

Untersuchung der Beanspruchungen in der Klebefuge eines Structural- Glazing-Elementes

T 2492

T 2492

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

2003

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

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



BERICHT ZUM FORSCHUNGSVORHABEN

Untersuchung der Beanspruchungen in der Klebefuge
eines Structural-Glazing-Elementes

Berichter: G. Krüger, G.E. Völkel, R. Wohlfahrt

Auftraggeber: Institut für Bautechnik, Berlin
AZ IV 1-5-638/92

Datum des Berichts: 31.12.1992

Auftrag: 25-10686

Textseiten: 83

	<u>INHALT</u>	Seite
	BEZEICHNUNGEN	4
1.	PROBLEMSTELLUNG	5
2.	DERZEITIGER KENNTNISSTAND	6
3.	VORUNTERSUCHUNGEN	8
3.1	Das Finite-Elemente-Modell	8
3.1.1	Modellierung der elastisch gelagerten Platte	8
3.1.2	Modellierung der Rahmenunterkonstruktion	10
3.1.3	Modellierung des Abstandshalters	10
3.2	Das Materialmodell	11
3.2.1	Vorgespanntes Glas	11
3.2.2	Silikonkautschuk	11
3.2.2.1	Kleine Dehnungen	14
3.2.2.2	Berücksichtigung des Abstandshalters	18
3.2.2.3	Große Dehnungen	18
4.	ERGEBNISSE DER FINITE-ELEMENTE-BERECHNUNGEN	21
4.1	Überblick, Rechenannahmen	21
4.2	Der Verformungs- und Spannungszustand der Klebefuge bei Einwirkung gleichförmiger Querlast auf die Platte	22
4.2.1	Windsog	22
4.2.2	Winddruck	28
4.2.3	Einfluß des Abstandshalters	27
4.2.4	Einfluß der endlichen Rahmensteifigkeit	31
4.2.5	Einfluß geometrischer Nichtlinearität	34
4.2.6	Berücksichtigung der Querdehnung des Silikonklebers	38
4.2.7	Nichtlineares Materialgesetz	41
4.3	Abhängigkeit des Verformungs- und Spannungszustandes von den geometrischen Abmessungen der Glasplatte und der Klebefuge	45
4.3.1	Variation der Plattendicke	45
4.3.2	Variation des Seitenverhältnisses	50
4.3.3	Variation der Fugenhöhe	55
4.3.4	Variation der Fugenbreite	58

5.	BAUTEILVERSUCHE	61
5.1	Versuchsaufbau und Durchführung	61
5.2	Versuchsergebnisse, Vergleich mit den Ergebnissen der Finite-Elemente-Berechnungen	65
5.2.1	Vorgehensweise	65
5.2.2	Versuchskörper mit Standardabmessungen	65
5.2.3	Veränderung der Plattendicke	68
5.2.4	Veränderung der Fugenhöhe	70
5.2.5	Veränderung des Seitenverhältnisses	73
5.2.5	Veränderung der Rahmensteifigkeit	75
6.	ZUSAMMENFASSUNG UND BEWERTUNG DER ERGEBNISSE	79
7.	AUSBLICK	80
8.	LITERATUR	82

Bezeichnungen

a_x	kurze Halbachse der Glasscheibe
b_y	lange Halbachse der Glasscheibe
h_z	Plattendicke
h_r	Höhe der Klebefuge
b_r	Breite der Klebefuge
n	Verhältnis a_x/b_y
h_a	Höhe des Rahmens
I	Flächenträgheitsmoment
E	Elastizitätsmodul
E_g	Elastizitätsmodul von Glas
E_s	Elastizitätsmodul von Silikonkautschuk
E_t	Tangentenmodul
ν	Querkontraktionszahl
ν_g	Querkontraktionszahl von Glas
ν_s	Querkontraktionszahl von Silikonkautschuk
A	1. Mooney-Rivlin-Konstante
B	2. Mooney-Rivlin-Konstante
x, y, z	kartesische Koordinaten
u_i	Verschiebungskomponenten, $i=x, y, z$
$u_i^{(i)}$	u_i längs der inneren Fugenkante
$u_i^{(a)}$	u_i längs der äußeren Fugenkante
ϕ_i	Verdrehung der Scheibenkante
ϵ	Dehnung
S_z	Spannungskomponenten in z-Richtung
$S_z^{(i)}$	S_z längs der inneren Fugenkante
$S_z^{(a)}$	S_z längs der äußeren Fugenkante
\bar{S}_z	über die Fugenbreite gemittelte Spannung S_z
SIG_i	Hauptspannungskomponenten, $i=1, 2, 3$
$SIG_i^{(i)}$	SIG_i längs der inneren Fugenkante
$SIG_i^{(a)}$	SIG_i längs der äußeren Fugenkante
$\bar{\sigma}$	nach der Bemessungsformel (1) berechnete Spannung
q_a	äußere Flächenlast

1. PROBLEMSTELLUNG

Im Hochbau werden in zunehmendem Maße geklebte Glasfassaden ('Structural Glazing') verwendet. Dabei werden großformatige Glasscheiben mittels Silikonkautschuk auf einem Rahmen verklebt, der anschließend am Bauwerk befestigt wird. Diese Technik ermöglicht gleichmäßige ununterbrochene Ganzglasfassaden (siehe z.B. [1]).

Die Verklebung muß die aus Temperatur, Wind und gegebenenfalls Eigengewicht resultierenden Belastungen aufnehmen und ausreichend dauerhaft gegen physikalische, chemische und biologische Einflüsse sein. Außerdem müssen die Anforderungen des Brandschutzes erfüllt werden.

Die Bemessung der Klebefuge eines Structural-Glazing-Elementes erfolgt bisher mit einem vereinfachten Ansatz für die Aufteilung der aus Windsog resultierenden Flächenlast auf die Auflagerlinie: Gemäß der Skizze (Bild 1.1) wird von einer trapezförmigen Lastverteilung ausgegangen [2], [3]. Damit errechnet sich die maximale Beanspruchung σ der Klebefuge zu

$$\bar{\sigma} = q_a \cdot a_x / d_r \quad (1)$$

mit q_a : äußere Flächenlast,
 a_x : kurze Halbachse des Structural-Glazing-Elementes,
 b_r : Breite der Klebefuge ('bite'),

für die der Silikon-Kleber mit einer zulässigen Spannung von $\bar{\sigma}=0,14\text{N/mm}^2$ bemessen wird.

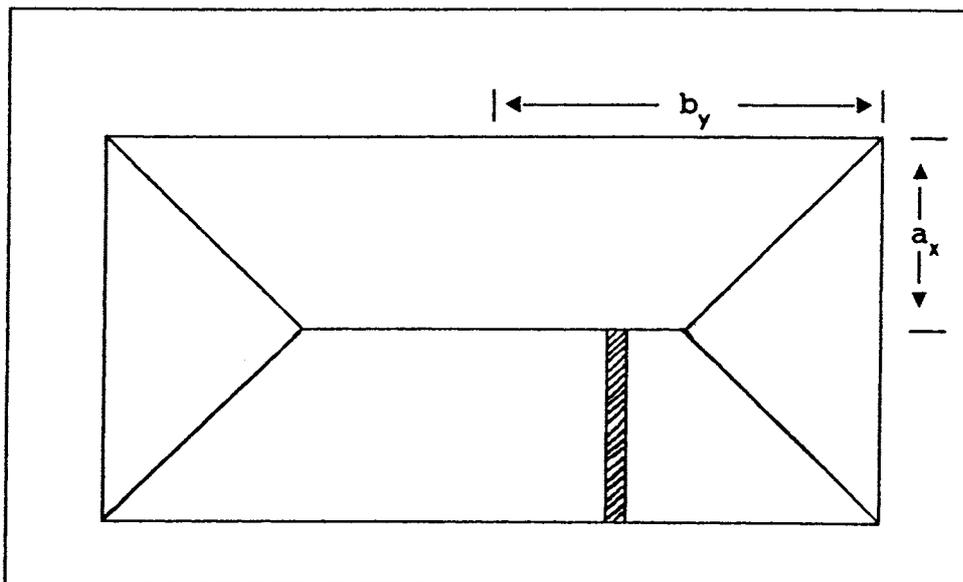


Bild 1.1. Aufteilung der Flächenlast auf die Auflagerlinie

- 6 -

Diese Vorgehensweise berücksichtigt allerdings nicht

- die aus der Plattentragwirkung resultierende nichtlineare Verteilung der Beanspruchung entlang der Auflagerlinie mit einem Vorzeichenwechsel in den Eckbereichen,
- die endliche Höhe und Breite der Fuge und der damit verbundenen Aufnahme von Randbiegemomenten,
- den Einfluß von konstruktiven Elementen (endliche Rahmensteifigkeit, Abstandshalter),
- die geometrischen Abmessungen und Biegesteifigkeit der Glasplatte,
- die spezifischen Materialeigenschaften des Silikonklebers.

Ziel des Forschungsvorhabens war, die Beanspruchungen in der Klebefuge des Structural-Glazing-Elementes mit Hilfe von Finite-Elemente-Rechnungen genauer zu ermitteln, wobei die aus Detailversuchen ermittelten Materialkennwerte des Silikonklebers zugrundegelegt werden sollten. Es sollte berücksichtigt werden, daß der Silikonkleber eine flächige Ausdehnung (keine ideale Linienlagerung) und der Randträger eine endliche Biegesteifigkeit besitzt, sowie daß sich der Abstandshalter zwischen Glasscheibe und Metallrahmen an der Lastabtragung beteiligt. Die Ergebnisse der Finite-Elemente-Rechnungen sollten anhand von Bauteilversuchen überprüft und gegebenenfalls kalibriert werden.

2. DERZEITIGER KENNTNISSTAND

Die beschriebene Problemstellung kann in zwei Bereiche unterteilt werden. Der erste Bereich umfaßt die reine Statik der elastisch gelagerten Platte. Der zweite Bereich betrifft die Materialbeschreibung von Silikonklebern und damit kritische Werte der Spannungen oder Dehnungen.

Der Werkstoff Silikonkautschuk ist eine organische Polymer-substanz, die aus Silizium-Sauerstoff-Verbindungen als molekülverknüpfende Elemente und Kohlenwasserstoffgruppen als Substituenten aufgebaut ist [4], [5], [6]. Die mechanischen Eigenschaften der Stoffe sind durch den chemischen Aufbau (Vernetzung, Substituenten) bestimmt. Silikonkautschuk zeigt die typischen Merkmale, die unter dem Begriff Gummielastizität zusammengefaßt werden: geringer Elastizitätsmodul, nahezu Inkompressibilität und eine ausgeprägte nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Beziehung bei sehr großen elastischen Dehnungen. Außerdem treten in hohem Maße zeitabhängige Prozesse (Kriechen) auf [7], [8].

Bei der makroskopischen Beschreibung des mechanischen Verhaltens von gummielastischen Werkstoffen muß von finiten Deformationen ausgegangen werden. Die freie Energie wird in den Invarianten des Verzerrungstensors formuliert [9]. Unter der Voraussetzung, daß das Volumen des Stoffes während einer Dehnung konstant bleibt, erhält man das Materialgesetz von

- 7 -

MOONEY und RIVLIN, das die experimentellen Ergebnisse in einem gewissen Bereich phänomenologisch gut beschreibt [10], [11].

Diese spezifischen Materialeigenschaften gehen in die bisherige Bemessungsvorschrift nur sehr pauschal durch einen zulässigen maximalen Spannungswert von $0,14 \text{ N/mm}^2$ ein. Diese Vereinfachung wird den komplexen Versagensvorgängen in elastomeren Werkstoffen [12] nicht gerecht. Bei der Bestimmung von Werkstoffkennwerten, Bruchlasten bzw. Bruchdehnungen ist insbesondere ein signifikanter Einfluß der Belastungsart [13] und der Probekörpergeometrie [14] gegeben.

Der Einfluß der nichtlinearen Plattentragwirkung auf die Spannungsverteilung in der Klebefuge eines Structural-Glazing-Elementes wird in [15] und [16] mit Hilfe eines numerischen Modells untersucht, wobei die Klebefuge als Linienlagerung mit elastischen Federelementen modelliert wurde. Hierbei wurde festgestellt, daß bei der querbelasteten elastisch gelagerten Platte die Reaktion in den Ecken entgegen der äußeren Last gerichtet ist. Bei höheren Lasten tritt die maximale Zugspannung in der Klebefuge als Folge der nichtlinearen Plattentragwirkung in der Nähe der Ecken auf.

Den Vorzeichenwechsel in den Eckbereichen und die Abhängigkeit der Spannungsverteilung in der Klebefuge von der Steifigkeit des Randträgers zeigten auch die an der FMPA durchgeführten Tastversuche mit großformatigen Scheiben.

3. VORUNTERSUCHUNGEN

3.1 Das Finite-Elemente-Modell

3.1.1 Modellierung der elastisch gelagerten Platte

Die Finite-Elemente-Rechnungen wurden mit dem Programm ANSYS PC Rev.4.4A (Wavefront 500) durchgeführt. Bei der Modellierung des Structural-Glazing-Elementes genügt es aufgrund der Symmetrie eine Viertelsplatte zu betrachten und entsprechende Symmetrierandbedingungen vorzugeben. Der Ursprung des Koordinatensystems wurde in die Mitte der Plattenunterseite gelegt, so daß die z-Achse normal zur Plattenmittenfläche und die x-Achse parallel zur kurzen Halbachse der Platte (Bild 3.1) orientiert ist.

Bei den Rechnungen wurden als Standardmaße die unten angegebenen Abmessungen gewählt:

Halbe Kantenlänge a_x	=	800mm	
Halbe Kantenlänge b_y	=	1200mm	
Plattendicke h_z	=	10mm	(Geometrie der Platte)
Höhe der Klebefuge h_r	=	10mm	
Breite der Klebefuge b_r	=	20mm	(Geometrie der Fuge)

Da sich Volumenelemente in ANSYS Rev.4.4A nicht ohne weiteres exzentrisch an Plattenelemente anbinden lassen, wurde sowohl zur Elementierung der Platte als auch der Klebefuge das dreidimensionale Volumenelement STIF45 [17] gewählt, 8 Knoten und drei Freiheitsgrade je Knoten besitzt.

Für den Fall der gelenkig gelagerten Platte ergibt der Vergleich mit der analytischen Lösung der Plattengleichung [18] und mit numerischen Lösungen der VON KARMAN'SCHEN Differentialgleichungen [18] eine sehr gute Übereinstimmung bei Modellierung mit Plattenelementen oder mit Volumenelementen.

Bei großen Dehnungen und nichtlinearen Materialverhalten ist für die Klebefuge das hyperelastische Volumenelement STIF86 [17] zu verwenden, das wie das Element STIF45 8 Knoten und drei Freiheitsgrade je Knoten besitzt und speziell Behandlung von inkompressiblen Werkstoffen geeignet ist.

Bei Ausnutzung der verfügbaren Wavefront von 500 und Verwendung von regulären rechtwinkligen Elementen ergibt sich bei den oben genannten Abmessungen die maximale Netzdichte in der Fuge zu 4x4 Elementen über den Fugenquerschnitt und 16 Elementen längs der kurzen Plattenkante (Bild 3.2).

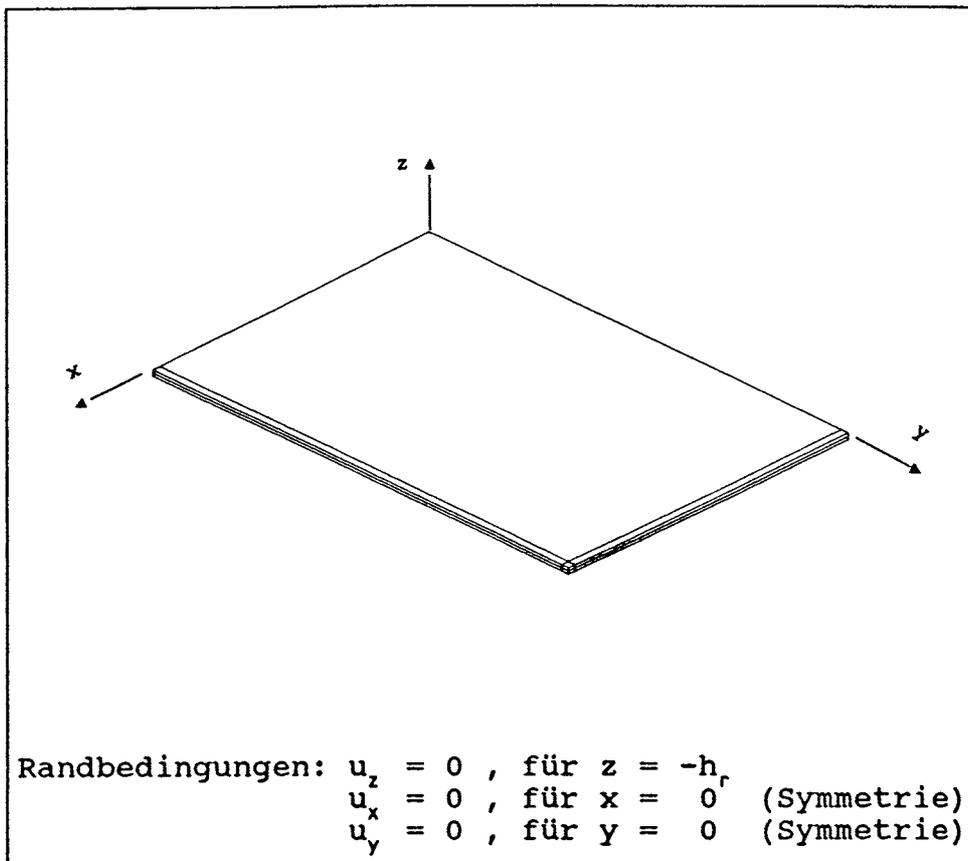


Bild 3.1. Modellierung der elastisch gelagerten Platte

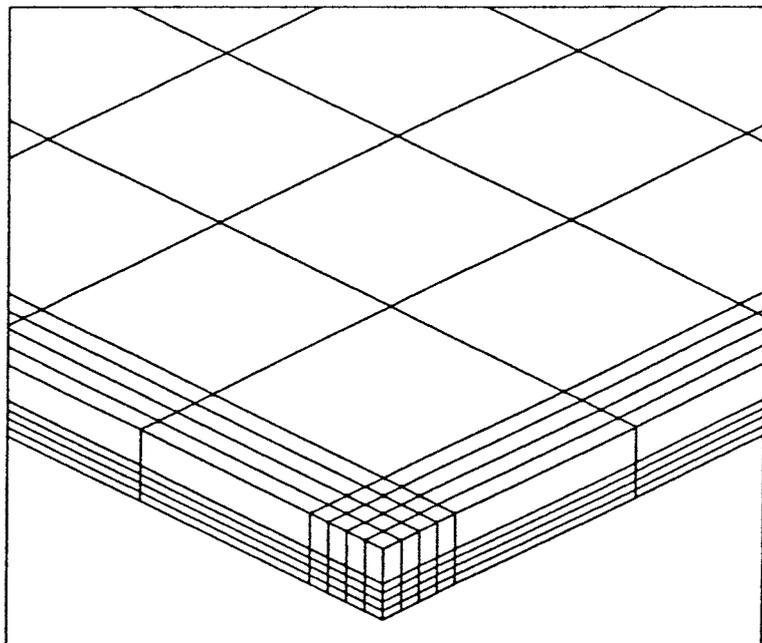


Bild 3.2. Modellierung der Klebefuge mit dreidimensionalen Volumenelementen STIF45

3.1.2 Modellierung der Rahmenunterkonstruktion

Zur Modellierung einer Unterkonstruktion mit endlicher Steifigkeit wurden ebenfalls Volumenelemente STIF45 verwendet (Bild 3.3), die direkt an die Klebefuge angeschlossen wurden. Durch die Abmessungen (Höhe h_a und Breite b_y) und die Materialeigenschaft (Elastizitätsmodul) wird die Biegesteifigkeit der Unterkonstruktion bestimmt. Die Randbedingungen wurden so angesetzt, daß sich die Unterkonstruktion an der langen Seite der Platte verformen kann. Im Bereich der kurzen Seite ($0 \leq x \leq 800\text{mm}$ und $1180\text{mm} \leq y \leq 1200\text{mm}$) wurde die Verformung $u_x = u_y = u_z = 0$ vorgegeben.

