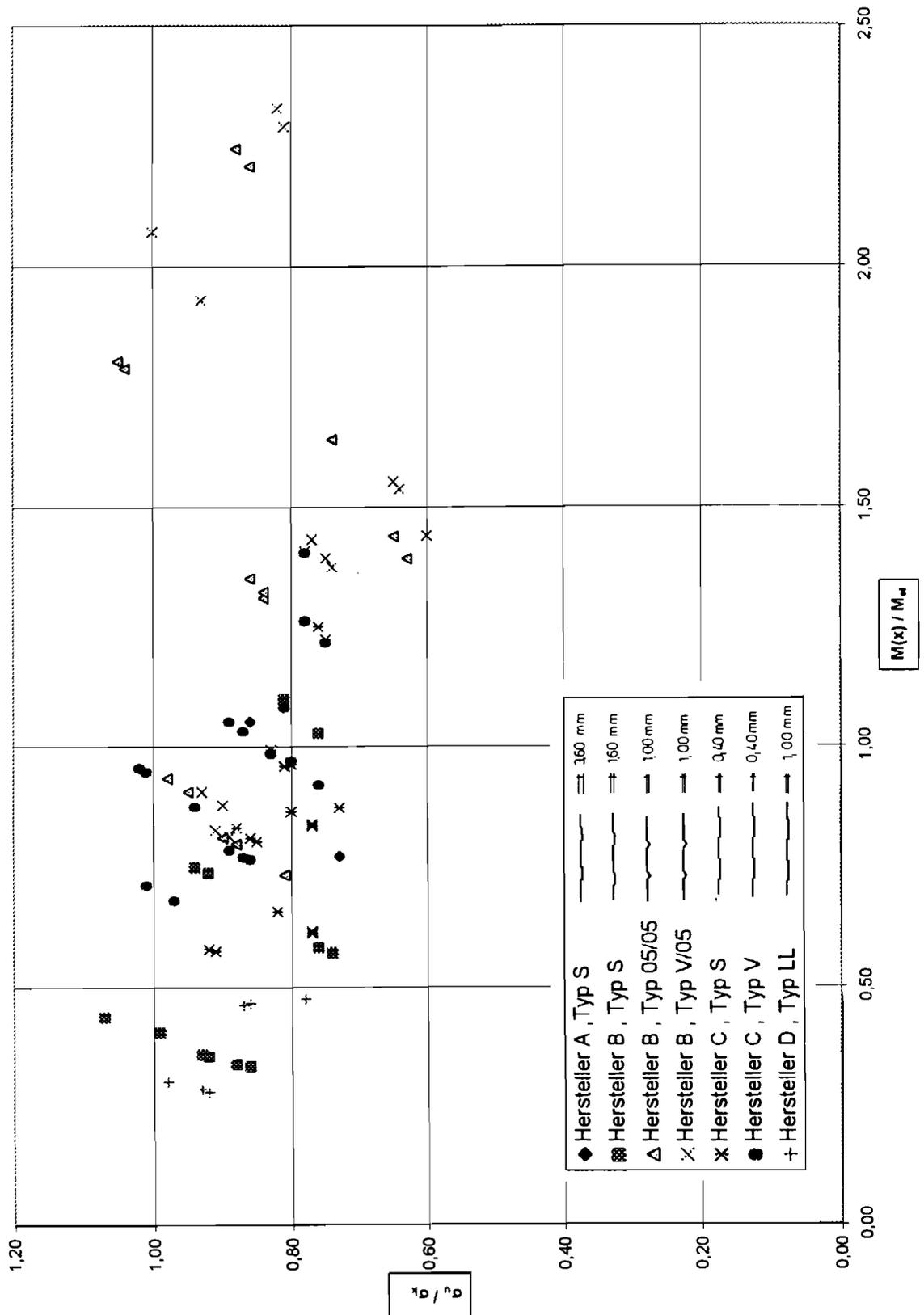


Abb. 3: Interaktionsdiagramm bei Ansatz von elastischen Verformungen

Aufgrund o.g. Beziehungen wurde das in Abb. 3 dargestellte Diagramm erstellt. Zur Interpretation der Ergebnisse ist folgendes zu sagen:

- a) Es ist deutlich die Tendenz zu erkennen, daß je größer die Auflagerpressung bzw. das Biegemoment ist, umso kleiner wird die Versagensspannung im Bereich der Mittelstützen im Vergleich zu den Knitterspannungen im Feld.
- b) Die breite Verteilung der durch die einzelnen Punkte dargestellten Ergebnisse läßt zunächst auf eine große Streuung der Ergebnisse schließen. Hierzu ist zu bemerken, daß bei allen Darstellungen in dieser Art von Interaktionsdiagrammen die Ergebnisse hinsichtlich der Ordinate (s. Abb. 3) absolut durch die im Versuch ermittelten Werte festliegen, so daß hier keine Fehlinterpretation denkbar ist. Die Abtragung der Werte auf der Abszisse hängt jedoch demgegenüber nur von dem gewählten Berechnungsmodell ab, so daß in dieser Hinsicht sich durchaus die Werte verschieben können und somit sowohl die Streuung als auch das Ergebnis sich ändern kann.
- c) Würden aufgrund der vorliegenden Interaktionsdiagramme die Ergebnisse interpretiert werden, müßte ein relativ hoher Abfall der Versagensspannungen im Mittelstützenbereich gegenüber den Knitterspannungen im Feld festgestellt werden. Dies ist wahrscheinlich in dieser Form nicht realistisch. Es tritt die Frage auf, inwieweit das angenommene Modell der lineartheoretischen Berechnung der Verformungen und Beanspruchungen einer elastisch gebetteten Platte die Realität erfaßt.

Aus diesem Grund wurde versucht, bessere Modelle, die auch plastische Beanspruchungen berücksichtigen, zu finden.

### **2.3.1.3 Deckblechbeanspruchungen bei Berücksichtigung von elastisch-plastischen Verformungen im Bereich der Auflager-Ränder**

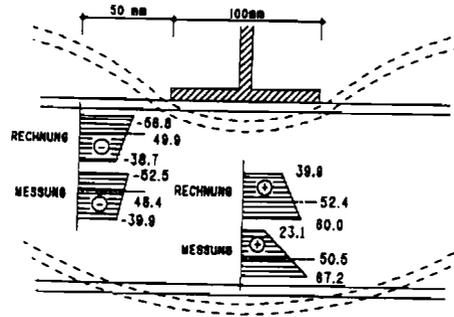
Aufgrund der relativ schlechten Verteilung in den Interaktionskurven gemäß 2.3.1.2 wurde erkennbar, daß eine rein elastische Betrachtung nicht ausreicht, um das Verhalten im Zwischenstützenbereich zu erfassen. Es wurden deshalb die Ergebnisse der in 2.2.1 beschriebenen Versuche in der Art ausgewertet, daß die Zusatzbeanspruchungen im "gestörten" Bereich, d.h. im Bereich direkt neben den Auflagerrändern, ersichtlich werden. Die Vorgehensweise ist auf Abb. 4 zu erkennen. Im Prinzip werden die Spannungen aus den gemessenen Dehnungen in der Hoch- und Tiefseite bei einer bestimmten Last zu einer Spannungsverteilung zusammengefaßt. Aus der Spannungsverteilung können dann Rückschlüsse hinsichtlich der vorhandenen Beanspruchungen gezogen werden.

Die Vorgehensweise wird zunächst beim Ersatzträger II erläutert:

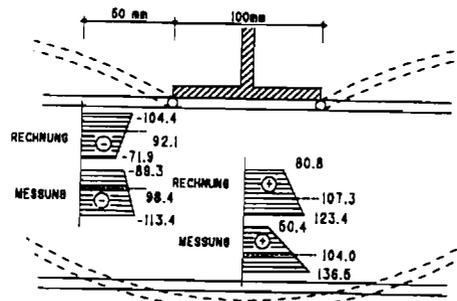
Werden als erstes die Spannungen bei einer geringen Laststufe, z.B.  $F = 7 \text{ kN}$  bzw. geringen Zusatzbeanspruchungen infolge Auflagerpressungen (ungestörte Verhältnisse) beurteilt, so ist ersichtlich, daß die gemessenen Werte mit den rechnerisch ermittelten Werte gut übereinstimmen (s. Abb. 4). Es können somit auch an anderen Stellen die rechnerisch ermittelten Werte bei ungestörten Verhältnissen vorausgesetzt werden. Dies bedeutet,

ERSATZTRÄGER-VERSUCH II

LASTSTUFE 7 KN



LASTSTUFE 14 KN



LASTSTUFE 17.7 KN

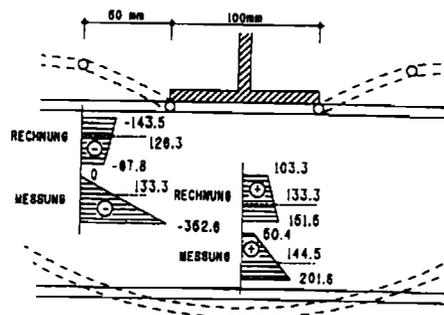


Abb. 4: Spannungsverteilungen auf der Grundlage der DMS-Messungen bei Ersatzträger-Versuch II  $\sigma$  [N/mm<sup>2</sup>]

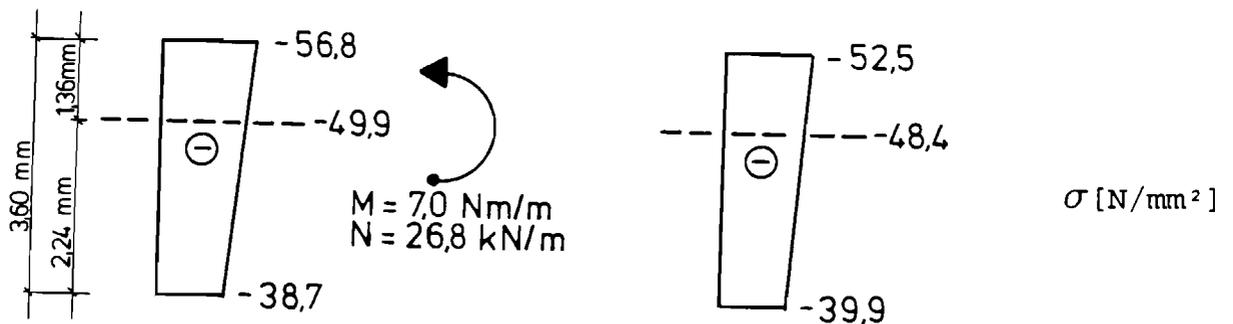
daß im Prinzip die Spannungsverteilung auch am oberen Deckblech bekannt ist, die ohne Zusatzbeanspruchungen vorhanden wäre.

Vergleicht man nun diese rechnerisch ermittelten Spannungen (ohne Zusatzbeanspruchung) mit den gemessenen Spannungen bei höheren Laststufen, z.B. bei  $F = 7 \text{ kN}$ , so können aus der Differenz der Spannungen die zusätzlich vorhandenen Biegemomente und Normalkräfte bestimmt werden.

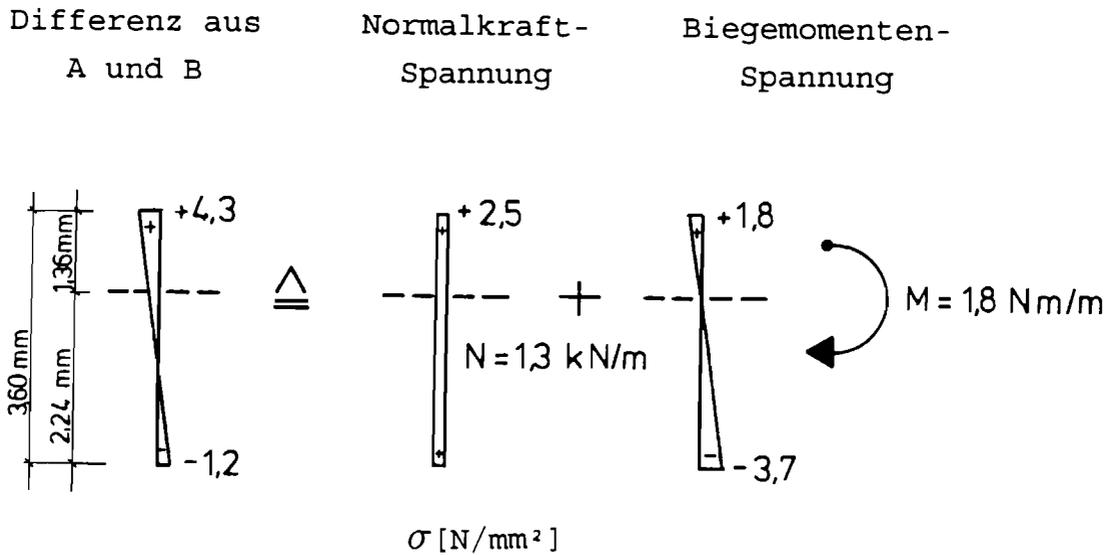
Dies wird nachfolgend im einzelnen zunächst an der Stelle **50 mm vom Auflagerrand (Laststufe 7 kN)** dargestellt:

- Verteilung A  
(rechnerisch ermittelt)  
"ungestört"

- Verteilung B  
(gemessen)  
"gestört"



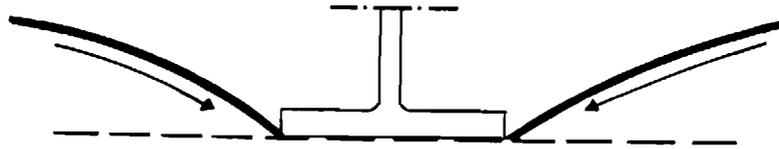
Aus der Differenz der beiden Spannungsbilder werden reine Normalkraft- und Biegemomenten-Spannungsanteile ermittelt:



Das bedeutet, daß die Spannungen, die im Sandwichbauteil aus dem äußeren Biegemoment vorhanden sind (ungestört) durch Spannungen aus der Lasteinleitung (gestört) überlagert werden, die aus einer Zug-Normalkraft von 1,3 kN/m und einem negativen Moment (Faser unten) von 1,8 Nm/m entstehen. Überlagert entsprechen dann die Spannungen wieder den gemessenen Werte.

Das Ergebnis erscheint zunächst überraschend, da

- 1) im oberen Deckblech ein Druckbereich des Sandwichquerschnitts lokal durch die Lasteinleitung eine Zug-Normalkraft auftritt. Aufgrund der Eindrückung ist dies (s. nachfolgende Skizze) aber durchaus vorstellbar.



- 2) ein negatives Biegemoment im Deckblech vorhanden ist (bei Faserdefinition: unten).

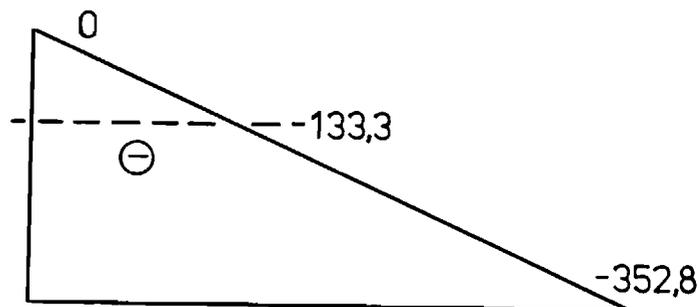
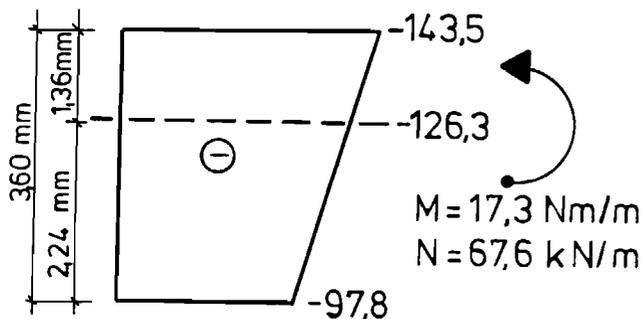
Ein negatives Moment bzw. die zugehörige Krümmung widerspricht aber den Vorstellungen aus den Betrachtungen im elastischen Bereich.

Wird aber davon ausgegangen, daß an den Kanten der Auflagerkräfte ein Fließgelenk entsteht, ist ein negativer Momentenverlauf zu erwarten. Ein Fließgelenk ist durch die punktuelle Abstützung am Trägerrand und anhand der erzwungenen Krümmung sicherlich denkbar. Das Entstehen eines Fließgelenkes ist auch anhand der DMS-Messungen zu erkennen, da z.B. bei Versuch II bei der Laststufe von ca. 14 kN ein deutliches Ausweichen der DMS-Kurven (s. Anhang) vorhanden ist. Hier wird im Bereich der Kante das positive Moment, das bei ungestörten Verhältnissen vorhanden wäre, durch ein negatives Moment so weit überlagert, daß das plastische Moment des Deckbleches erreicht wird und ein plastisches Gelenk entsteht. Es muß wahrscheinlich davon ausgegangen werden, daß durch die Kantenpressung die Linierung des Bleches flachgedrückt wird, so daß nur noch das plastische Restmoment des ebenen Deckbleches vorhanden ist. Nachdem an der Auflagerkante ein plastisches Gelenk entstanden ist, kann die Beanspruchung des Deckbleches weiter gesteigert werden bis ein zweites Gelenk auf-

Deckbleches weiter gesteigert werden bis ein zweites Gelenk auftritt. Hierzu wurde eine weitere Auswertung an der Stelle 50 mm vom Auflagerrand bei der maximalen Laststufe (ca. 17,7 kN) durchgeführt (s. Abb. 4):

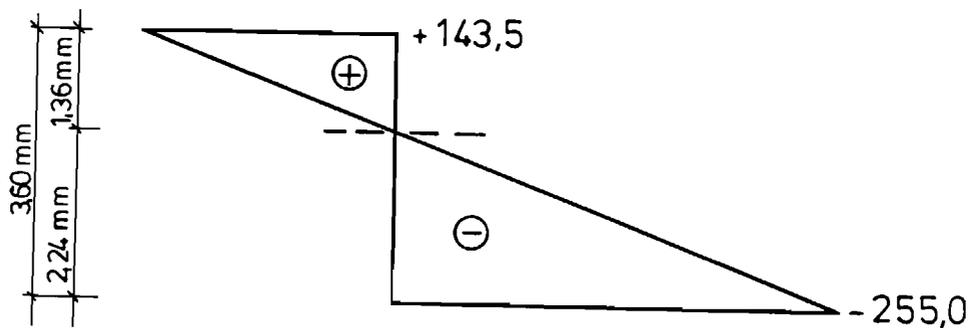
- Verteilung A  
 (rechnerisch ermittelt)  
 "ungestört"

-Verteilung B  
 (gemessen)  
 "gestört"



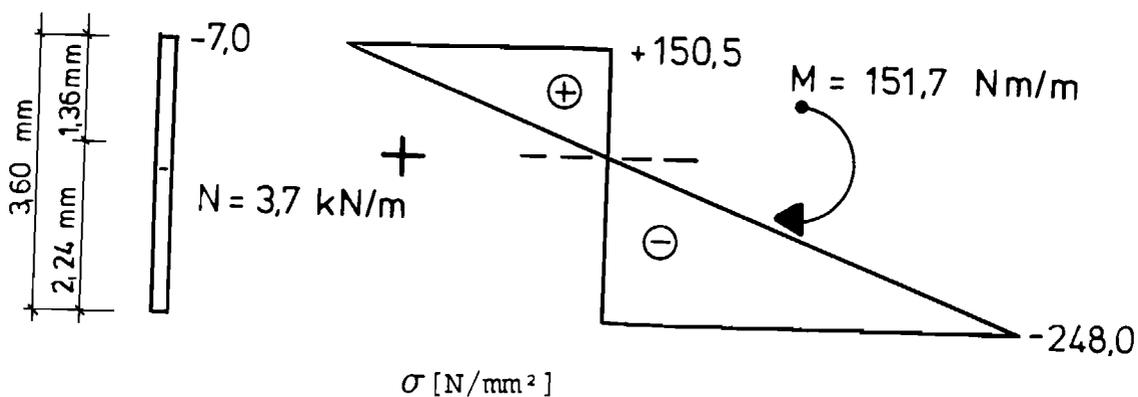
Differenz aus A und B

$\sigma \text{ [N/mm}^2\text{]}$



Normalspannung

Biegemomentenspannung



Es ist deutlich zu erkennen, daß das negative Biegemoment sehr stark zugenommen hat und im Bereich von dem plastischen Moment der linierten Deckschicht liegt. Es muß deshalb davon ausgegangen werden, daß sich ein zweites plastisches Moment ausbildet. Dadurch entsteht eine labile Gelenkkette, die auch vom Schaum nicht mehr stabilisiert werden kann und die somit Ursache des Versagens wird.

Analog zum Ersatzträger-Versuch II sind die Verteilungen der Spannungen bei verschiedenen Laststufen bei Ersatzträger-Versuch I auf Abb. 5 zu erkennen.

Aus diesen Ergebnissen können praktisch die gleichen Erkenntnisse gewonnen werden, wie sie für Ersatzträger-Versuch II eingehend beschrieben wurden. Die Versagensursache und die Stelle des Versagens im Bereich der Lasteinleitungen sind demnach m.E. geklärt.

## ERSATZTRAGER-VERSUCH I

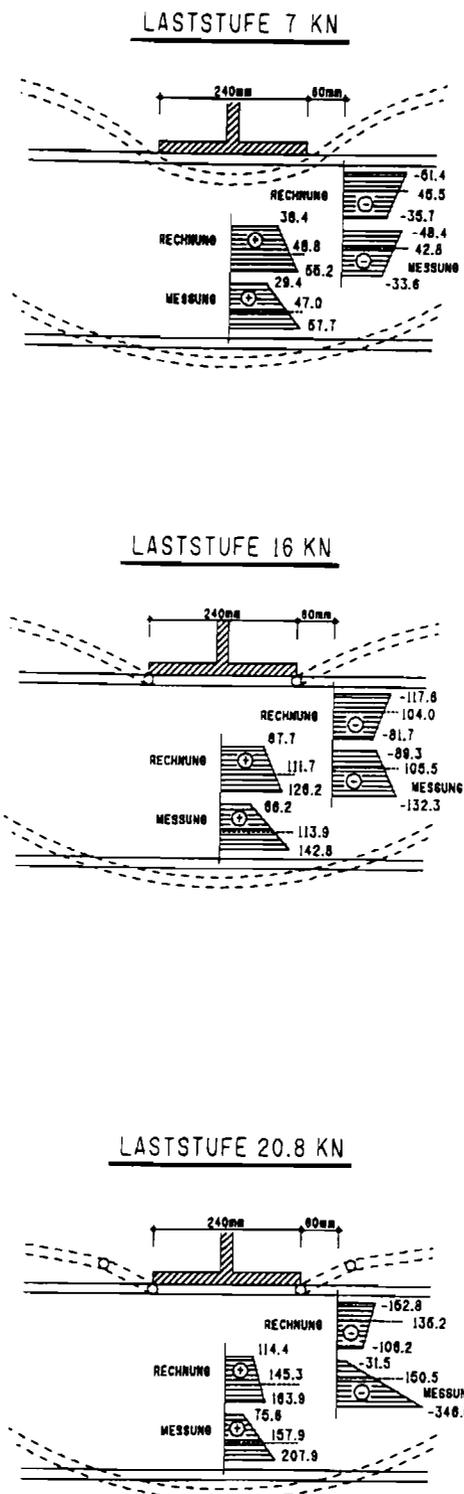


Abb. 5: Spannungsverteilungen auf der Grundlage der DMS-Messungen bei Ersatzträger-Versuch I  $\sigma$  [N/mm<sup>2</sup>]

Wichtig ist hierbei, daß es sich vorrangig nicht um einen reinen Stabilitätsfall (Knittern des Deckbleches) handelt, sondern um ein plastisches Versagen infolge Überlagerung von Biegemomenten- und Normalkraft-Beanspruchungen.

Es liegt somit auf der Hand, daß auf der Basis o.g. Erkenntnisse eine Biegemomenten/Normalkraft Interaktion zu berücksichtigen ist.

Allgemein kann formelmäßig die Interaktion bei der Beanspruchung im Traglastbereich wie folgt erfaßt werden:

$$\frac{N_u}{N_k} + \frac{M_i}{M_{pl}} \leq 1$$

$N_u$  = Normalkraft in der druckbeanspruchten Deckschicht im Bereich der Lasteinleitung

$N_k$  = Normalkraft im Versagenszustand bei Erreichen der Knitterspannung bei reiner Normalkraftbeanspruchung

$$N_k = \sigma_K * A_D$$

$\sigma_K$  = Knitterspannung bei der Einfeldplatte

$A_D$  = Deckblech-Fläche

$M_i$  = Biegebeanspruchung infolge Zusatzbeanspruchung im Bereich der Mittelunterstützung

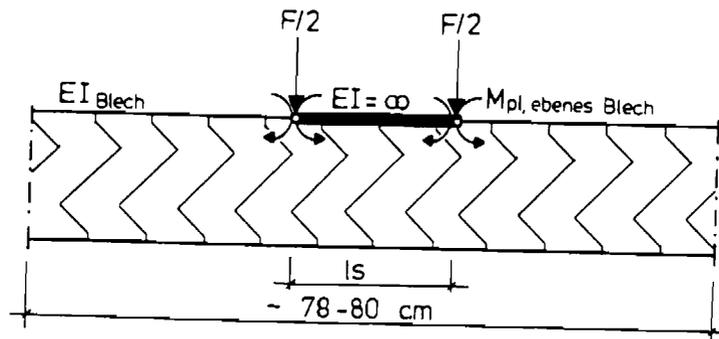
$M_{pl}$  = plastisches Moment der Deckschicht

Aus den Gleichungen ist ersichtlich, daß

- 1) die maximalen Biegebeanspruchungen ( $M_i$ ) infolge Lasteinleitung, unter Berücksichtigung des plastischen Restmomentes an der Auflagerkante und der elastischen Bettung auf dem Schaumkern und

2) das plastische Moment der Deckschicht zu ermitteln ist.

Zur Ermittlung der Biegebeanspruchungen wurde ein EDV-Programm verwendet. Zur Eingabe wurde ein Berechnungsmodell entwickelt, das jeweils einen ca. 80 cm langen Deckblechstreifen erfaßt, der elastisch durch den Schaumkern gebettet ist. Im Bereich der Auflagerträger wurde ein unendlich steifer Bereich angesetzt. Am Auflagertrand wurde die anteilige (halbe) Auflagerkraft und für den Traglastzustand an der Auflagerkante ein plastisches Gelenk mit dem Resttragmoment des ebenen Bleches angesetzt.



Die elastische Bettung wurde mit Hilfe von Federn berücksichtigt. Die Federsteifigkeit wurde aus den E-Moduli des Kerns bestimmt. Die Berechnung der maximalen Deckblechmomente ( $M_i$ ) wurden für jeden Deckblechtyp und den zugehörigen Schaumkennwerten unter der Belastung ( $R$ ) (entspricht der Traglast) berechnet. Das plastische Moment ( $M_{\text{pl}}$ ) der einzelnen Deckbleche wurde (ebenfalls mit einem EDV-Programm) aufgrund der gemessenen Blechgeometrie für die einzelnen Typen und den zugehörigen Fließspannungen ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tab. 3 ersichtlich.

Hersteller	Typ	Nr.	d (mm)	l <sub>0</sub> (mm)	E-Modul (N/mm <sup>2</sup> )	c (KN/mm)	I <sub>0</sub> (mm <sup>4</sup> /mm)	M <sub>el</sub> (Nm/m)	M <sub>pl</sub> (Nm/m)	M <sub>lpl</sub> (-)	sigma u / sigma k (-)
A	S	1	120	240	117,3	0,59	1,3704	75,59	217,62	0,35	0,86
A	S	2	120	100	117,3	0,59	1,3704	110,43	217,62	0,51	0,51
B	S	3	35	80	4,61	2,48	0,2671	26,32	91,3	0,29	1,07
B	S	4	35	80	4,61	2,48	0,2671	25,31	91,3	0,28	0,99
B	S	5	60	100	5,6	1,75	0,2671	34,56	91,3	0,38	0,94
B	S	6	60	100	5,6	1,75	0,2671	34,23	91,3	0,37	0,92
B	05/05	7	35	60	4,81	2,58	0,0228	9,38	25,29	0,37	0,9
B	05/05	8	35	60	4,81	2,58	0,0228	8,96	25,29	0,35	0,81
B	05/05	9	35	60	4,81	2,58	0,0228	9,36	25,29	0,37	0,88
B	05/05	10	35	80	4,81	2,58	0,0228	8,60	25,29	0,34	0,98
B	05/05	11	35	80	4,81	2,58	0,0228	8,48	25,29	0,34	0,95
B	05/05	12	60	100	5,405	1,69	0,0228	13,32	25,29	0,53	1,04
B	05/05	13	60	100	5,405	1,69	0,0228	13,98	25,29	0,55	1,14
B	05/05	14	100	120	4,59	0,86	0,0228	17,80	25,29	0,70	0,88
B	05/05	15	100	120	4,59	0,86	0,0228	17,66	25,29	0,70	0,86
B	V/05	16	35	60	3,68	1,98	0,0228	11,05	25,29	0,44	0,91
B	V/05	17	35	60	3,68	1,98	0,0228	10,97	25,29	0,43	0,89
B	V/05	18	35	60	3,68	1,98	0,0228	10,97	25,29	0,43	0,89
B	V/05	19	35	80	3,68	1,98	0,0228	10,57	25,29	0,42	1,08
B	V/05	20	35	80	3,68	1,98	0,0228	9,79	25,29	0,39	0,9
B	V/05	21	60	100	4,455	1,40	0,0228	15,03	25,29	0,59	0,93
B	V/05	22	60	100	4,455	1,40	0,0228	16,62	25,29	0,66	1
B	V/05	23	100	120	3,495	0,66	0,0228	19,65	25,29	0,78	0,82
B	V/05	24	100	120	3,495	0,66	0,0228	19,49	25,29	0,77	0,81
C	S	25	50	60	3,51	1,40	0,0346	22,43	47,18	0,48	0,8
C	S	26	50	60	3,51	1,40	0,0346	22,05	47,18	0,47	0,77
C	S	27	50	60	3,51	1,40	0,0346	22,10	47,18	0,47	0,77
C	S	28	50	80	3,51	1,40	0,0346	19,17	47,18	0,41	0,73
C	S	29	50	60	3,51	1,40	0,0346	18,68	47,18	0,40	0,77
C	S	30	50	60	3,51	1,40	0,0346	19,21	47,18	0,41	0,77
C	S	31	50	60	3,51	1,40	0,0346	19,74	47,18	0,42	0,82
C	S	32	50	60	3,51	1,40	0,0346	18,73	47,18	0,40	0,92
C	S	33	50	60	3,51	1,40	0,0346	18,73	47,18	0,40	0,92
C	S	34	50	60	3,51	1,40	0,0346	18,73	47,18	0,40	0,92
C	S	35	80	60	2,349	0,59	0,0346	33,33	45,48	0,73	0,75
C	S	36	80	60	2,349	0,59	0,0346	33,74	45,48	0,74	0,76
C	S	37	80	60	2,349	0,59	0,0346	33,33	45,48	0,73	0,75
C	S	38	80	80	2,349	0,59	0,0346	30,37	45,48	0,67	0,78
C	S	39	80	60	2,349	0,59	0,0346	29,33	45,48	0,64	0,81
C	S	40	80	60	2,349	0,59	0,0346	29,36	45,48	0,65	0,8
C	S	41	80	60	2,349	0,59	0,0346	29,84	45,48	0,66	0,73
C	S	42	80	60	2,349	0,59	0,0346	27,08	45,48	0,60	0,86
C	S	43	80	60	2,349	0,59	0,0346	27,41	45,48	0,60	0,88
C	S	44	80	60	2,349	0,59	0,0346	27,10	45,48	0,60	0,85
C	V	45	50	60	3,691	1,48	0,0346	19,93	40,29	0,49	0,8
C	V	46	50	60	3,691	1,48	0,0346	19,39	40,29	0,48	0,76
C	V	47	50	60	3,691	1,48	0,0346	19,92	40,29	0,49	0,8
C	V	48	50	80	3,691	1,48	0,0346	17,71	40,29	0,44	0,81
C	V	49	50	60	3,691	1,48	0,0346	17,75	40,29	0,44	0,87
C	V	50	50	60	3,691	1,48	0,0346	17,71	40,29	0,44	0,86
C	V	51	50	60	3,691	1,48	0,0346	17,91	40,29	0,44	0,89
C	V	52	50	60	3,691	1,48	0,0346	17,12	40,29	0,42	1,01
C	V	53	50	60	3,691	1,48	0,0346	16,77	40,29	0,42	0,97
C	V	54	50	60	3,691	1,48	0,0346	17,13	40,29	0,43	1
C	V	55	80	60	4,178	1,04	0,0346	24,97	39,61	0,63	0,75
C	V	56	80	60	4,178	1,04	0,0346	25,49	39,61	0,64	0,78
C	V	57	80	60	4,178	1,04	0,0346	25,49	39,61	0,64	0,78
C	V	58	80	80	4,178	1,04	0,0346	22,55	39,61	0,57	0,78
C	V	59	80	60	4,178	1,04	0,0346	22,26	39,61	0,56	0,83
C	V	60	80	60	4,178	1,04	0,0346	22,81	39,61	0,58	0,87
C	V	61	80	60	4,178	1,04	0,0346	22,93	39,61	0,58	0,89
C	V	62	80	60	4,178	1,04	0,0346	20,98	39,61	0,53	0,94
C	V	63	80	60	4,178	1,04	0,0346	21,92	39,61	0,55	1,02
C	V	64	80	60	4,178	1,04	0,0346	21,81	39,61	0,55	1,01
D	LL	65	40	80	3,671	1,84	0,1532	24,44	105,84	0,23	0,92
D	LL	66	40	80	3,671	1,84	0,1532	24,63	105,84	0,23	0,93
D	LL	67	40	80	3,671	1,84	0,1532	25,09	105,84	0,24	0,98
D	LL	68	80	80	1,502	0,38	0,1341	34,85	105,5	0,33	0,87
D	LL	69	80	80	1,502	0,38	0,1341	34,98	105,5	0,33	0,86

Tabelle 3: Auswertung der Versuche auf der Basis von elastisch/plastischen Verformungen

Zur Darstellung o.g. Interaktion konnten nun in einem Diagramm auf der Abszisse das Verhältnis  $M_i/M_{pl}$  (Biegemoment infolge Zusatzbeanspruchung/plastisches Moment) aufgetragen werden. Auf der Ordinate ist entsprechend der Interaktionsbeziehung das Verhältnis der erreichten Deckblech-Normalkraft ( $N_u$ ) im Zwischenstützenbereich (bzw. beim Ersatzträgerversuch) zur Deckblech-Normalkraft im ungestörten Bereich (beim Einfeldträgerversuch) angetragen. Da die Deckblechfläche gleich ist, können auch direkt die Normal-Kraftspannungen angesetzt werden. Das Ergebnis der Auswertung von 69 Versuchen in der beschriebenen Art ist in Abb. 6 dargestellt. Dabei ist zu bemerken, daß Versuche, bei denen die Auflagerpressung größer als die Druckfestigkeiten des Kerns waren, zur Auswertung nicht herangezogen wurden (s. auch Kap. 2.4).