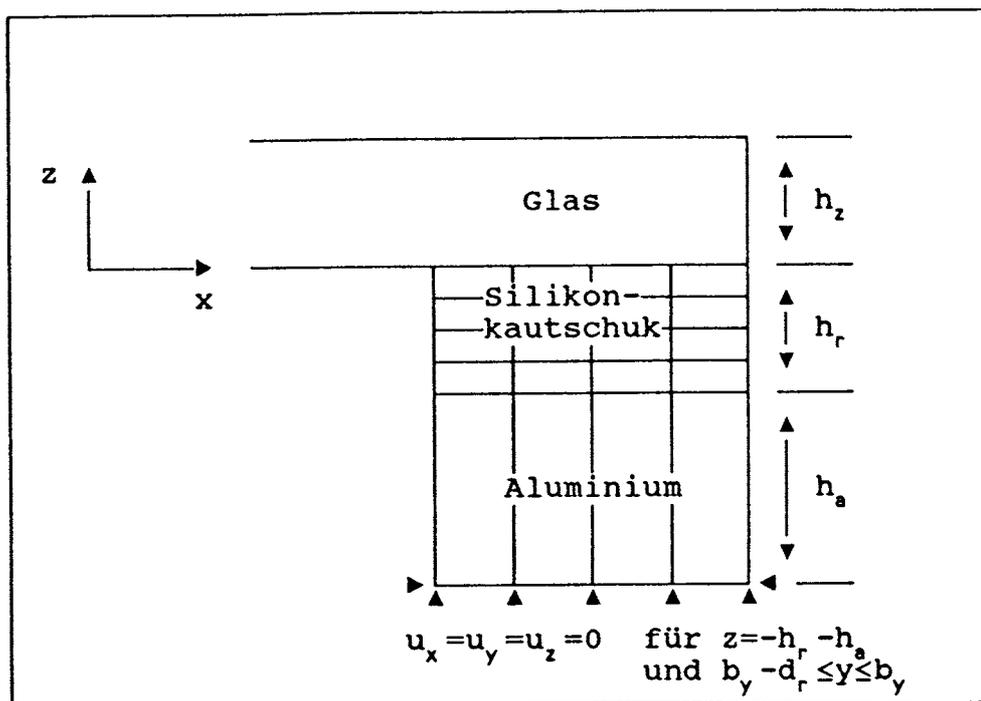


Bild.3.3. Modellierung der Rahmenunterkonstruktion des Structural-Glazing-Elementes

3.1.3 Modellierung des Abstandshalters

Der bei Structural-Glazing Elementen aus fertigungstechnischen Gründen zwischen Scheibe und Rahmen längs der Klebefuge eingelegte Abstandshalter besteht wie die Fuge selbst aus gummielastischem Material. Dieser Abstandshalter schließt direkt an die Klebefuge an, ist aber nicht mit der Glasscheibe verklebt, so daß bei Belastung der Scheibe vom Abstandshalter nur Druck-, aber keine Zugkräfte aufgenommen werden können.

Um dieses Verhalten zu simulieren, wurden in dem beschriebenen FE-Modell nichtlineare Stabelemente STIF10 [17] zusätzlich an der inneren Berandung der Fuge eingebracht (Bild 3.4). Die Geometrie des Abstandshalters und ins-

besondere die durch den Abstandshalter gegebene Verformungsbehinderung der Klebefuge wird dadurch allerdings nicht erfaßt.

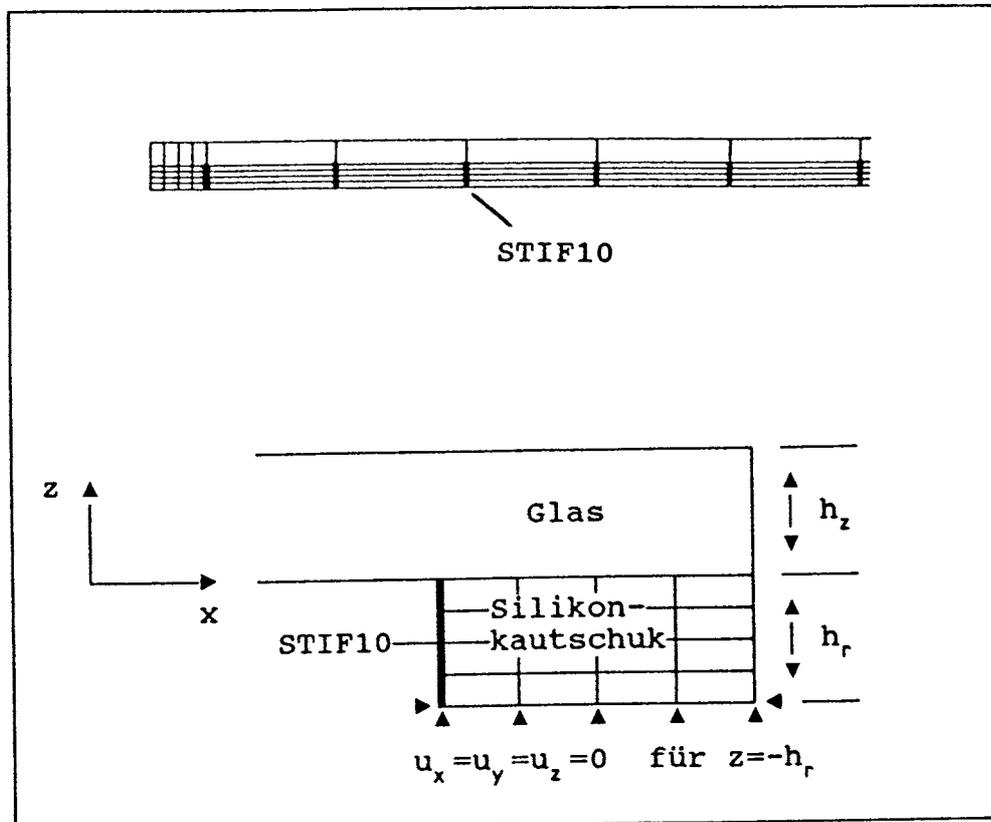


Bild 3.4. Modellierung des Abstandshalters am Structural-Glazing-Element mit nichtlinearen Balkenelementen STIF10

3.2 Das Materialmodell

3.2.1 Vorgespanntes Glas

Vorgespanntes Glas verhält sich linear elastisch. Die Elastizitätsmoduln der Gläser liegen je nach chemischer Zusammensetzung und Herstellungsprozess im Bereich zwischen $6,3 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$ und $9,2 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$ (siehe z.B. [20]). Die Querkontraktionszahl wird mit $\nu_g = 0,22$ angegeben. Bei den folgenden Finite-Elemente-Berechnungen wurden die Werte $E_g = 6,8 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$ und $\nu_g = 0,22$ zugrundegelegt.

3.2.2 Silikonkautschuk

Aus Zug-, Druck- und Scherversuchen lagen Last-Verschiebungskurven vor, die zur Bestimmung der Materialparameter herangezogen werden konnten. Die in diesen Detailversuchen verwendeten Probekörper bestanden aus einer Glasplatte und

- 12 -

einer Aluminiumplatte mit den Abmessungen $80 \cdot 50 \cdot 10 \text{mm}^3$, die durch zwei Klebefugen (Abmessungen $20 \cdot 50 \cdot 10 \text{mm}^3$) verbunden waren (Bild 3.5). Außerdem waren Abstandshalter vorhanden. Der Aufbau entsprach somit bis auf die Abmessung der Klebefuge in Längsrichtung dem Aufbau eines Structural-Glazing-Elementes.

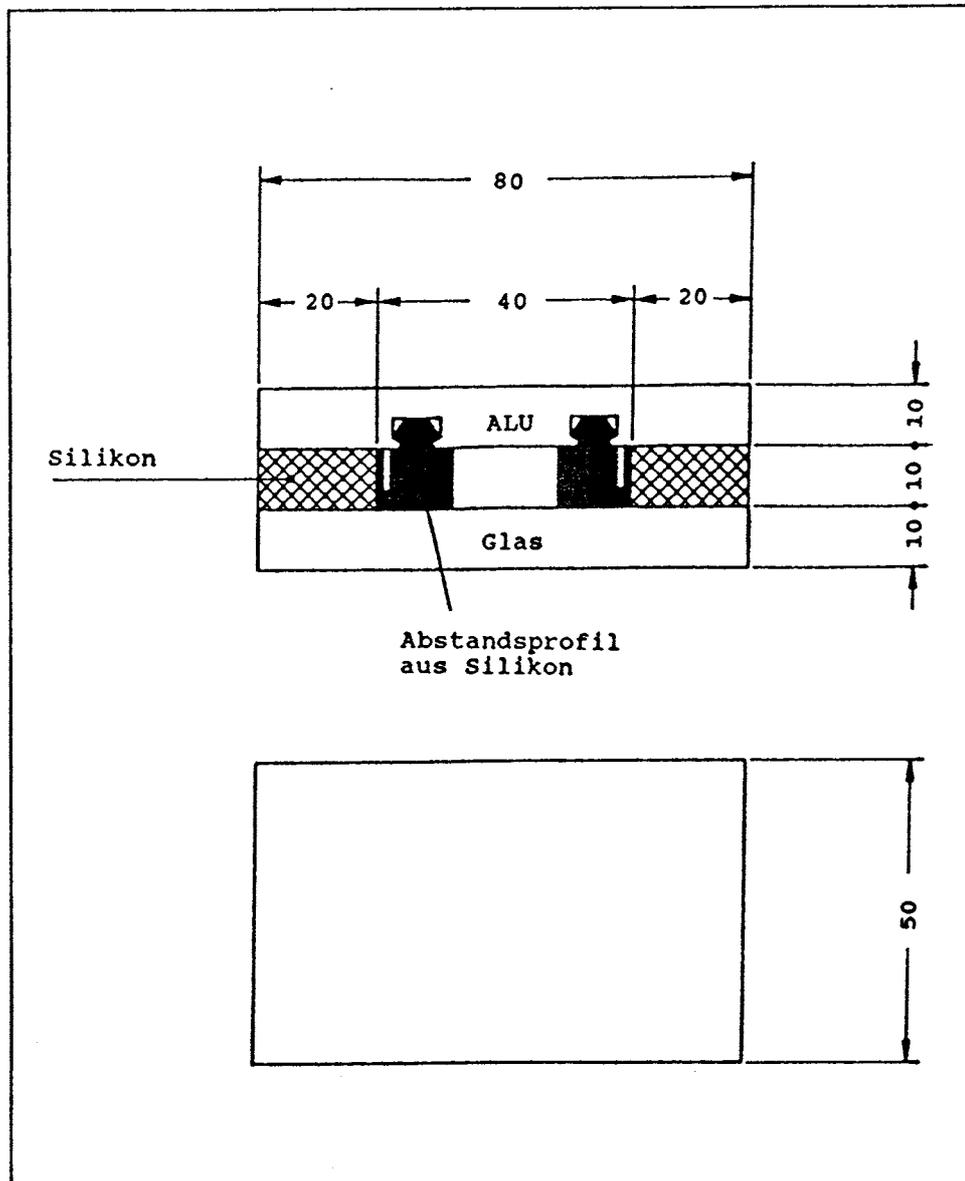


Bild 3.5. Probekörpergeometrie
(Detailversuche)

In den Detailversuchen wurden die äußere Last und die Verschiebung gemessen. Die Diagramme in Bild 3.6 zeigen die Last-Verschiebungs-Kurven im reversiblen Bereich. Die Druckversuche wurden mit und nach Entfernen des Abstandshalters durchgeführt.

Bei kleinen Dehnungen ($\epsilon < 5\%$) liegt der Tangentenmodul bei 5N/mm^2 . Durch Mitwirkung des Abstandshalters erhöht sich der Tangentenmodul im Druckbereich auf 10N/mm^2 . Bei großen Dehnungen ($\epsilon > 5\%$) zeigt die Last-Verschiebungskurve einen nicht-linearen Verlauf. Die Bruchspannung, bezogen auf den Ausgangsquerschnitt, liegt bei ca. $1,1\text{N/mm}^2$.

Im Bereich kleiner Dehnungen, kann das Materialverhalten näherungsweise als linear elastisch angenommen werden. Es genügt die Angabe zweier elastischer Konstanten, z.B. des Elastizitätsmoduls E und der Querkontraktionszahl ν .

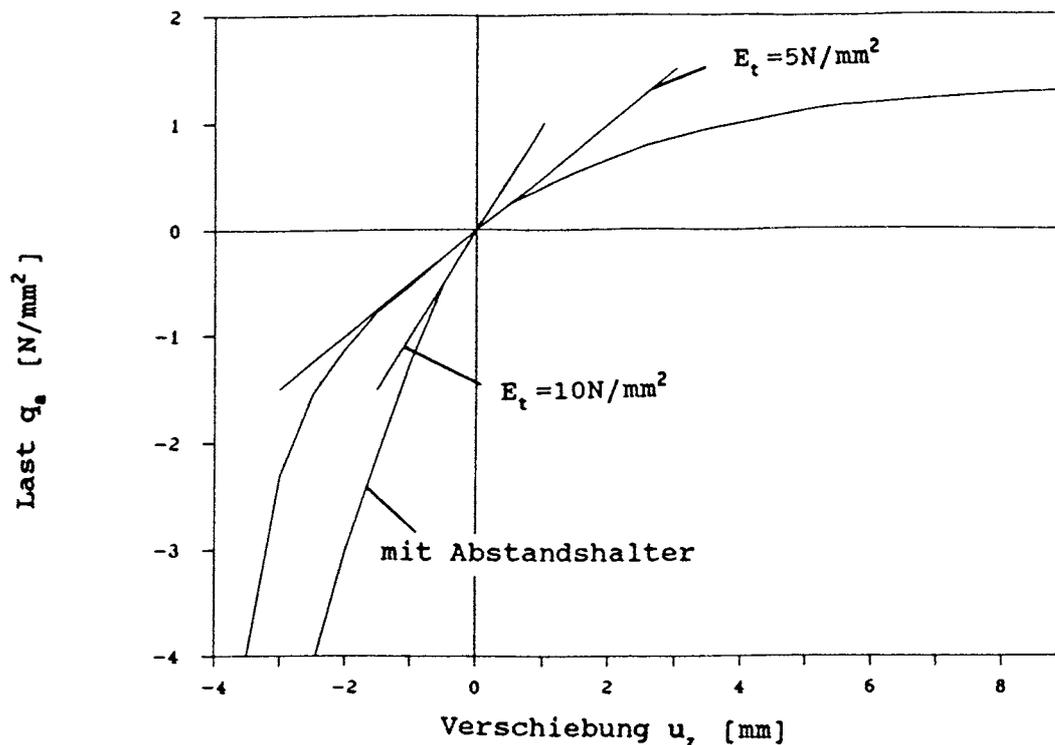


Bild 3.6. Gemessene Last-Verschiebungskurven bei einachsiger Zug und Druck mit und ohne Abstandshalter (Detailversuche)

Bei einem Material mit hoher Querkontraktionszahl wird der im einachsigen Zugversuch aus Last-Verschiebungs-Diagrammen ermittelte Tangentenmodul E_t sehr stark durch die Art des Probekörpers und die Probekörpergeometrie beeinflusst. Während bei einem langen, stabförmigen Probekörper ein kleiner, mittig liegender Beobachtungsbereich als ungestört angesehen werden kann, wird bei dem verwendeten Probekörper nach Bild 3.5 die Dehnungsbehinderung an den Grenzflächen zu den Substraten zu Spannungen quer zur Belastungsrichtung und zu einer höheren Verformungssteifigkeit führen. Der aus diesen Last-Verschiebungs-Diagrammen abgeleitete Tangentenmodul E_t weicht daher deutlich vom dem eigentlichen gesuchten Materialkennwert Elastizitätsmodul ab.

- 14 -

Beim reinen Scherversuch tritt dieses Problem jedoch nicht auf, da das Volumen der Probe unabhängig von der Querkontraktionszahl konstant bleibt. Der Schubmodul kann hier aus der Tangentensteigung der Last-Verschiebungskurve bei kleinen Scherwinkeln ermittelt werden. In dieser Weise wurde der Schubmodul zu $G_s = 0,74 \text{ N/mm}^2$ bestimmt.

Die Gleichung (2) stellt eine Verknüpfung zwischen den linear elastischen Materialkonstanten für das isotrope Kontinuum dar.

$$E = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot G \quad (2)$$

Diese Beziehung ist gültig für den Bereich $0 \leq \nu \leq 0,5$. Mit Hilfe von (2) kann bei bekannten Werten der Querkontraktionszahl ν und des Schubmoduls G der Elastizitätsmodul berechnet werden.

Bei ideal inkompressiblem Verhalten, d.h. $\nu = 0,5$ errechnet sich mit $G_s = 0,74 \text{ N/mm}^2$ der Elastizitätsmodul zu $E_s = 2,22 \text{ N/mm}^2$.

Bei großen Dehnungen muß die nichtlineare Kontinuumsmechanik angewandt werden. Das zur Beschreibung von inkompressiblen Werkstoffen geeignete Materialgesetz ist das phänomenologische MOONEY-RIVLIN-Gesetz, das auch in dem Finite Elemente-Programm ANSYS in Verbindung mit dem hyperelastischen Volumenelement STIF86 verfügbar ist.

Die nichtlinearen Materialparameter A und B (MOONEY-RIVLIN-Konstanten) können experimentell aus einem einachsigen Spannungs-Dehnungs Versuch an schlanken Probekörpern ermittelt werden [7], [9], [10]. Bei kleinen Dehnungen ist die Summe der MOONEY-RIVLIN-Konstanten A und B proportional zum Elastizitätsmodul E bzw. zum Schubmodul G , wobei eine Querkontraktionszahl von $\nu = 0,5$ vorausgesetzt wird.

3.2.2.1 Kleine Dehnungen

Bei der Beschreibung des Materialverhaltens von gummiartigen Werkstoffen wird von Inkompressibilität ausgegangen. Da die Eingabe von $\nu = 0,5$ bei der FE-Rechnung zu einer singulären Steifigkeitsmatrix führt, muß allerdings ein Wert $\nu < 0,5$ gewählt werden. Die Nachrechnung von Zug- und Druckversuchen mit der Finite-Elemente-Methode zeigt außerdem, daß bei ansteigender Querkontraktionszahl die Elementierung verfeinert werden muß.

Der Einfluß der Elementierung wurde für verschiedene Werte der Querkontraktionszahl im Bereich zwischen 0,00 und 0,49 untersucht. Beim querbelasteten Structural-Glazing-Element ist die Belastung in der Klebefuge im wesentlichen durch Zug- und Druckkräfte in Richtung der äußeren Last gegeben. Aus diesem Grund wurde der Tangentenmodul der experimen-

tellen Last-Verschiebungskurve im Zug- und Druckversuch vorgegeben und der Elastizitätsmodul in Abhängigkeit der Querkontraktionszahl und der Elementierung angepaßt. Damit wird jedoch ein gewisser Fehler im der Schubmodul in Kauf genommen, der umso kleiner wird je feiner die Netzeinteilung gewählt wird.

Das Finite-Elemente-Netz zu Nachrechnung der Detailversuche ist in Bild 3.7 dargestellt. Die Elementierung in Fugenlängsrichtung (y-Richtung) kann relativ grob gewählt werden, da bei dem querbelasteten Structural-Glazing-Element in dieser Richtung nur geringe Verschiebungen auftreten.

Bild 3.8 zeigt die verformte Klebefuge bei einer äußeren Zugbelastung von $q_a = 0,001 \text{ N/mm}^2$ (Materialparameter: $\nu_s = 0,47$, $E_s = 2,5 \text{ N/mm}^2$) sowie die Konturlinien der Hauptspannungskomponente SIG_1 auf dem Fugenquerschnitt. Die Spannungsmaxima im Bereich der Ecken, wo der Einfluß der Querdehnungsbehinderung maximal ist, liegen um ca. 35% über dem Nominalwert der Spannung q_a , der sich aus der äußeren Last dividiert durch den Ausgangsquerschnitt des Probekörpers berechnet.

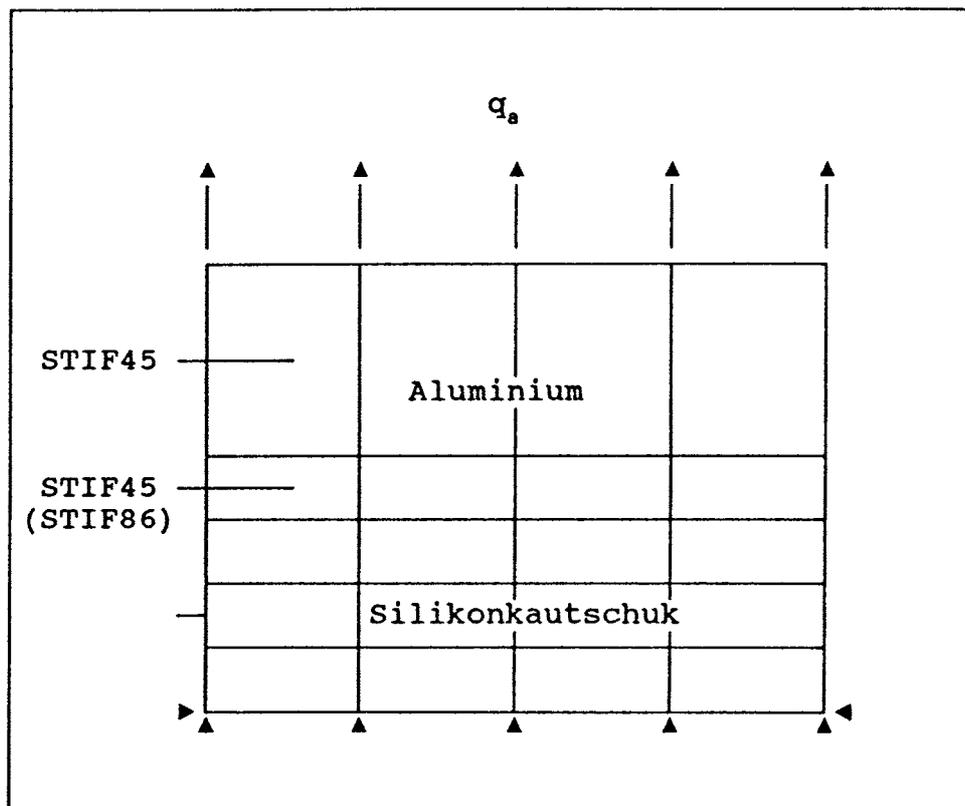


Bild.3.7. Das Finite-Elemente-Modell
(Detailversuch)

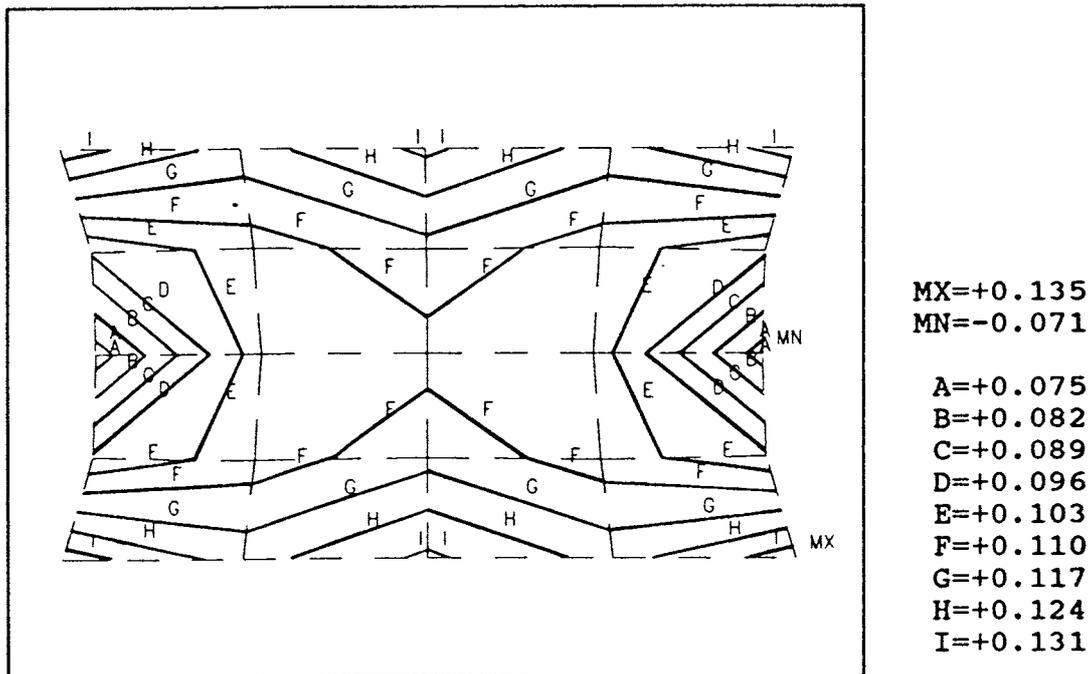


Bild 3.8. FE-Modell, verformte Struktur, Spannungsverteilung (SIG_1)

Die Ergebnisse der Finite-Elemente-Berechnungen sind in der Tabelle 1 zusammengefaßt. Angegeben sind für eine bestimmte Elementierung die Materialparameter ν_s , E_s und nach (1) berechnet G_s , die im einachsigen Zug- oder Druckversuch auf einen Tangentenmodul von $E_t = 5 \text{ N/mm}^2$ führen. Alle in Tabelle 1 angegebenen Parametersätze führen somit im Zug- und Druckversuch auf einen Tangentenmodul von 5 N/mm^2 . Abhängig von der Querkontraktionszahl resultiert aber gegenüber dem Versuchswert $G_s = 0,74 \text{ N/mm}^2$ ein Fehler im der Schubmodul.

Außerdem ist in Tabelle 1 der in ANSYS ausgegebene Wert der relativen Fehlerenergie (ERPC) angegeben. Die relative Fehlerenergie, die aus der Differenz von gemittelten und ungemittelten Werten der Knotenspannungen berechnet und auf die Verzerrungsenergie der Struktur bezogen wird [17], stellt und ein globales Maß für die Güte der Netzeinteilung dar.

Die Elementierung ist mit einer Bezeichnung wie z.B. $(4 \times 4) \times 2$ angegeben und bedeutet in diesem Fall $4 \cdot 4 = 16$ Elemente über dem Fugenquerschnitt (x- und z-Richtung) und 2 Elemente längs zur Fuge (y-Richtung).

Mit Verfeinerung des FE-Netzes konvergiert E_s in Abhängigkeit von ν gegen einen Grenzwert, der als der eigentliche Materialparameter bei kleinen Dehnungen zu betrachten ist. Für eine sehr feine Netzeinteilung $((8 \times 8) \times 16$ Elemente) stellt der Parametersatz $\nu_s = 0,49$ und $E_s = 2,33 \text{ N/mm}^2$ im Bereich

kleiner Dehnungen die eigentlichen Werkstoffkenngrößen dar. Dies ist in guter Übereinstimmung mit dem Wert von G_s , der über die Beziehung (2) aus dem Schubmodul berechnet würde.

	(1x1)x2	(2x2)x2	(3x3)x2	(4x4)x2	(8x8)x16
ν_s	E_s [N/mm ²] G_s [N/mm ²] (ϵ_{RPC} [%])	E_s [N/mm ²] G_s [N/mm ²] (ϵ_{RPC} [%])	E_s [N/mm ²] G_s [N/mm ²] (ϵ_{RPC} [%])	E_s [N/mm ²] G_s [N/mm ²] (ϵ_{RPC} [%])	E_s [N/mm ²] G_s [N/mm ²] (ϵ_{RPC} [%])
0.00	5.00 2.50 (0.00)	5.00 2.50 (0.00)	5.00 2.50 (0.00)	5.00 2.50 (0.00)	5.00 2.50 (0.00)
0.20		4.63 1.93 (11.54)	4.64 1.93 (10.12)	4.65 1.94 (9.12)	
0.30		4.04 1.55 (20.40)	4.12 1.58 (17.28)	4.14 1.59 (5.61)	
0.40		3.20 1.14 (27.25)	3.28 1.17 (27.25)	3.33 1.19 (24.70)	
0.47		2.33 0.79 (44.85)	2.43 0.83 (37.77)	2.50 0.85 (34.32)	2.62 0.89 (9.12)
0.49		2.03 0.68 (49.65)	2.14 0.72 (41.87)	2.21 0.74 (38.04)	2.33 0.78 (21.22)

Tabelle 1.
Einfluß der Elementierung,
Materialparameter E_s , G_s , ν_s ,
Diskretisierungsfehler (ϵ_{RPC})

Da die Geometrie der Probekörper im Detailversuch und der Structural-Glazing-Elemente, mit Ausnahme der Abmessung in Fugenlängsrichtung, gleich sind, wird der Einfluß der Elementierung minimiert, wenn die gleiche Elementierung bei der Berechnung der Detailversuche und der Structural-Glazing-Elemente verwendet wird.

Bei einer Elementierung von 4x4 Elementen über den Fugenquerschnitt stellt der Parametersatz $\nu_s = 0,47$, $E_s = 2,5 \text{ N/mm}^2$ und damit $G_s = 0,85 \text{ N/mm}^2$ eine gute Näherung dar. Zudem sind dann numerische Probleme aufgrund zu kleiner Werte im Nenner der Steifigkeitsmatrix noch gering.

3.2.2.2 Berücksichtigung des Abstandshalters

Der Abstandshalter erhöht bei Einwirkung von Drucklasten die Steifigkeit der Struktur (Bild 3.6). Dies wird durch Einführung von zusätzlichen nichtlinearen Balkenelementen STIF10 (Bild 3.9) erreicht, die nur Druck-, aber keine Zugkräfte aufnehmen können. Die Steifigkeit der Balkenelemente wurde bei der Nachrechnung der Detailversuche und bei den Structural-Glazing-Elementen so gewählt, daß sich bei Druckbelastung ein Tangentenmodul von $E_t = 10\text{N/mm}^2$ ergibt.

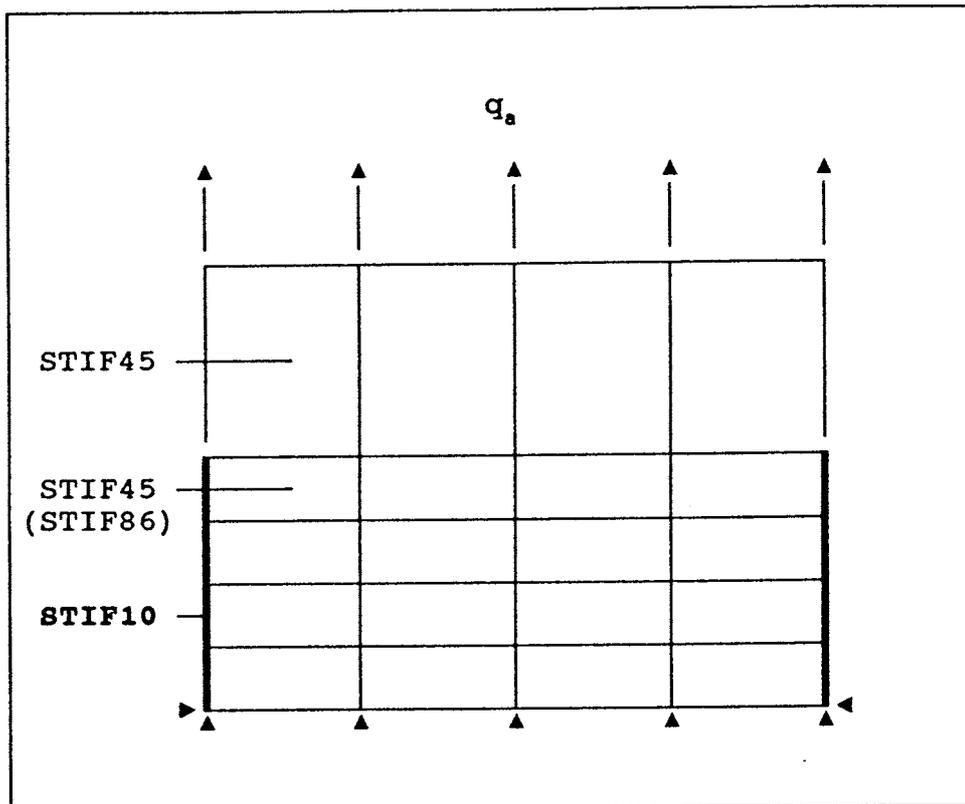


Bild 3.9. Modellierung des Abstandshalters im Detailversuch mit dem nichtlinearen Balkenelement STIF10

3.2.2.3 Große Dehnungen

Das mechanische Verhalten von gummielastischem Werkstoff läßt sich durch den Ansatz von MOONEY und RIVLIN beschreiben. Dieses Materialmodell ist in Verbindung mit dem speziell für diese Fragestellung optimierten hyperelastischen Volumenelement STIF86 in dem FE-Programm ANSYS verfügbar [17]. Die Eingabe erfolgt durch Angabe der Querkontraktionszahl ν sowie zweier weiterer materialspezifischer Parameter A und B (MOONEY-RIVLIN-Konstanten), die experimentell aus einem einachsigen Spannungs-Dehnungs Versuch an schlanken Probekörpern ermittelt werden können [8], [10], [11]. Die

Summe $A + B$ ist proportional zu E bzw. G bei kleinen Dehnungen. Durch den verbleibenden freien Parameter kann die Krümmung der Last-Verschiebungs-Kurve angepaßt werden.

Die Ermittlung der Parameter A und B erfolgte durch Anpassung der gerechneten Last-Verschiebungs-Kurve bei großen Dehnungen an die gemessene Kurve. Vorgegeben wurde der Tangentenmodul $E_t = 5 \text{ N/mm}^2$ bei kleinen Dehnungen und die Querkontraktionszahl $\nu_s = 0,47$ bzw. $\nu_s = 0,49$. Gerechnet wurde mit einer Netzeinteilung in $(4 \times 4) \times 2$ Elemente.