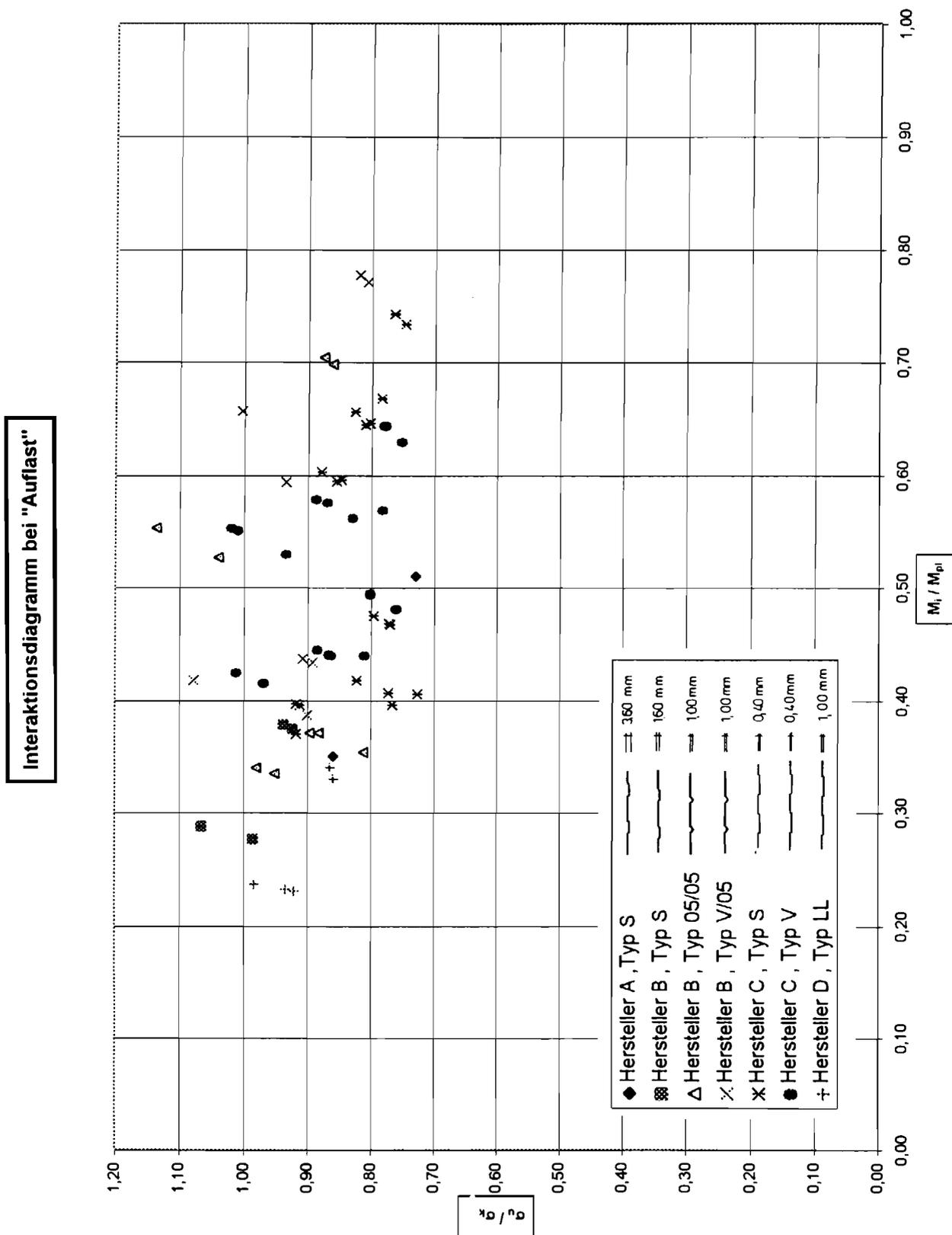


Abb. 6: Interaktionsdiagramm bei Ansatz von elastisch/plastischen Verformungen

Wesentlich ist zu bemerken, daß bei dieser Darstellung alle zur Verfügung stehenden Versuchsergebnisse von sehr unterschiedlichen Deckblechgeometrien, Schaumkennwerten und Auflagerbreiten in einem Diagramm zusammengefaßt sind.

Wie schon erwähnt, sind alle Werte, die auf der Ordinate aufgetragen sind, durch die Auswertung einzelner zugehöriger Versuche, z.B. Ersatzträger-Versuche und Einfeldträger-Versuche aus einer Charge, ermittelt, so daß die Lage der Punkte in Richtung der Ordinate festliegen.

Die Werte auf der Abszisse sind theoretisch ermittelt und somit von dem Rechenmodell abhängig. Das Rechenmodell ist aber durch Versuche mit aufwendigen DMS-Messungen relativ gut untermauert.

#### **Interpretation der Interaktions-Geraden:**

Als erste Näherung wurde als arithmetisches Mittel aller Punkte eine Gerade bestimmt, die eindeutig eine fallende Tendenz hat. Dies ist auch zu erwarten, da bei zunehmender Zusatzbeanspruchung ( $M_j$ ) die Versagensspannung ( $\sigma_u$ ) abfällt. Aufgrund der Geraden kann somit in allgemeiner Art die Abminderung der Versagensspannungen im Bereich der Zwischenunterstützungen (oder im Ersatzträger-Versuch) gegenüber der Knitterspannungen im Feld (ohne Zusatzbeanspruchung) abgelesen werden.

Der Vorteil dieser Darstellungsweise liegt gerade darin, daß für die Festlegung der Versagensspannungen im Mittelstützenbereich der Bezug zur gut abgesicherten Knitterspannung im Feldbereich hergestellt ist, da im Prinzip nur der Abminderungsfaktor gegenüber diesem Wert gebraucht wird, um einen Rechenwert für den Nachweis im Bereich der Zwischenunterstützung zu erhalten.

Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, die Grenzen der Gültigkeit der Interaktionsbeziehungen zu definieren. Die Grenze auf der Ordinate ist erreicht, wenn die Momentenbeanspruchungen ( $M_i$ ) im Deckblech so groß werden wie das plastische Moment des Deckblechs, d.h., wenn  $M_i/M_{pl} = 1$  ist.

Auf der Abszisse ist die Grenze dadurch definiert, daß die Versagensspannungen bei Zusatzbeanspruchungen im Prinzip nicht größer sein können als die Knitterspannungen im ungestörten Bereich in Feldmitte.

Somit ist der Gültigkeitsbereich durch die vertikalen und horizontalen Grenzlinien festgelegt.

Die in Abb. 7 dargestellte vollständige Interaktions-Beziehung könnte somit als Bemessungsgrundlage für den Zwischenstützenbereich vorgeschlagen werden.

Der Nachteil dieser Darstellung ist aber die aufwendige Ermittlung der Momentenbeanspruchungen, die sinnvoll nur mit einem EDV-Programm durchgeführt werden kann. Dies ist für eine praktische Anwendung nicht vorstellbar. Es wird deshalb, auf der Grundlage der oben beschriebenen Erkenntnisse, in Kap. 2.4 ein vereinfachtes Verfahren vorgeschlagen.

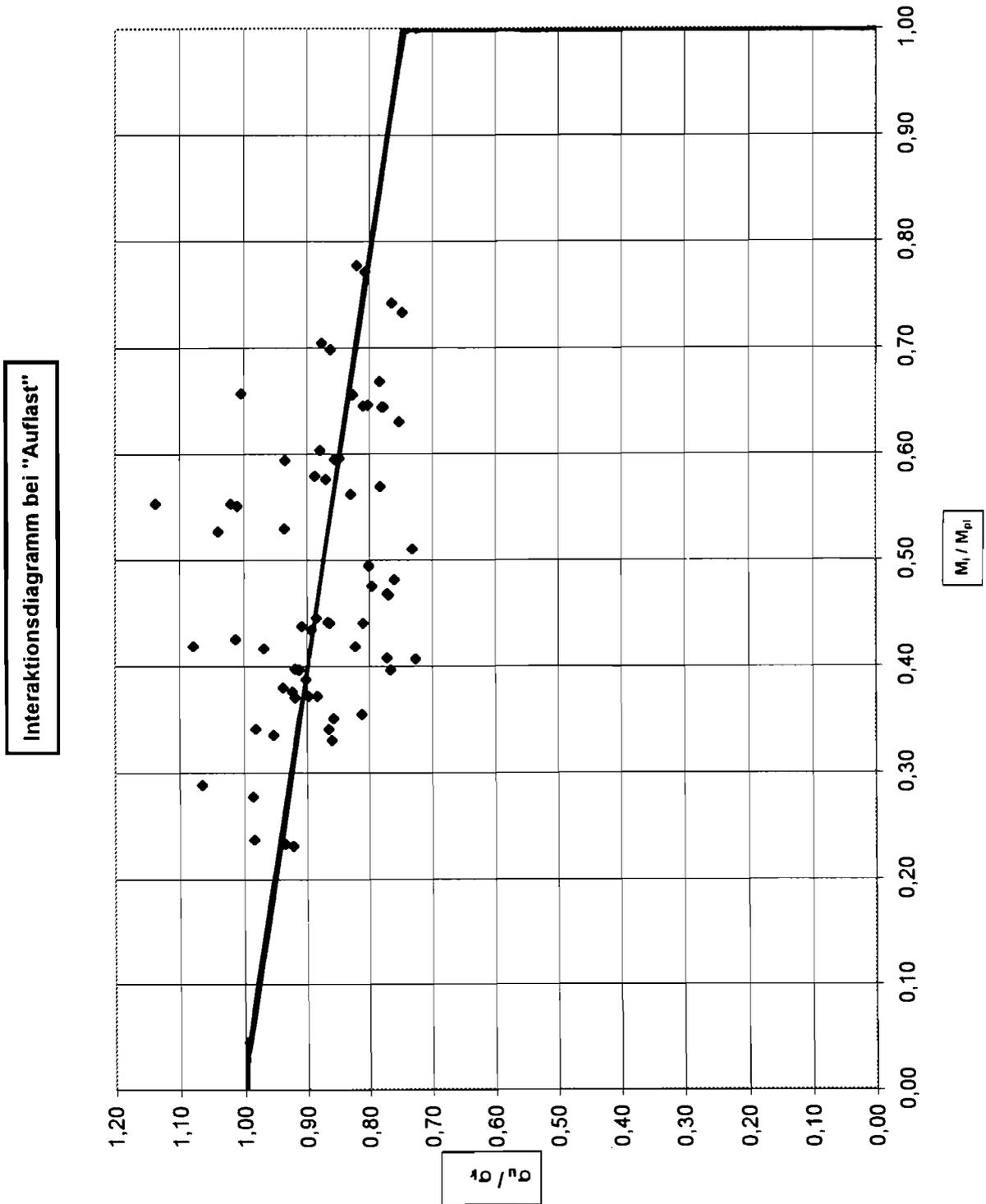


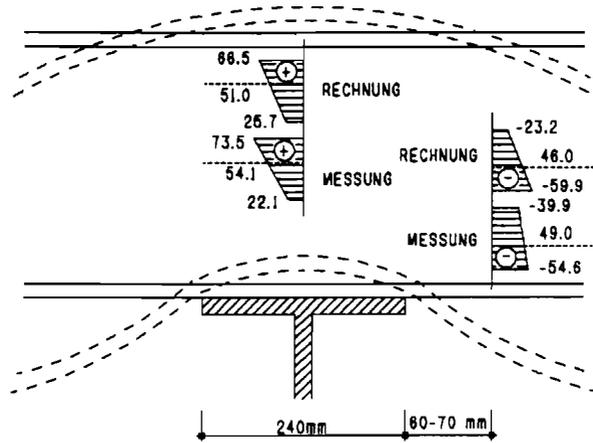
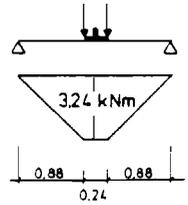
Abb. 7: Interaktionsbeziehung zwischen  $\sigma_u / \sigma_k$  und  $M_i / M_{pl}$  mit Gültigkeitsgrenzen

### 2.3.2 Vergleich der Beanspruchungen bei Ersatzträger- und Zweifeldträger-Versuchen

Die in Kap.2.3.1 beschriebenen Interaktionsbeziehungen wurden im wesentlichen auf der Grundlage von Ersatzträger-Versuchen ermittelt. Aus dem Interaktionsdiagramm soll aber die maßgebende Versagensspannung über der Mittelstütze von durchlaufenden Sandwichbauteilen, d.h. für Zwei- oder Mehrfeldträger, entnommen werden. Die Versagensspannungen hängen, wie in Kap. 2.3.1.3 eingehend erläutert, im wesentlichen von Zusatzbeanspruchungen infolge von Biegemomenten im Deckblech im Bereich der Mittelauflager ab, die durch die Einleitung der Auflagerkräfte und Eindrückungen im Kern entstehen. Diese Zusatzbeanspruchungen sind lokal begrenzt und von mehreren Parametern abhängig, wie z.B. plastisches Verhalten des Deckblechs an der Auflagerkante, Steifigkeiten der Kernschicht, Deckblechgeometrie usw. Daraus ist zu erkennen, daß die Spannungsverteilungen infolge der Biegebeanspruchungen in den dünnen nur ca. 0,5 mm dicken Deckblechen mit den sehr geringen Profilierungen (zwischen 0,5 und 4 mm Sicken-tiefe) äußerst empfindlich sind. Hierzu kommen noch Eigenspannungen und Imperfektionen in den Deckblechen, so daß hinsichtlich der Ergebnisse aus DMS-Messungen im Vergleich zu den theoretischen Werten keine allzu großen Erwartungen bezüglich der Genauigkeit gestellt werden können. Nachfolgend wird auf der Grundlage der Dehnungsmessungen bei den im Kap. 2.2.1 dargestellten Versuchen trotzdem versucht, die Spannungsverteilungen und damit die Beanspruchungen bei den Ersatzträger- und Zweifeldträger-Versuchen gegenüberzustellen.

## ZWEIFELDTRÄGER-VERSUCH

LASTSTUFE 2.5 kN/m



## ERSATZTRÄGER-VERSUCH I

LASTSTUFE 7.4 kN

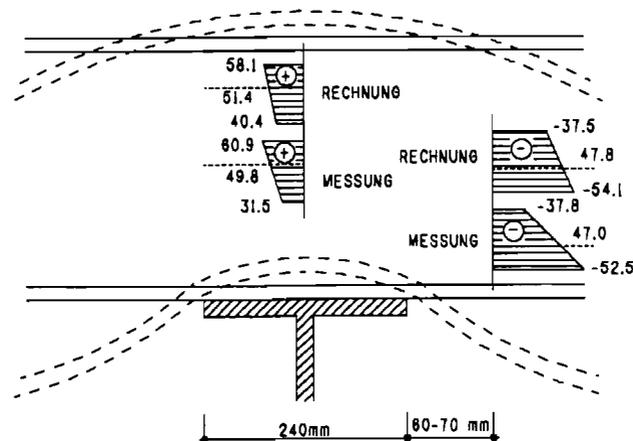
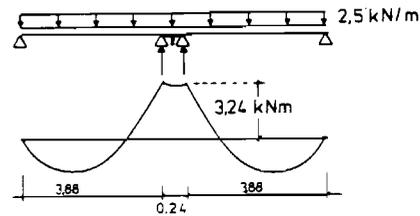


Abb. 8: Vergleich der Deckblechspannungen im „ungestörten“ und „gestörten“ Bereich zwischen Ersatzträger- und Zweifeldträger-Versuchen  $\sigma$  [N/mm<sup>2</sup>]

In Abb. 8 sind für eine bestimmte Momentenbeanspruchung die Spannungen im ungestörten (ohne Lasteinleitungs-Beanspruchungen) und gestörten Bereich (Bereich mit Auflagerpressungen) beim Ersatzträger- und Zweifeldträger-Versuch gegenübergestellt. Neben den gemessenen Werten wurden auch die theoretisch ermittelten Werte dargestellt. Hierbei ist zu beachten, daß die rechnerischen Werte möglichst genau, z.B. an einem Durchlaufsystem mit Unterstützung an den Auflagerkanten, ermittelt wurden.

Aus der vergleichenden Gegenüberstellung ist folgendes zu erkennen:

- a) Im ungestörten Bereich stimmen die gemessenen Spannungen ausreichend genau mit den errechneten Werten überein, wobei die anfänglich erwähnten Schwierigkeiten der DMS-Messung am dünnen Blech beachtet werden müssen.
- b) Aufgrund der Sandwichtheorie werden bei den Zweifeldträgern geringfügig unterschiedliche Beanspruchungen im Deckblech (unterschiedliche Krümmungen) gegenüber den Ersatzträgern aufgrund der Momentenbeanspruchung im Deckblech ermittelt. Die Normalkraftspannungen sind aber praktisch gleich. Bei einer praxisnahen Bemessung werden, bei quasi-ebenen Deckblechen, aber auch nur die vorhandenen Normalkraftspannungen den Versagensspannungen (ebenfalls reine Normalkraftspannungen) gegenübergestellt.
- c) Die infolge Auflagerkraft-Einleitung vorhandenen Biegemomente (gestörter Bereich) im Deckblech sind beim Ersatzträger- und Zweifeldträger-Versuch gleich groß. Dies ist die Grundlage, daß die Festlegung der Versagensspannungen entsprechend dem

vorgelegten Interaktionsdiagramm, das im wesentlichen auf den Ergebnissen von Ersatzträger-Versuchen beruht, auf jeden Fall auch für Durchlaufträger zutreffen.

Zum Tragverhalten von durchlaufenden Sandwichbauteilen ist allgemein, auch im Vergleich zum Ersatzträger, folgendes zu bemerken.

Normalerweise wird bei steigender Belastung zuerst ein plastisches Gelenk in der unteren (im Ersatzträger-Versuch: oberen) Deckschicht am Auflagerrand und dann, wie ausgiebig beschrieben, ein zweites plastisches Gelenk in einem Abstand von 40 bis 80 mm vom Auflagerrand entstehen.

Beim Ersatzträger-Versuch bedeutet dies auch gleichzeitig das Gesamtversagen des Bauteils. Beim Zweifeldträger muß das Versagen der unteren Deckschicht aber noch nicht das Versagen des gesamten Bauteils bedeuten, da über der Mittelstütze ein Reststützmoment erhalten bleibt, insbesondere auch bei profilierten oberen Deckblechen (Trapezprofile). Aufgrund der plastischen Verformungen lagern sich die Beanspruchungen in das Feld der Durchlaufplatten um. Erst wenn sich im Feld ein zusätzliches plastisches Gelenk einstellt, versagt das Bauteil insgesamt.

Dieses Verhalten, das in ähnlicher Form auch bei den reinen Trapezblech-Bauteilen zu beobachten ist, war von Beginn an bekannt und in den bauaufsichtlichen Zulassungen durch entsprechende Nachweisverfahren berücksichtigt.

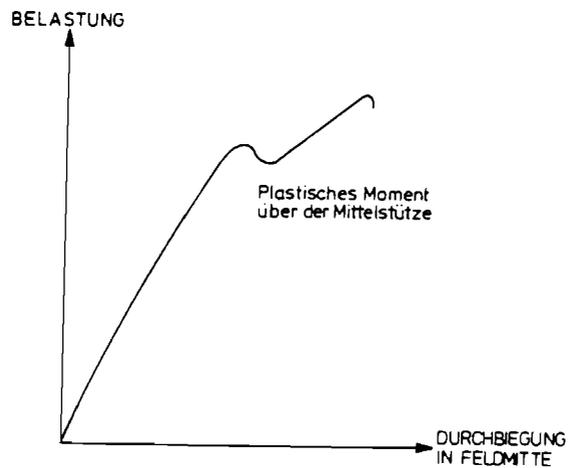
Das Versagen des unteren Deckbleches bei durchlaufenden Sandwichplatten bedeutet somit zwar noch nicht das Gesamtversagen,

da noch nicht die Traglast erreicht ist. Unter Gebrauchslast können aber plastische Verformung, sichtbar durch eine Querfalte neben dem Auflager, auftreten, die aus verschiedenen Gründen (optische Beeinträchtigung, erhöhte Gefahr der Korrosion, Undichtigkeit usw.) nicht erwünscht sind. Es wurde deshalb ein "Gebrauchsfähigkeits-Nachweis" gefordert, mit dem bei einem relativ geringen Sicherheitsbeiwert von  $\gamma = 1,1$  sichergestellt werden soll, daß solche Beschädigungen im Zwischenstützen-Bereich nicht auftreten. Gegenüber dem Gesamtversagen ist dann, unter der Annahme eines plastischen Momentes (mit oder ohne Reststützmoment) über der Mittelstütze ein Tragsicherheits-Nachweis mit einem Sicherheitsfaktor von  $\gamma = 1,85$  zu führen.

Dieser Nachweis der Tragsicherheit ist aber bei den in der Praxis zur Anwendung kommenden Bauteilen im Prinzip nicht maßgebend, da ein erheblicher Anteil der Beanspruchungen bei durchlaufenden Platten aus dem Lastfall "unterschiedliche Deckblechtemperaturen" herrührt. Diese Beanspruchungen sind aber nur bei den durchlaufenden Platten von ausschlaggebender Bedeutung und somit nur beim Gebrauchsfähigkeits-Nachweis. In dem Moment, in dem sich ein plastisches Gelenk über der Zwischenstütze bildet und damit aus dem statisch unbestimmten System zwei statisch bestimmte Einfeldträger entstehen, ist die Temperatur-Zwängungsbeanspruchung sehr gering. Somit wird der Tragsicherheits-Nachweis praktisch nie maßgebend.

Das Verhalten von durchlaufenden Sandwichplatten, im Zustand eines vorhandenen plastischen Gelenkes über der Stütze, hat damit für die Praxis keine Bedeutung. Das heißt aber auch, daß es unwichtig ist, das Verhalten der Platten bei höherer Beanspruchung als bis zum 1. plastischen Gelenk zu untersuchen. Dabei ist un-

bestritten, daß, nachdem sich das Gelenk über der Mittelstütze gebildet hat, durchaus noch Laststeigerungen durch Rest-Stützmo-  
mente und Momenten-Umlagerungen ins Feld möglich sind. Eine ty-  
pische Last-Verformungskurve mit einer Momenten-Umlagerung ist  
qualitativ in nachfolgender Skizze zu erkennen.



## 2.4 Darstellung von Interaktions-Beziehungen für eine praxisgerechte Bemessung.

Die in 2.3.1.3 beschriebene Interaktion zwischen den Versagensspannungen  $\sigma_u/\sigma_k$  und  $M_i/M_{p1}$  beschreibt m.E. die realen Beanspruchungen im Deckblech im Bereich der Zwischenaufleger am besten, da vor allem die zusätzlichen Biegemomente in der Deckschicht infolge Einleitung der Auflagerkräfte direkt erfaßt werden.

Für eine praxisgerechte Bemessung hat diese Darstellung jedoch zwei wesentliche Nachteile:

1. Das Versagen des Deckblechs im Bereich der Zwischenaufleger ist im Prinzip von zwei Kriterien abhängig. Als erstes Versagens-Kriterium ist sicherlich die Zusatzbeanspruchung infolge Biegemomente aus der Auflagerpressung zu nennen. Diese Biegebeanspruchung resultiert aber aus der Pressung und der daraus sich ergebenden Verformung im Kern. Es muß deshalb aber auch das Versagen durch Überschreitung der Druckfestigkeit des Kerns als Kriterium beachtet werden. Dieses Versagen ist jedoch in der Interaktionsbeziehung auf der Grundlage  $M_i/M_{p1}$  nicht erfaßt. Bei einer praxisgerechten Bemessung ist dieses Versagen zwar durch den geforderten Nachweis, daß die Auflagerpressung geringer sein muß als die Druckfestigkeit im Kern, praktisch ausgeschlossen. Der Nachteil bei der Interaktions-Darstellung über  $M_i/M_{p1}$  ist aber, daß dies nicht direkt zu erkennen ist.
2. Für praxisnahe Gebrauchsfähigkeits-Nachweise (Nachweis gegen Versagen über der Mittelstütze) ist es praktisch unmöglich, daß für jeden Nachweis mit einem EDV-Programm die zusätzliche

Momentenbeanspruchung im Deckblech ( $M_i$ ) ermittelt wird. Diese Beanspruchung müßte projektbezogen jeweils neu ermittelt werden, da sie von der vorhandenen Auflagerkraft (abhängig von der Unterkonstruktion und den äußeren Lasten) und der Auflagerpressung (abhängig von der Auflagerbreite) bestimmt ist.

Aus Gründen der genannten Nachteile wurde deshalb eine Interaktions-Beziehung gesucht, die für praxisgerechte rechnerische Nachweise von Sandwich-Bauteilen besser geeignet ist.

Grundlage dieser Überlegungen ist die Abhängigkeit der Biegemomente im Deckblech von der Auflagerpressung:

Bei elastisch gebetteten Platten ist das Biegemoment ( $M_i$ ) in der Platte im Prinzip linear von den äußeren Belastungen ( $R$ ) und von dem Verhältnis  $EJ_D/C$  (Biegesteifigkeit der Platte/Federsteifigkeit der Kernschicht) abhängig. Das plastische Moment ( $M_{p1}$ ) hängt im wesentlichen von der Deckblechgeometrie ( $J_D$ ) und der Fließgrenze des Stahls ab.

Bei dem Verhältnis  $M_i/M_{p1}$  hebt sich (bei gleichem E-Modul und Fließgrenze des Stahls) weitgehend der Einfluß des Trägheitsmomentes ( $J_D$ ) auf, so daß als wesentliche Einflüsse die Belastung und die Federsteifigkeit übrigbleiben.

Zwischen dem Ansatz der Belastung als Einzellasten ( $R/2$ ) und dem Ansatz der Auflagerpressung ( $\beta$ ) kann als Bezugsgröße kein großer Unterschied sein. Die Federsteifigkeit entspricht dem E-Modul des Kerns. Als Bezugsgröße kann aber auch die Druckfestigkeit des Kerns angesetzt werden, die definitionsgemäß die Druckspannung bei 10 % Stauchung ist und somit einen Wert für die Stei-

figkeit der Kernschicht darstellt.

$$\frac{M_i}{M_{pl}} = f \left[ \frac{\left( R, \frac{E J_D}{C} \right)}{(\beta_s, \sim J_D)} \right] = f \left[ \frac{R}{C} \right] = f \left[ \frac{\beta}{\beta_D} \right]$$

Es bietet sich somit an, eine Interaktion zwischen den Versagensspannungen im gestörten und ungestörten Bereich ( $\sigma_u/\sigma_k$ ) und dem Verhältnis der vorhandenen Pressung und der Druckfestigkeit im Kern ( $\beta/\beta_D$ ) aufzustellen.

Die gesamten in 2.2 dargestellten Versuche wurden deshalb, analog zum Kap. 2.3.3, auf dieser Basis nochmals ausgewertet (s. Tab. 4). In Abb. 9 ist zur Darstellung dieser Interaktion in einem Diagramm die Ergebnisse in o.g. Form aufgetragen.

Wesentlich ist zu bemerken, daß auch bei dieser Interaktions-Darstellung alle zur Verfügung stehenden Versuchsergebnisse von sehr unterschiedlichen Deckblech-Geometrien, Schaumkennwerte und Auflagerbreiten in **einem Diagramm** zusammengefaßt sind. Alle Werte, die auf der Ordinate aufgetragen sind, wurden durch die Auswertung einzelner zugehöriger Versuche, z.B. Ersatzträger-Versuche und Einfeldträger-Versuche aus einer Charge, ermittelt, so daß die Lage der Punkte in Richtung der Ordinate durch experimentell über die Traglasten ermittelte Werte festliegen.

Die Werte auf der Abszisse sind im Prinzip ebenfalls experimentell ermittelte Werte, wobei die Druckspannungsverteilung direkt im Bereich der Auflagerträgerflansche als konstant angenommen wurden. In der Beziehung  $\sigma_u/\sigma_k$  zu  $\beta/\beta_D$  ist jedoch implizit ein

Hersteller	Typ	Nr.	Stützweite (mm)	$t_k$ (mm)	d (mm)	e (mm)	$l_s$ (mm)	A (cm <sup>2</sup> )	$F_U$ (kN)	$\beta$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\beta_0$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\beta/\beta_0$ (-)	sigma u / sigma k (-)
A	S	1	2000	0,52	120	117,3	240	5,2	21,12	0,09	0,144	0,61	0,86
A	S	2	2000	0,52	120	117,3	100	5,2	18,02	0,18	0,144	1,25	0,73
B	S	3	1600	0,52	35	33,78	60	4,91	6,48	0,11	0,186	0,58	0,86
B	S	4	1600	0,52	35	33,78	60	4,91	6,98	0,12	0,186	0,63	0,93
B	S	5	1600	0,52	35	33,78	60	4,91	6,88	0,11	0,186	0,62	0,92
B	S	6	1600	0,52	35	33,78	60	4,91	6,58	0,11	0,186	0,59	0,88
B	S	7	1600	0,52	35	33,78	80	4,91	8,00	0,10	0,186	0,54	1,07
B	S	8	1600	0,52	35	33,78	80	4,91	7,40	0,09	0,186	0,50	0,99
B	S	9	1600	0,52	60	59,78	60	4,91	10,23	0,17	0,199	0,86	0,74
B	S	10	1600	0,52	60	59,78	60	4,91	10,23	0,17	0,199	0,86	0,74
B	S	11	1600	0,52	60	59,78	60	4,91	10,43	0,17	0,199	0,87	0,76
B	S	12	1600	0,52	60	59,78	100	4,91	12,93	0,13	0,199	0,65	0,94
B	S	13	1600	0,52	60	59,78	100	4,91	12,73	0,13	0,137	0,93	0,92
B	S	14	1600	0,52	100	100,8	120	4,91	13,38	0,11	0,137	0,81	0,78
B	S	15	1600	0,52	100	100,8	120	4,91	14,28	0,12	0,137	0,87	0,81
B	S	16	1600	0,52	100	100,8	120	4,91	14,28	0,12	0,137	0,87	0,81
B	05/05	17	1600	0,52	35	34,6	60	4,9	8,31	0,11	0,185	0,57	0,90
B	05/05	18	1600	0,52	35	34,6	60	4,9	5,71	0,10	0,185	0,51	0,81
B	05/05	19	1600	0,52	35	34,6	60	4,9	6,21	0,10	0,185	0,56	0,88
B	05/05	20	1600	0,52	35	34,6	80	4,9	6,90	0,09	0,185	0,47	0,98
B	05/05	21	1600	0,52	35	34,6	60	4,9	6,70	0,08	0,185	0,45	0,95
B	05/05	22	1600	0,52	60	61,2	60	4,9	9,49	0,16	0,202	0,78	0,84
B	05/05	23	1600	0,52	60	61,2	60	4,9	9,59	0,16	0,202	0,79	0,84
B	05/05	24	1600	0,52	60	61,2	60	4,9	9,79	0,16	0,202	0,81	0,86
B	05/05	25	1600	0,52	60	61,2	100	4,9	11,83	0,12	0,202	0,59	1,04
B	05/05	26	1600	0,52	60	61,2	100	4,9	11,93	0,12	0,152	0,78	1,14
B	05/05	27	1600	0,52	100	101,1	60	4,9	9,37	0,16	0,152	1,03	0,65
B	05/05	28	1600	0,52	100	101,1	60	4,9	9,07	0,15	0,152	0,99	0,63
B	05/05	29	1600	0,52	100	101,1	60	4,9	10,67	0,18	0,152	1,17	0,74
B	05/05	30	1600	0,52	100	101,1	120	4,9	12,55	0,10	0,152	0,69	0,88
B	05/05	31	1600	0,52	100	101,1	120	4,9	12,35	0,10	0,152	0,68	0,86
B	V/05	32	1600	0,52	35	33,4	60	4,9	6,14	0,10	0,157	0,65	0,91
B	V/05	33	1600	0,52	35	33,4	60	4,9	6,04	0,10	0,157	0,64	0,89
B	V/05	34	1600	0,52	35	33,4	60	4,9	6,04	0,10	0,157	0,64	0,89
B	V/05	35	1600	0,52	35	33,4	80	4,9	6,30	0,08	0,195	0,40	1,08
B	V/05	36	1600	0,52	35	33,4	80	4,9	6,10	0,08	0,195	0,39	0,90
B	V/05	37	1600	0,52	60	59,4	60	4,9	9,76	0,16	0,195	0,83	0,75
B	V/05	38	1600	0,52	60	59,4	60	4,9	10,08	0,17	0,195	0,86	0,77
B	V/05	39	1600	0,52	60	59,4	60	4,9	9,86	0,16	0,195	0,83	0,74
B	V/05	40	1600	0,52	60	59,4	100	4,9	12,18	0,12	0,125	0,97	0,93
B	V/05	41	1600	0,52	60	59,4	100	4,9	13,08	0,13	0,125	1,05	1,00
B	V/05	42	1600	0,52	100	101,1	60	4,9	8,97	0,15	0,125	1,20	0,60
B	V/05	43	1600	0,52	100	101,1	60	4,9	9,57	0,16	0,125	1,28	0,64
B	V/05	44	1600	0,52	100	101,1	60	4,9	9,87	0,16	0,125	1,29	0,65
B	V/05	45	1600	0,52	100	101,1	120	4,9	12,18	0,10	0,125	0,81	0,82
B	V/05	46	1600	0,52	100	101,1	120	4,9	11,98	0,10	0,125	0,80	0,81

Tabelle 4,I: Auswertung der Versuche auf der Basis von Auflagerpressungen

Hersteller	Typ	Nr.	Stützweite (mm)	$t_k$ (mm)	d (mm)	e (mm)	$l_s$ (mm)	A (cm <sup>2</sup> )	$F_{11}$ (kN)	$\beta$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\beta_0$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\beta/\beta_0$ (-)	sigma u / sigma k (-)
C	S	47	1100	0,54	50	49,4	80	5,427	9,67	0,16	0,1517	1,06	0,80
C	S	48	1100	0,54	50	49,4	80	5,427	9,34	0,16	0,1517	1,03	0,77
C	S	49	1100	0,54	50	49,4	80	5,427	9,38	0,16	0,1517	1,03	0,77
C	S	50	1100	0,54	50	49,4	80	5,427	8,84	0,11	0,1517	0,73	0,73
C	S	51	1500	0,54	50	49,4	80	5,427	6,83	0,11	0,1517	0,75	0,77
C	S	52	1500	0,54	50	49,4	80	5,427	6,88	0,11	0,1517	0,76	0,77
C	S	53	1500	0,54	50	49,4	80	5,427	7,34	0,12	0,1517	0,81	0,82
C	S	54	1900	0,54	50	49,4	80	5,427	6,46	0,11	0,1517	0,71	0,92
C	S	55	1900	0,54	50	49,4	80	5,427	6,46	0,11	0,15518	0,69	0,92
C	S	56	1900	0,54	50	49,4	80	5,427	6,42	0,11	0,15518	0,69	0,91
C	S	57	1100	0,54	80	77,12	80	5,427	11,35	0,19	0,15518	1,22	0,75
C	S	58	1100	0,54	80	77,12	60	5,427	11,60	0,19	0,15518	1,25	0,76
C	S	59	1100	0,54	80	77,12	80	5,427	11,35	0,19	0,15518	1,22	0,75
C	S	60	1100	0,54	80	77,12	80	5,427	11,90	0,15	0,15518	0,96	0,78
C	S	61	1500	0,54	80	77,12	80	5,427	8,90	0,15	0,15518	0,96	0,81
C	S	62	1500	0,54	80	77,12	80	5,427	8,94	0,15	0,15518	0,96	0,80
C	S	63	1500	0,54	80	77,12	80	5,427	9,21	0,15	0,15518	0,99	0,83
C	S	64	1900	0,54	80	77,12	80	5,427	7,52	0,13	0,15518	0,81	0,86
C	S	65	1900	0,54	80	77,12	80	5,427	7,72	0,13	0,15518	0,83	0,88
C	S	66	1900	0,54	80	77,12	80	5,427	7,45	0,12	0,15518	0,80	0,85
C	V	67	1100	0,54	50	49,4	80	5,427	9,35	0,16	0,1465	1,06	0,80
C	V	68	1100	0,54	50	49,4	80	5,427	8,87	0,15	0,1465	1,01	0,76
C	V	69	1100	0,54	50	49,4	80	5,427	9,34	0,16	0,1465	1,06	0,80
C	V	70	1100	0,54	50	49,4	80	5,427	9,44	0,12	0,1465	0,81	0,81
C	V	71	1500	0,54	50	49,4	80	5,427	7,42	0,12	0,1465	0,84	0,87
C	V	72	1500	0,54	50	49,4	80	5,427	7,38	0,12	0,1465	0,84	0,86
C	V	73	1500	0,54	50	49,4	80	5,427	7,56	0,13	0,1465	0,86	0,89
C	V	74	1900	0,54	50	49,4	80	5,427	6,86	0,11	0,15518	0,74	1,01
C	V	75	1900	0,54	50	49,4	80	5,427	6,55	0,11	0,15518	0,70	0,97
C	V	76	1900	0,54	50	49,4	80	5,427	6,86	0,11	0,15518	0,74	1,00
C	V	77	1100	0,54	80	76,8	80	5,427	10,90	0,18	0,15518	1,17	0,75
C	V	78	1100	0,54	80	76,8	60	5,427	11,30	0,19	0,15518	1,21	0,78
C	V	79	1100	0,54	80	76,8	80	5,427	11,30	0,18	0,15518	1,21	0,78
C	V	80	1100	0,54	80	76,8	80	5,427	11,40	0,14	0,15518	0,92	0,78
C	V	81	1500	0,54	80	76,8	80	5,427	8,83	0,15	0,15518	0,95	0,83
C	V	82	1500	0,54	80	76,8	60	5,427	9,25	0,15	0,15518	0,99	0,87
C	V	83	1500	0,54	80	76,8	60	5,427	9,34	0,16	0,15518	1,00	0,89
C	V	84	1900	0,54	80	76,8	80	5,427	7,85	0,13	0,15518	0,84	0,94
C	V	85	1900	0,54	80	76,8	80	5,427	8,57	0,14	0,15518	0,92	1,02
C	V	86	1900	0,54	80	76,8	80	5,427	8,49	0,14	0,15518	0,91	1,01
D	LL	87	1930	0,56	40	40,11	80	5,644	5,59	0,07	0,1578	0,44	0,92
D	LL	88	1930	0,56	40	40,41	80	5,644	5,71	0,07	0,1578	0,45	0,93
D	LL	89	1930	0,56	40	40,42	80	5,644	6,01	0,08	0,1578	0,48	0,98
D	LL	90	2730	0,5	80	81,75	80	4,938	6,55	0,08	0,0723	1,13	0,78
D	LL	91	2730	0,5	80	80,97	80	4,398	6,37	0,08	0,0723	1,10	0,87
D	LL	92	2730	0,5	80	82,12	80	4,398	6,42	0,08	0,0723	1,11	0,86

Tabelle 4,II: Auswertung der Versuche auf der Basis von Auflagerpressungen

Rechenmodell die Grundlage und somit ist die Verteilung in Richtung der Abszisse eher theoretisch.

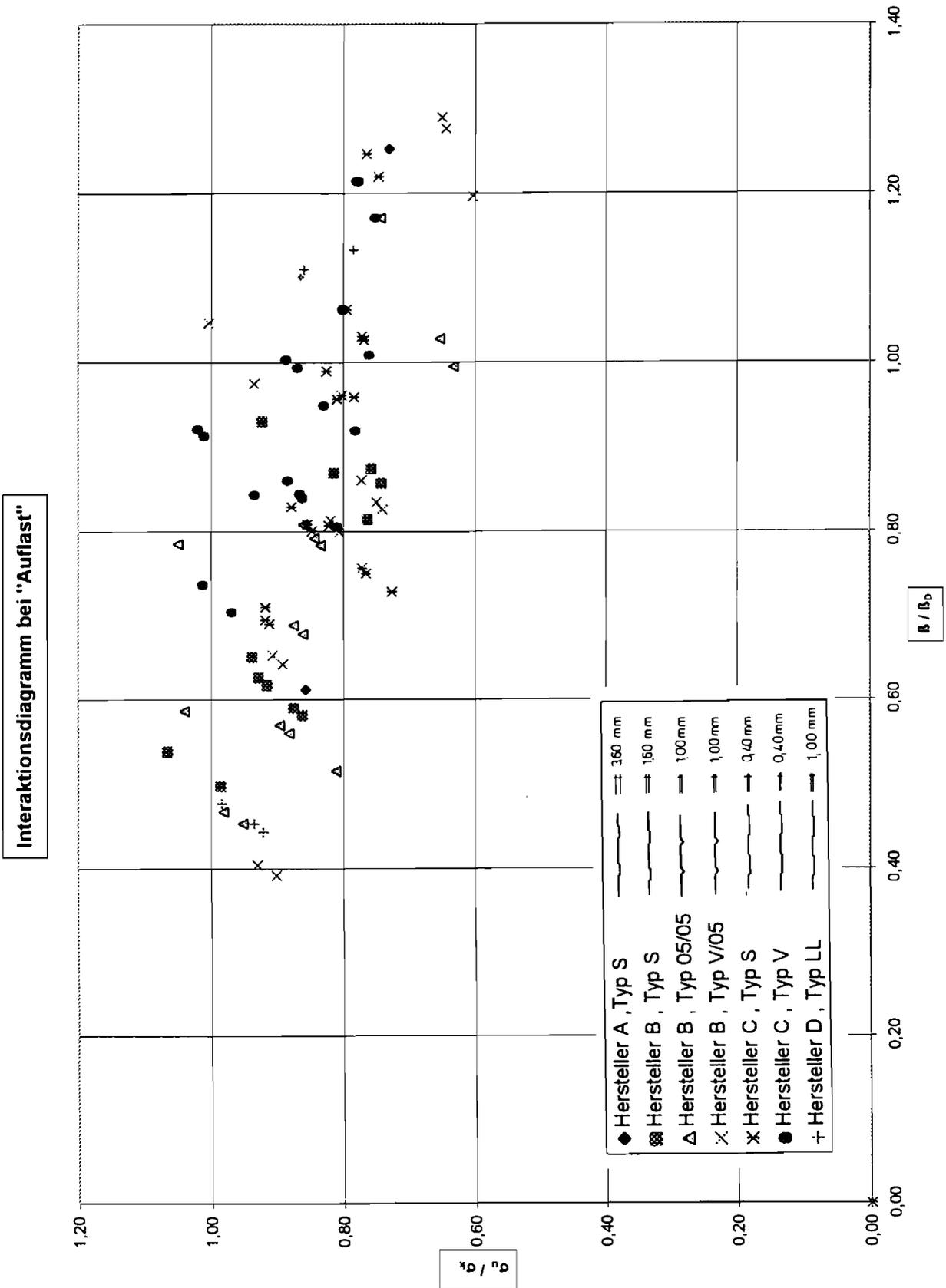


Abb. 9: Interaktionsdiagramm auf der Basis von Auflagerpressungen

### Interpretation der Interaktions-Geraden:

Als erste Näherung wurde, analog zu Kap. 2.3.1.3, das arithmetische Mittel aller Punkte als Gerade abgebildet, die eindeutig eine fallende Tendenz hat. Dies ist auch zu erwarten, da bei zunehmender Zusatzbeanspruchung, infolge erhöhter Auflagerpressung ( $\beta$ ), die Versagensspannung abfällt.

Aufgrund der dargestellten Geraden kann somit in allgemeiner Art aufgrund der vorhandenen Auflagerpressung auf sehr einfache, praktikable Art die Abminderung der Versagensspannung im Bereich der Zwischenunterstützungen gegenüber der Knitterspannung im Feld abgelesen werden.

Der Vorteil dieser Darstellungsweise liegt im wesentlichen darin, daß

- a) keine schwierigen Berechnungen der Zusatzmomente und der plastischen Momente (z.B. mit EDV-Programmen) erforderlich werden, und
- b) die Grenzen der Gültigkeit der Interaktionsbeziehungen definiert werden können. Diese sind auf der Ordinate dadurch definiert, daß die Versagensspannungen im Zwischenstützen-Bereich nicht größer sein können als die definierten Knitterspannungen im Feld ( $\sigma_u/\sigma_k = 1$ ). Auf der Abszisse ist die Grenze erreicht, wenn die Pressung über dem Auflager die Druckfestigkeit des Kerns erreicht, d.h. wenn  $\beta/\beta_D = 1$  ist. Somit ist der Gültigkeitsbereich durch die horizontalen und vertikalen Grenzlinien festgelegt.

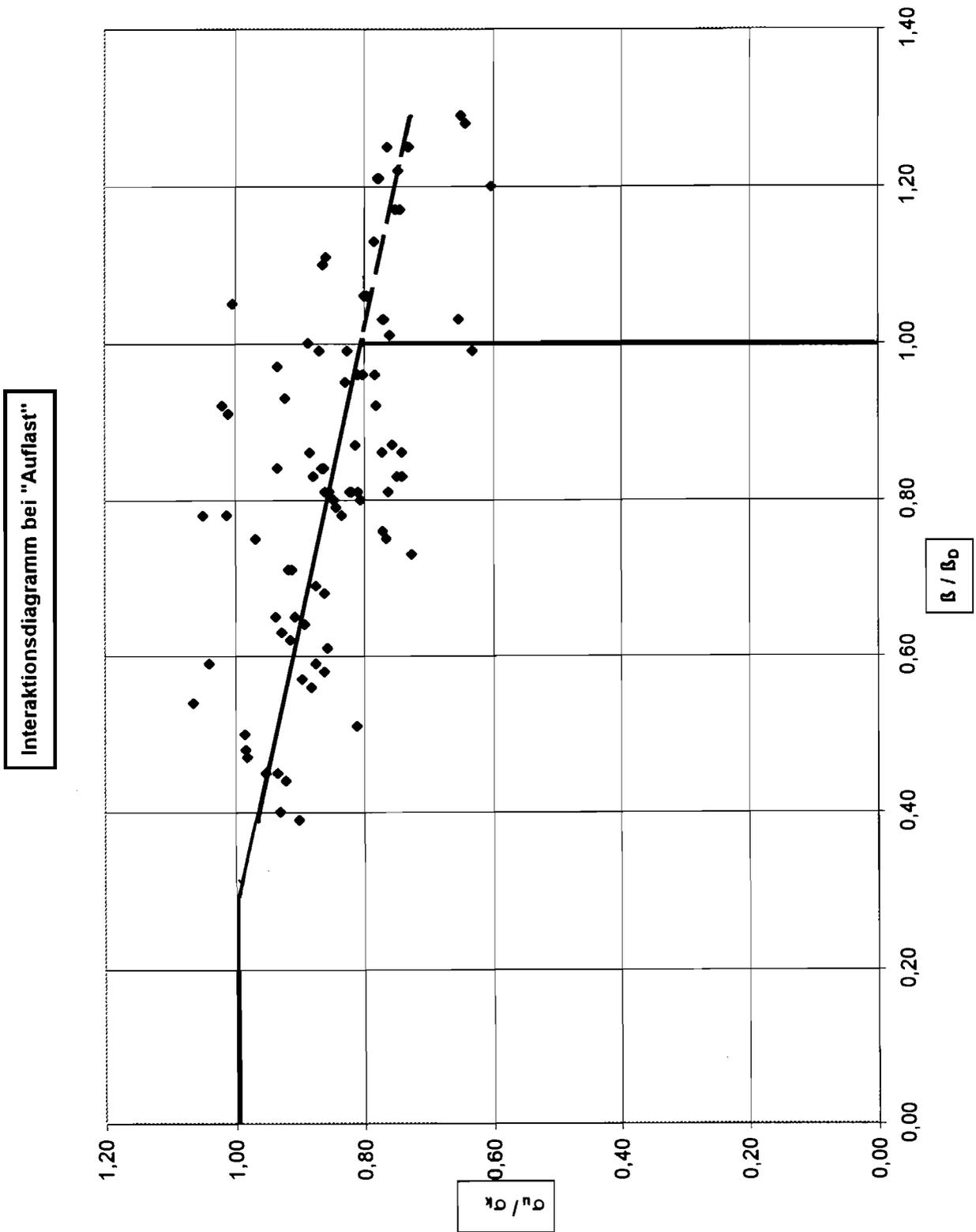


Abb. 10: Interaktionsbeziehung zwischen  $\sigma_u / \sigma_k$  und  $\beta / \beta_D$  mit Gültigkeitsgrenzen

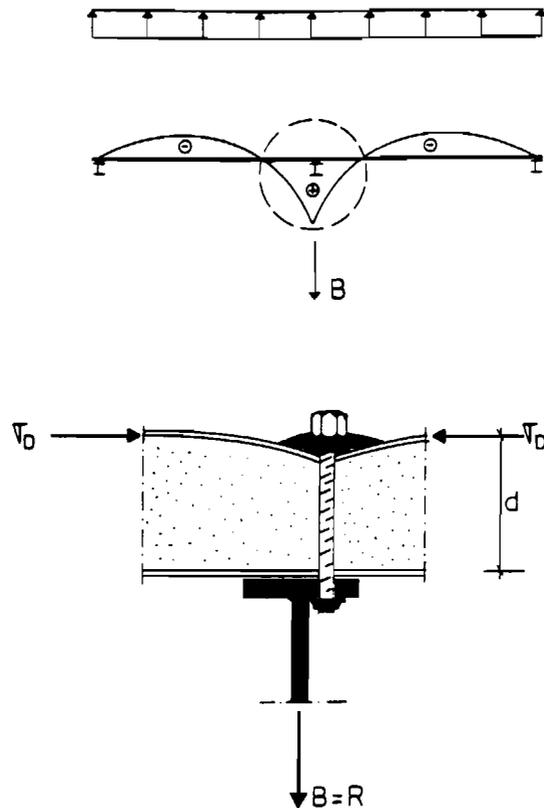
Die in Abb. 10 dargestellte vollständige Interaktions-Beziehung kann m. E. somit als Berechnungsgrundlage für einen einfachen, praxisgerechten Nachweis im Zwischenstützenbereich verwendet werden.

### 3. Untersuchungen zum Tragverhalten im Zwischenstützenbereich bei Beanspruchung infolge von abhebenden Lasten

#### 3.1 Allgemeines

Beim Lastfall "Abhebende Lasten" (s. auch Kap. 1) werden im Zwischenstützen-Bereich die Auflagerreaktionen der durchlaufenden Sandwichplatten im allgemeinen durch eine Durch- und Durch-Verschraubung in die Unterkonstruktion eingeleitet. Falls Sandwichbauteile mit außenliegenden, profilierten Deckschichten verwendet werden, können die Auflagerkräfte über die Stege der Trapezbleche und dem schmalen Obergurt problemlos eingeleitet werden. Einige Hersteller verwenden auch zur Einleitung der punktuell auftretenden Kräfte zusätzliche Kalotten, die zusätzlich ein besseres Verhalten der Befestigung hinsichtlich "Überknöpfen der Schraubenköpfe" gewährleisten. Bei ebenen oder quasi-ebenen außenliegenden Deckblechen (oder bei profilierten Deckblechen mit außergewöhnlich breiten Obergurten) müssen die Auflagerkräfte aus dem Bauteil über die elastisch gebetteten biegeweichen Deckbleche in die Schrauben eingeleitet werden. Es entsteht eine punktuelle Lagerung im Bereich der Schraubenköpfe, die eine relativ hohe, lokal begrenzte Zusatzbeanspruchung der äußeren Deckbleche zur Folge hat.

Da die äußeren Deckbleche bei abhebenden Lasten und entsprechenden (positiven) Biegemomenten über den Zwischenstützen gerade im Bereich der Schraubenköpfe maximal druckbeansprucht sind, ist sicher auch für diesen Fall eine Interaktion dieser Beanspruchungen mit den lokalen Zusatz-Beanspruchungen infolge Einleitung der Auflagerkräfte über die Schraubenkräfte zu erwarten.



Nach ersten Voruntersuchungen wurden deshalb bei den neueren bauaufsichtlichen Zulassungen zur Berücksichtigung dieser Zusatzbeanspruchungen eine pauschale Abminderung der Knitterspannungen um 20 % vorgeschrieben. Dabei ist zu beachten, daß selbstverständlich dabei vorausgesetzt wird, daß bei den Schraubenkräften die (in den Zulassungen) vorgegebenen zulässigen Schraubenkräfte eingehalten sind, so daß hierdurch eine Begrenzung der einzuleitenden Auflagerkräfte erfolgt.

Da die lokalen Zusatzbeanspruchungen in den Deckblechen durch die punktuelle Lagerung auf den Schraubenköpfen von einer Reihe von Parametern abhängen (z.B. Anzahl der Schrauben/Bauteilbreite, Schraubenkräfte, Steifigkeit der Kernschicht usw.), ist es fraglich, ob die sehr pauschal angesetzt (mehr geschätzte) Abminderung von 20 % bei der bemessungsrelevanten Knitterspannung über der Mittelstütze das reale Tragverhalten erfaßt.

Um etwas genauere Aussagen machen zu können, wurden nachfolgend beschriebene Versuche ausgewertet.

### 3.2 Experimentelle Untersuchungen

#### Ersatzträger-Versuche

Das für durchlaufende Sandwichbauteile traglastbestimmende Verhalten der oberen, ebenen oder quasi-ebenen Deckbleche ist äußerst komplex, da das Versagen der dünnen, auf dem Kern elastisch gebettete und zusätzlich im Bereich der Schraubenköpfe punktuell beanspruchte Platte von einer Reihe von Parametern abhängt.

Hier sind insbesondere die Anzahl der Schrauben pro Bauteilbreite, die einzuleitende Schraubenkraft, Steifigkeit und Festigkeit der Kernschicht, häufig auftretende Lunker im Kern im Grenzbereich zur Deckschicht und die unterschiedliche Linierung oder Sicking (Geometrie) der Deckbleche zu nennen.

Es ist klar, daß diese Fülle von Einflüssen (analog zu Kap 2.2) durch eine rein theoretische Betrachtung nicht erfaßt werden kann. Es sind somit auch bei abhebenden Lasten Versuche erforderlich, um den Einfluß der Zusatzbeanspruchungen im Bereich der Schraubenköpfe für durchlaufende Platten zu beurteilen. Es wurden deshalb die nachfolgend beschriebenen Ersatzträgerversuche durchgeführt und ausgewertet:

Wie bereits in Kap. 2.2.1.1 beschrieben, werden Ersatzträgerversuche an Stelle von Zweifeldträger-Versuchen konzipiert, in dem der Mittelstützenbereich des Zweifeldträgers bis zu den Momenten-Nullpunkten als Einfeldträger-Versuch mit der Auflagerkraft als Belastung angesetzt wird.

Im vorliegenden Fall ist es hierbei wesentlich, daß die Auflagerkraft für abhebende Belastung über die Schrauben in das Bauteil eingeleitet wird und somit Biegemomente, Querkräfte und vor allem die lokalen Zusatzbeanspruchungen im Bereich der Schraubenköpfe entstehen, die in vergleichbarer Art auch bei der durchlaufenden Platte bei abhebenden Lasten auftreten.

Analog in den in Kap. 2.2.2 dargestellten Ersatzträger-Versuchen mit Auflast wurde auch hier versucht, durch eine Versuchs-Serie die unterschiedlichen Einflüsse experimentell zu untersuchen. Bei Ersatzträger-Versuchen mit Einleitung der Auflagerkräfte über die Schrauben sind, gegenüber den Versuchen nach Kap. 2.2.2, noch weitere Versuchsparameter zu berücksichtigen, wie z.B.:

- Anzahl der Schrauben
- Höhe der Schraubenkräfte
- Deckblechgeometrie
- Bauteildicke
- Ersatzträger-Stützweite.

Eine Übersicht über die einzelnen Versuchsparameter ist in Tab. 4 dargestellt. Es ist besonders beachtenswert, daß auch für diese Ersatzträgerversuche die zugehörigen Ergebnisse aus den Einfeldträger-Versuchen und den Schaumkern-Untersuchungen vorliegen. Damit können die Versuchsergebnisse aus den Ersatzträger-Versuchen direkt auf die Knitterspannungen im Feld und die zugehörigen Material-Kennwerte bezogen werden.

Insgesamt wurden 30 Ersatzträger-Versuche ausgewertet. Alle erforderlichen Angaben sind in Tab. 5 zusammenfassend dargestellt.

Weitere Versuche, insbesondere mit DMS-Messung bzw. auch vergleichbare Zweifeldträger-Versuche (analog zu Kap. 2.2.1.1 und 2.2.1.2) konnten bei dem begrenzten vorgegebenen Finanzrahmen nicht durchgeführt werden.

Da es allerdings äußerst schwierig ist, für die Beanspruchungen des Deckblechs im Bereich der Schraubenköpfe ein theoretisches Modell zu erarbeiten (s. nachfolgendes Kapitel), bleibt zunächst auch die Frage bestehen, inwieweit Ergebnisse aus DMS-Messungen sinnvoll interpretiert und zu einem Bemessungsvorschlag ausgewertet werden könnten. Zur genaueren Untersuchung der Deckblechbeanspruchungen wären allerdings solche Messungen von großem Interesse und sollten in zukünftigen Forschungsvorhaben auch durchgeführt werden.



### 3.3 Auswertung der Versuche

Es wurde eine Reihe von theoretischen Ansätzen zur Erfassung der einzelnen Parameter, in ähnlicher Art wie in Kap. 2.3.1 beschrieben, untersucht. Es war allerdings nicht möglich ein schlüssiges Modell in Form von Zusatz-Biegemomente zu finden, da es sich um räumlich verteilte Zusatzbeanspruchungen handelt. Zusätzlich zu den in Kap. 2.3.1 beschriebenen Schwierigkeiten bei der Beurteilung des Deckblech-Versagens ist bei abhebenden Lasten zu beachten, daß bei der punktuellen Lagerung auf den Schraubenköpfen sich bei steigender Belastung trichterförmige Vertiefungen in die Platte ziehen, die bei den unterschiedlichen Druckspannungen aus dem äußeren Biegemoment in Plattenlängs- bzw. -Querrichtung einen eher ellipsenförmigen Grundriß haben. Diese räumlich verteilten Eindrückungen erzeugen auch räumlich verteilte Zusatz-Biegemomente. Oben erwähnte Ansätze wurden deshalb auch mit der Ausbildung von plastischen Gelenken und Ausfallquerschnitten erarbeitet und in verschiedenen Richtungen angesetzt. Eine befriedigende Übereinstimmung oder Abhängigkeit konnte hinsichtlich der Ergebnisse aus den Versuchen jedoch nicht gefunden werden.

Um die Einflüsse der Zusatzbeanspruchungen bei abhebenden Lasten im Zwischenstützenbereich bei der Lasteinleitung der Auflagerkräfte zumindest qualitativ zu erfassen, wurden die Versuchsergebnisse in einigen unterschiedlichen Varianten ausgewertet.

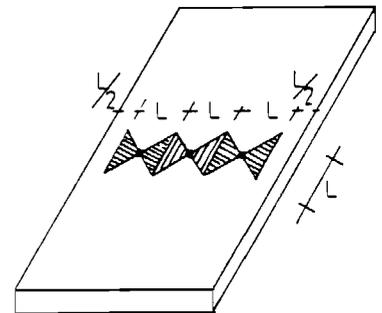
Dabei wurde analog zu der Versuchsauswertung für Auflasten Interaktions-Diagramme erstellt, bei denen in jedem Fall auf der Ordinate das Verhältnis Versagensspannungen aus den Ersatzträgerversuchen ( $\sigma_u$ ) zu den Knitterspannungen aus den Einfeldträ-

ger-Versuchen ( $\sigma_K$ ) angetragen ( $\sigma_u/\sigma_K$ ) sind. Diese Vorgehensweise hat wieder den Vorteil, daß auf die abgesicherten Werte im ungestörten Bereich (Knitterspannungen der Einfeldträger) bezogen wird. Wird das Verhältnis  $\sigma_u/\sigma_K$  kleiner als 1, kann auf der Ordinate praktisch die Abminderung der Bemessungsspannung im Zwischenstützenbereich abgelesen werden. Auf der Abszisse wurden pro Variante folgende unterschiedliche Werte als Interaktions-Bezugsgrößen abgetragen:

- Variante 1: Last pro Schraube, d.h. die erreichte Traglast dividiert durch die Anzahl der Schrauben, (Abb. 11).
- Variante 2: Last pro Meter, d.h. die Summe der Schraubenkräfte (bei Erreichen der Traglast) auf die Bauteilbreite (als Linienlast) verteilt, (Abb. 12).
- Variante 3: Wie Variante 2, jedoch nur die Versuchsergebnisse aus "Positivlage". Positivlage bedeutet, daß das bei der Produktion oben liegende Deckblech auch im Versuch oben, im Druckbereich liegt. Damit ist gewährleistet, daß der negative Einfluß der produktionsbedingten Lunker im Kern im Bereich der oberen Grenzschicht zur Deckschicht miterfaßt ist, (Abb. 13).
- Variante 4:  $\beta_{\text{senkrecht}}/\beta_D$ . In Anlehnung an die Erkenntnisse bei der Auswertung für die Interaktions-Beziehungen bei "Auflast", daß die Zusatzbeanspruchungen fast linear von den Pressungen im Kern abhängig sind, wurde auch für die Einleitung der Schraubenkräfte eine

zugehörige Pressung ( $\beta_{\text{senkrecht}}$ ) errechnet. Dabei wurde über eine Art mittragende Breite eine Fläche bestimmt, die zur Einleitung für eine Schraubenkraft zur Verfügung steht. Die Fläche ist dabei stark von der Anzahl der Schrauben abhängig. Das Gedankenmodell ist in nachfolgender Skizze zu erkennen. Die Pressung kann damit mit folgender einfacher Formel errechnet werden, (Abb. 14).

$$\beta_{\text{senkrecht}} = \frac{\text{Schraubenkraft}}{\left( \frac{\text{Bauteilbreite}}{\text{Anzahl der Schrauben} + 1} \right)^2}$$



Variante 5: Wie Variante 4, jedoch nur die Versuchsergebnisse aus "Positivlage". Bedeutung "Positivlage" siehe Variante 3, (Abb. 15).

Variante 6: Wie Variante 3, mit zusätzlichen Angaben zur Schraubenanzahl, (Abb. 16).

Variante 7: Wie Variante 5, mit zusätzlichen Angaben zur Schraubenanzahl, (Abb. 17).