Die beste Übereinstimmung zwischen gemessenen und gerechneten Werten ergab sich bei sehr kleinen Werten des Parameters A . Die gerechneten und gemessenen Last-Verschiebungsdiagramme sind für den Parametersatz $\nu_s = 0,47$, $A = 0,001 \text{ N/mm}^2$, $B = 0,38 \text{ N/mm}^2$ bzw. für $\nu_s = 0,49$, $A = 0,001 \text{ N/mm}^2$, $B = 0,26 \text{ N/mm}^2$ in Bild 3.10 aufgetragen. Der Schubmodul liegt im Fall $\nu_s = 0,47$ bei $0,78 \text{ N/mm}^2$ und im Fall $\nu_s = 0,49$ bei $0,53 \text{ N/mm}^2$.

Bei einer sehr feinen Netzeinteilung von $(8 \times 8) \times 16$ Elementen erhält man mit den Parametern $\nu_s = 0,49$, $A = 0,0013 \text{ N/mm}^2$, $B = 0,34 \text{ N/mm}^2$ eine gute Übereinstimmung zwischen gerechneter und gemessener Last-Verschiebungs-Kurve.

Die maximale Zugspannung SIG_1 hängt, wie in Bild 3.11 dargestellt, von der Wahl der Materialparameter A , B , ν_s ab. Die Werte von SIG_1 liegen beträchtlich über der Nominalspannung q_a , die sich aus der äußeren Last dividiert durch die Ausgangsquerschnittsfläche berechnet.

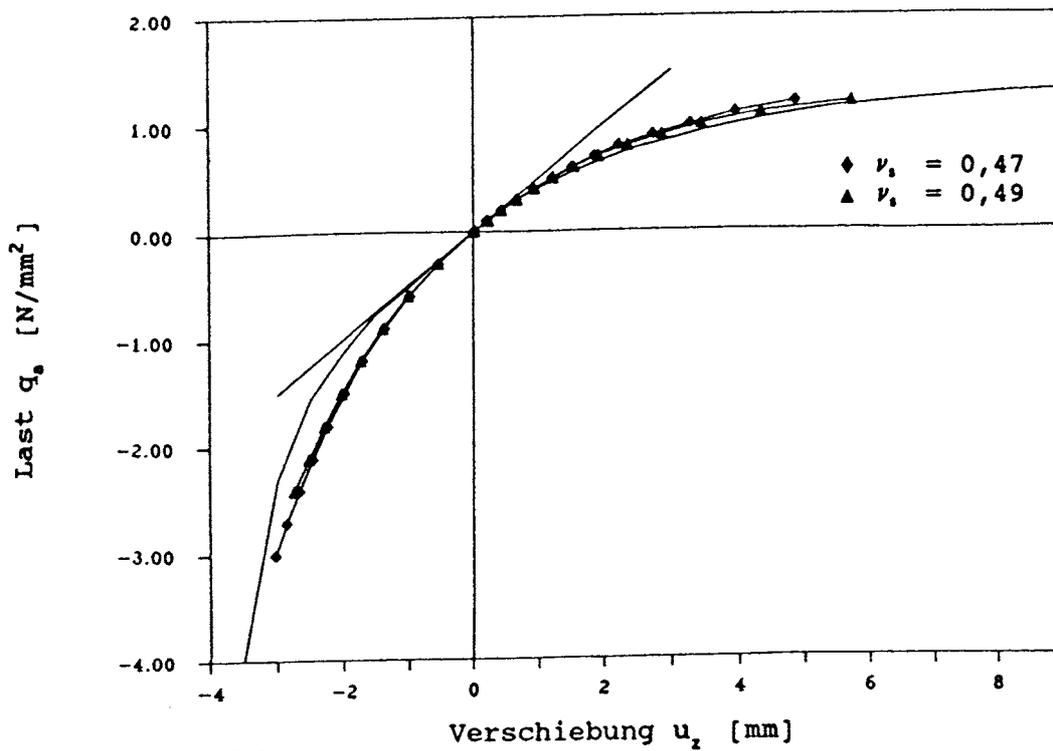


Bild 3.10. Gerechnete und gemessene Last-Verschiebungs Diagramme

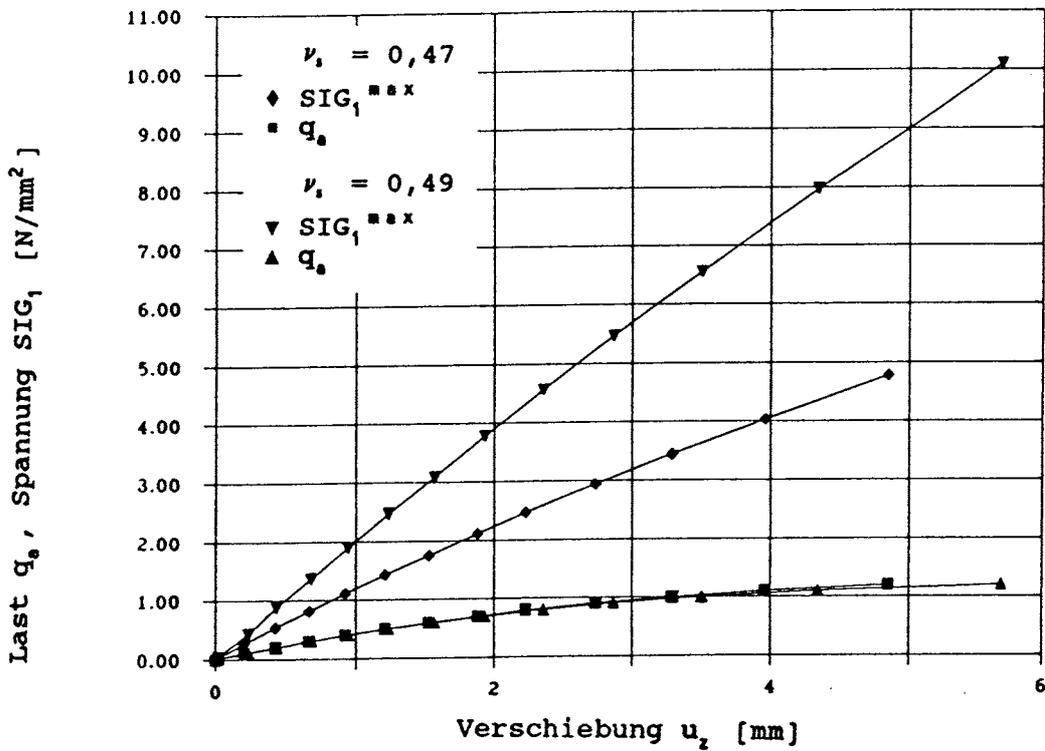


Bild 3.11. Gerechnete Last-Verschiebungs Diagramme, Maximum der Hauptspannungskomponente SIG_1

4. ERGEBNISSE DER FINITE-ELEMENTE-BERECHNUNGEN

4.1 Überblick, Rechenannahmen

Die Verklebung der Glasscheibe am Rand mit Silikonkautschuk stellt eine elastische Lagerung dar. Bei Belastung der Scheibe durch Flächenlasten sind am Rand sowohl Verformungen senkrecht zur Plattenebene (out-of-plane) als auch in der Plattenebene (in-plane) möglich. Hinzu kommt außerdem eine Verdrehung der Fuge.

Unter Einwirkung von gleichförmiger Querlast verhält sich das Structural-Glazing-Element geometrisch nichtlinear, d.h. die Steifigkeit der Struktur und die Richtung des Lastvektors ändern sich bei großen Verformungen der Glasscheibe. Außerdem sind nichtlineares Materialverhalten und konstruktive Gegebenheiten, wie der Abstandshalter und die endliche Steifigkeit der Unterkonstruktion zu berücksichtigen.

Um die Einflüsse dieser verschiedenen Faktoren getrennt untersuchen zu können, wurde zunächst der Verformungs- und Spannungszustand der Klebefuge eines Structural-Glazing-Elementes, der sich bei Einwirkung von gleichförmiger Querlast einstellt, anhand eines vereinfachten Modells charakterisiert und dann schrittweise zu einer realistischeren Modellierung übergegangen.

Betrachtet wird ein rechteckiges Structural-Glazing-Element mit den in Abschnitt 2 angegebenen Standardmaßen. Die endliche Steifigkeit der Unterkonstruktion und der Abstandshalter werden zunächst nicht berücksichtigt.

Die Klebefuge wird zunächst mit Volumenelementen STIF45 modelliert. Das Materialverhalten des Glases und des Silikonklebers wird als linear elastisch angenommen, der Einfluß der Querkontraktion wird vernachlässigt, so daß der Elastizitätsmodul gleich dem Tangentenmodul im einachsigen Zugversuch gesetzt werden kann (Abschnitte 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3, 4.2.4).

Die Berechnungen werden für eine äußere Last von $q_s = 0,001 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ kN/m}^2$ durchgeführt. Bei diesem Druck und den gegebenen Abmessungen sind dann die Dehnungen des Klebers noch klein, und die geometrische Nichtlinearität ist noch von geringer Bedeutung. Der Einfluß geometrischer Nichtlinearität wird in Abschnitt 4.2.5 untersucht.

Anhand dieses Modells können grundsätzliche Aussagen zum Verformungs- und Spannungszustand für die Lastfälle Windsog und Winddruck sowie die Einflüsse der konstruktiven Elemente Abstandshalter und Unterkonstruktion gemacht werden.

In einem weiteren Schritt wird dann die hohe Querkontraktionszahl des Klebematerials berücksichtigt, wobei zunächst

ein lineares Materialgesetz ($\nu_s=0,47$ und $E_s=2,5\text{N/mm}^2$, siehe Abschnitt 3.2.2.1) zugrunde gelegt wird und dann mit nichtlinearem Materialgesetz (Modellierung mit dem hyperelastischen Volumenelement STIF86 entsprechend Abschnitt 3.2.2.3) gerechnet wird (Abschnitte 4.2.6 und 4.2.7).

Die Variation der geometrischen Abmessungen der Glasplatte und der Klebefuge wird mit linearem und mit nichtlinearem Materialgesetz im Lastbereich bis $0,005\text{N/mm}^2=5\text{kN/m}^2$ durchgeführt, was ungefähr der doppelten maximalen Gebrauchslast entspricht.

4.2 Der Verformungs- und Spannungszustand der Klebefuge bei Einwirkung gleichförmiger Querlast auf die Platte

4.2.1 Windsog

Die an der Platte angreifenden Zugkräfte werden von der Klebefuge aufgenommen. Aus dem Verformungszustand der Platte resultiert eine ungleichmäßige Spannungsverteilung längs der Klebefuge. Dies wird in [16] gezeigt, wobei die Klebefuge als elastische Linienlagerung mit Federelementen modelliert wurde.

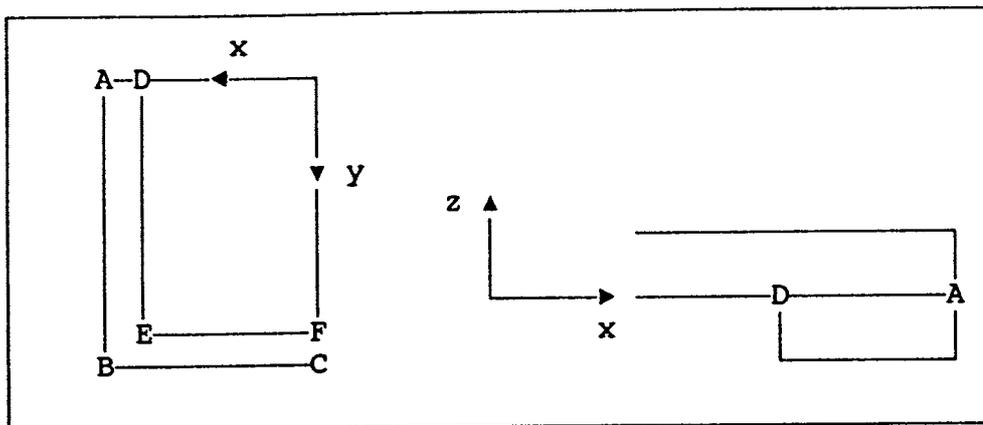


Bild 4.1. Verlauf der Randkoordinate

Geht man zur Modellierung der Klebefuge als Volumen über, dann ergibt sich zusätzlich eine ungleichmäßige Spannungsverteilung über den Fugenquerschnitt. Die Modellierung der Fuge erfolgt zunächst mit nur einem Volumenelement. Die globale Verformung der Klebefuge wird dann durch die Verschiebungskomponenten u_x , u_y , u_z längs der äußeren (a) und der inneren (i) Fugenkante (bezeichnet mit Randkoordinate) an der Kontaktfläche der Klebefuge zur Glasplatte bestimmt. Wie in Bild 4.1 skizziert, verläuft die Randkoordinate entlang der Punkte A, B und C an der äußeren Fugenkante bzw. entlang der Punkte D, E, und F an der inneren Fugenkante. Der Nullpunkt der Randkoordinate wurde in die Ecke (Punkte B bzw. E) gelegt

In Bild 4.2 sind die berechneten Verschiebungskomponenten u_x , u_y , u_z über der Randkoordinate aufgetragen. Die in-plane Verformungen werden im Bereich der Kantenmitten ($x=a_x$, $y=0$ bzw. $x=0$, $y=b_y$) maximal. Die Verdrehung der Klebefuge, bestimmt durch die Differenz der Verschiebungen an der inneren und an der äußeren Kante $\Delta u_z = (u_z^{(i)} - u_z^{(a)})$, ist ebenfalls im Bereich der Kantenmitte maximal. Die mittlere out-of-plane-Verschiebung $\bar{u}_z = (u_z^{(a)} + u_z^{(i)})/2$ variiert stark längs des Fugenrandes und ist im Bereich der Kantenmitten positiv und im Eckbereich negativ, also entgegengesetzt zur Richtung des äußeren Lastvektors.

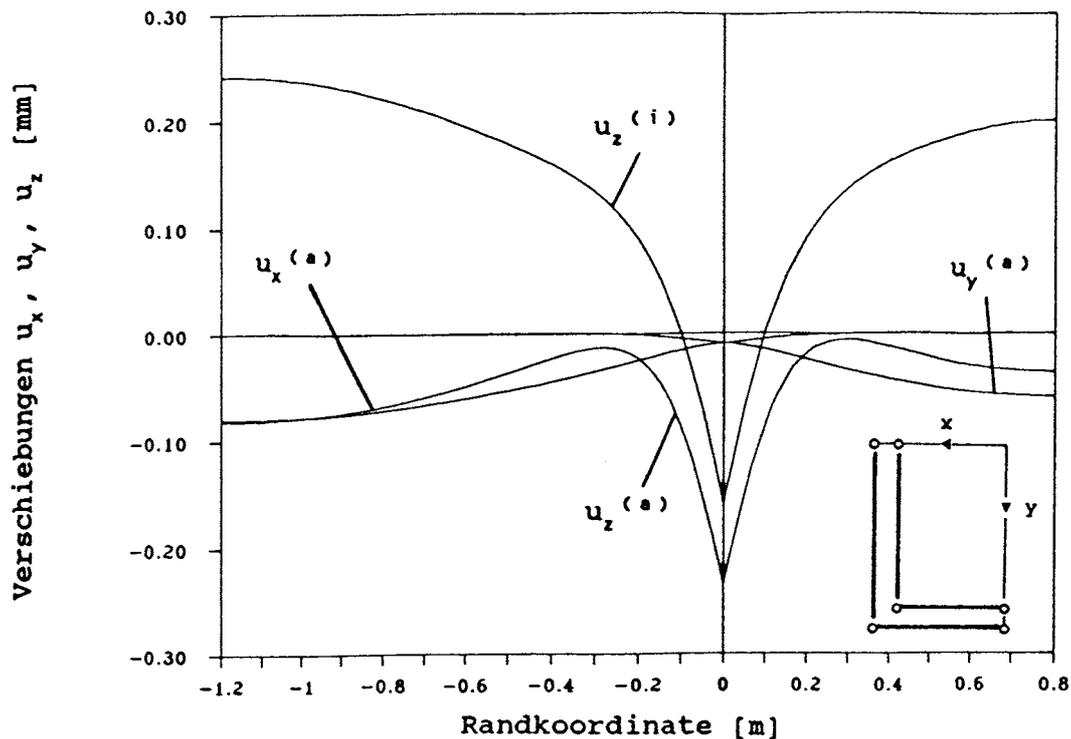


Bild 4.2. Verschiebungen u_x , u_y , u_z längs der äußeren (a) und inneren (i) Kante der Klebefuge

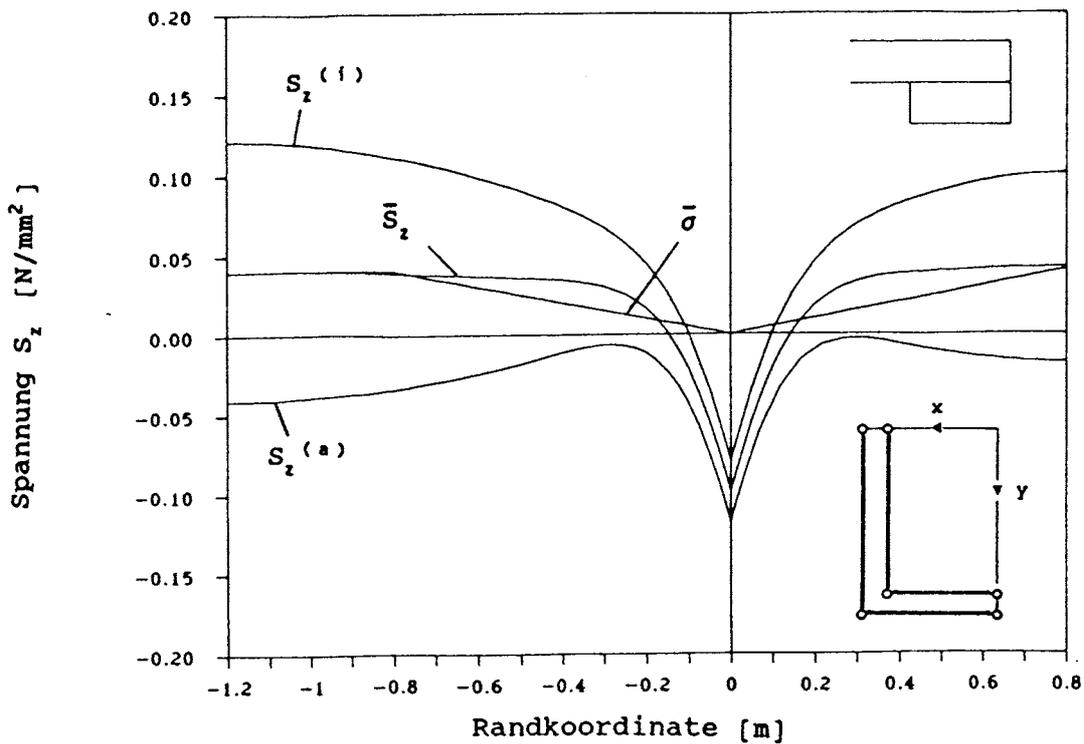


Bild 4.3. Spannungskomponente S_z , Mittelwert \bar{S}_z und $\bar{\sigma}$ nach (1) längs der Kante der Klebefuge

Bei Verwendung von nur einem Element über dem Fugenquerschnitt wird längs der Fuge je ein Spannungswert an der Innenseite ($S_z^{(i)}$) und ein Spannungswert an der Außenseite ($S_z^{(a)}$) berechnet, der einen Mittelwert über die Fugenhöhe darstellt. Entsprechend dem Vorzeichenwechsel u_z -Verschiebungen am Fugenrand resultieren in der Klebefuge im wesentlichen Zugspannungen im Bereich der Seitenmitten der Platte und Druckspannungen im Bereich der Ecke, was bereits auch in [16] gezeigt wurde.

In Bild 4.3 sind $S_z^{(i)}$ und $S_z^{(a)}$ und zusätzlich die über die Fugenbreite gemittelte Spannung $\bar{S}_z = (S_z^{(i)} + S_z^{(a)})/2$ aufgetragen, die sich näherungsweise bei einer Rechnung mit elastischer Linienlagerung ergeben würde. Als eine Folge der Verdrehung der Klebefuge sind die Spannungen an der inneren Fugenkante gegenüber dem gemittelten Wert erhöht und an der äußeren Kante abgesenkt. Der Maximalwert der Spannung S_z an der Innenseite der Kantenmitte (Punkt D) liegt bei diesem Rechenbeispiel um einen Faktor 3 über dem gemittelten Wert \bar{S}_z . Zum Vergleich ist in Bild 4.3 außerdem der Spannungswert $\bar{\sigma}^z$ eingetragen, der sich aus der Bemessungsformel (1) in Abschnitt 1 berechnet.

Die Hauptspannung SIG_1 enthält auch Spannungsanteile, die aus den in-plane-Verschiebungen resultieren. Der Maximalwert von SIG_1 liegt bei $0,133N/mm^2$ und tritt im betrachteten

Lastfall Windsog als Folge einer kombinierten Zug- und Scherbelastung im Punkt D an der Innenseite der Mitte der langen Kante ($x=a_x-d_c$, $y=0$, $z=0$) auf. Die Hauptspannung ist in diesem Fall sowohl in der Richtung als auch im Betrag im wesentlichen durch die Spannungskomponente S_x bestimmt.

Wird das Finite-Elemente-Netz auf 4×4 Elemente über den Fugenquerschnitt verfeinert, dann ändert sich die Steifigkeit bei reiner Druck- und Zugbelastung nicht, jedoch werden die Verformungen und Spannungen auf dem Fugenquerschnitt entsprechend feiner abgebildet (Bild 4.4). Der Maximalwert von SIG_1 erhöht sich dann auf $0,19N/mm^2$. In Bild 4.5 ist der Verlauf der Hauptspannungen $SIG_1^{(i)}$ und $SIG_3^{(s)}$ über der Randkoordinate bei Rechnung mit 1 Element und bei Rechnung mit $4 \cdot 4 = 16$ Elementen aufgetragen.

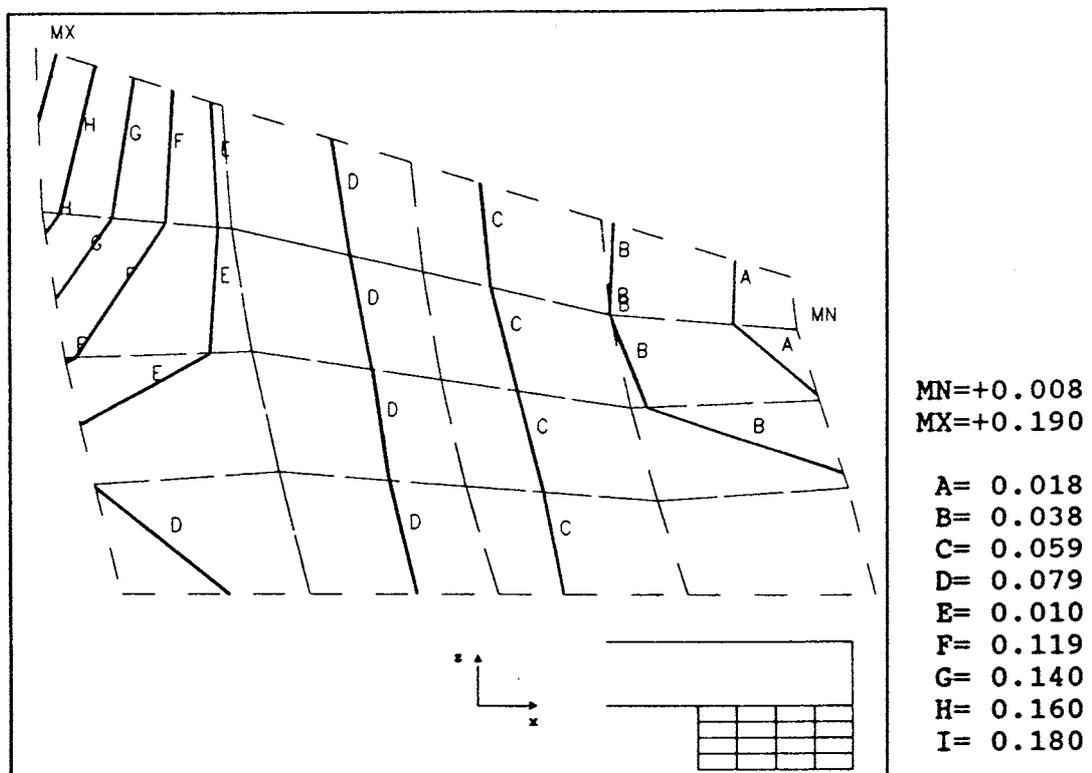


Bild. 4.4 SIG_1 über dem Fugenquerschnitt

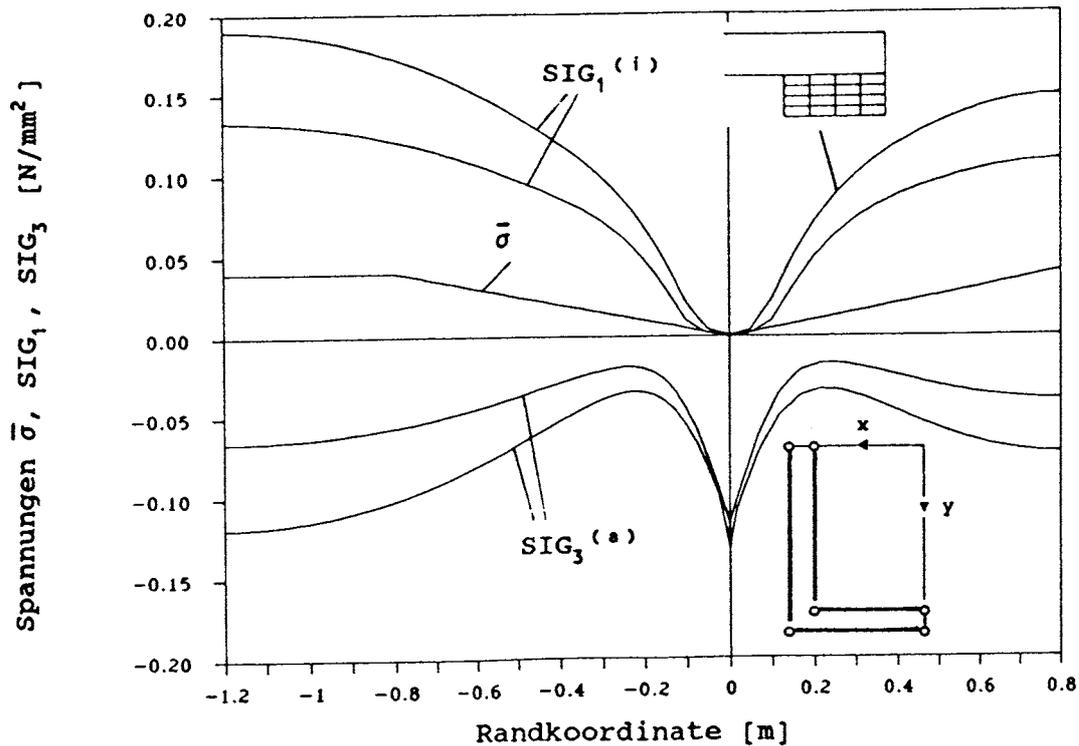


Bild 4.5. Hauptspannungskomponenten $SIG_1^{(i)}$ und $SIG_3^{(a)}$ längs der Kante der Klebefuge

4.2.2 Winddruck

Betrachtet man nur die Verschiebungskomponente u_z , dann führt die Belastung des Structural-Glazing-Elementes mit Winddruck zu einer Umkehrung der Verhältnisse bei Windsog. Das heißt, über die Fugenbreite gemittelt treten negative Werte von u_z im Bereich der Kantenmitten und positive Werte im Eckbereich (Bild 4.6) auf.

Im Vergleich zu dem Lastfall Windsog sind allerdings die in-plane Komponenten entlang des Randes insgesamt geringer, da die Verformung der Glasscheibe und die Verdrehung am Rand in-plane Bewegungen mit entgegengesetztem Vorzeichen erzeugen.

Insbesondere sind aber die in-plane Verformungen dort minimal, wo die maximalen Verschiebungen in z -Richtung auftreten. Das heißt, daß an der Ecke (Punkt B) nicht wie entsprechend im Lastfall Windsog in der Kantenmitte (Punkt D) eine konstruktive Überlagerung von Zug- und Scherbelastung erfolgt. Deshalb liegt der Maximalwert von SIG_1 (Bild 4.7) im Lastfall Winddruck niedriger als der Maximalwert im vergleichbaren Lastfall Windsog.

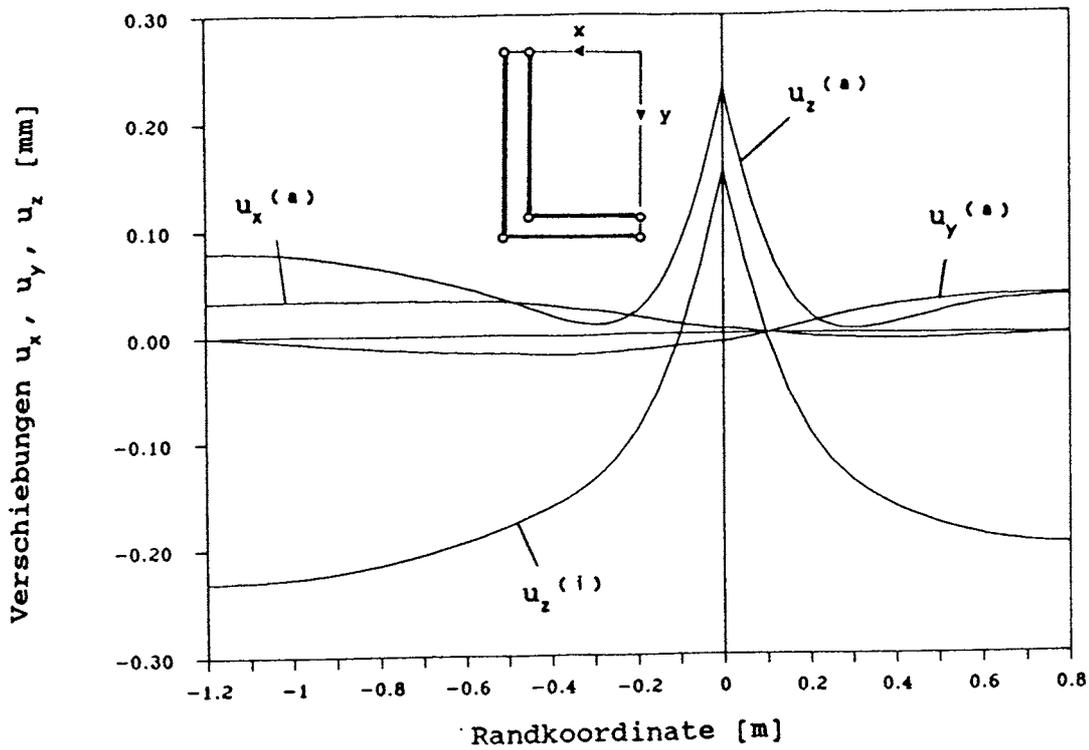


Bild 4.6. Verschiebungskomponenten u_x, u_y, u_z längs der Kante der Klebefuge

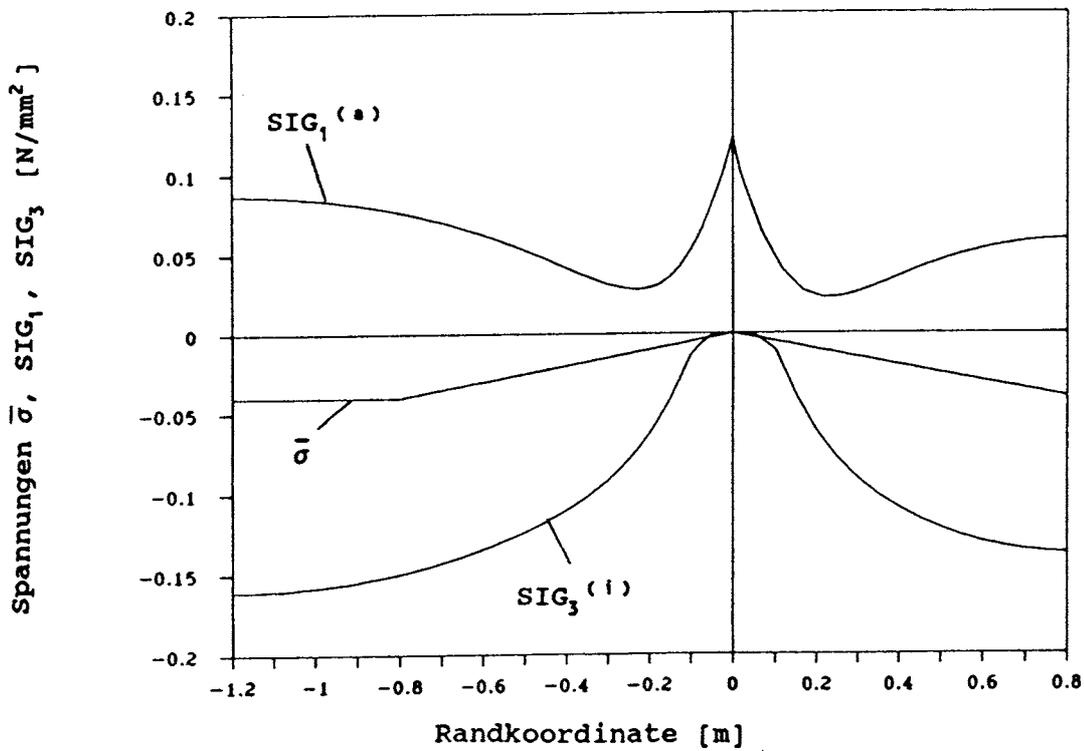


Bild 4.7. Hauptspannungskomponenten $SIG_1^{(a)}, SIG_3^{(i)}$ längs der Kante der Klebefuge

4.2.3 Einfluß des Abstandshalters

Durch zusätzliche nichtlineare Balkenelemente STIF10, die an der inneren Kante der Klebefuge eingebracht wurden und nur Druckkräfte aufnehmen können, wurde die Wirkung des Abstandshalters simuliert. Die Steifigkeit der Balkenelemente wurde so angesetzt, daß im einfachen Druckversuch der resultierende Tangentenmodul $E_t = 10\text{N/mm}^2$ beträgt.

Im Lastfall Windsog nehmen die nichtlinearen Balkenelemente im Bereich der Kantenmitten keine Kräfte auf. Somit bleiben die Verschiebungen und Spannungen in Kantenmitte durch die Balkenelemente fast unbeeinflusst. Negative Werte der Verschiebungskomponente u_z und damit Druckkräfte entstehen im Bereich der Ecken. Die Steifigkeitszunahme durch die Abstandshalter bewirkt, daß die Verformungen in z-Richtung im Eckbereich geringer werden (Bild 4.8). Die in-plane-Verschiebungen werden nicht merklich beeinflusst.

Der Einfluß auf die Spannungsverteilung ist in Bild 4.9 dargestellt. Aufgetragen ist die Hauptspannungskomponente SIG_3 längs der inneren und der äußeren Fugenkante. Aufgrund des Abstandshalters werden im Bereich der Ecke die Druckspannungen abgebaut (Bild 4.10).

Durch den Abstandshalter wird das Maximum der Zugspannung (Komponente SIG_1) im Bereich der Kantenmitte nur unwesentlich beeinflusst. Somit ist im Lastfall Windsog der Einfluß des Abstandshalters auf die Spannungsverteilung in der Fuge als unkritisch zu betrachten.