#### **Interpretation der Auswertung:**

- 1) An der unregelmäßigen Verteilung bei Variante 1 ist zu erkennen, daß der Bezug allein auf die bei der Traglast vorhande-

nen Schraubenkraft nicht ausreicht. Dies ist auch verständlich, da bei gleichen Schraubenkräfte die Versagensspannungen bei einer Schraubenanzahl von z.B. 5 Schrauben sicher kleiner ist als bei 2 Schrauben.

- 2) Sehr viel realistischer ist der Bezug auf die "Last pro Meter" entsprechend Variante 3. Da die Summe der Schraubenkräfte, die beim Erreichen der Traglast vorhanden sind, auf die Bauteilbreite verteilt wird, ist auf jeden Fall auch die Anzahl der Schrauben erfaßt. Hier kommt auch eine sinnvolle Verteilung heraus, wobei aber eine deutliche Streuung sichtbar wird. Der Nachteil dieser Darstellung liegt darin, daß die Verteilung der Schrauben keinen Einfluß hat.
- 3) Wird, entsprechend Variante 5, die Verteilung der Schrauben, zumindest in erster Näherung (s. Skizze) über die Ermittlung einer Pressung mitherrangezogen, ist eine relativ gute und von der Tendenz sinnvolle Verteilung zu erkennen. Diese Variante wird als Grundlage für eine praxisgerechte Bemessung empfohlen.

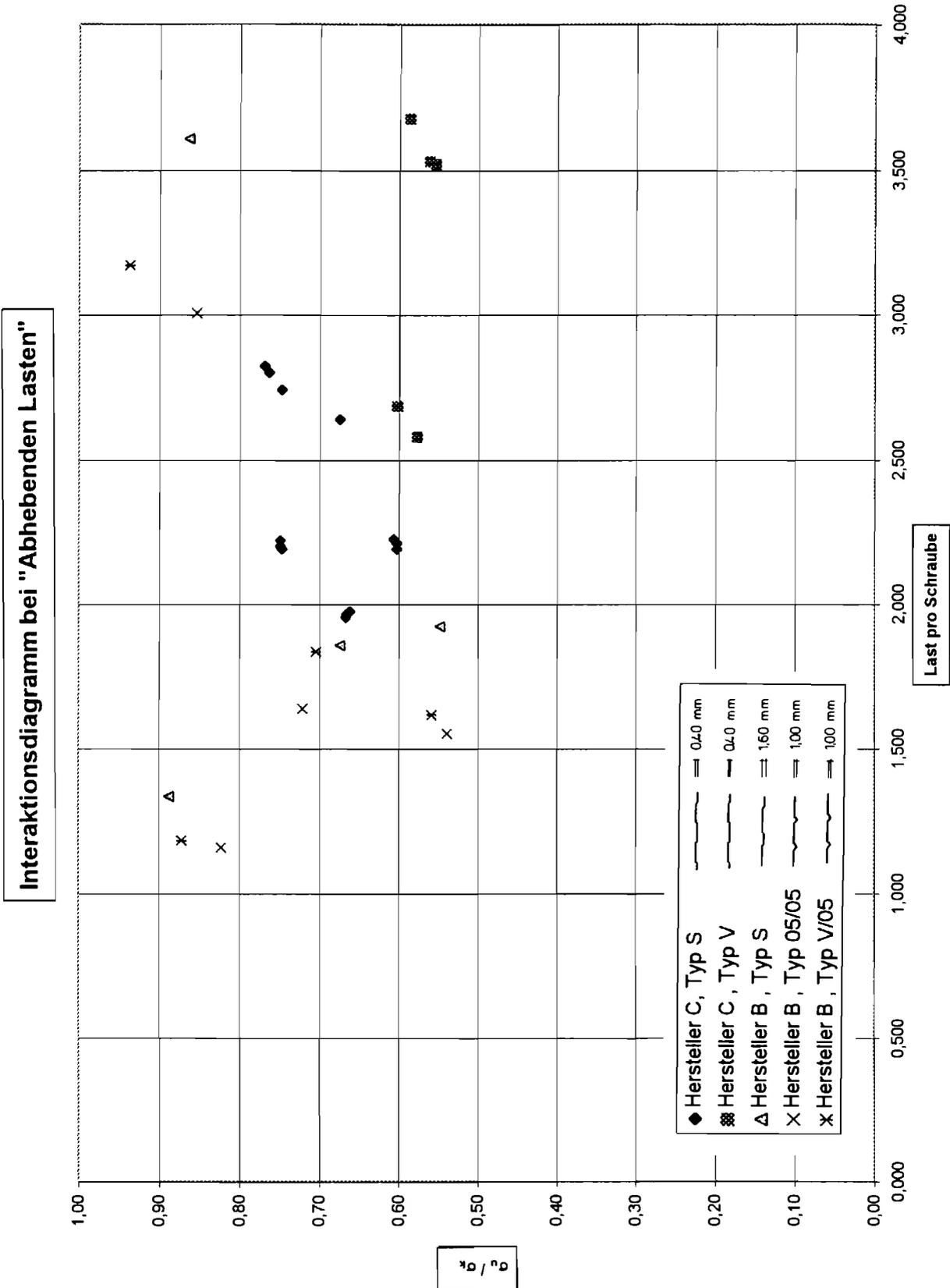


Abb. 11: Variante 1: Last pro Schraube

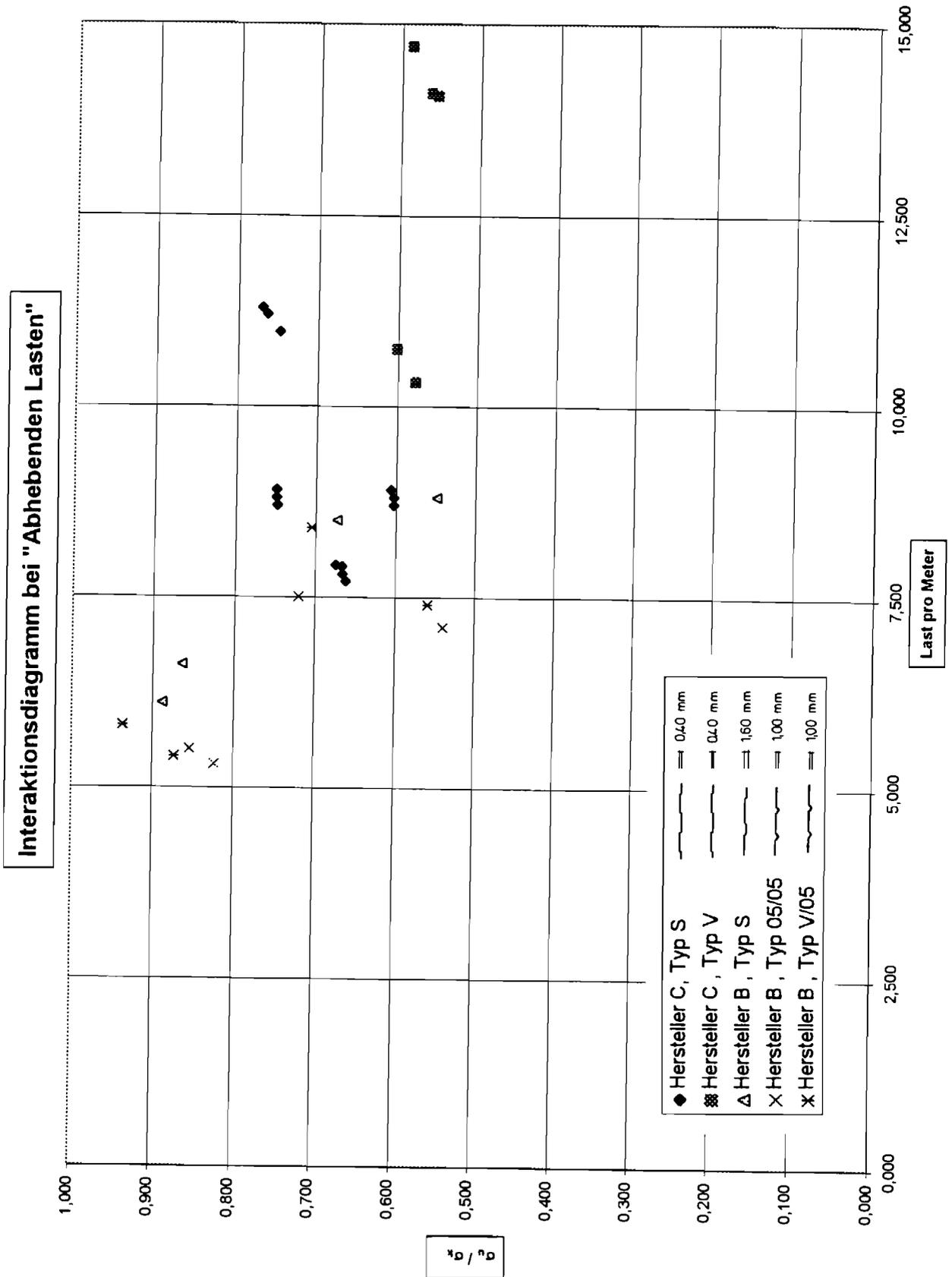


Abb. 12: Variante 2: Last pro Meter

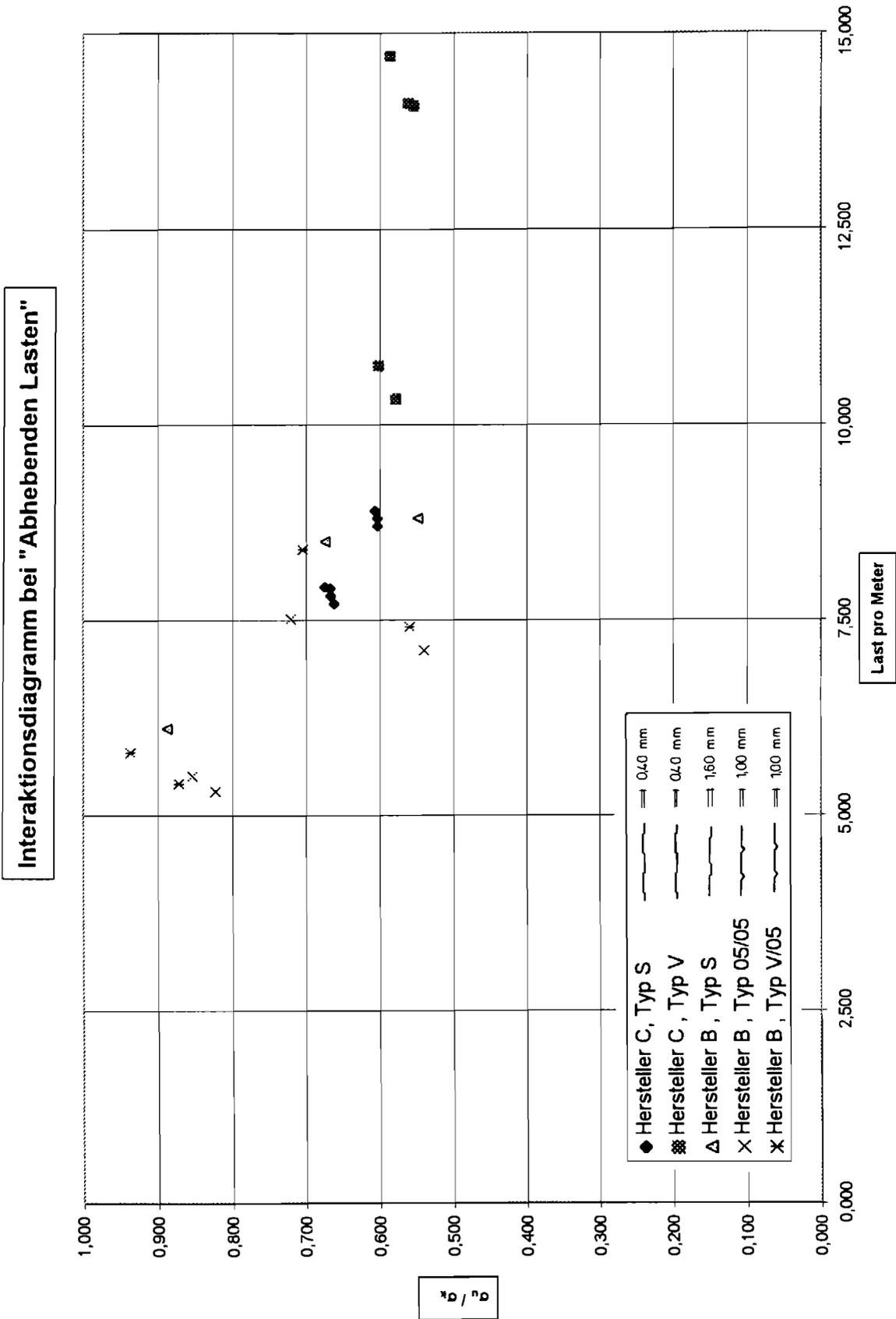


Abb. 13: Variante 3: Last pro Meter; nur Positivlage

Interaktionsdiagramm bei "Abhebenden Lasten"

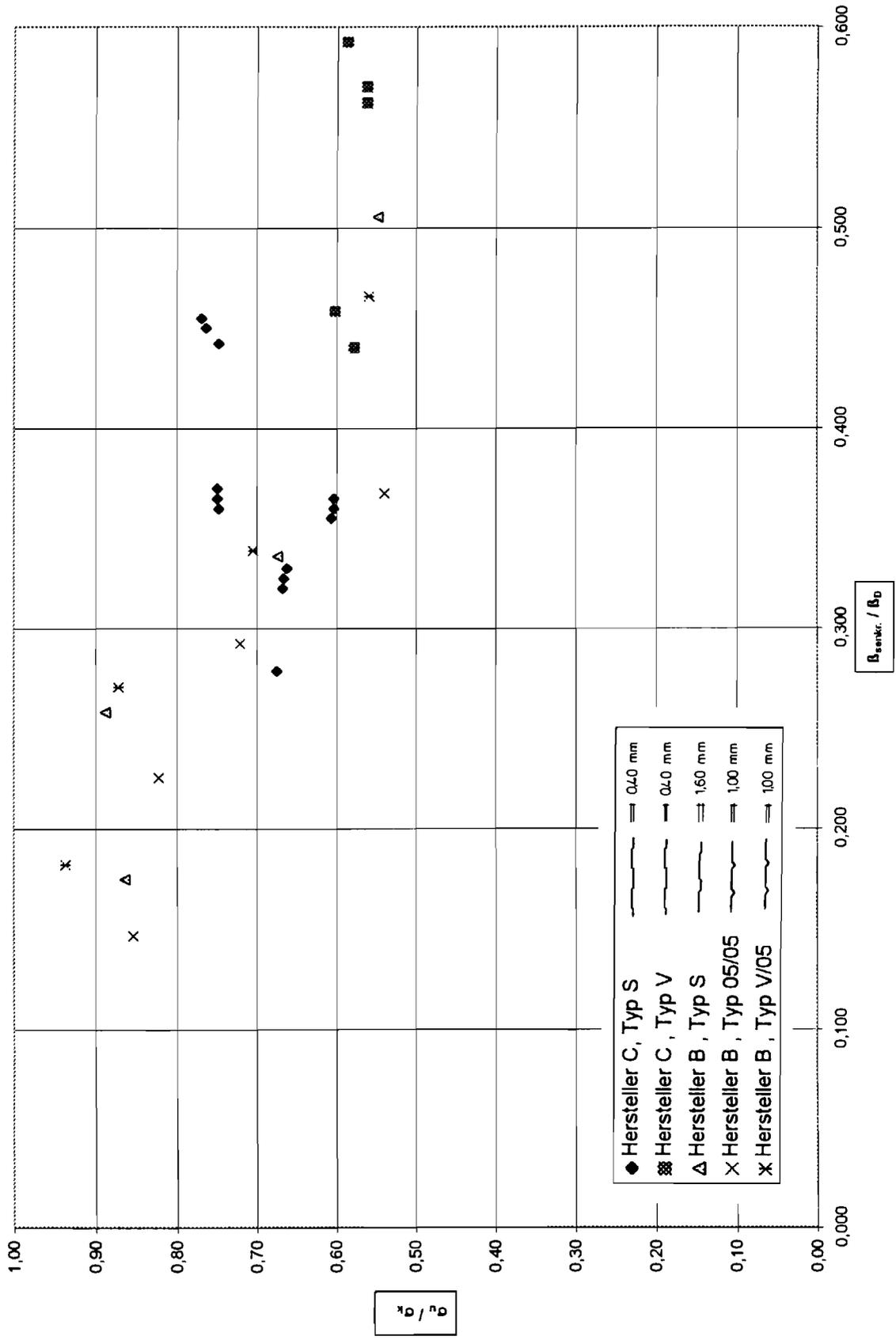


Abb. 14: Variante 4:  $\beta_{senkr.} / \beta_D$



Interaktionsdiagramm bei "Abhebenden Lasten"

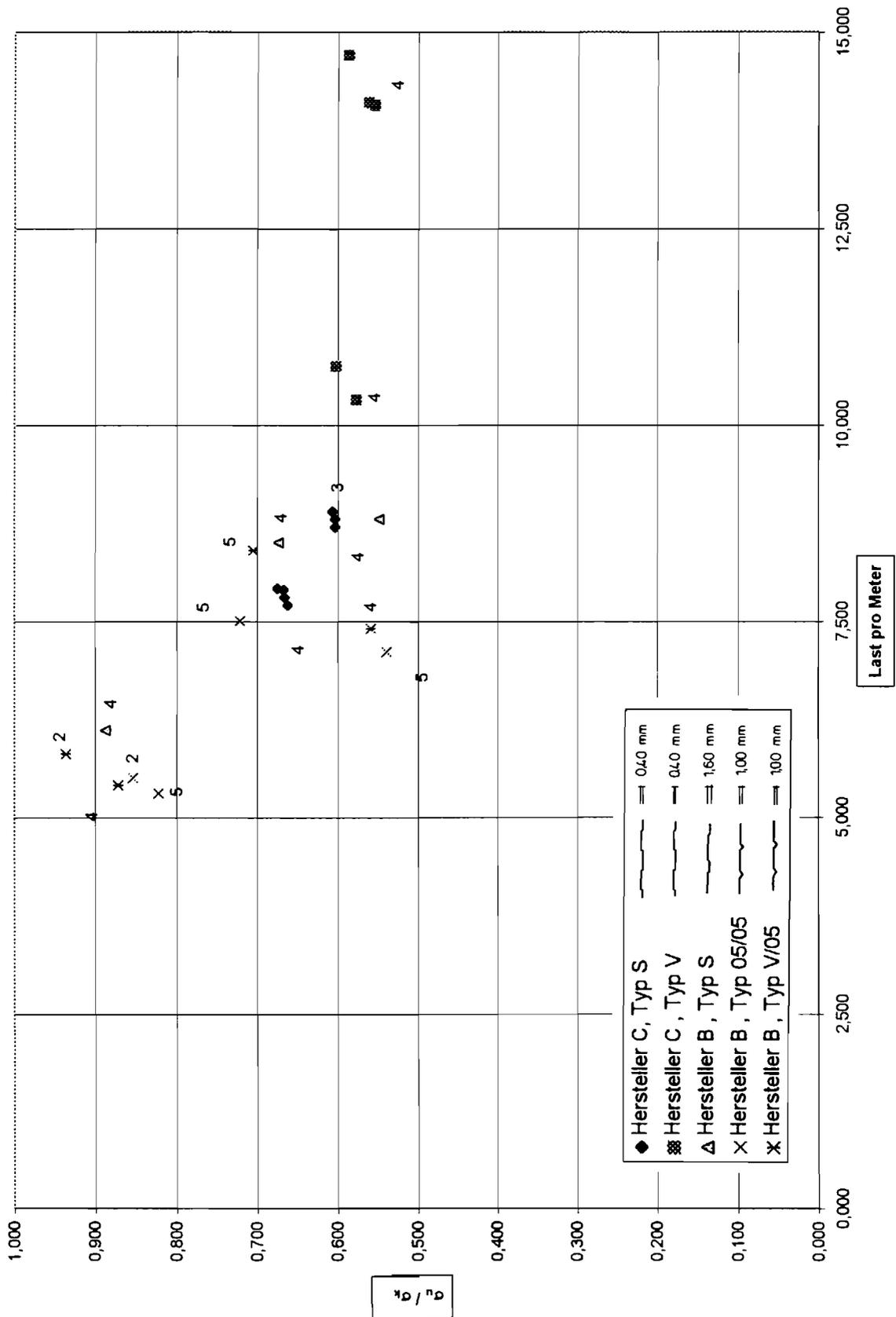


Abb. 16: Variante 6: Last pro Meter; nur Positivlage, mit Angabe der Schraubenanzahl

Interaktionsdiagramm bei "Abhehenden Lasten"

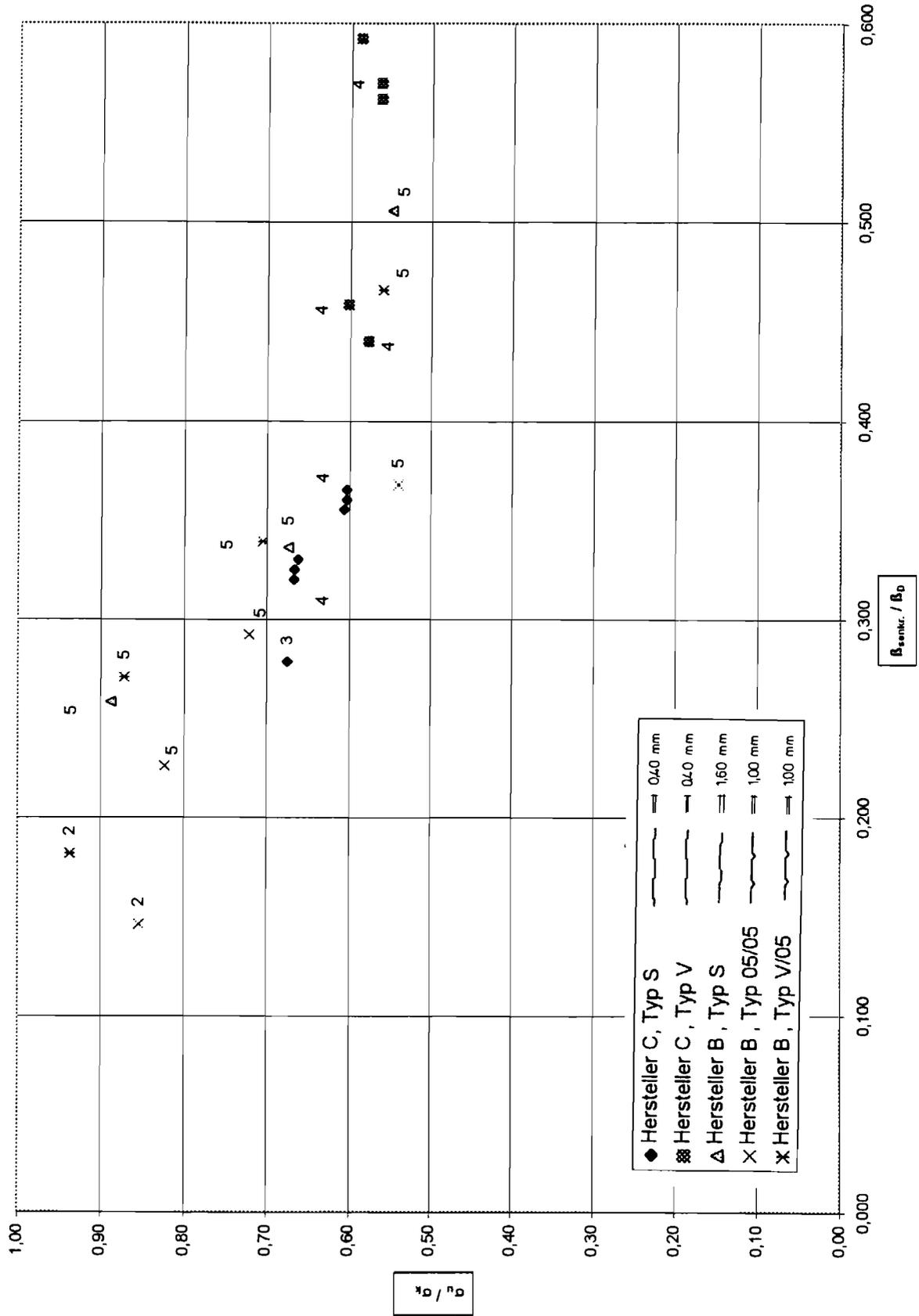


Abb. 17: Variante 7:  $\beta_{senkr.} / \beta_D$ ; nur Positivlage, mit Angabe der Schraubenanzahl

### 3.4 Darstellung von Interaktions-Beziehungen für eine praxisgerechte Bemessung

Als erste Näherung für die Erfassung einer Interaktion zwischen den Versagensspannungen im Mittelstützenbereich bezogen auf die Knitterspannung im Feld und Pressungen, die durch die punktuelle Einleitung von Schraubenkräften hervorgerufen werden, wird das unter Variante 5 dargestellte Diagramm empfohlen.

Um eine möglichst praktikable Handhabung zu erreichen, können auch die Grenzen, bezogen auf die Anzahl der Schrauben, angegeben werden, falls vorausgesetzt wird, daß maximal die **zulässige Schraubenkraft** bei einer praxisgerechten Bemessung in einem realen Bauteil eingeleitet werden muß. Es ist klar, daß an dieser Stelle eventuell ein Sicherheitskonzept mit erfaßt werden müßte. Dies ist aber relativ schwierig, da die geforderten Sicherheiten für das Bauteil ( $\gamma = 1,1$ ) und für die Schraubenkräfte ( $\gamma = 2,0$ ) sehr unterschiedlich sind. Wird aber davon ausgegangen, daß bei einer praxisgerechten Bemessung der Verbindungsmittel die zulässigen Schraubenkräfte nicht überschritten werden, können folgende Vereinfachungen getroffen werden.

Hierfür wurden folgende Annahmen getroffen:

Die zulässige Auszugskraft ist praktisch für alle zugelassenen Schrauben gleich groß und ist für  $t_N = 0,6$  mit  $zul. F = 1,29 \text{ kN}$  angegeben.

Die maximale Pressung bei dieser Schraubenkraft hängt somit nur noch von der Anzahl der Schrauben ab.

Wird weiterhin angenommen, daß die Druckfestigkeit im Schaum allgemein bei  $\beta = 0,1 \text{ N/mm}^2$  liegt, können die Grenzen für die Anzahl der Schrauben festgelegt werden.

Z.B. für  $n = 3$ :

$$\beta = \frac{1290}{\left(\frac{1000}{3+1}\right)^2} = 0,021$$

$$\frac{\beta}{\beta_D} = \frac{0,021}{0,1} = 0,21$$

Die Auswertung für weitere Grenzlinien in dieser Art ist auf Abb. 18 zu erkennen. Mit diesen Angaben kann m.E. das angegebene Interaktions-Diagramm für einfache praxisgerechte Nachweise im Zwischenstützenbereich bei abhebenden Lasten und einer Durch- und Durch-Verschraubung bei unterschiedlicher Schraubenanzahl verwendet werden.

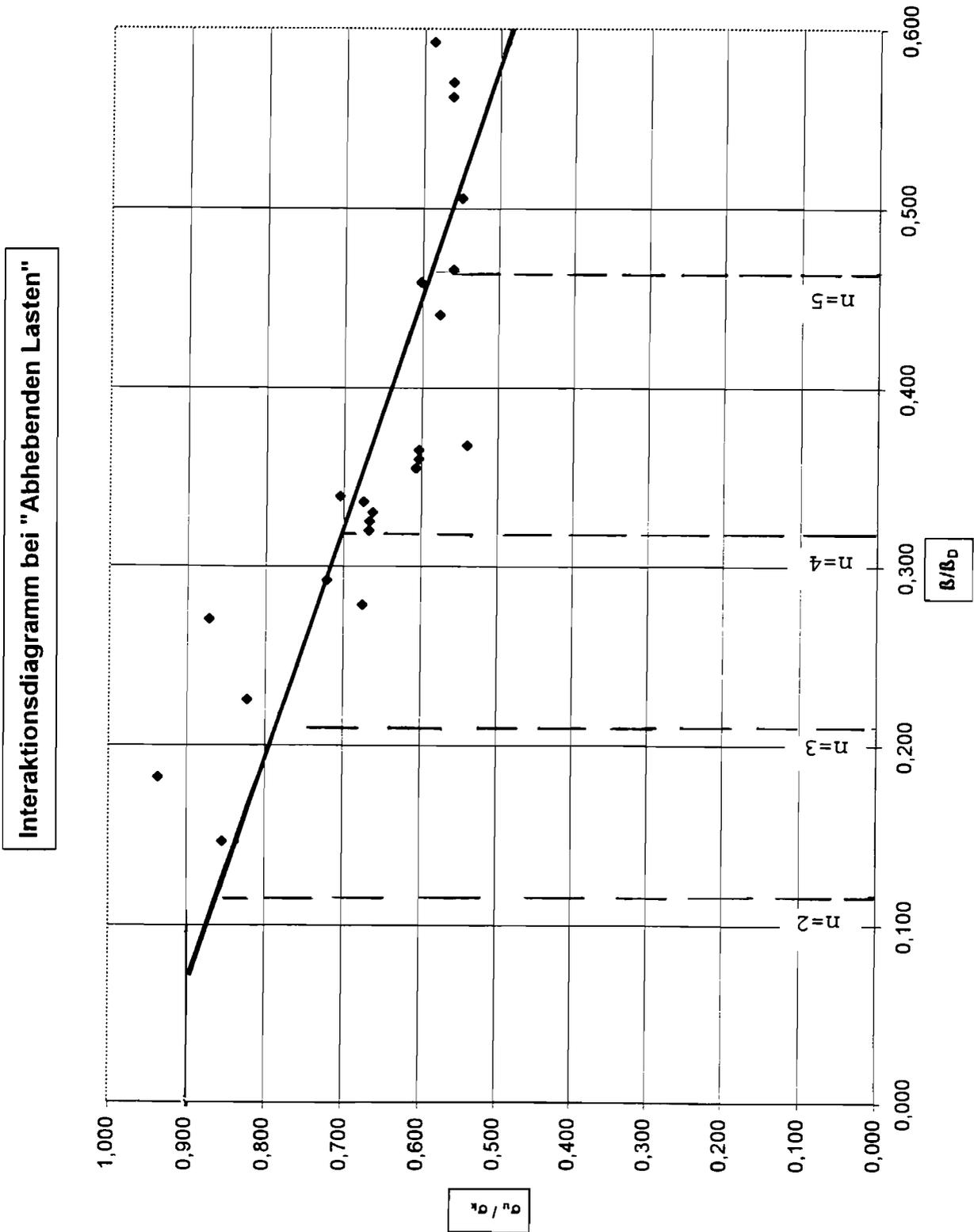


Abb. 18: Interaktionsbeziehung zwischen  $\sigma_u / \sigma_k$  und  $\beta_{senkr.} / \beta_D$  mit Gültigkeitsgrenzen in Abhängigkeit der Schraubenanzahl

#### 4. Zusammenfassung

Sandwich-Dach- und Wandbauteilen werden überwiegend als durchlaufende Platten über eine oder mehrere Zwischenunterstützungen (Wandriegel oder Dachpfetten) vorgesehen.

Bei den Einwirkungen aus Eigengewicht, Schnee, Winddruck und Windsog und unterschiedlichen Deckblechtemperaturen ist die Interaktion aus den Beanspruchungen infolge von Biegemomenten und Auflagerkräften im Zwischenstützenbereich zu berücksichtigen.

Bemessungsrelevant sind die Rechenwerte für die Versagensspannungen der ebenen oder quasi-ebenen (gesickten oder linierten) Deckbleche. Infolge der Interaktion der Beanspruchungen im Bereich der Zwischenunterstützungen werden diese Werte gegenüber den Knitterspannungen im Feld (bzw. bei einfeldrig gespannten Platten) deutlich geringer. Aufgrund einiger theoretischer Ansätze, vor allem aber aufgrund der Auswertung einer größeren Anzahl von Versuchen, die die Beanspruchungen im Zwischenstützenbereich erfaßt (Ersatzträgerversuche), werden Interaktionsdiagramme erstellt. Mit diesen Diagrammen können die Bemessungswerte für die Zwischenstützenbereiche durchlaufender Sandwichplatten für die Lastfälle "Auflast" und "Abhebende Lasten" festgelegt werden, mit denen einerseits eine "auf der sicheren Seite liegende", andererseits aber auch eine "möglichst wirtschaftliche" Bemessung durchgeführt werden kann.

Mainz, November 1995



Prof. Dr. K. Berner

### Literaturverzeichnis

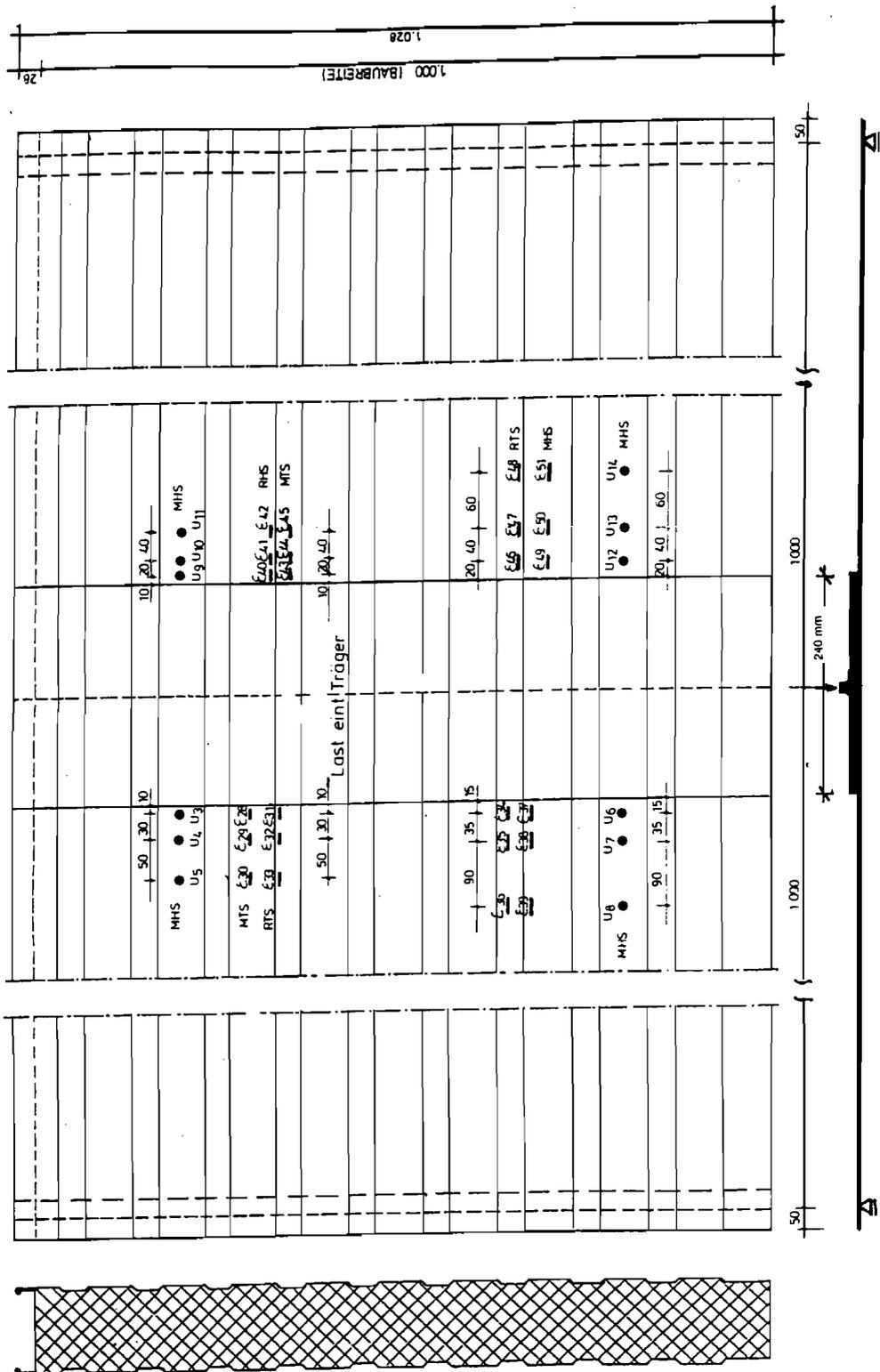
- /1/ Hassinen, P. u. Martikainen, L.:  
Behaviour and Design of Multispan Sandwich  
Panels at Intermediate Supports.  
Annual Meeting of CIB, W 56, 1953
  
- /2/ Schulz, U.:  
Zum Zwischenstützenbereich von Sandwich-  
elementen bei Mehrfeldträgersystemen  
Stahlbau 62, Heft 10, 1993
  
- /3/ Berner, K. u. Hassinen, P. u. Heselius, L.:  
Present Design Methodes of Lightweight  
Sandwich Panels  
Nordic Steel Constuction Conference 95

# Zweifeldträger-Versuch

# Ersatzträger-Versuch I

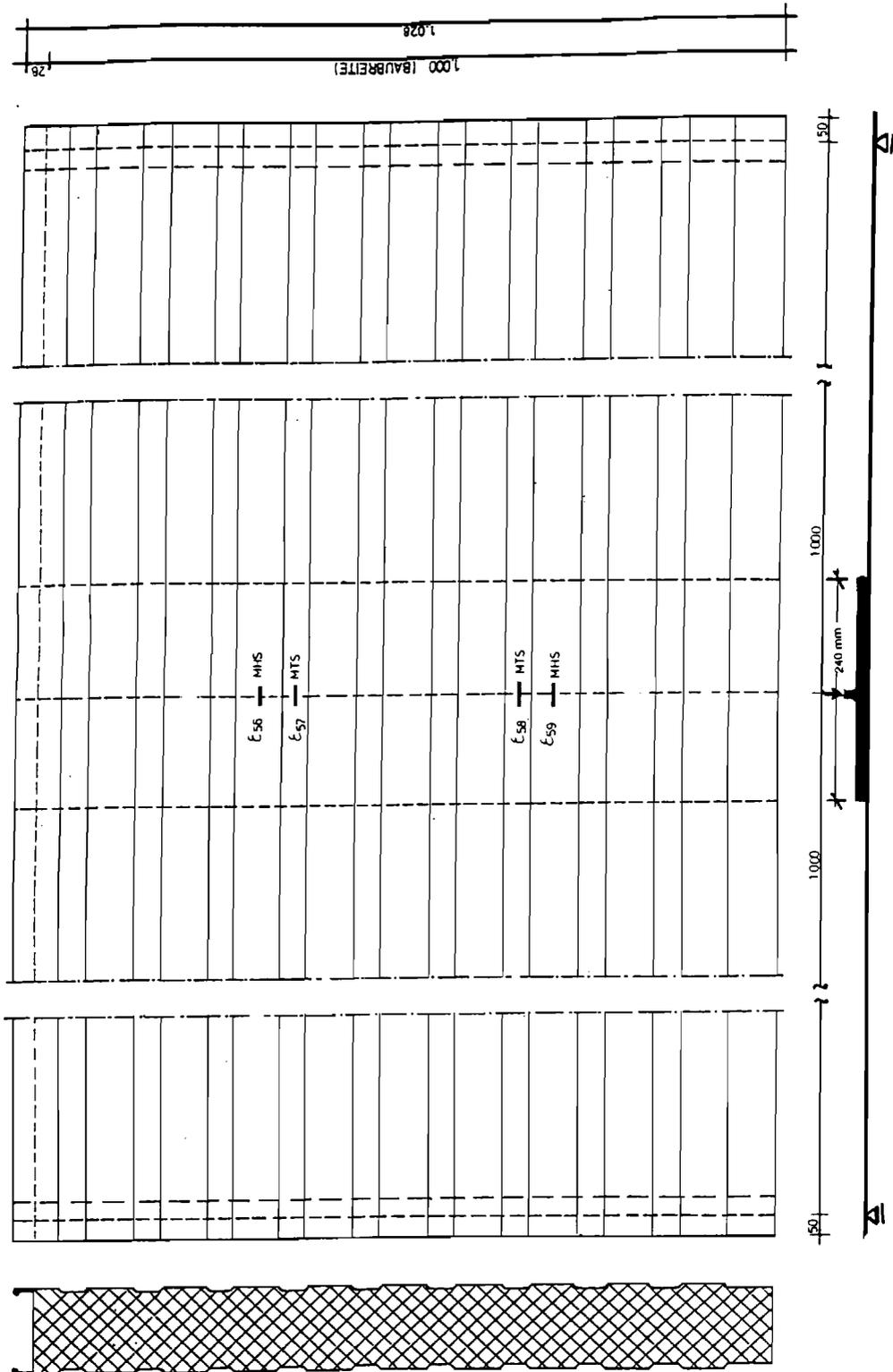
MHS = Mitte Hochsickle (TS = Tiefsicke)  
 RHS = Rand Hochsicke  
 £ - DHS  
 U - Wegnehmer 20mm  
 F - Kraftmessdose  
 ⊕ - Wegnehmer 200mm

U<sub>3</sub> - U<sub>14</sub>  
 BEZOGEN AUF LASTEINT. TRÄGER



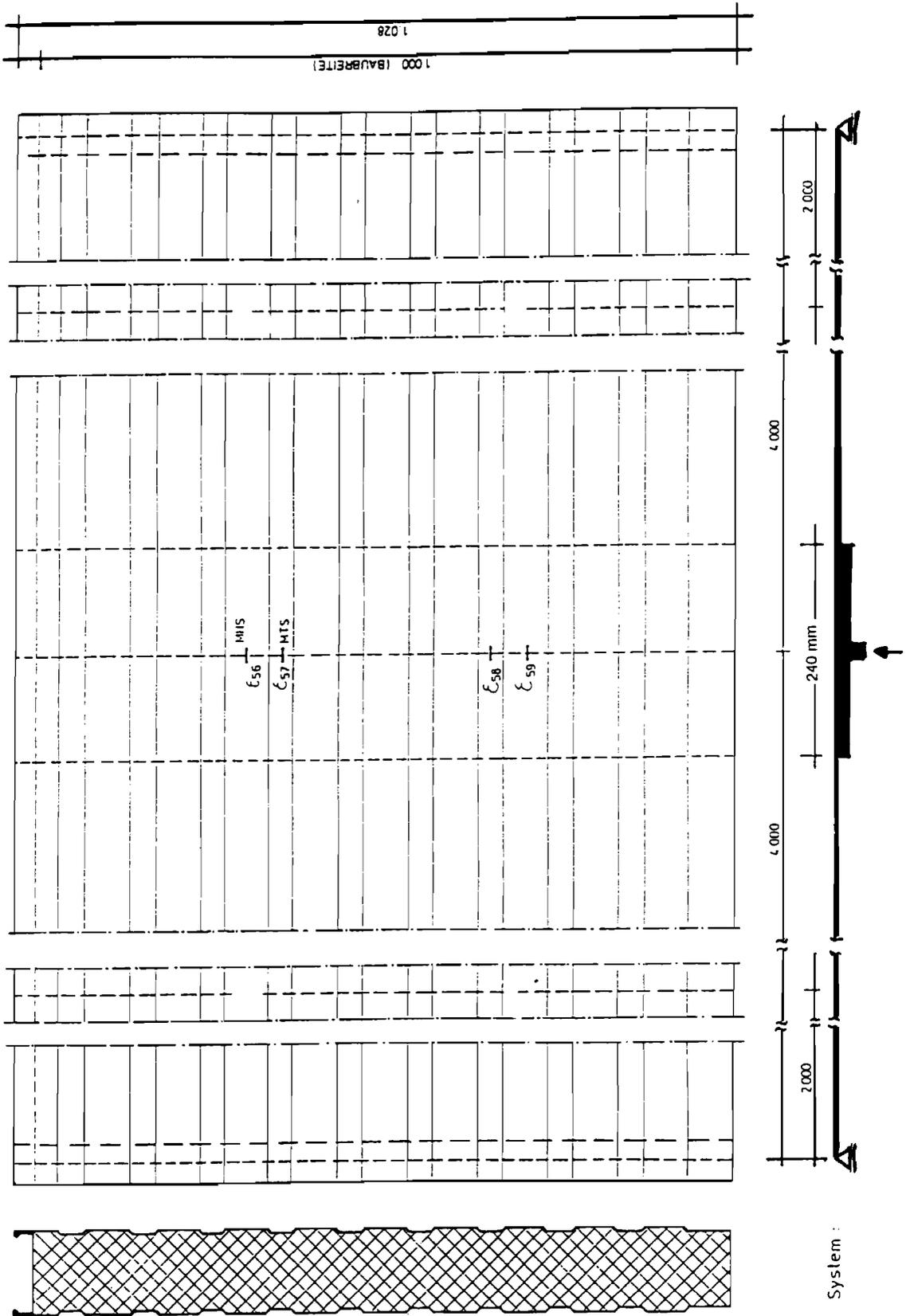
Anordnung der Dehnungsmeßstreifen an der Bauteiloberseite

MHS = Mitte Hochsickel(S = Tiefsicke)  
 RHS = Rand Hochsicke  
 ε - DHS  
 F - Kraftmessdose  
 U - Wegnehmer 20mm  
 ⊕ - Wegnehmer 100mm



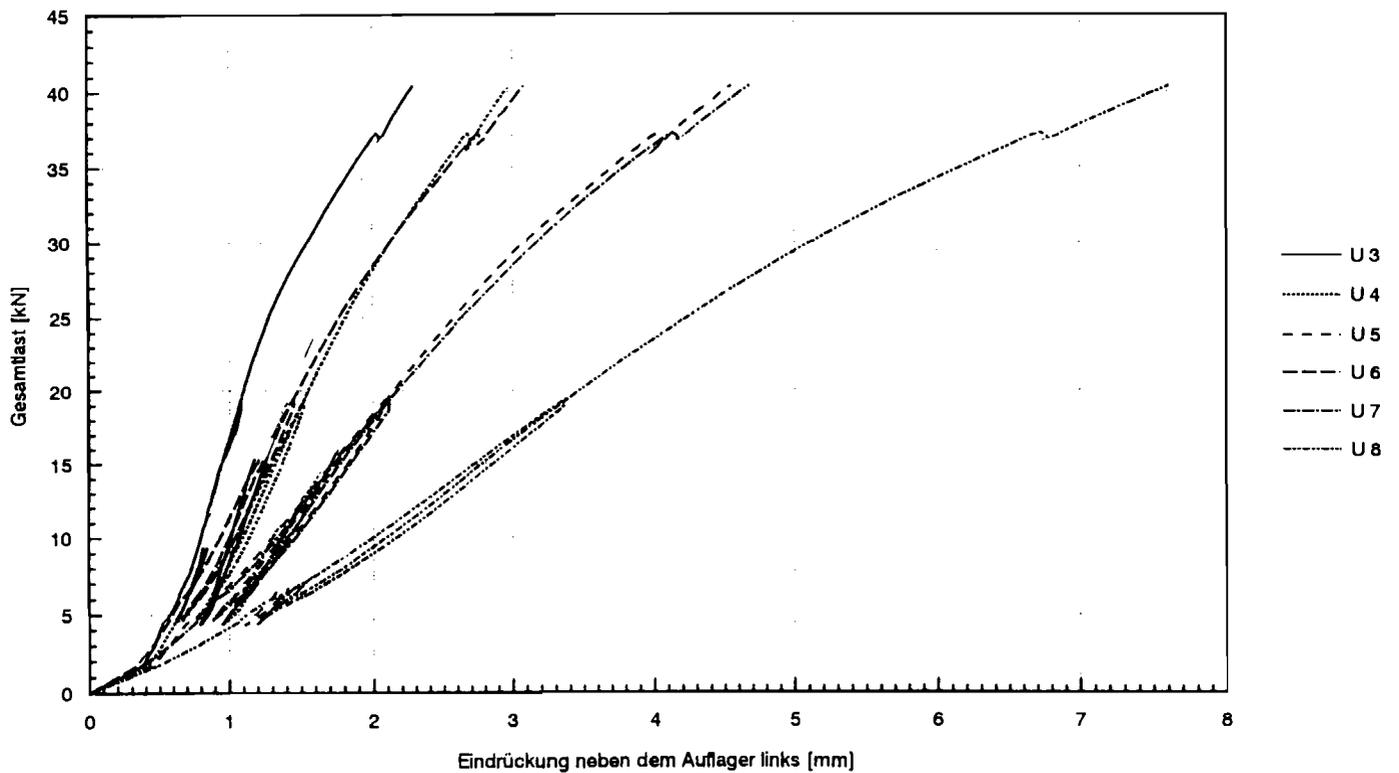
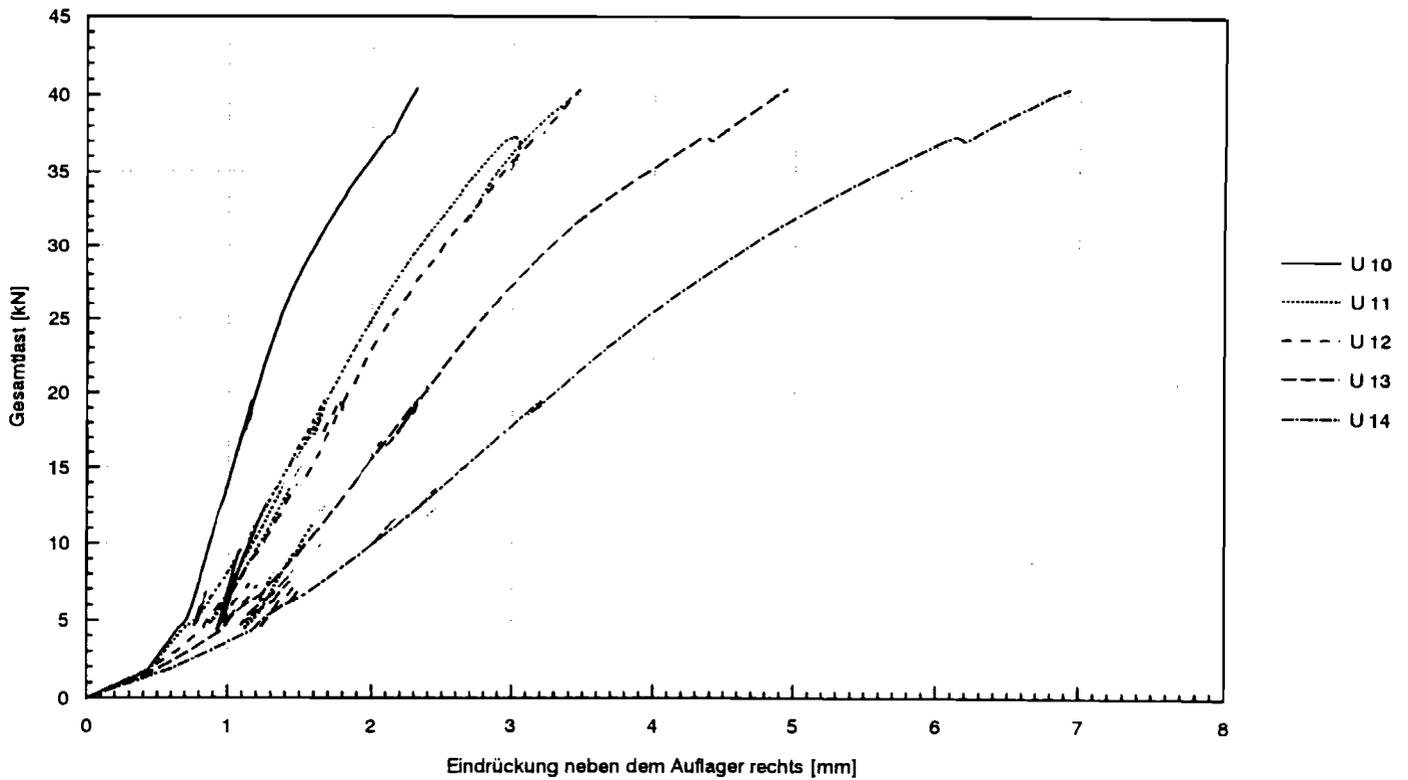
Anordnung der Dehnungsmeßstreifen an der Bauteilunterseite

MHS = Mitte Hochsicke (TS = Tiefsicke)  
 RHS = Rand Hochsicke  
 ζ - DMS  
 F - Kraftmessdose  
 U - Wegnehmer 20mm  
 ⊕ - Wegnehmer 200mm



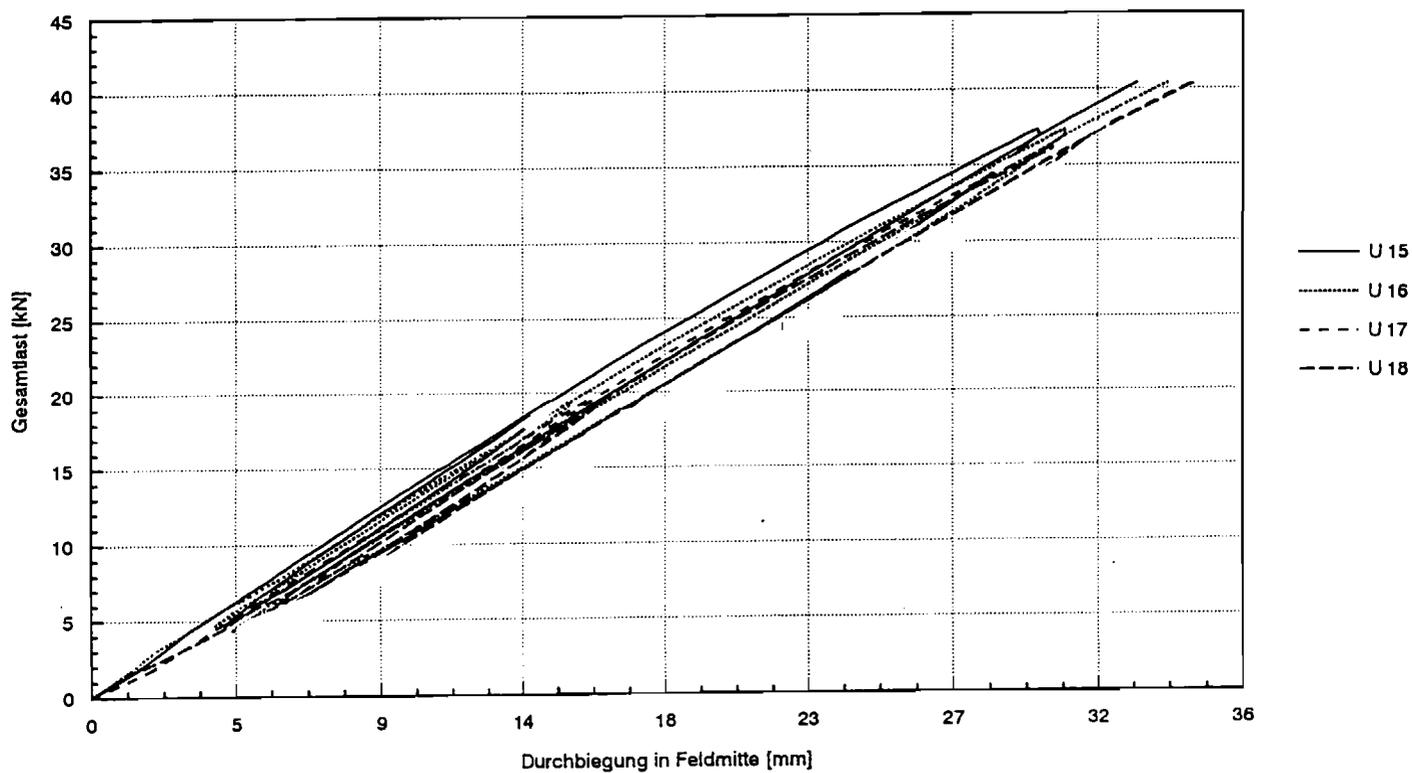
Anordnung der Dehnungsmeßstreifen an der Bauteiloberseite  
 = Bauteilunterseite des Ersatzträgers

2-Feldplatte



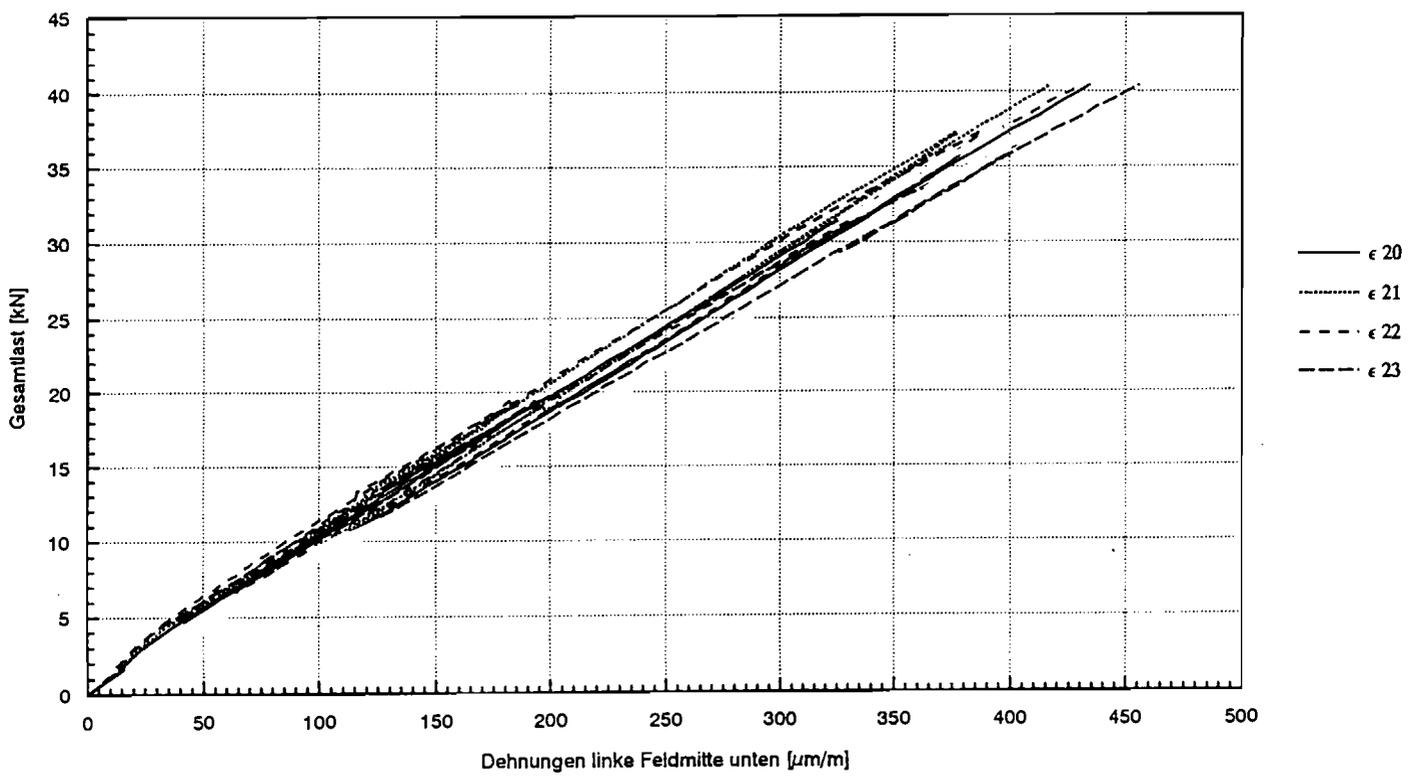
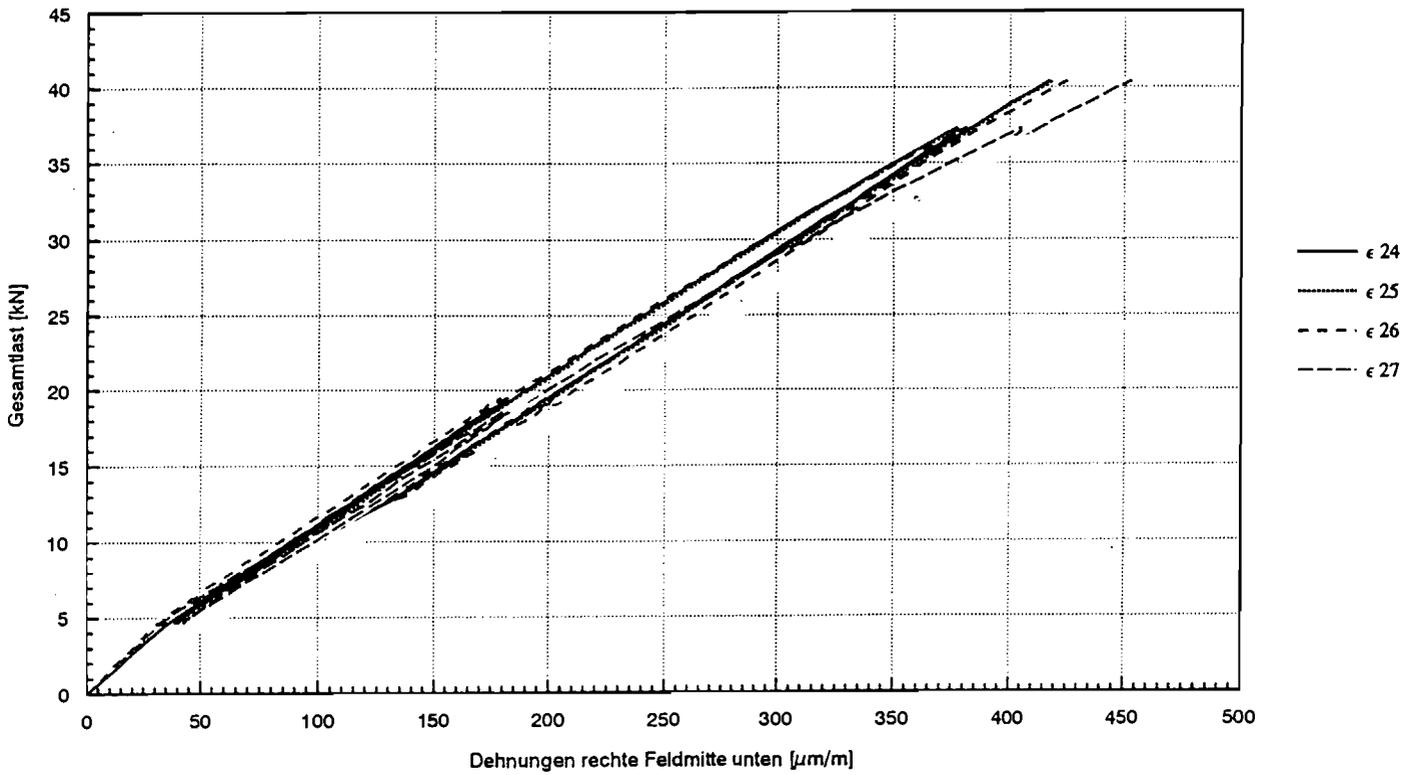
Eindrückungen neben dem Auflager rechts und  
Eindrückungen neben dem Auflager links