Die Ergebnisse für den Lastfall Winddruck sind in Bild 4.8 und Bild 4.9 dargestellt. Bedingt durch den Abstandshalter resultiert im Bereich der Kantenmitte eine Hebelwirkung, wodurch sich die Verschiebung in z-Richtung an der äußeren Fugenkante erhöht und dementsprechend die Zugspannung (SIG_1) anwächst. Das Maximum von SIG_1 liegt im Lastfall Winddruck dann nicht mehr in der Ecke (Punkt B), sondern in der Kantenmitte (Punkt A).

Für den Lastfall Winddruck ist somit festzustellen, daß in diesem Modell die maximale Zugspannung in der Fuge aufgrund des Abstandshalters ansteigt und sich deren Ort von der Ecke (Punkt B) zu der Kantenmitte (Punkt A) verschiebt. Der Grund ist die Hebelwirkung des Abstandshalters. Allerdings liegt der Spitzenwert der Zugspannung im Lastfall Winddruck noch deutlich unter dem im Lastfall Windsog. Weiterhin ist zu vermuten, daß die Hebelwirkung abgemindert wird, wenn der Abstandshalter nicht mit Balkenelementen, sondern realistischer mit Volumenelementen modelliert wird. Im folgenden wird nur noch der Lastfall Windsog betrachtet, da dieser nach den bisherigen Resultaten als der kritischere Fall anzusehen ist.

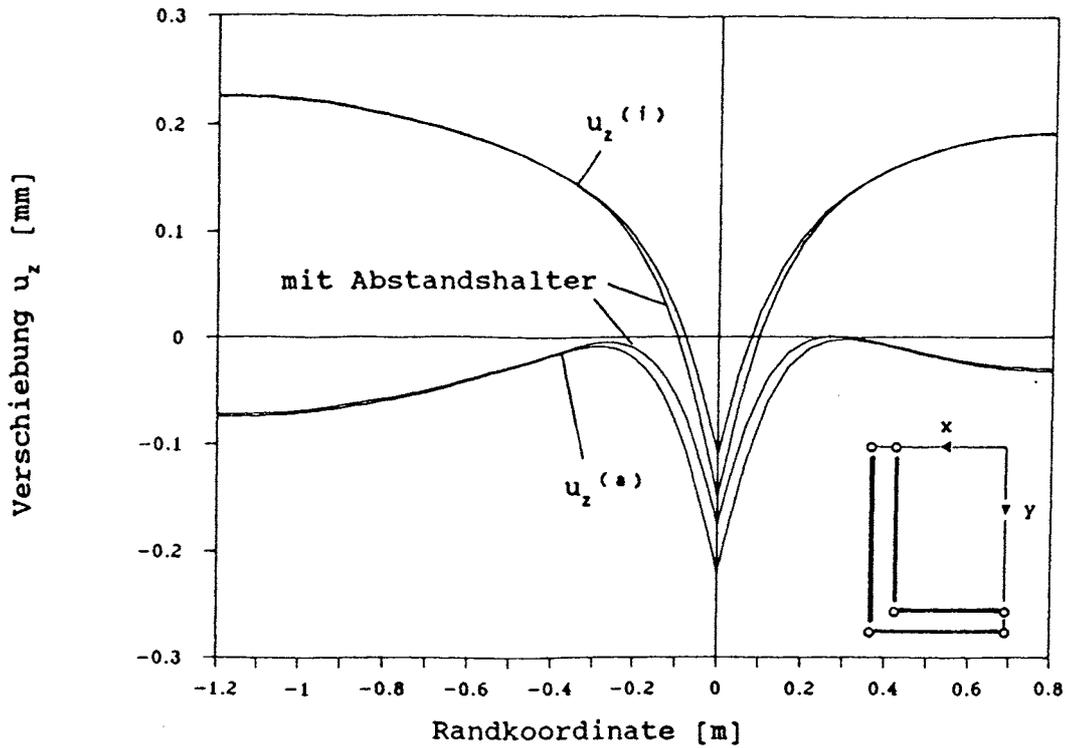


Bild 4.8. u_z längs der Fugenkanten mit und ohne Abstandshalter (Windsog $q_a = 0.001 \text{ N/mm}^2$)

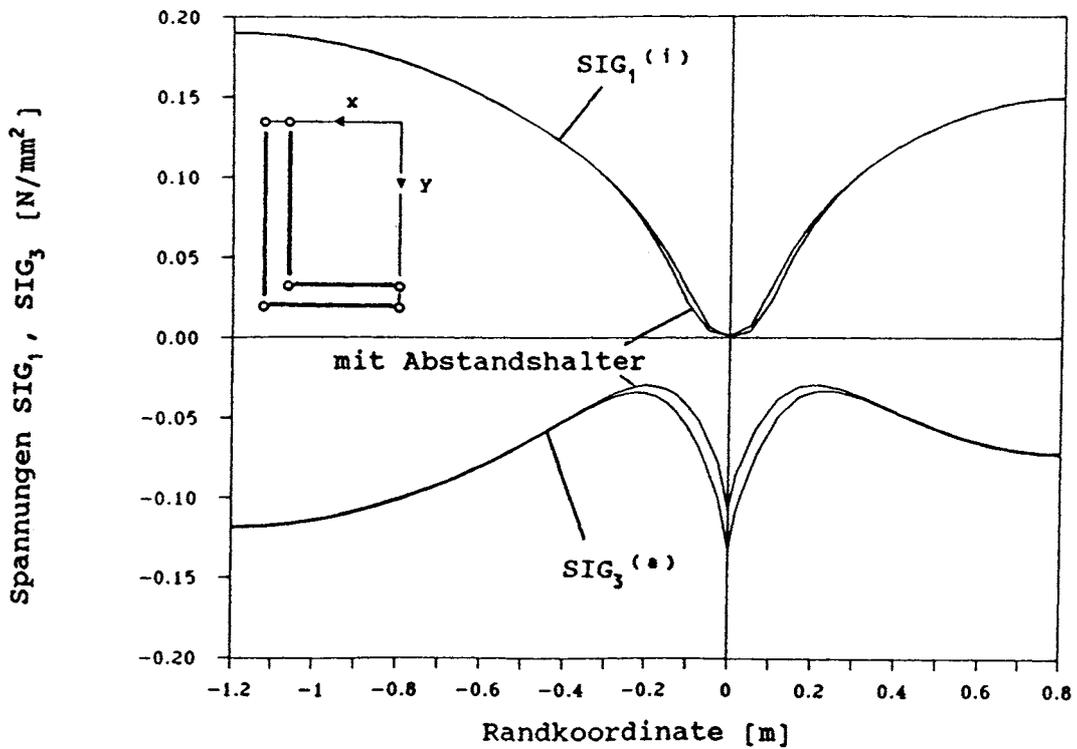


Bild 4.9. $SIG_1^{(i)}$, $SIG_3^{(a)}$ längs der Fugenkanten mit und ohne Abstandshalter (Windsog $q_a = 0.001 \text{ N/mm}^2$)

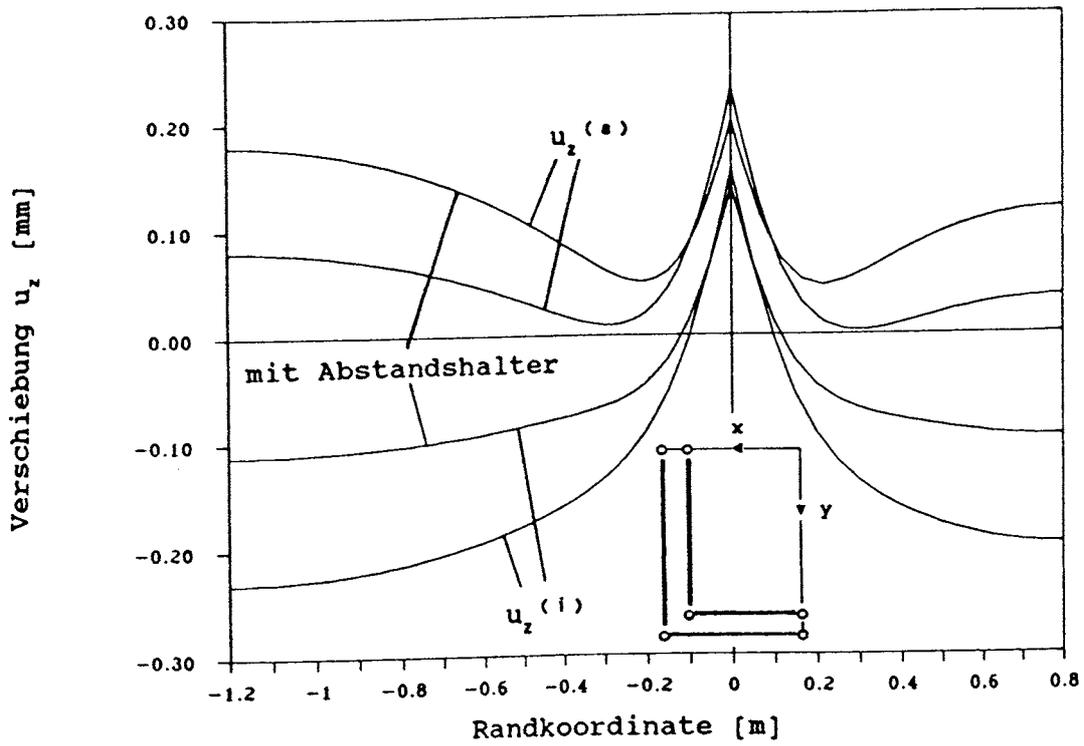


Bild 4.10. u_z längs der Fugenkanten mit und ohne Abstandshalter (Winddruck $q_a = 0,001 \text{ N/mm}^2$)

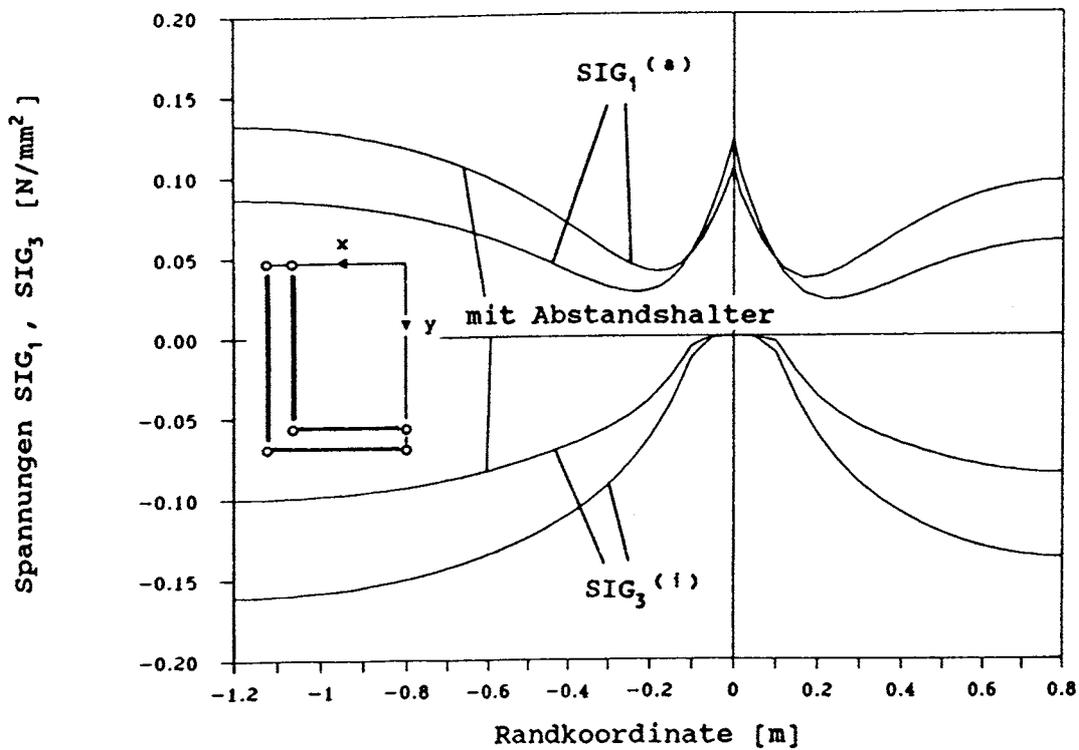


Bild 4.11. $SIG_1^{(a)}$, $SIG_3^{(i)}$ längs der Fugenkanten mit und ohne Abstandshalter (Winddruck)

4.2.4 Einfluß der endlichen Rahmensteifigkeit

Die Verklebung der Scheibe erfolgt üblicherweise auf einem Metallrahmen, der eine endliche Biegesteifigkeit besitzt und sich bei Belastung verformen kann. Durch die Verformung der Unterkonstruktion wird der Verformungs- und Spannungszustand der Klebefuge beeinflusst.

Der Metallrahmen wurde im Finite-Elemente-Modell mit Volumenelementen STIF45 modelliert. Die Randbedingungen wurden so gewählt, daß sich die Unterkonstruktion unterhalb der längeren Plattenseite im Bereich $0 \leq y < b_y - b_r$ verformen kann. Die Biegesteifigkeit $E \cdot I$ wird bei konstanter Breite durch den Elastizitätsmodul E des Werkstoffs und die Höhe h_a des Rahmens bestimmt. Bei den Rechnungen wurden durch verschiedene Werte von h_a zwischen 30mm und 100mm Biegesteifigkeiten (bezüglich des Schwerpunktes des Rahmens) im Bereich von $E \cdot I = 0,3 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$ bis $E \cdot I = 11 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$ vorgegeben.

In Bild 4.12 ist die Verformung des Rahmens (u_z -Verschiebungen an der Kante Rahmen zu Klebefuge, $h_a = 100\text{mm}$) dargestellt. Die absoluten u_z -Verschiebungen der Klebefuge an der inneren und äußeren Kante sind in Bild 4.13 aufgetragen.

Das Bild 4.14 zeigt die relativen u_z -Verschiebungen die man durch Differenzbildung aus den Absolutwerten an der oberen und unteren Fugenkante erhält. Zum Vergleich sind die u_z -Verschiebungen bei unendlich steifer Unterkonstruktion eingetragen.

Die Auswirkungen auf die Spannungsverteilung in der Klebefuge sind in Bild 4.15 dargestellt. Aufgetragen ist die Hauptspannungskomponente SIG_1 längs der inneren und SIG_3 längs der äußeren Kante der Klebefuge an der Grenzfläche zur Glas-scheibe für unterschiedliche Rahmensteifigkeiten.

Man sieht, daß bei endlicher Rahmensteifigkeit die maximale Spannung in der Kantenmitte (Punkt D) gegenüber dem Fall $E \cdot I = \infty$ deutlich reduziert wird. Durch die Verformung der Unterkonstruktion wird der Spannungszustand der Klebefuge homogener. Mit sinkender Rahmensteifigkeit werden die relativen Spannungsmaxima im Bereich der Kantenmitten der Scheibe noch weiter abgebaut, allerdings wachsen die Spannungen im Bereich der Ecken stark an und liegen im Fall von $h_a = 30\text{mm}$ bereits über dem Maximalwert von SIG_1 bei $E \cdot I = \infty$. Der Fall mit minimalen Spannungsspitzen wird durch das Verhältnis der Rahmensteifigkeit zur Plattensteifigkeit bei den gegebenen Randbedingungen bestimmt.

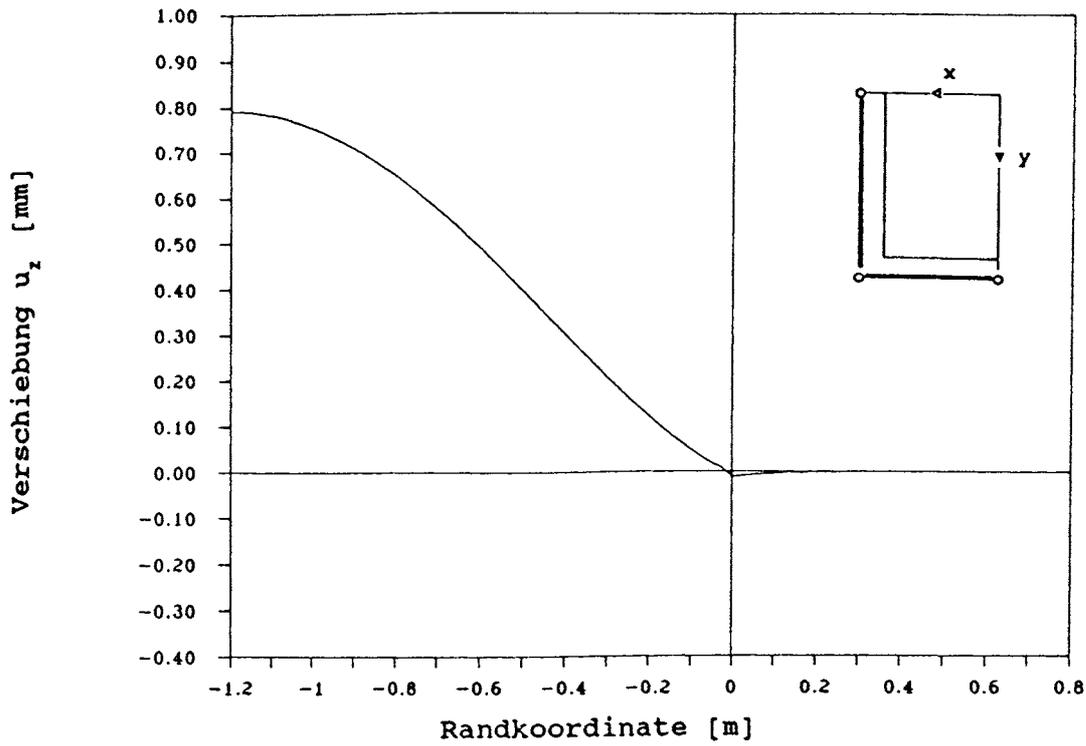


Bild 4.12. Verformung des Rahmens
 ($h_a = 100\text{mm}$, $E \cdot I \approx 11 \cdot 10^6 \text{N} \cdot \text{mm}^2$)