2-Feldplatte



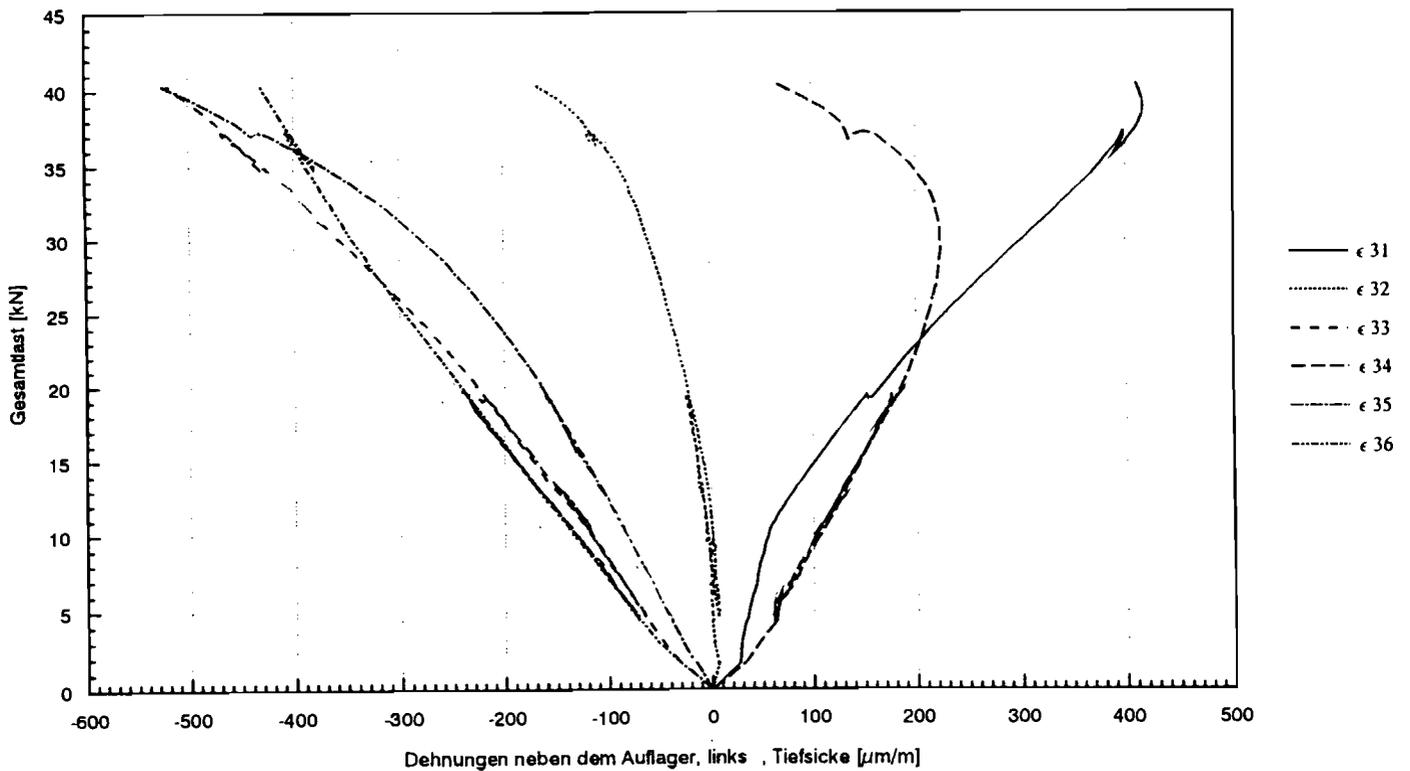
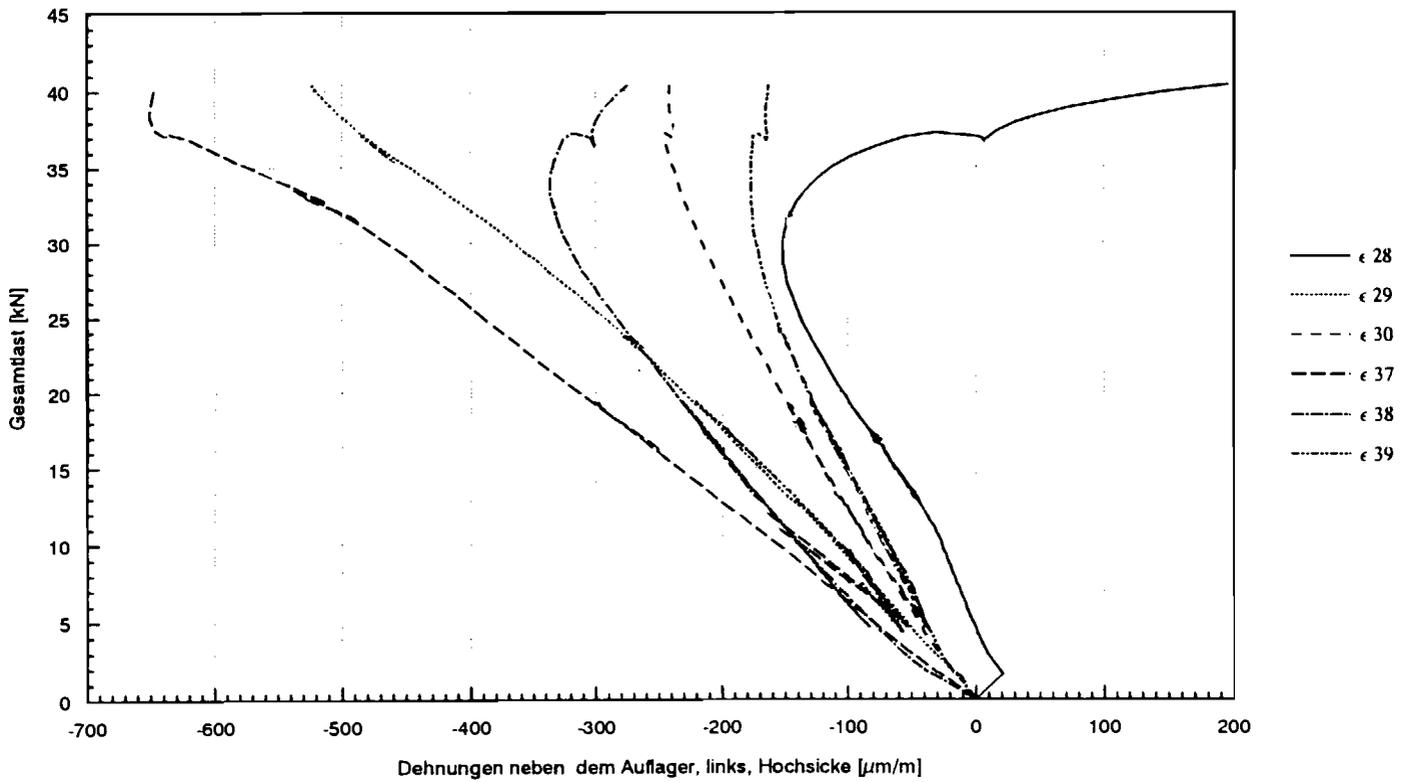
Durchbiegung in Feldmitte

2-Feldplatte



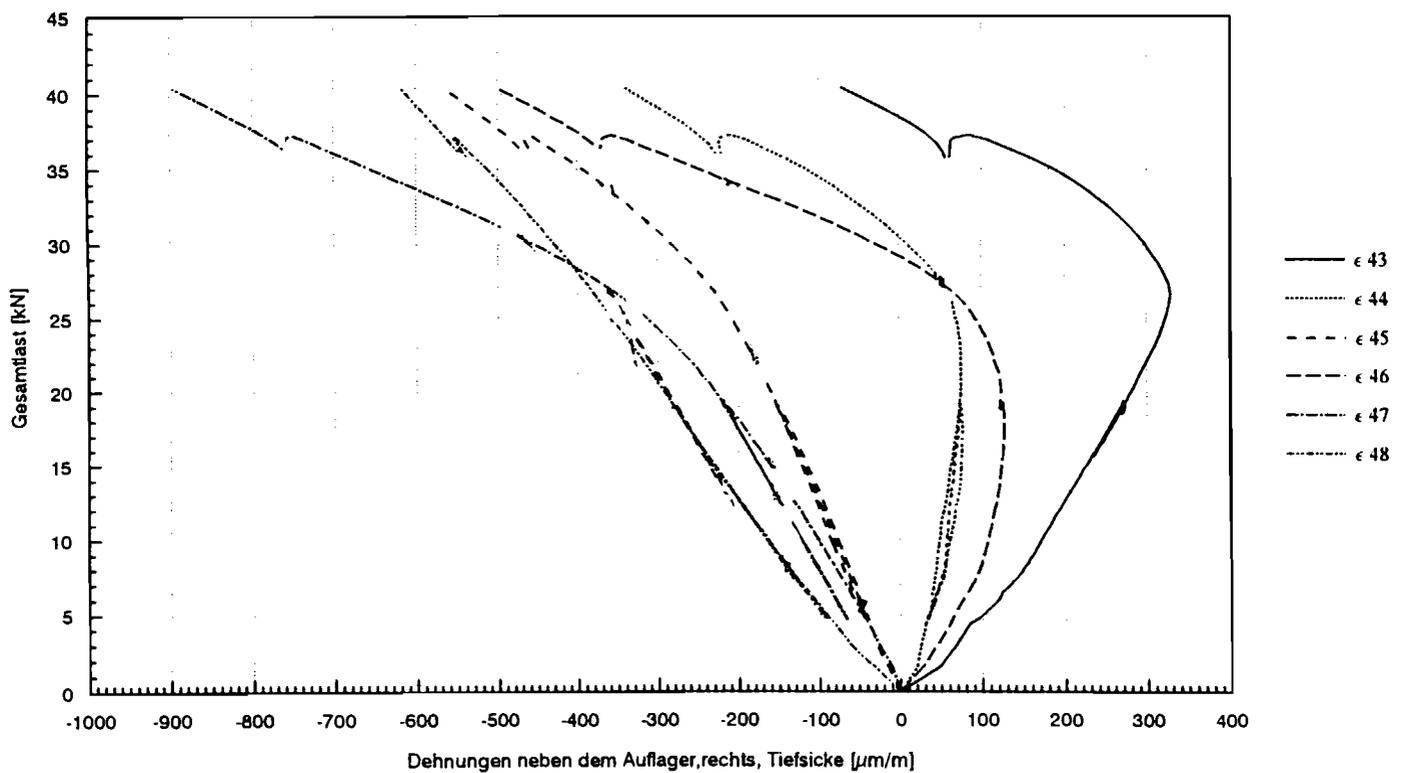
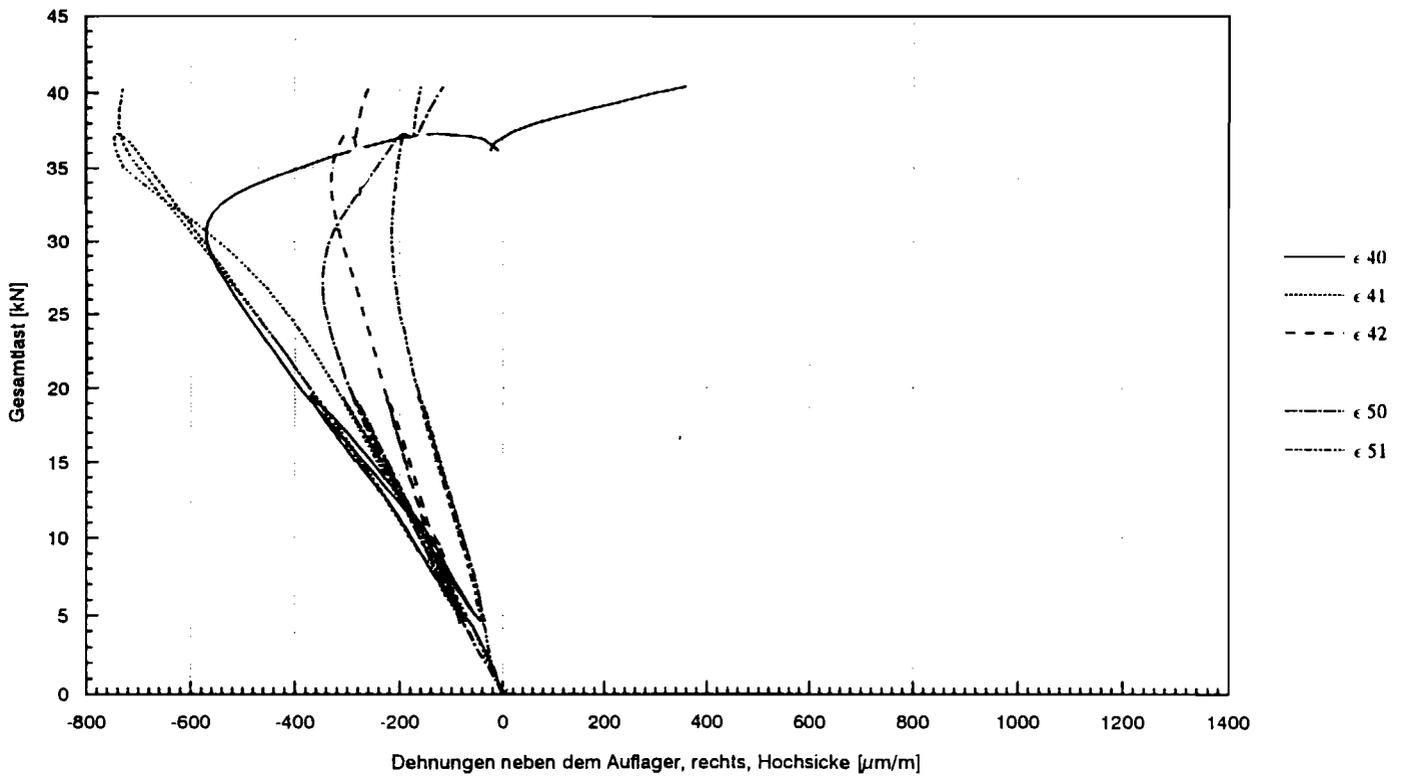
Dehnungen in Feldmitte

2-Feldplatte



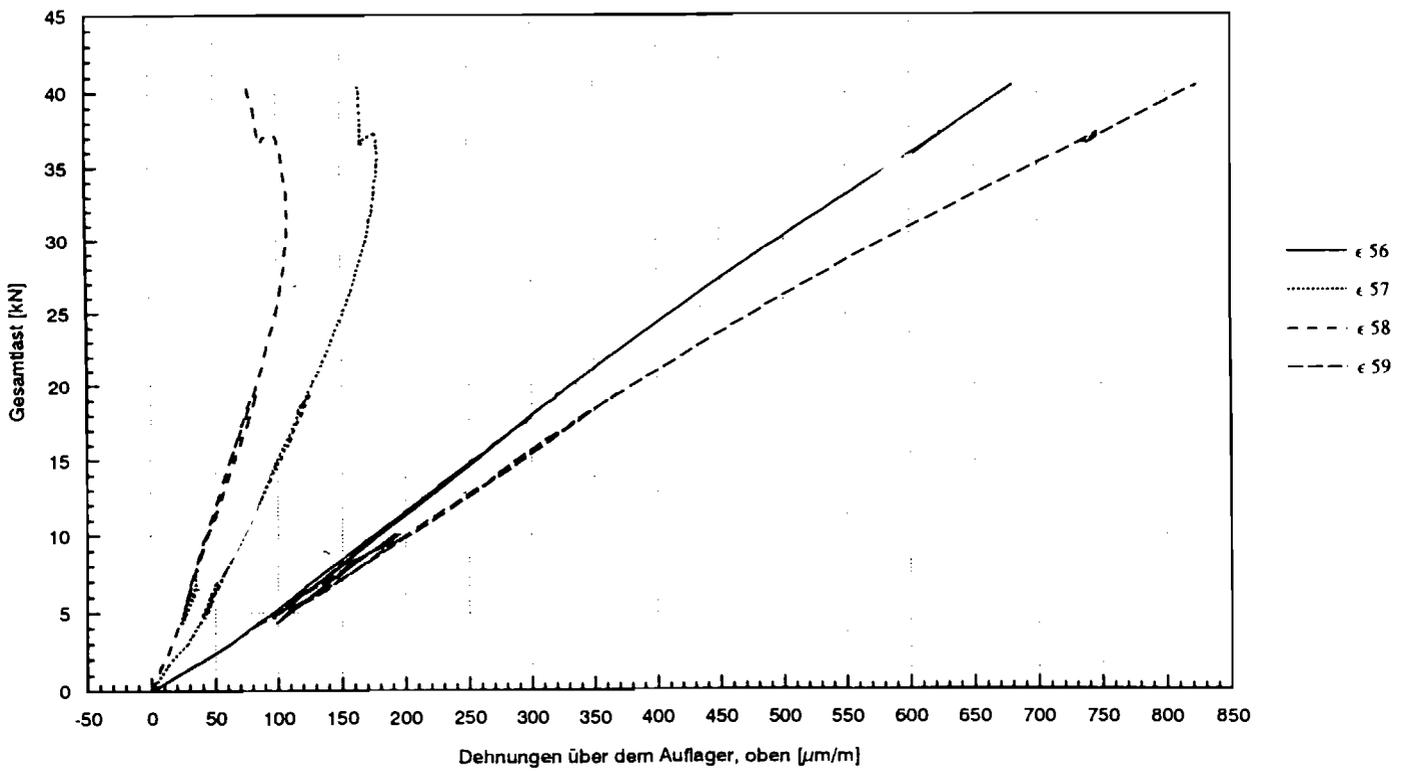
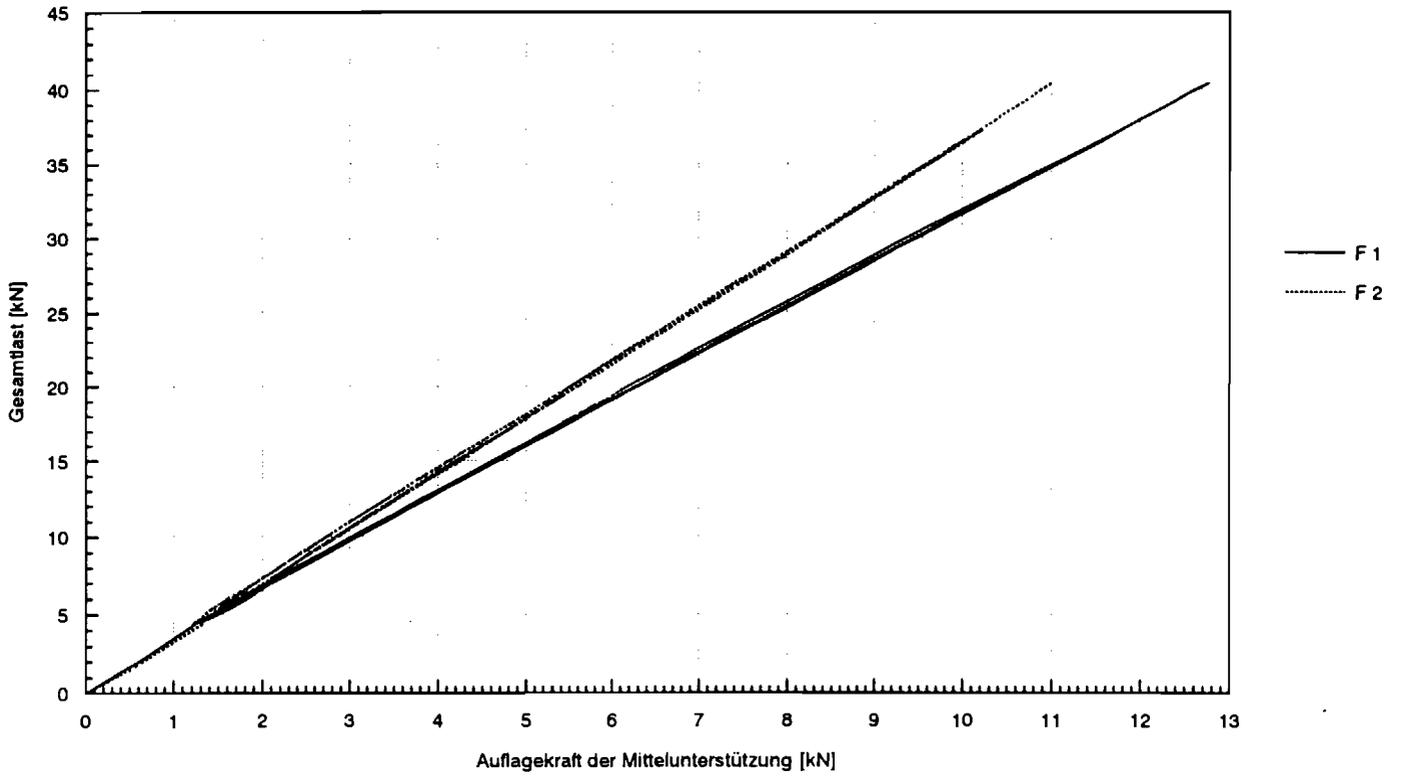
Dehnungen an der Bauteilunterseite; links von der Lasteinleitung

2-Feldplatte



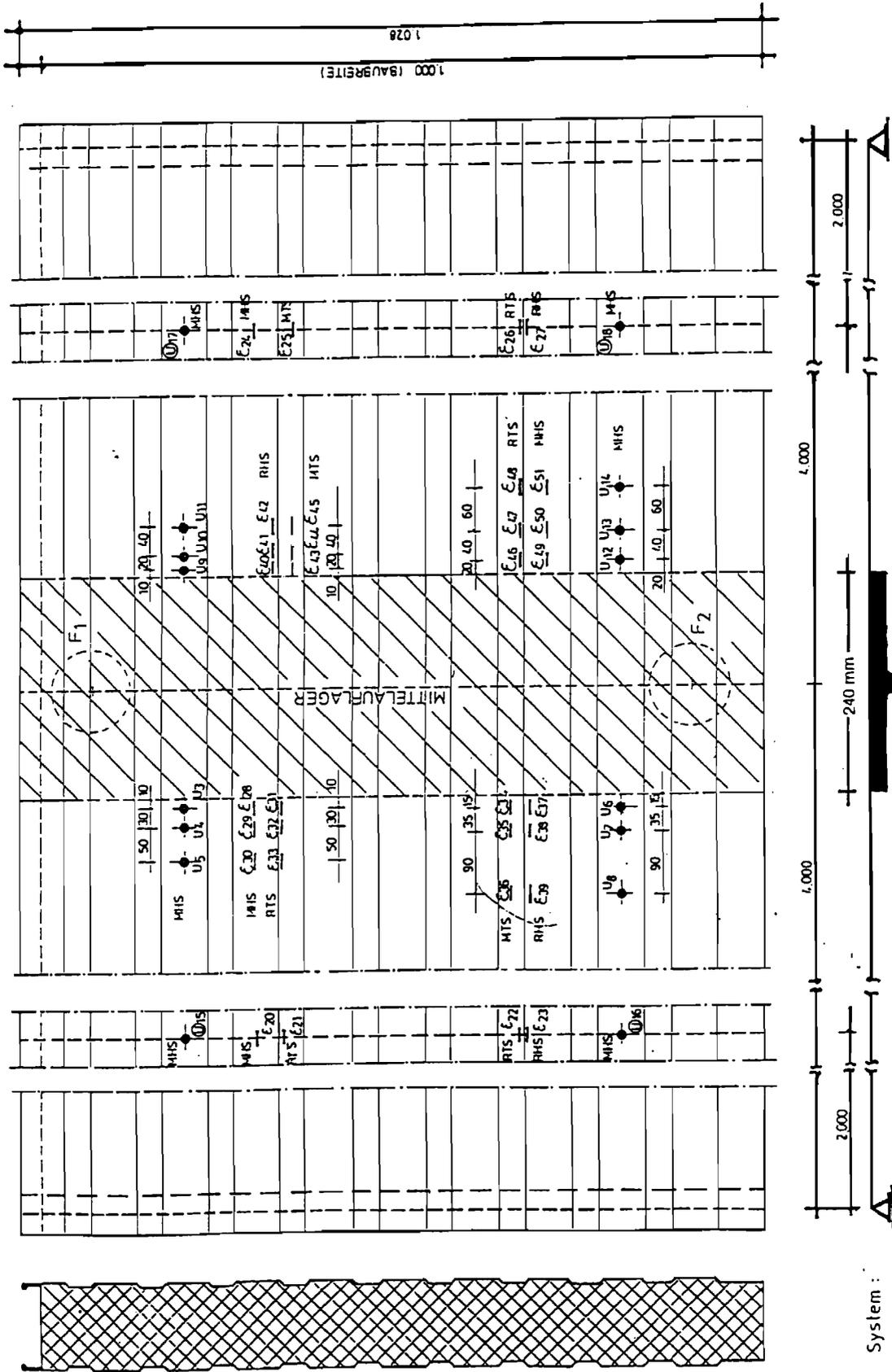
Dehnungen an der Bauteilunterseite; rechts von der Lasteinleitung

2-Feldplatte



Auflagekräfte an der Mittelunterstützung und Dehnungen an der Bauteiloberseite

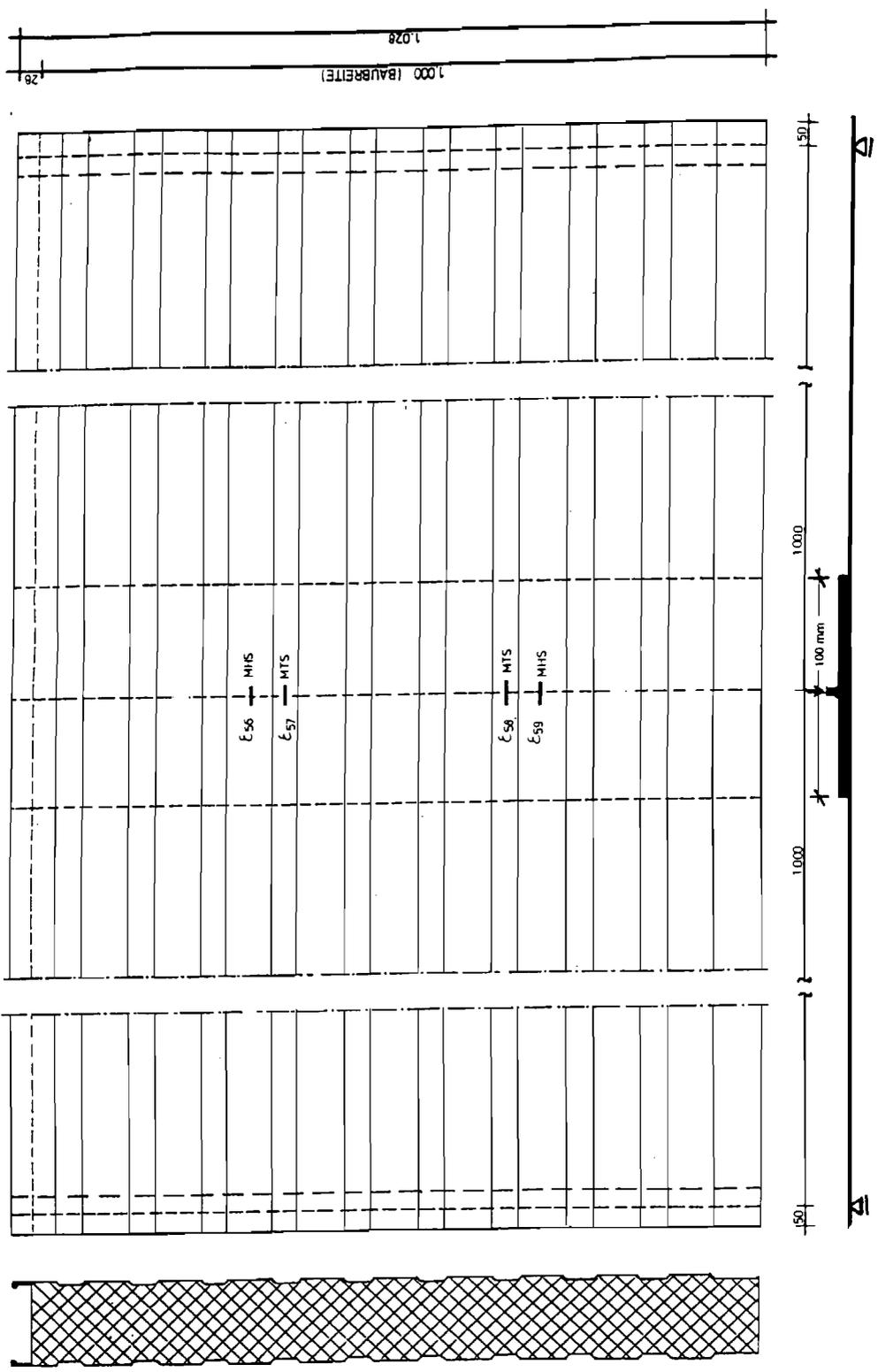
MHS = Mitte Hochsicke (TS = Tiefsicke)  
 RHS = Rand Hochsicke  
 ε - DMS  
 U - Wegnehmer 20mm  
 F - Kraftmessdose  
 ⊕ - Wegnehmer 200mm



Anordnung der Dehnungsmessstreifen an der Bauteilunterseite  
 = Bauteiloberseite des Ersatzträgers

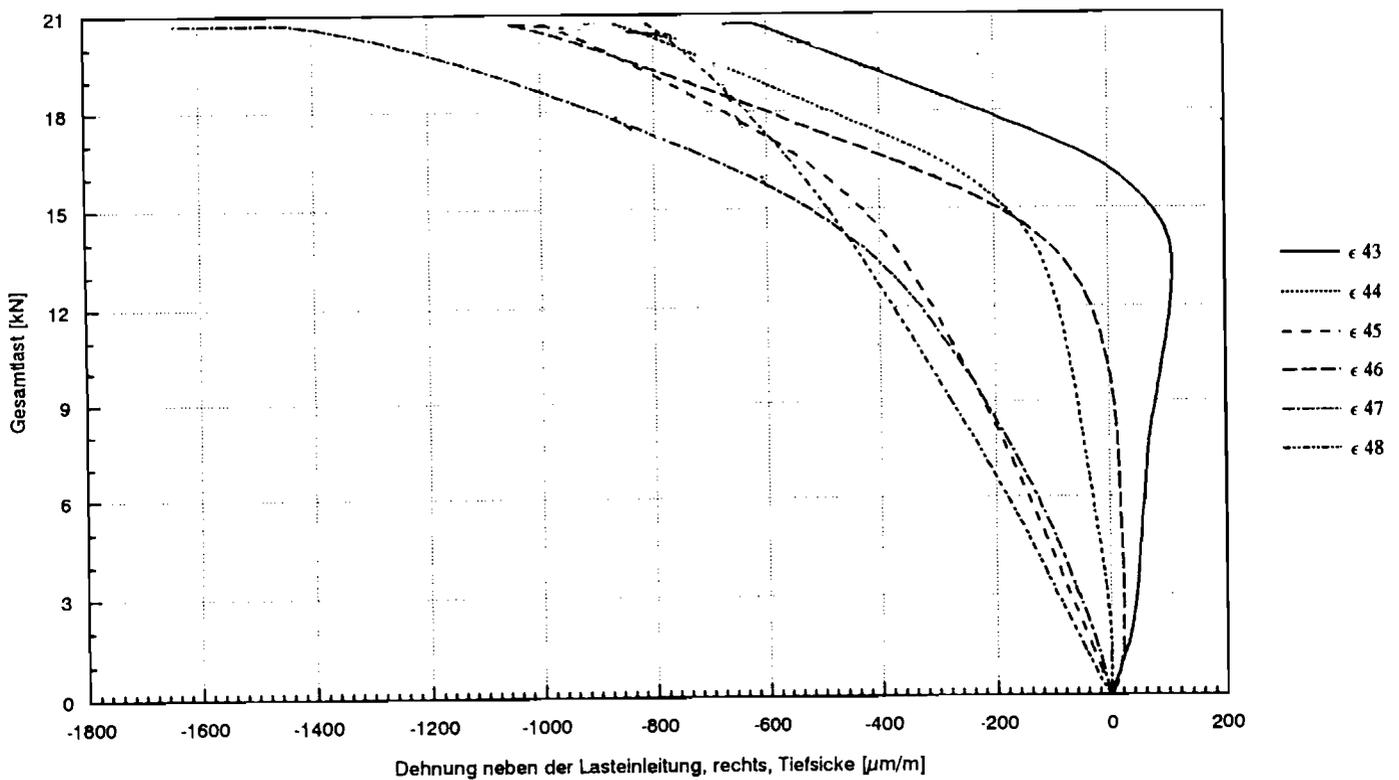
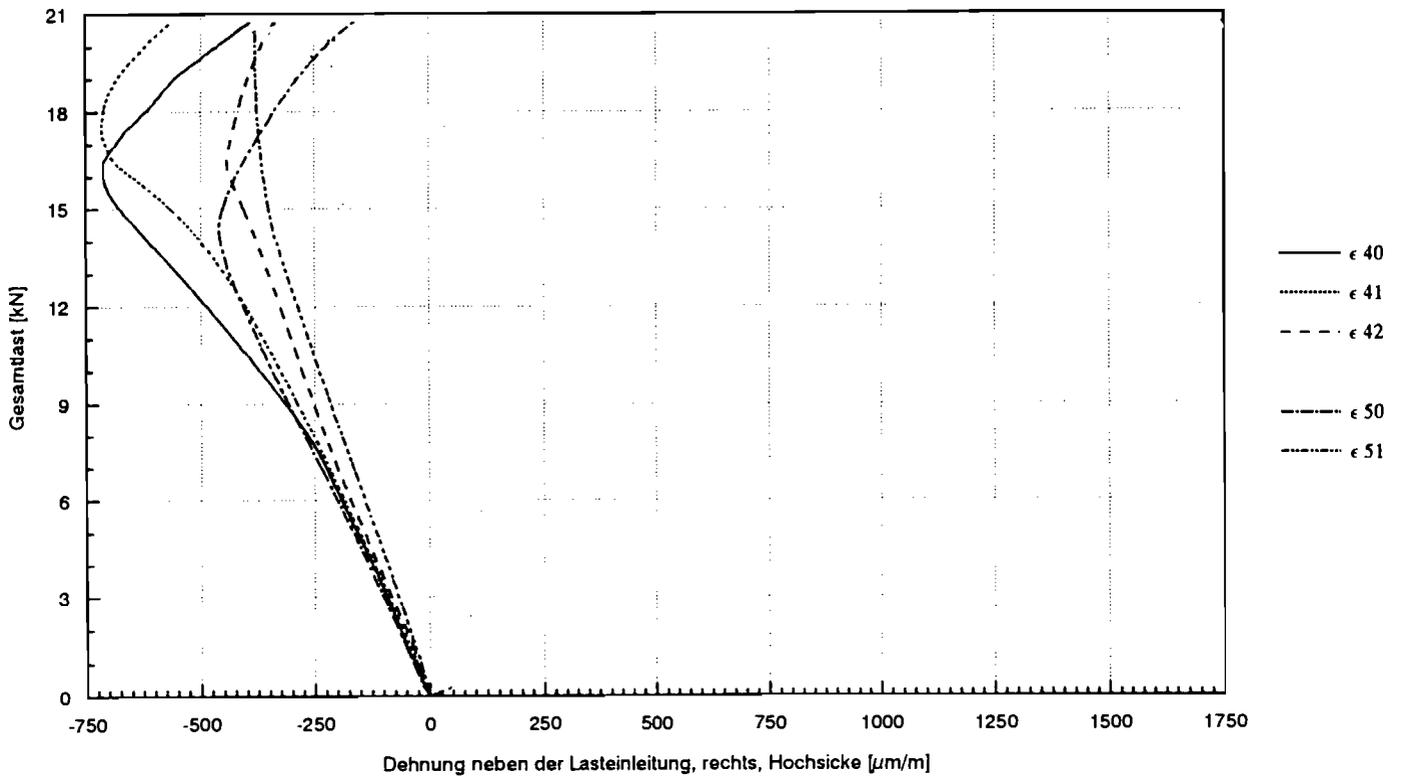
MHS = Mitte Hochsickle (TS = Tiefsickle)  
 RHS = Rand Hochsickle  
 Ⓡ = DMS  
 U = Wegnehmer 20mm  
 F = Krallmessdose Ⓣ = Wegnehmer 100 mm