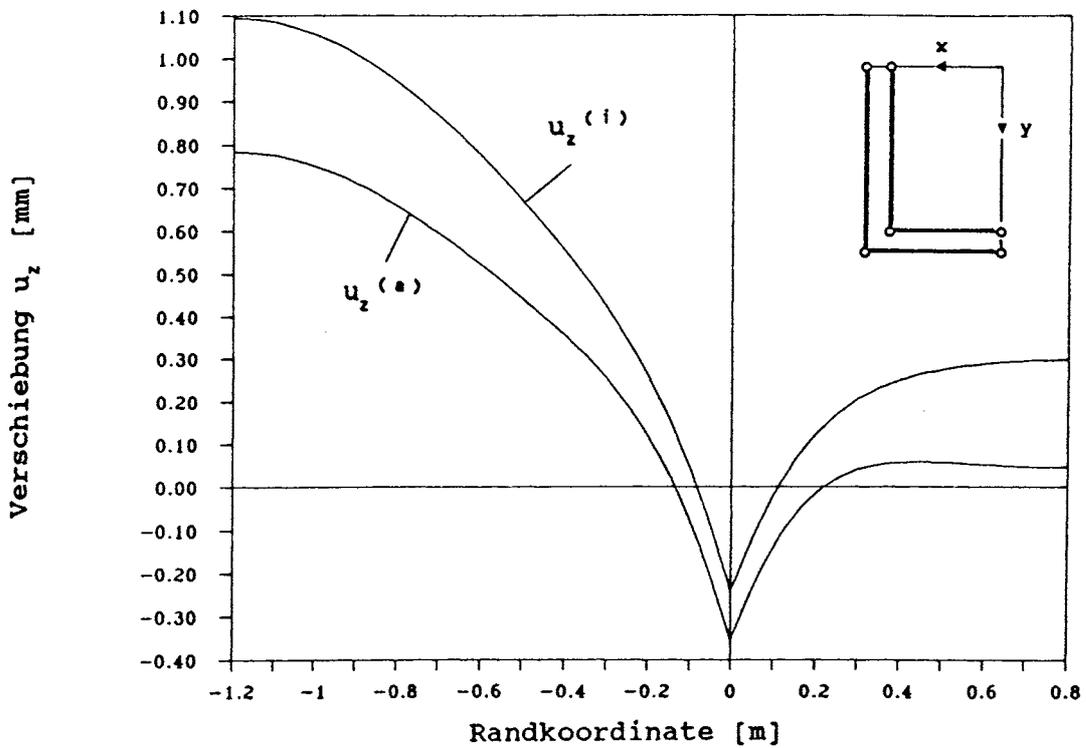


Bild 4.13. absolute u_z -Verschiebungen längs der
 Fugenkanten ($h_a = 100\text{mm}$, $E \cdot I \approx 11 \cdot 10^6 \text{N} \cdot \text{mm}^2$)

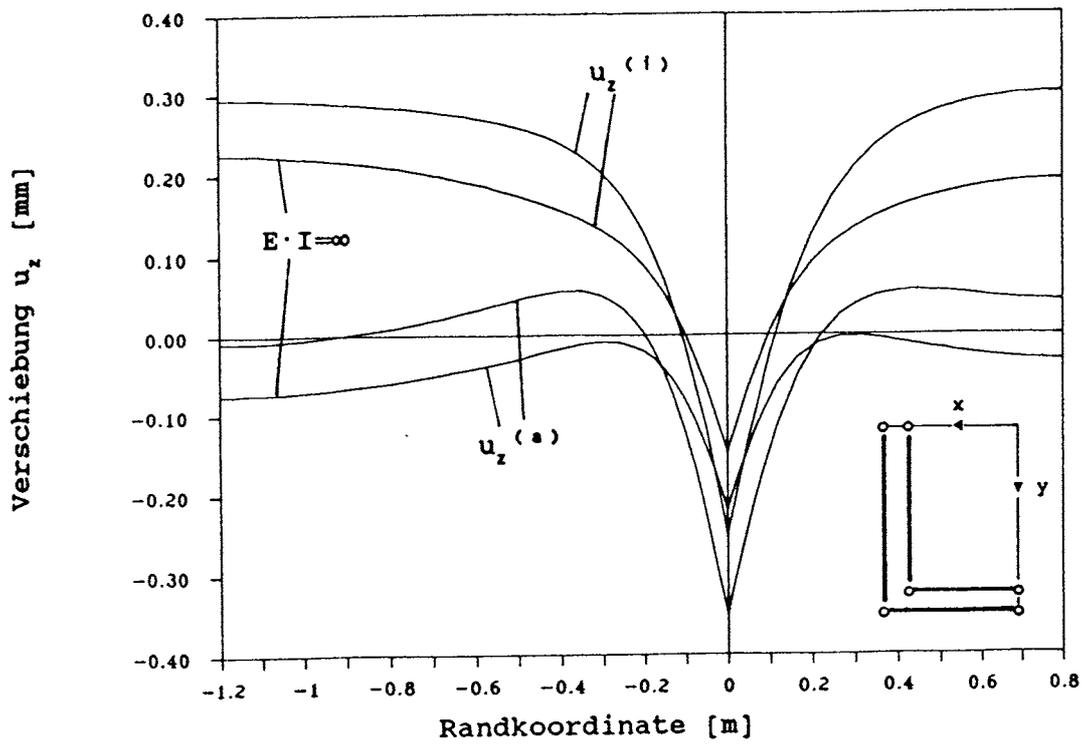


Bild 4.14. relative u_z -Verschiebungen längs der Fugenkanten ($h_s=100\text{mm}$, $E \cdot I \approx 11 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$)

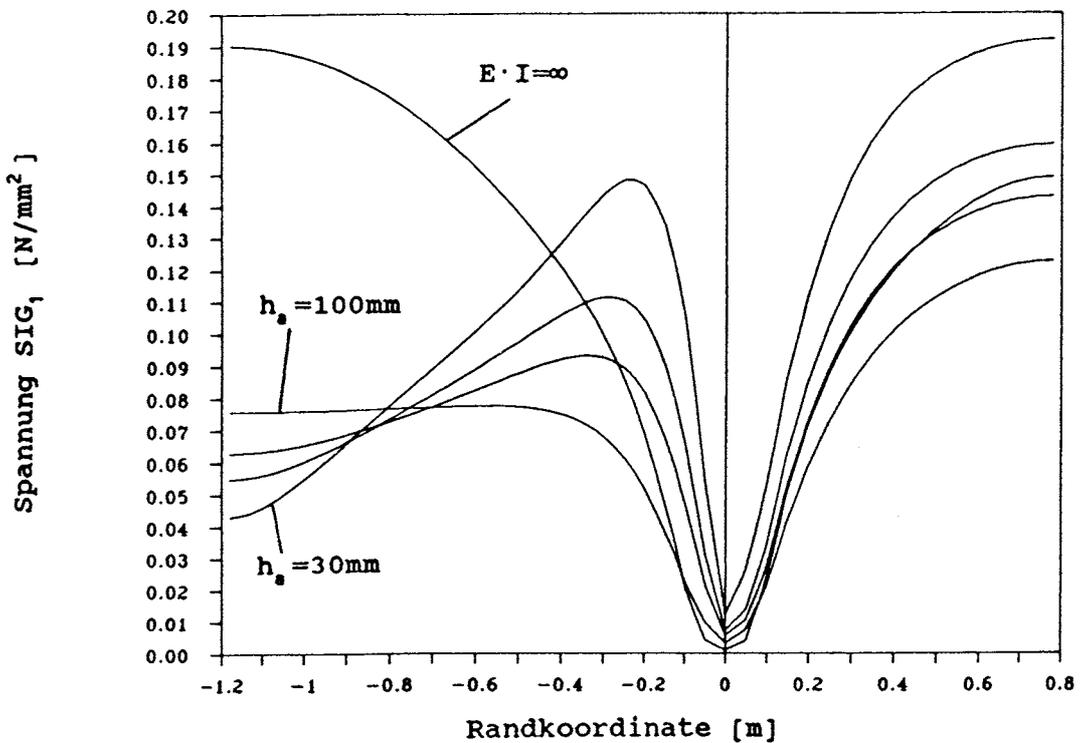


Bild 4.15. $SIG_1^{(i)}$ längs der Fugenkanten für verschiedene Rahmensteifigkeiten

4.2.5 Einfluß geometrischer Nichtlinearität

Mit steigender Last wird die Verformung der Platte in zunehmendem Maße durch Membranspannungen in der Plattenmittelfläche bestimmt. Aufgrund der Verformung ändert sich die Steifigkeit der Platte und die Richtung des Lastangriffs. Die Struktur verhält sich unter Belastung geometrisch nichtlinear.

Bedingt durch die Membranspannungen und die resultierende Zunahme der Steifigkeit des Systems erhält man in Abhängigkeit der Last einen überproportionalen Anstieg der in-plane-Komponenten und gleichzeitig eine relative Abnahme der out-of-plane Komponente der Verschiebungen.

Dieser Sachverhalt wird durch die folgenden Abbildungen verdeutlicht. Für den Lastfall Windsog ist in Bild 4.16 in Abhängigkeit von der Last die Verschiebungskomponente u_z längs der Plattendiagonalen und längs der äußeren Fugenkante aufgetragen. Der in Bild 4.17 dargestellte Verlauf der Randverschiebungen u_z in Abhängigkeit von der Last ist typisch für das nichtlineare Tragverhalten der querbelasteten Platte (siehe z.B. [16]).

In den Bildern 4.18 bis 4.20 sind die Verschiebungskomponente u_z bzw. u_x und u_y an den ausgezeichneten Punkten Plattenmitte, Ecke (Punkt B) und Kantenmitte (Punkt A) in Abhängigkeit von der Last dargestellt.

In Bild 4.21 ist der Maximalwert der Hauptspannungskomponente σ_1 in den Kantenmitten (Punkte D und F) für den Lastfall Windsog in Abhängigkeit von der Last aufgetragen. Zum Vergleich ist auch das Ergebnis einer linearen Berechnung eingezeichnet.

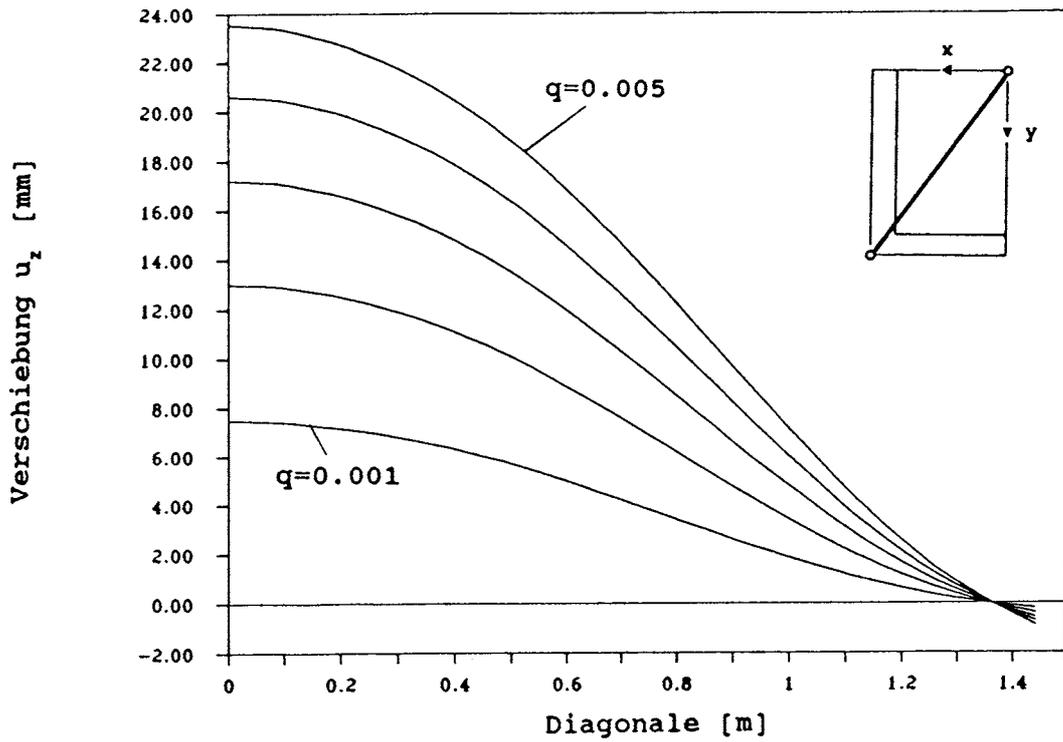


Bild 4.16. u_z längs der Plattendiagonalen für Lasten von $0,001\text{N/mm}^2$ bis $0,005\text{N/mm}^2$

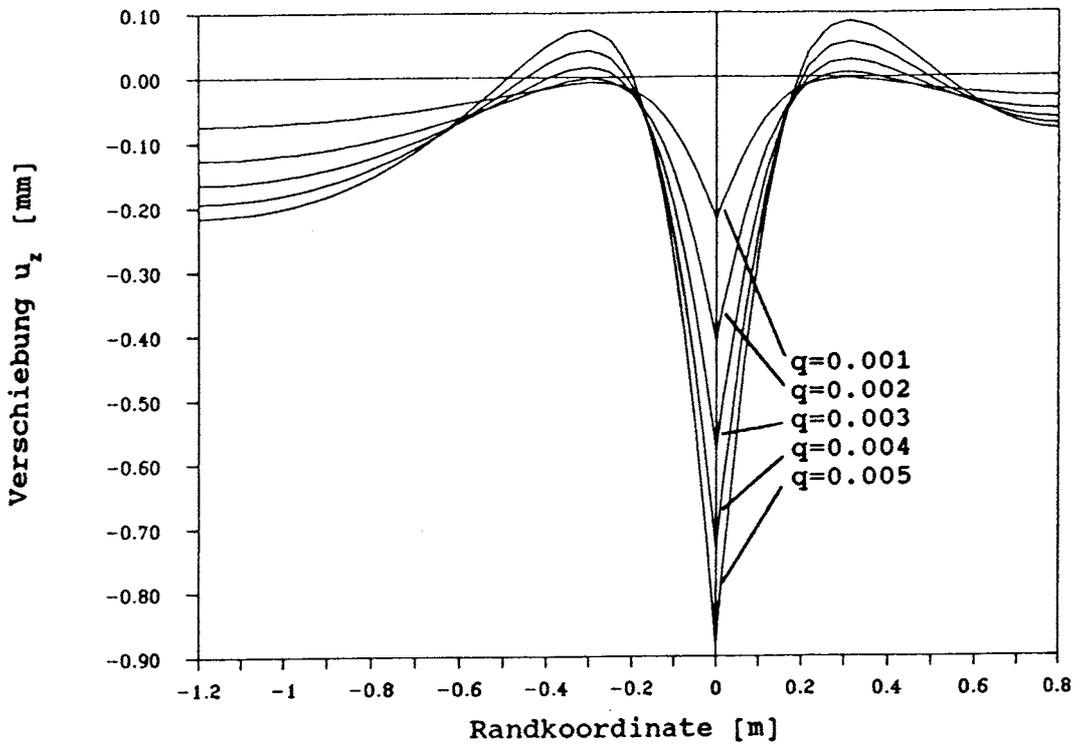


Bild 4.17. $u_z^{(a)}$ längs der äußeren Fugenkante für Lasten von $0,001\text{N/mm}^2$ bis $0,005\text{N/mm}^2$