U9 UND U19  
 DURCHBIEGUNG IN  
 FELDMITTE



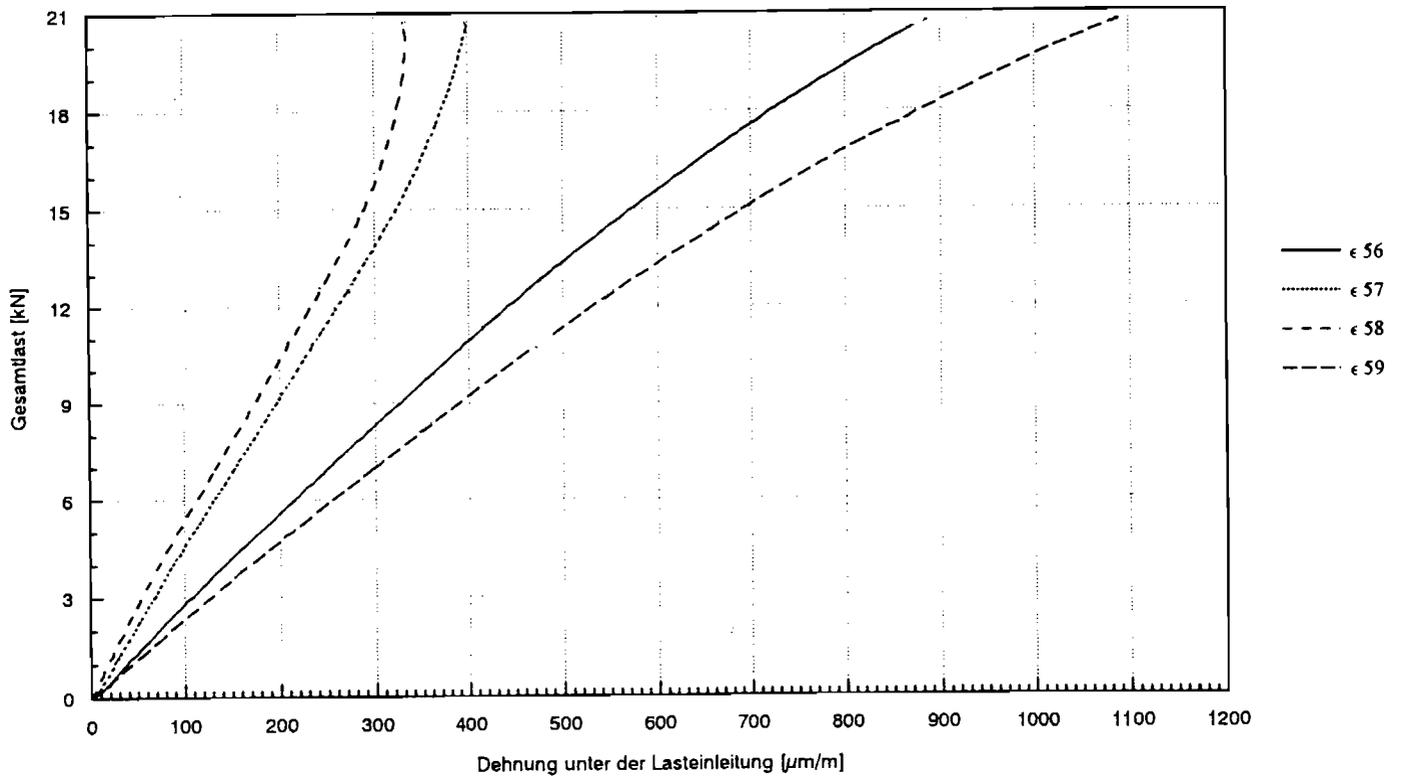
Anordnung der Dehnungsmeßstreifen an der Bauteilunterseite

Ersatzträgerversuch 1, Lasteinleitungsbreite 240 mm



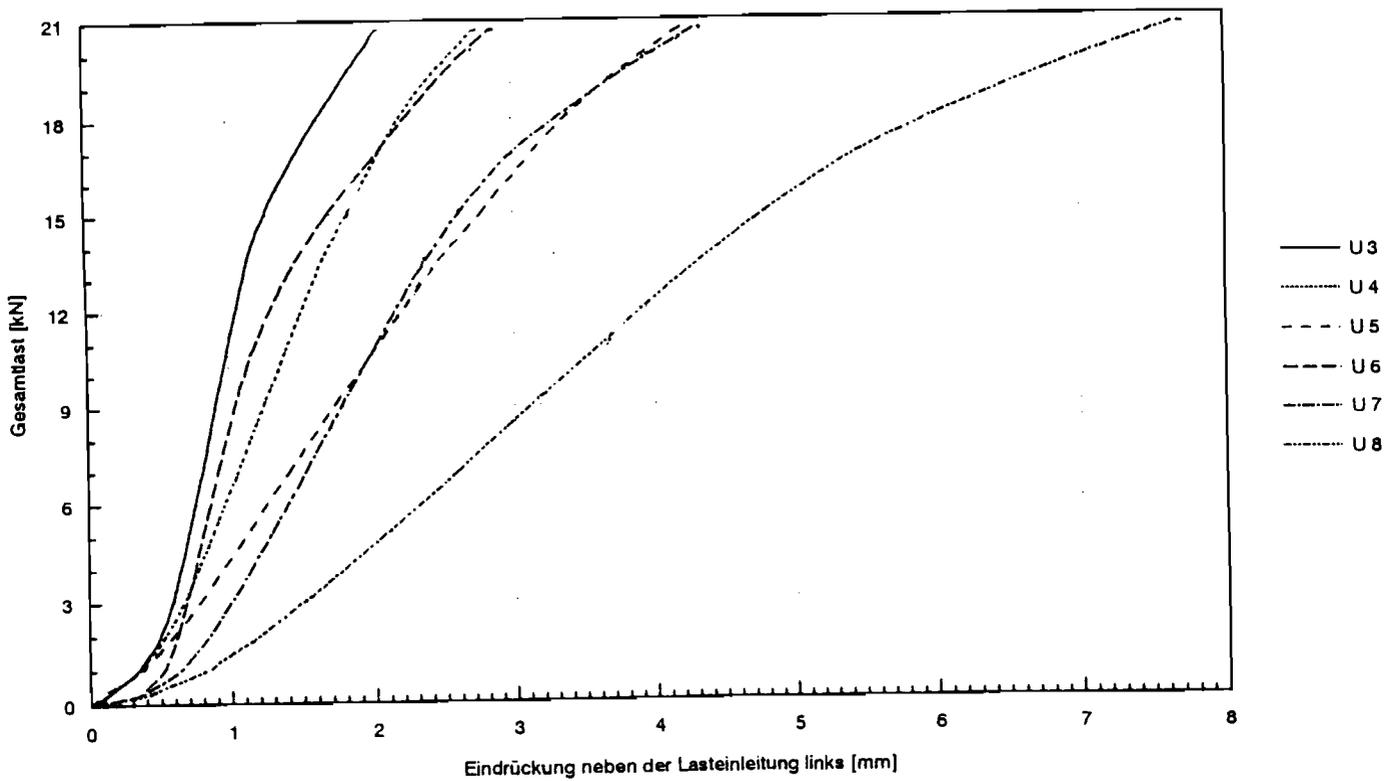
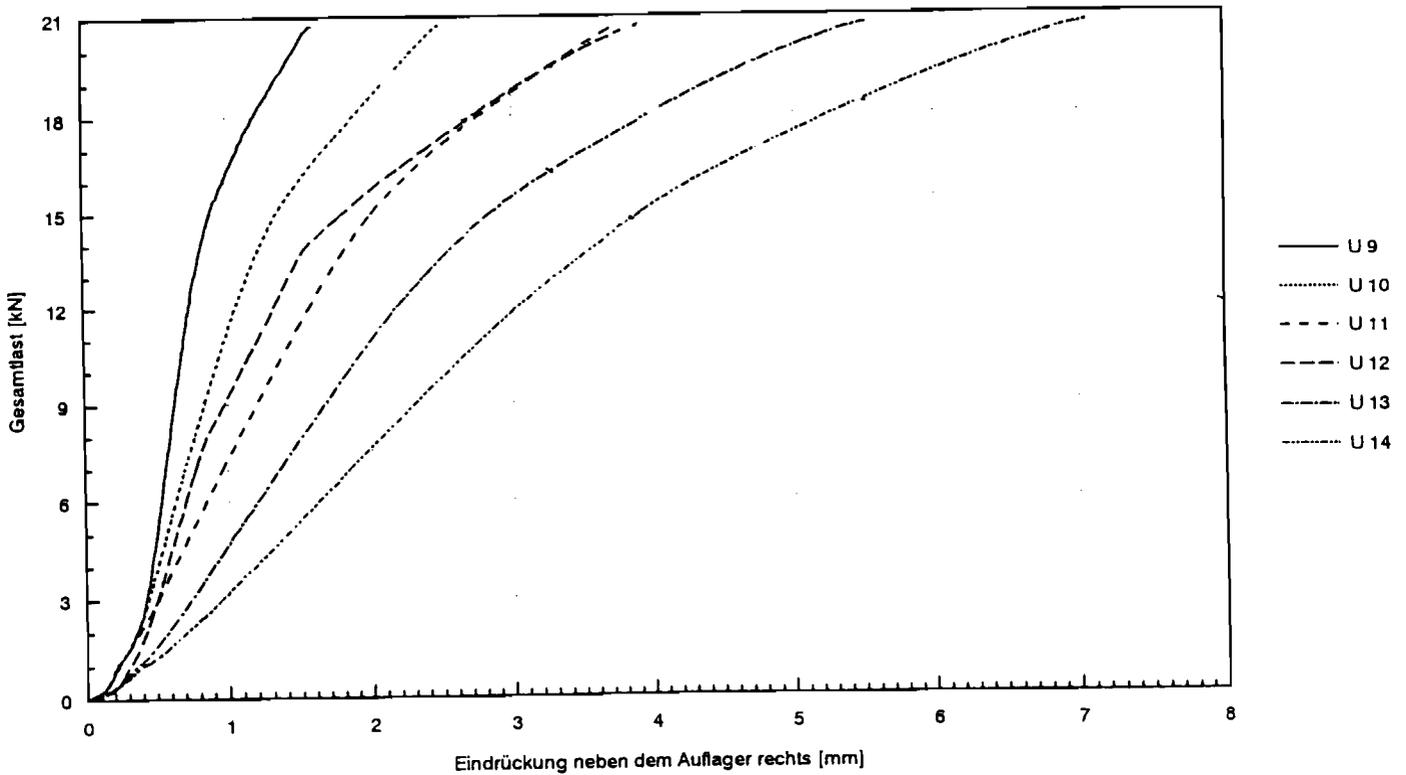
Dehnungen an der Bauteiloberseite, rechts von der Lasteinleitung

Ersatzträgerversuch 1, Lasteinleitungsbreite 240 mm



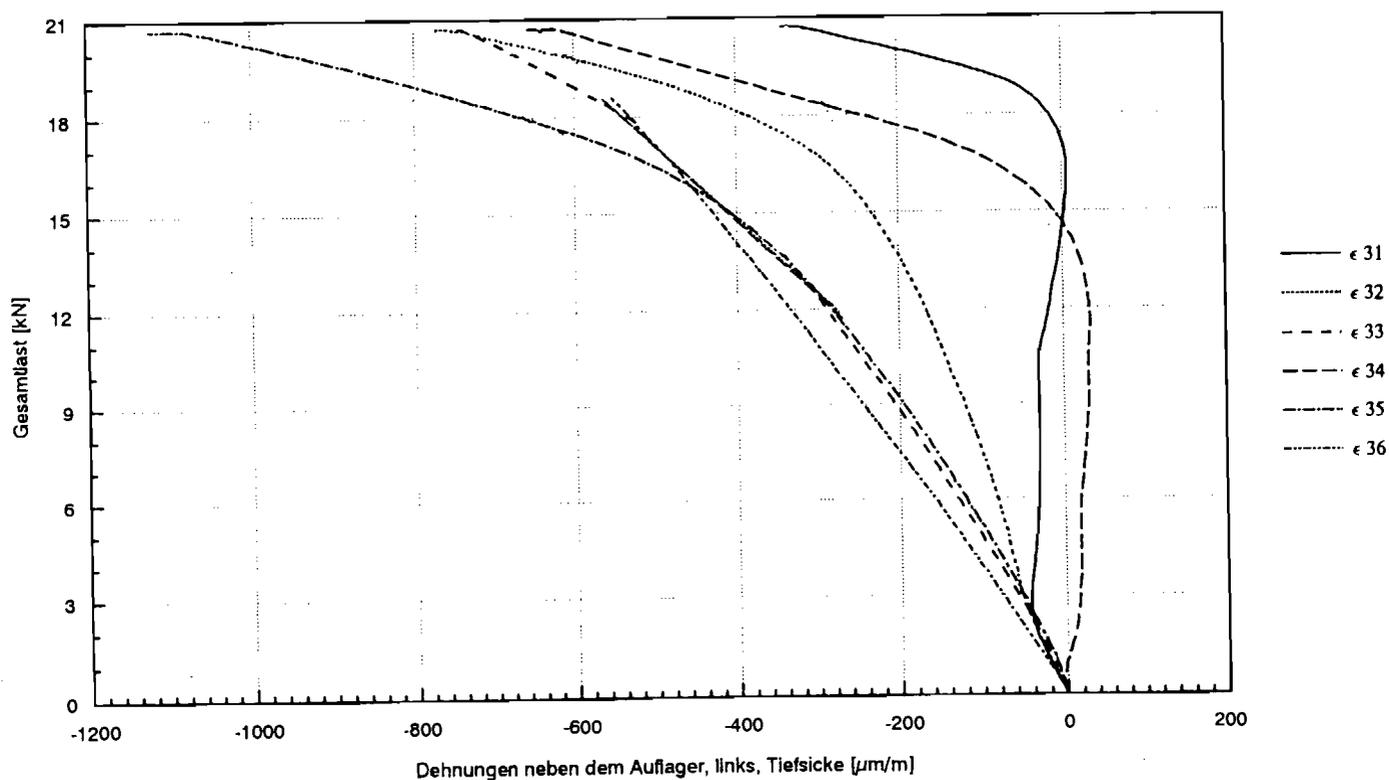
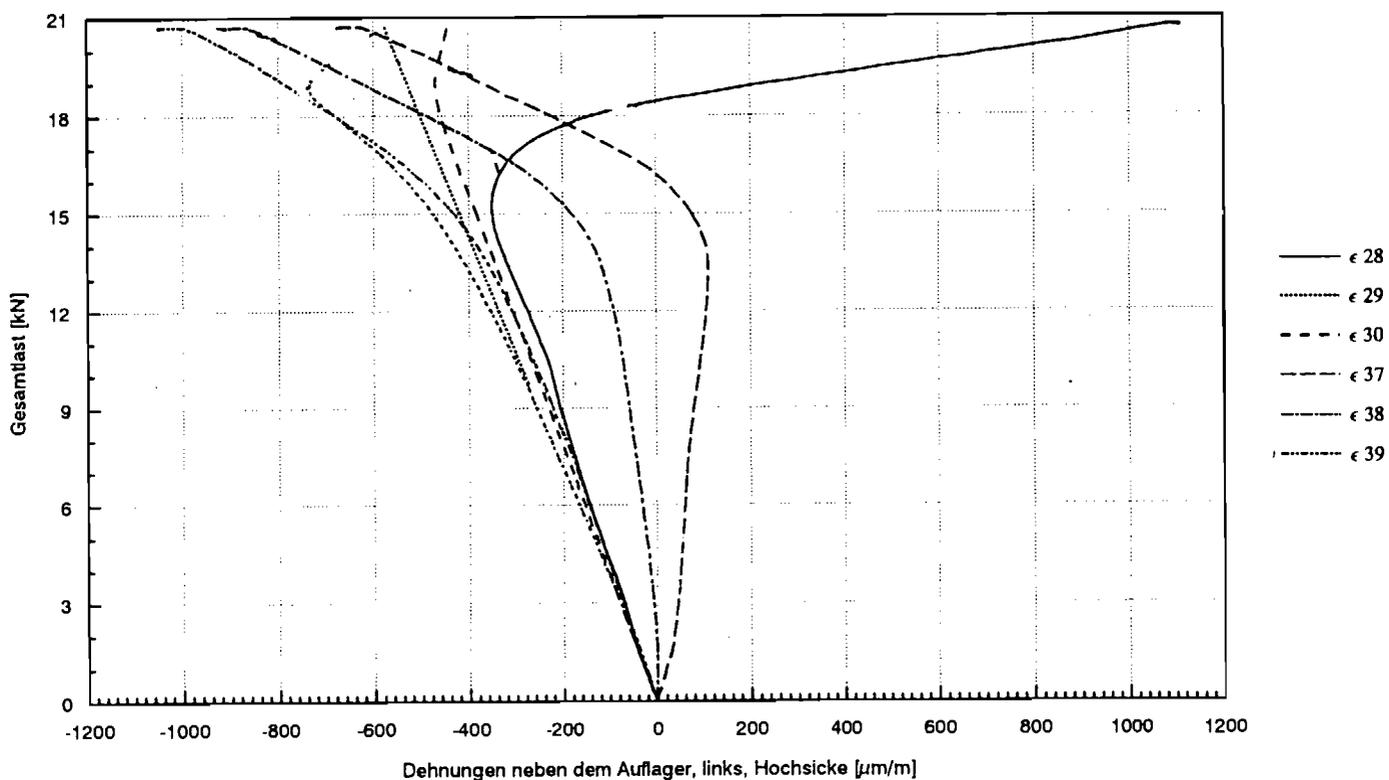
Dehnungen an der Bauteilunterseite

Ersatzträgerversuch 1, Lasteinleitungsbreite 240 mm



Eindrückungen neben dem Auflager rechts und  
Eindrückungen neben dem Auflager links

Ersatzträgerversuch 1, Lasteinleitungsbreite 240 mm

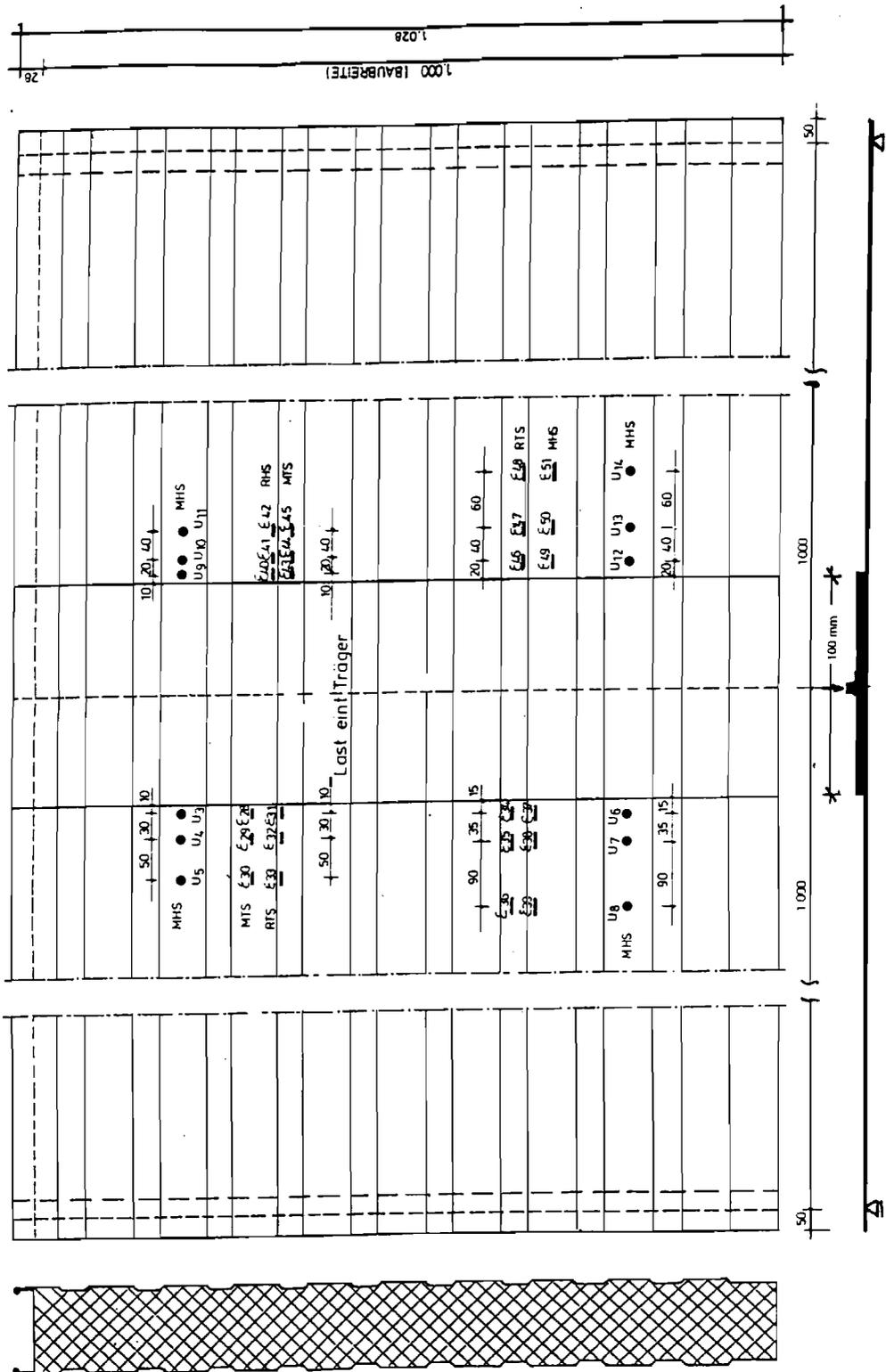


Dehnungen an der Bauteiloberseite; links von der Lasteinleitung

# Ersatzträger-Versuch II

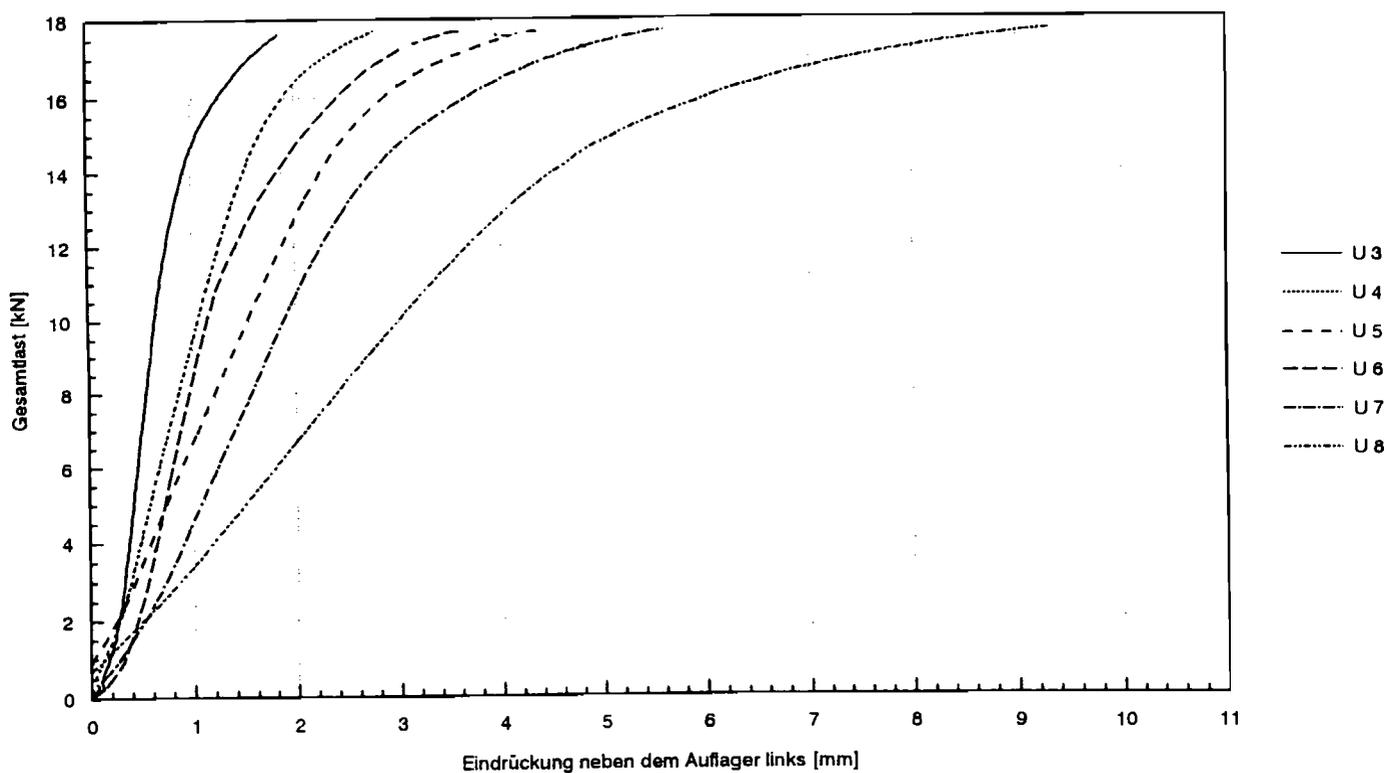
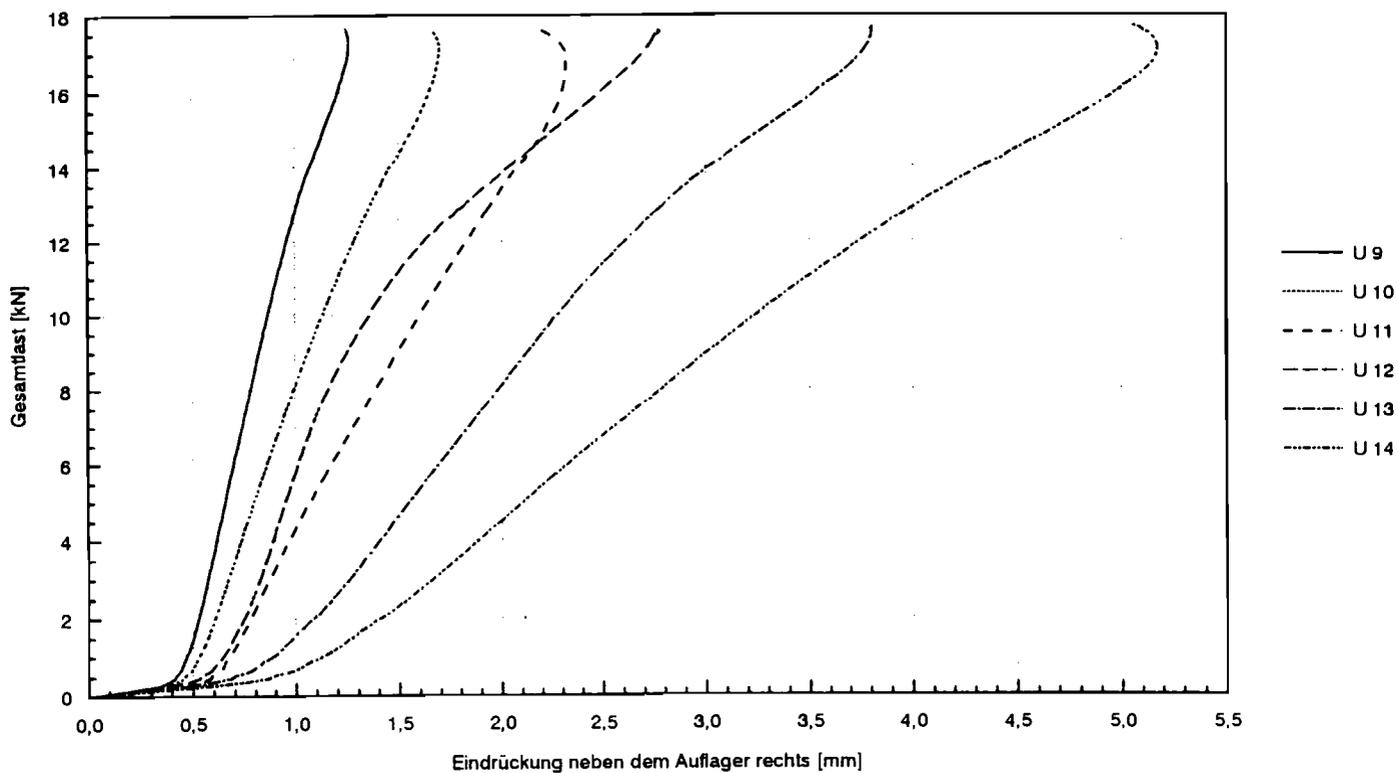
MHS = Mitte Hochsicherheitstiefen  
 RHS = Rand Hochsicherheitstiefen  
 £ = DHS  
 U = Wegnehmer 20mm  
 F = Kraftmessdose  
 ⊕ = Wegnehmer 200mm

U<sub>3</sub> - U<sub>14</sub>  
 BEZOGEN AUF LASTEINT. TRÄGER



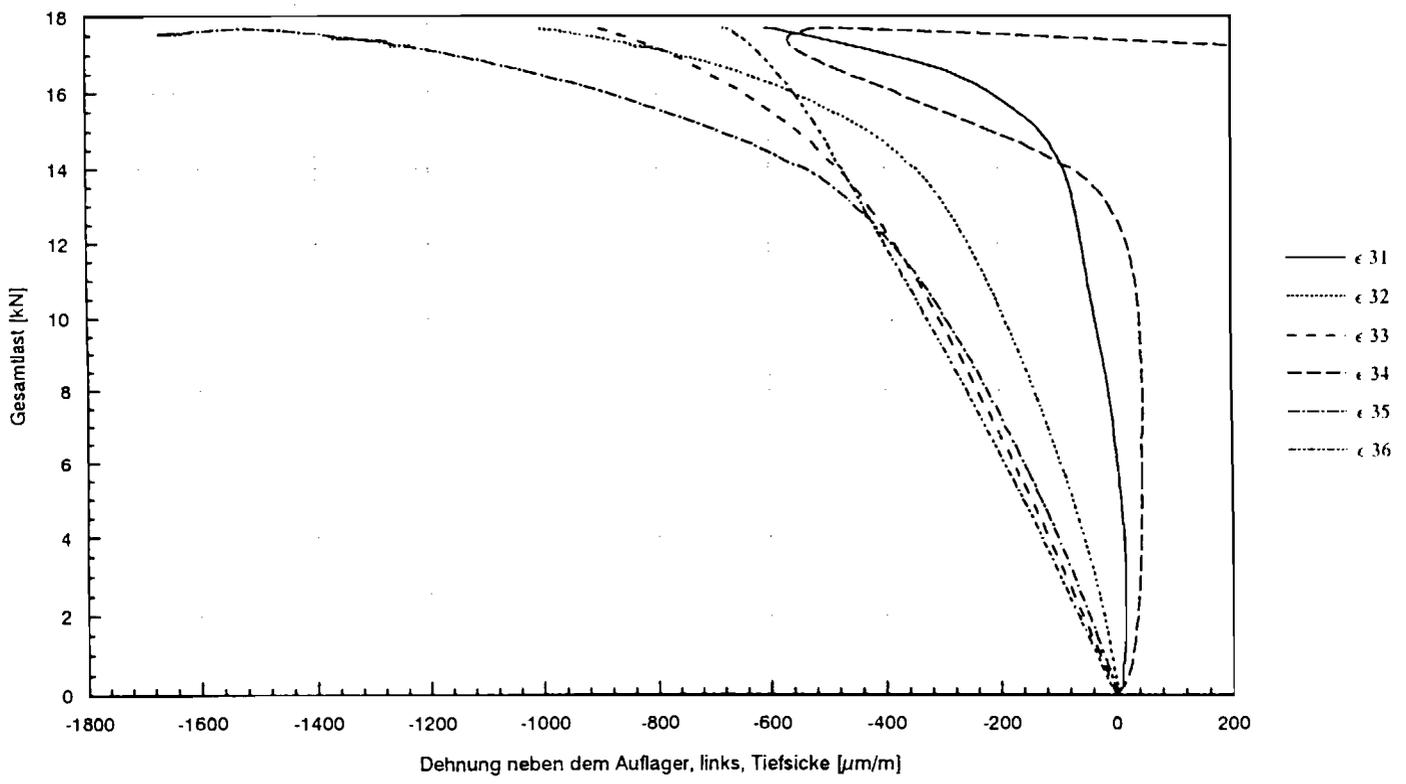
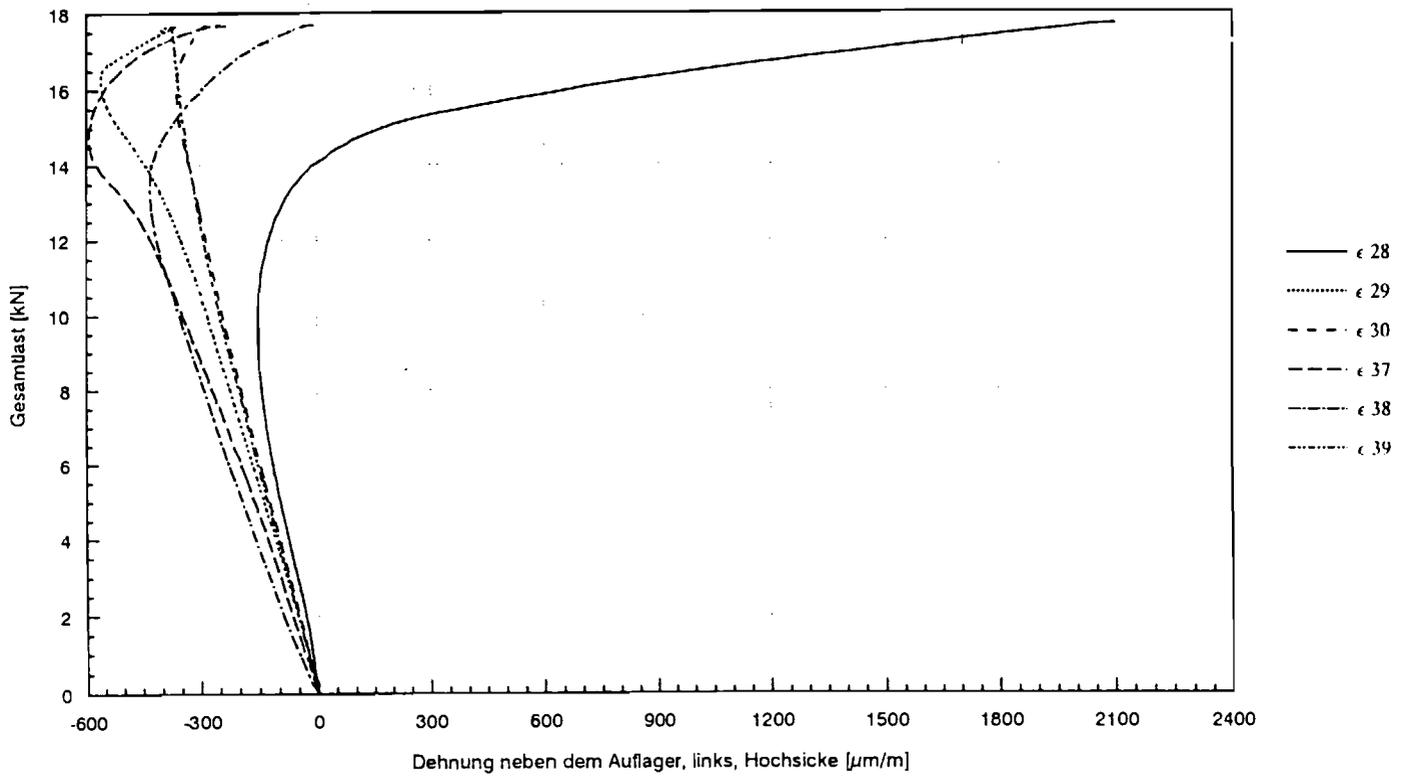
Anordnung der Dehnungsmeßstreifen an der Bauteiloberseite

Ersatzträgerversuch 2, Lasteinleitungsbreite 100 mm



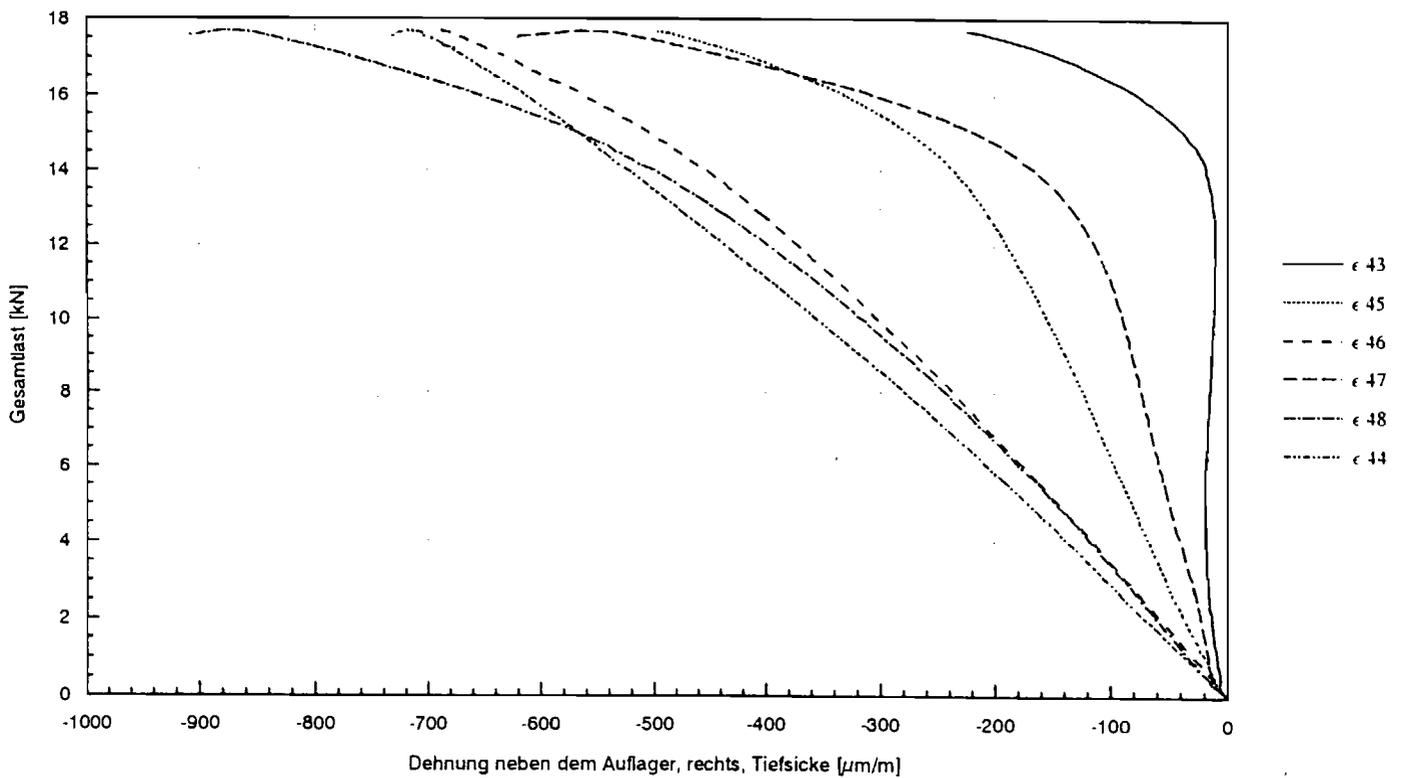
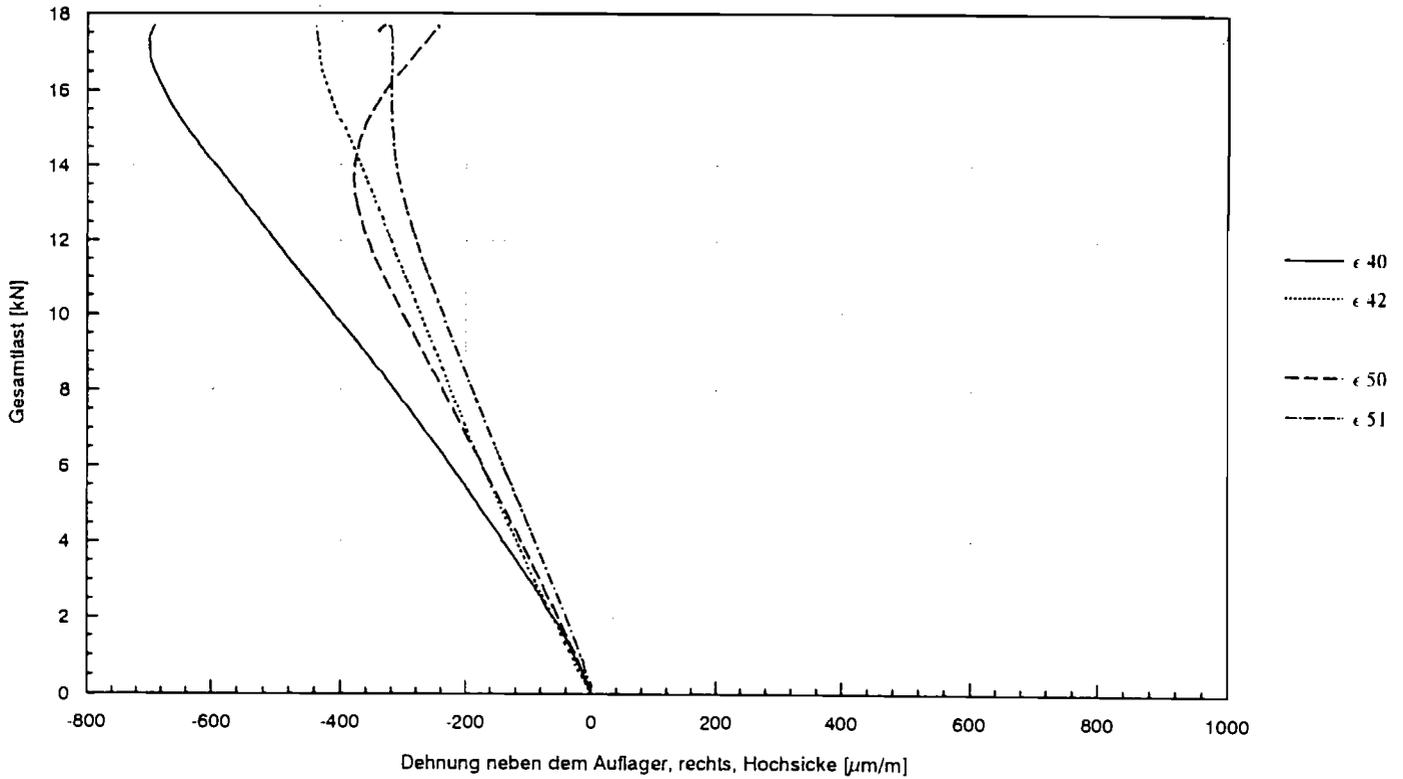
Eindrückungen neben dem Auflager rechts und  
Eindrückungen neben dem Auflager links

Ersatzträgerversuch 2, Lasteinleitungsbreite 100 mm



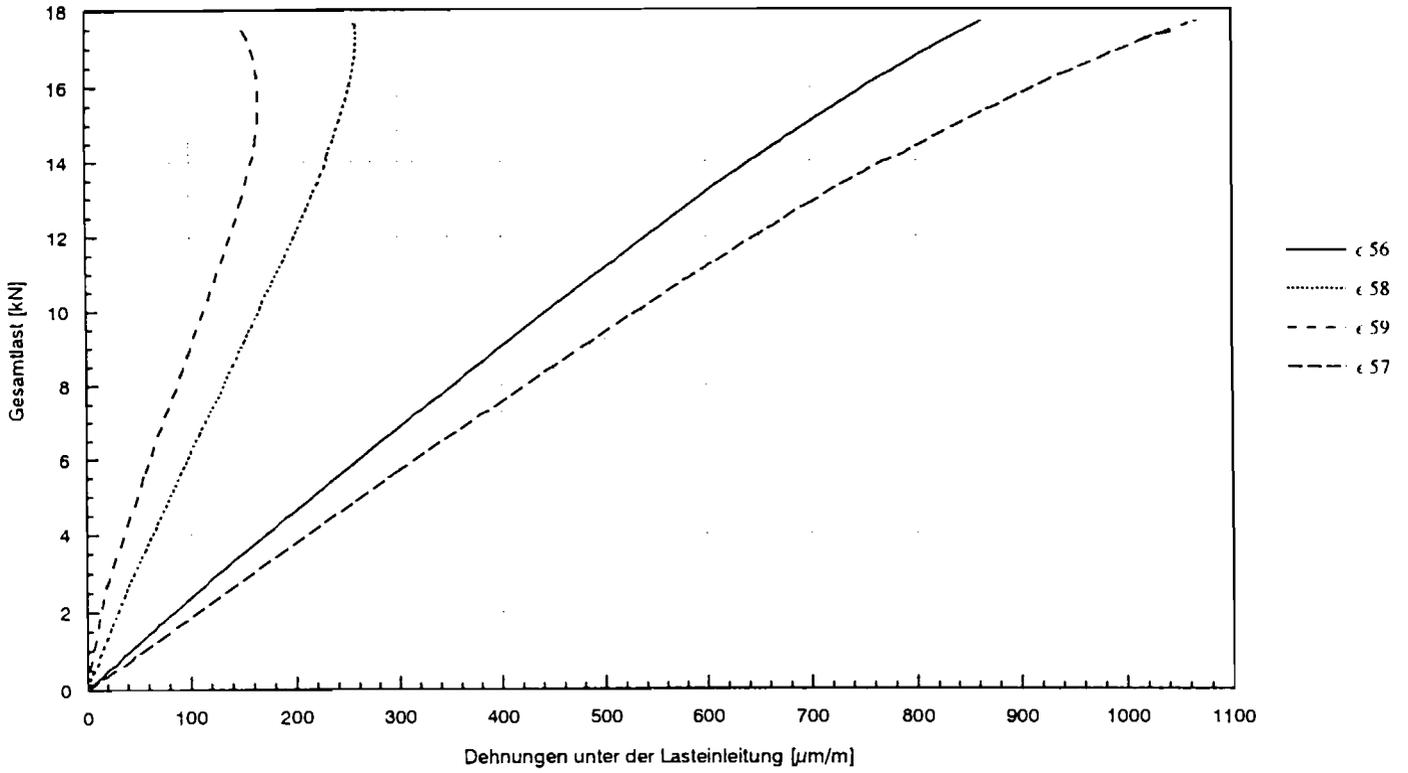
Dehnungen an der Bauteiloberseite, links von der Lasteinleitung

Ersatzträgerversuch 2, Lasteinleitungsbreite 100 mm



Dehnungen an der Bauteiloberseite; rechts von der Lasteinleitung

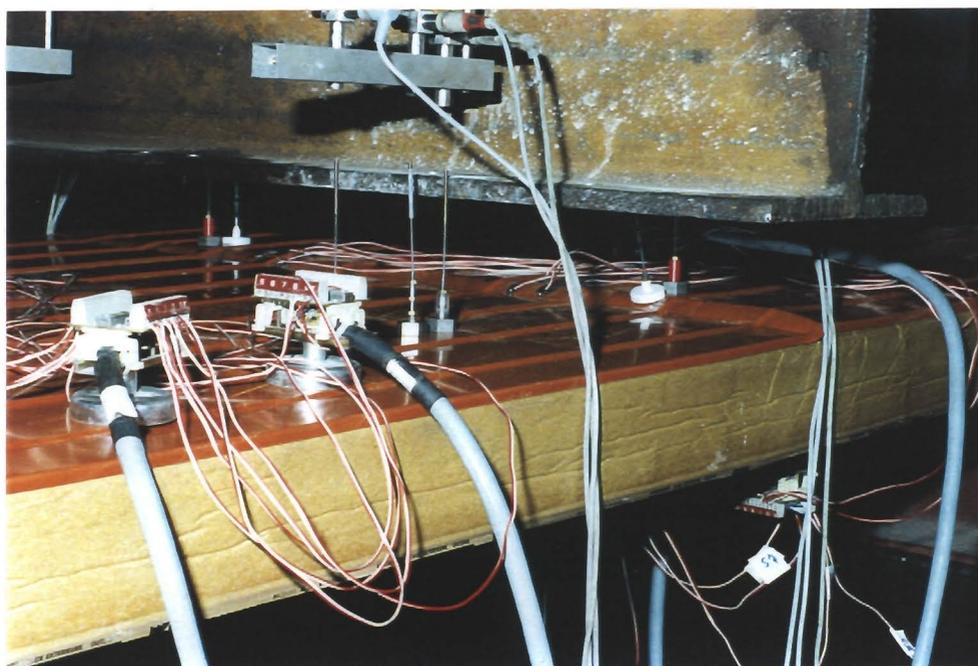
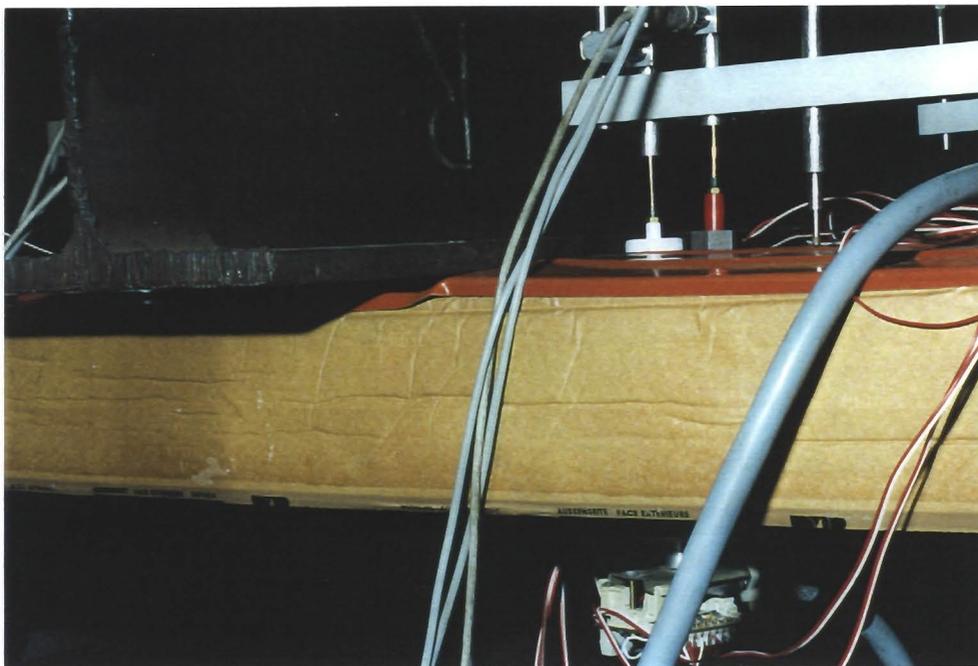
Ersatzträgerversuch 2, Lasteinleitungsbreite 100 mm



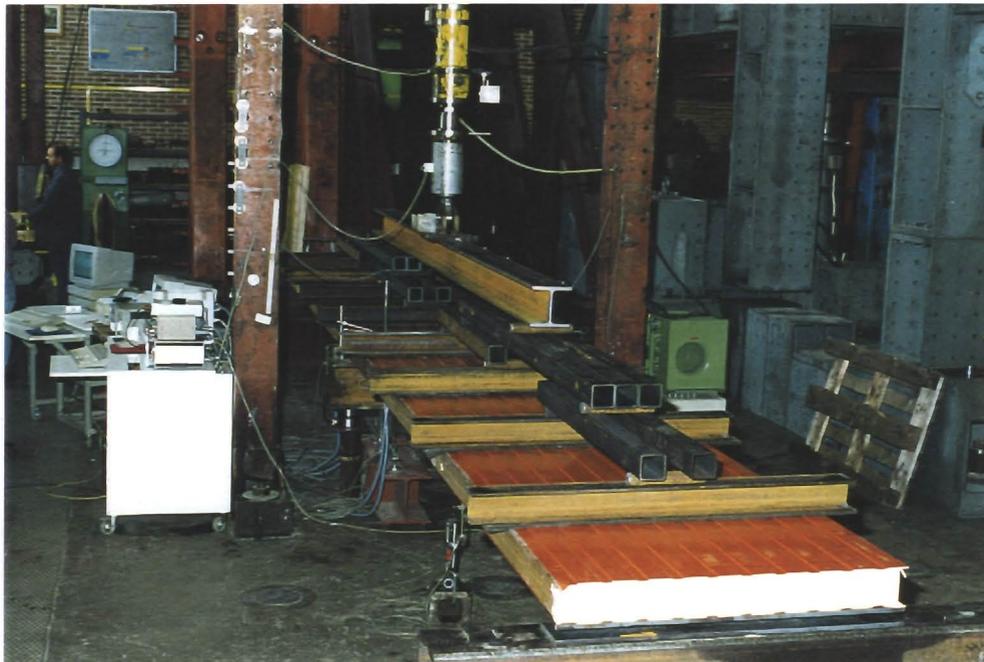
Dehnungen an der Bauteilunterseite

# Anhang

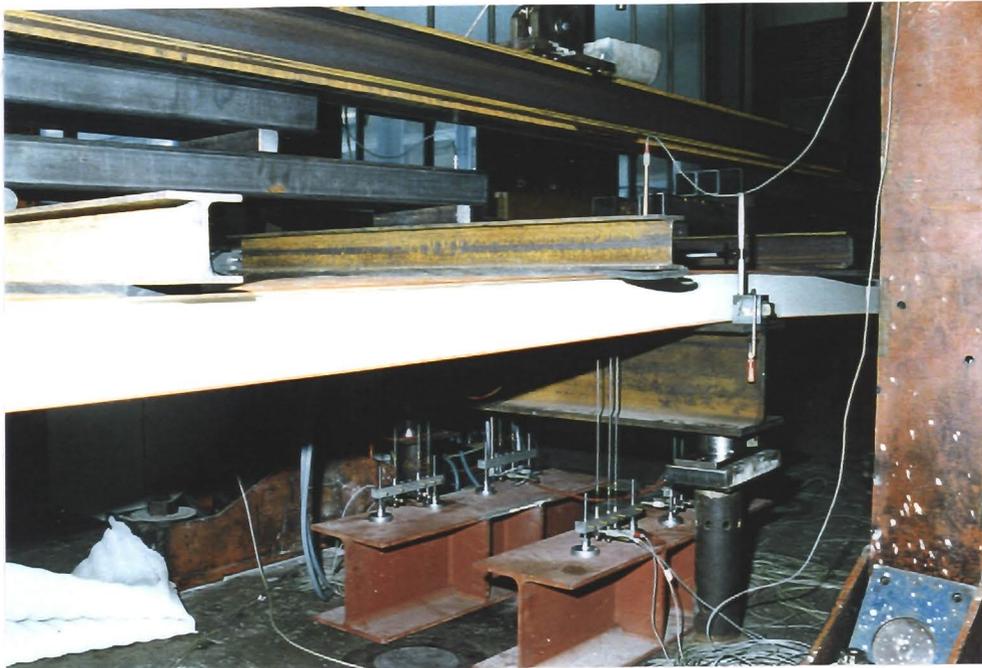
Experimentelle Untersuchungen  
mit DMS-Messungen



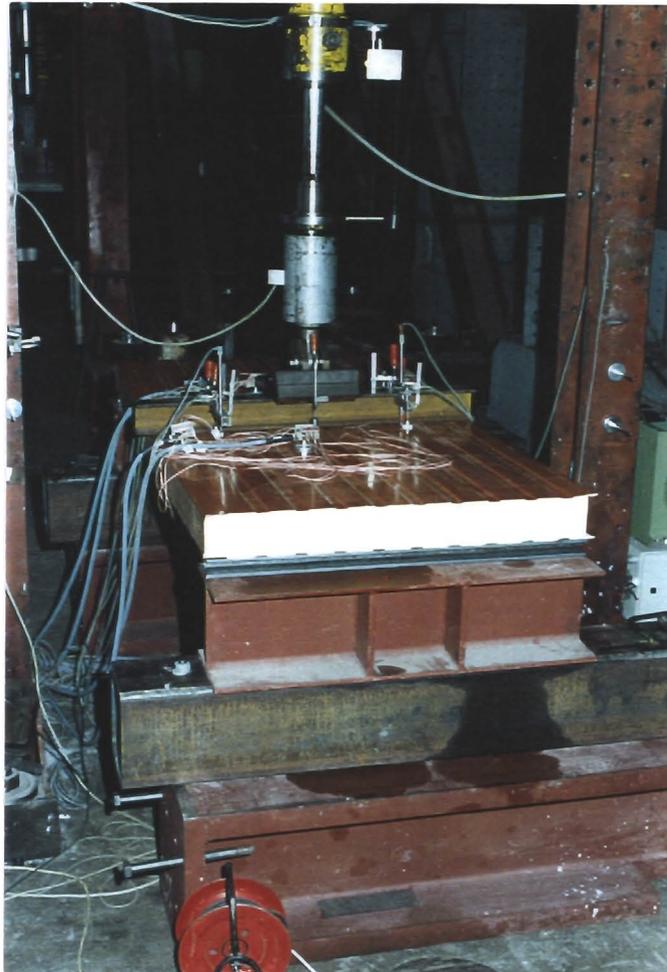
Versagenszustand



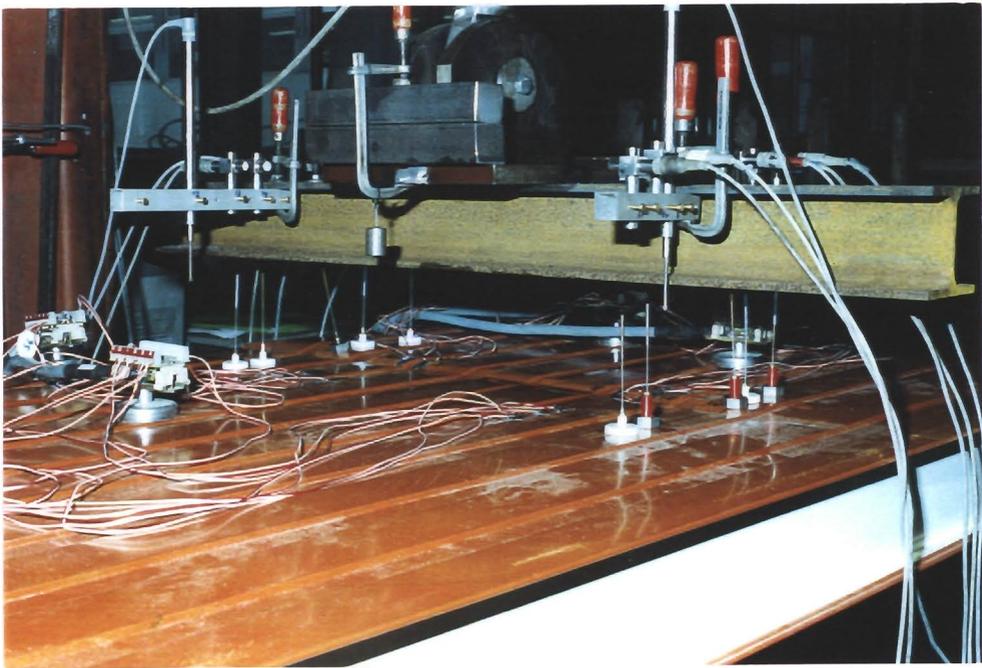
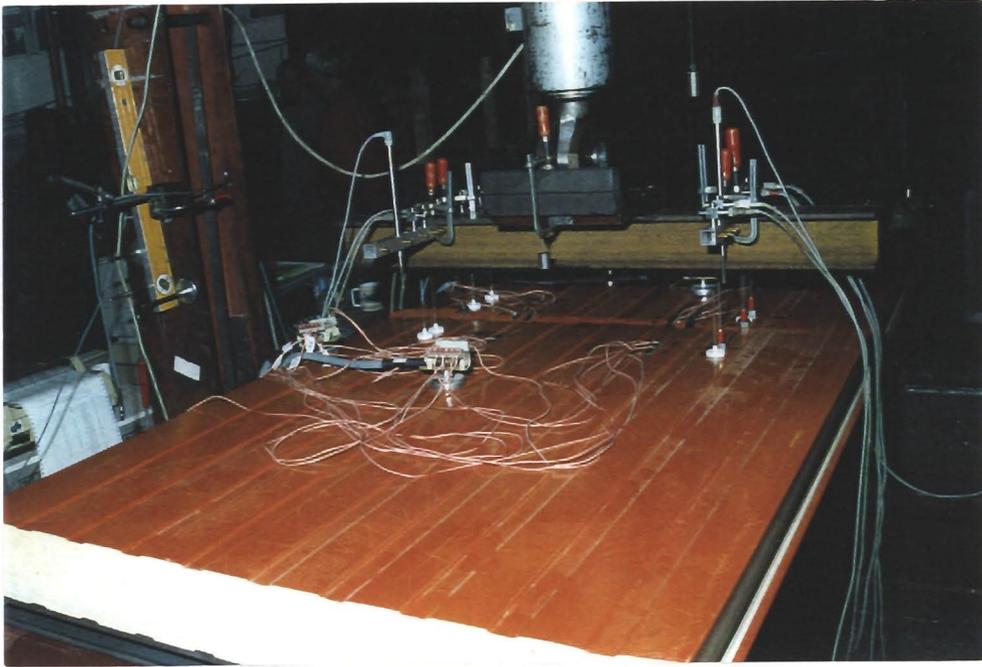
Versuchsaufbau



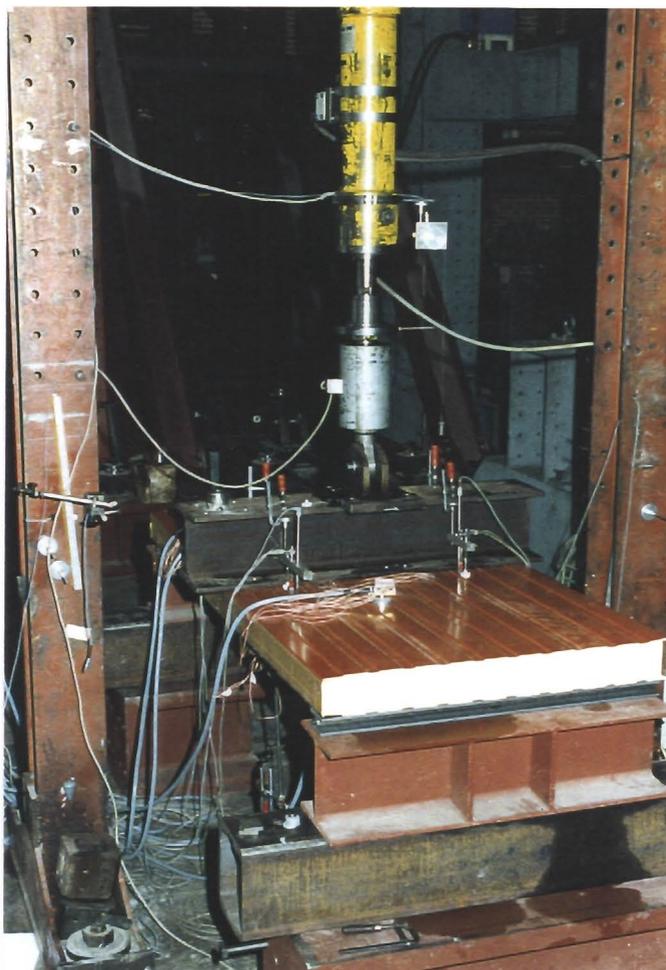
Mittelunterstützung



Versuchsaufbau



Versagenszustand



Versuchsaufbau