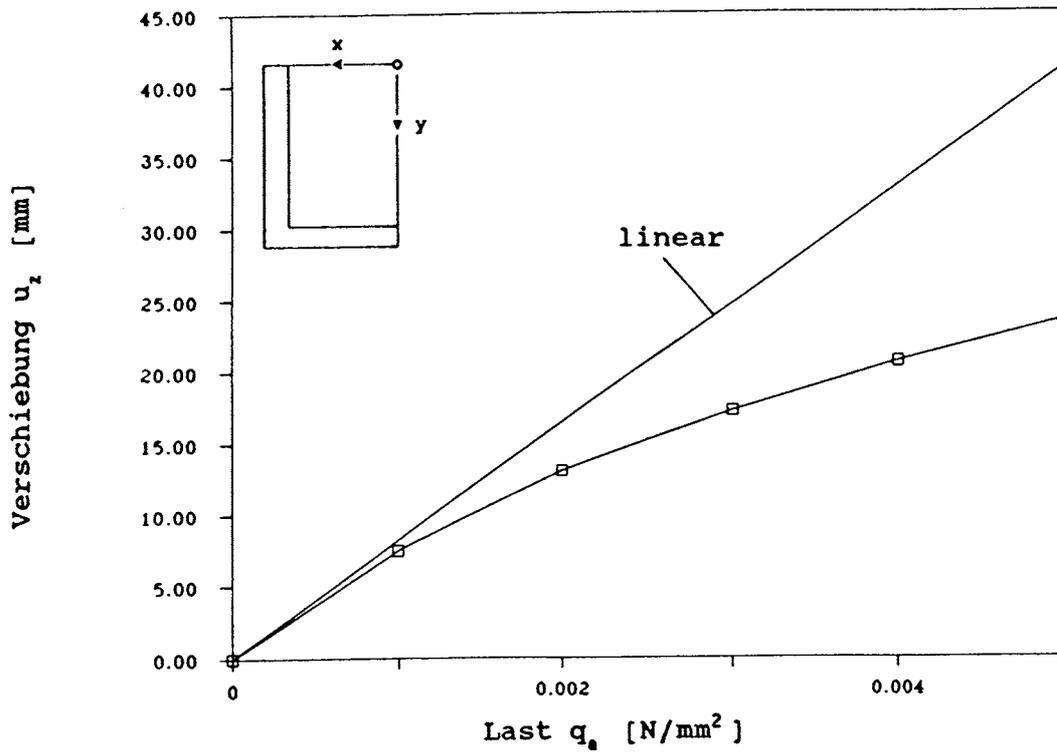


Bild 4.18. Mittendurchbiegung (u_z) in Abhängigkeit von der Last

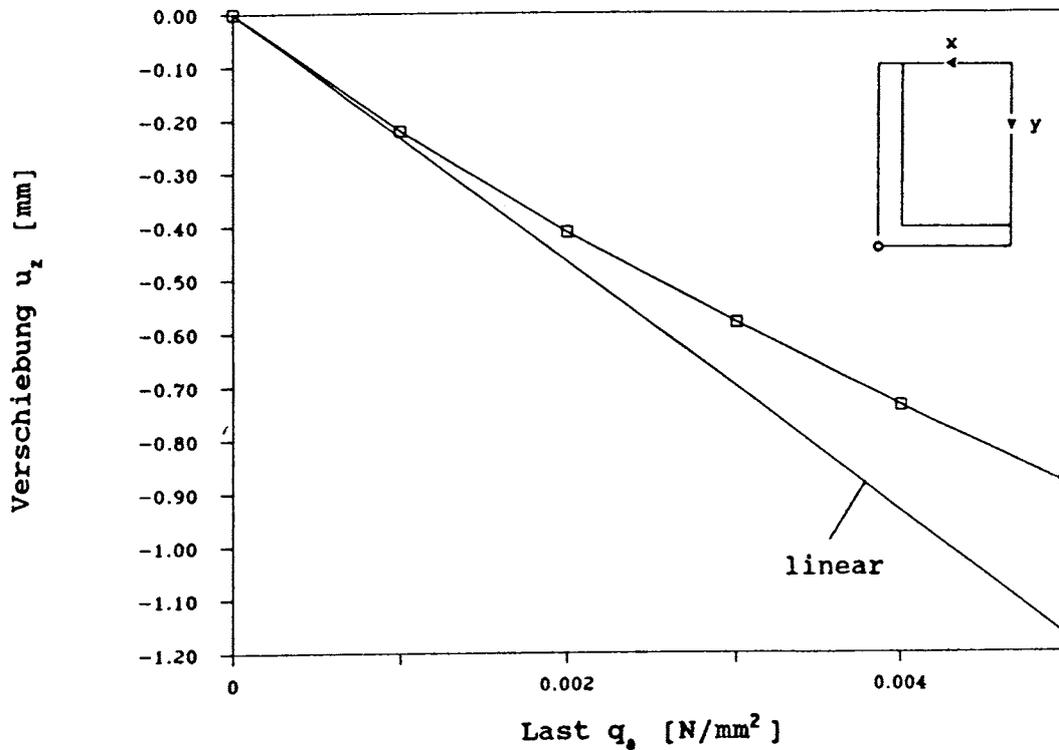


Bild 4.19. u_z in der Ecke (Punkt B) in Abhängigkeit von der Last

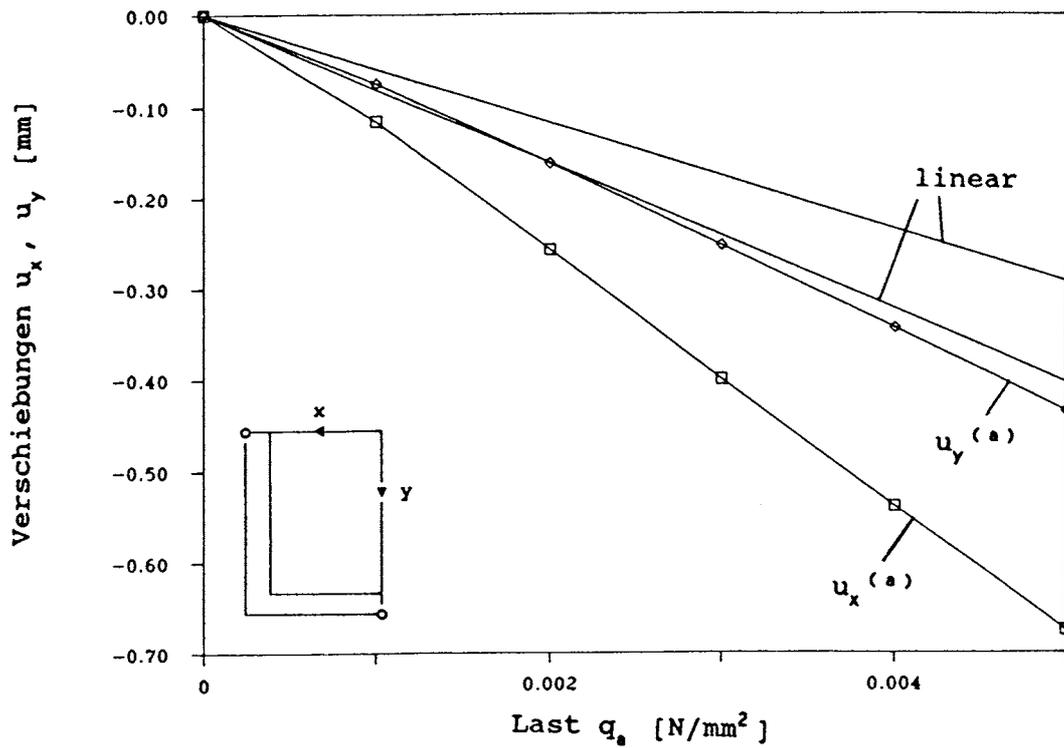


Bild 4.20. $u_x^{(a)}$, $u_y^{(a)}$ in den Kantenmitten der Platte (Punkte D und F) in Abhängigkeit von der Last

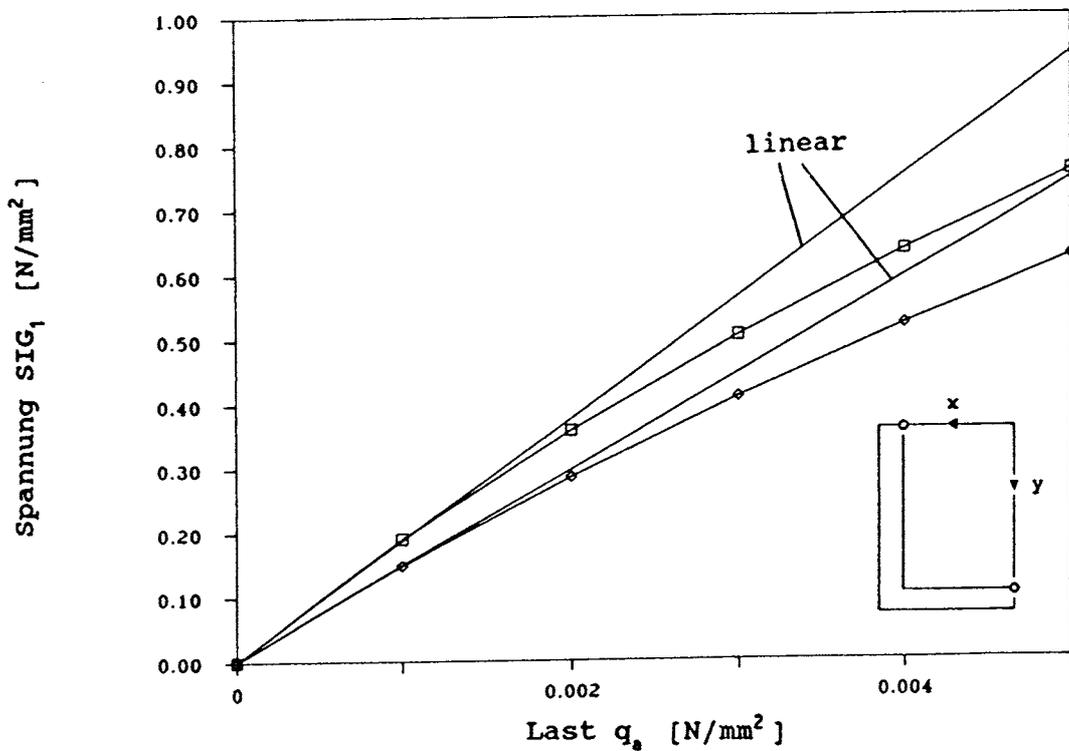


Bild 4.21. SIG_1 in den Kantenmitten der Platte (Punkte D und F) in Abhängigkeit von der Last

4.2.6 Berücksichtigung der Querdehnung des Silikonklebers

Die Rechnungen wurden mit einer Querkontraktionszahl $\nu_s = 0,00$ durchgeführt. Im diesem Abschnitt wird untersucht, wie sich die Einführung eines realistischeren Materialgesetzes für den Silikonkleber auf den Verformungs- und Spannungszustand in der Klebefuge auswirkt. Zunächst wird noch für kleine Dehnungen ein lineares Materialgesetz mit den Parametern $\nu_s = 0,47$ und $E_s = 2,5 \text{ N/mm}^2$ (siehe Abschnitt 2) angenommen. Die Materialparameter für Glas werden zu $E_g = 6,8 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$ und $\nu_g = 0,22$ gesetzt.

Die Analyse der Verformungen zeigt im Vergleich mit der Rechnung bei $E_s = 5 \text{ N/mm}^2$, $\nu_s = 0$ nur geringe Abweichungen an der globalen Verformung der Klebefuge (Bild 4.22), da sich die globale Steifigkeit der Struktur im Zug- und Druckbereich nicht geändert hat und Scherkomponenten nur von zweitrangiger Bedeutung sind. Die hohe Querkontraktionszahl bewirkt allerdings eine Einschnürung der Klebefuge bei Zug (Bild 4.23) und entsprechend eine Verdickung bei Druck (Bild 4.24).

Aufgrund der Querdehnungsbehinderung an den Begrenzungsflächen der Fuge zur Glasscheibe bzw. zur Unterkonstruktion resultieren Spannungen quer zur Belastungsrichtung. Als Folge davon treten bei Windsog an der inneren Klebefugenkante (Bild 4.25) in Kantenmitte und entsprechend bei Winddruck in der Ecke in allen drei Hauptspannungsrichtungen Zugkräfte auf. Der nicht glatte Verlauf der Spannungen im Bereich der Ecke ist eine Folge der insgesamt relativ groben Elementierung in Bezug auf die hohe Querkontraktionszahl und des Übergangs von einer relativ groben Elementierung auf eine feine Elementierung im Eckbereich.

Das Bild 4.26 zeigt die Konturlinien von SIG_1 über dem Fugenquerschnitt für Windsog und die Lage des Maximums an der Innenkante der Fuge (Punkt D).

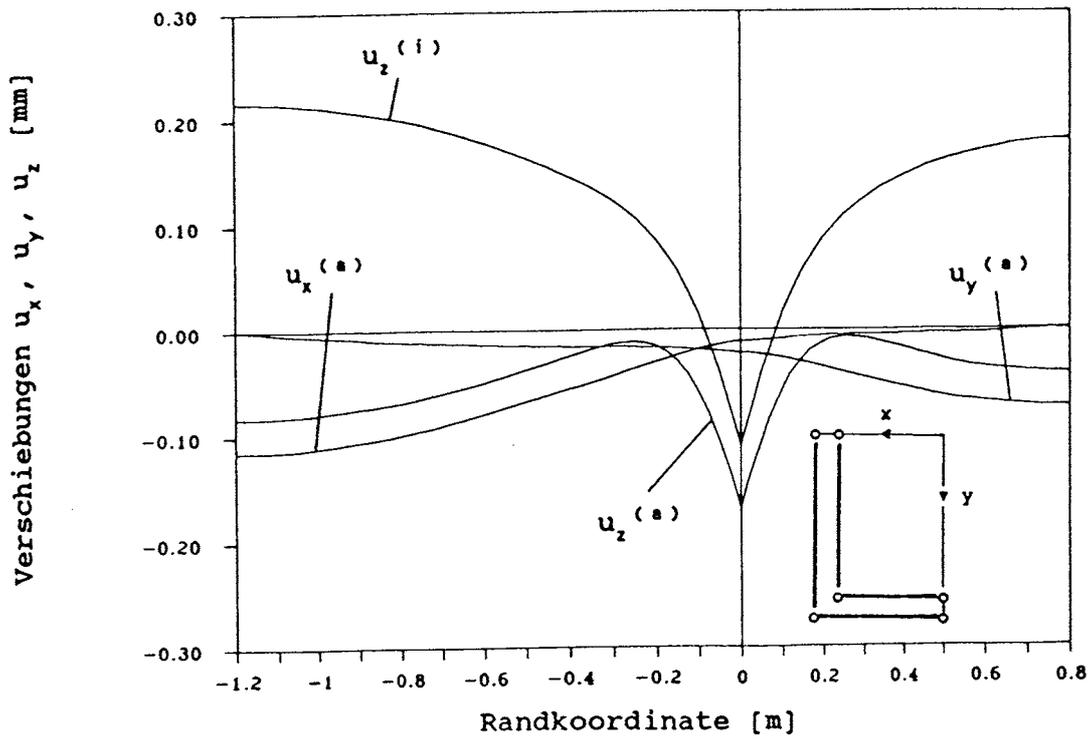


Bild 4.22. u_x, u_y, u_z längs der Fugenkante (Windsog, $q_a=0,001\text{N/mm}^2$)

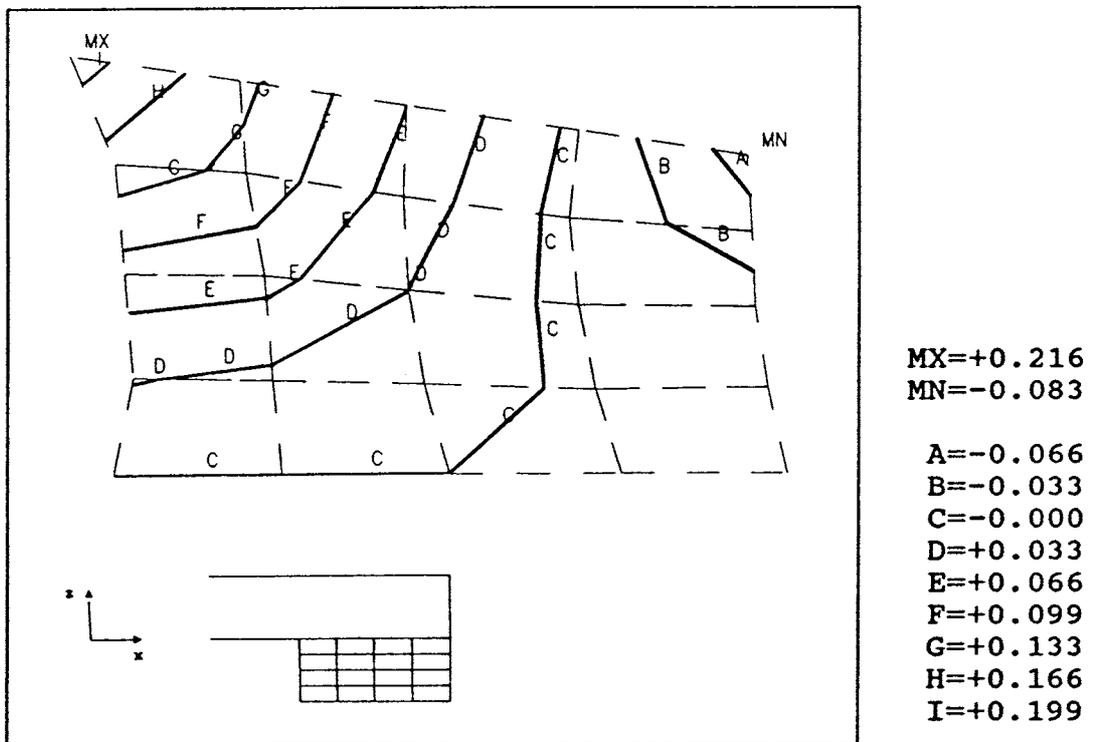


Bild 4.23. Verschiebungskomponente u_z über dem Fugenquerschnitt (Windsog, $q_a=0,001\text{N/mm}^2$)

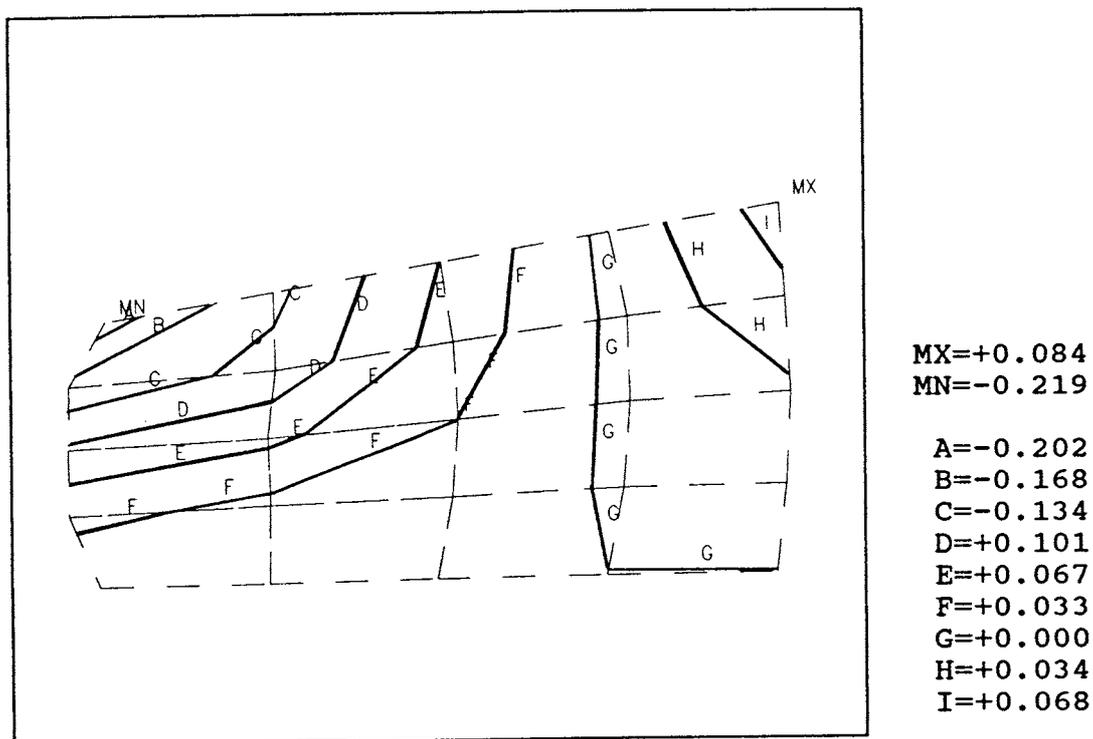


Bild 4.24. Verschiebungskomponente u_z über dem Fugenquerschnitt (Winddruck, $q_a = 0,001 \text{N/mm}^2$)

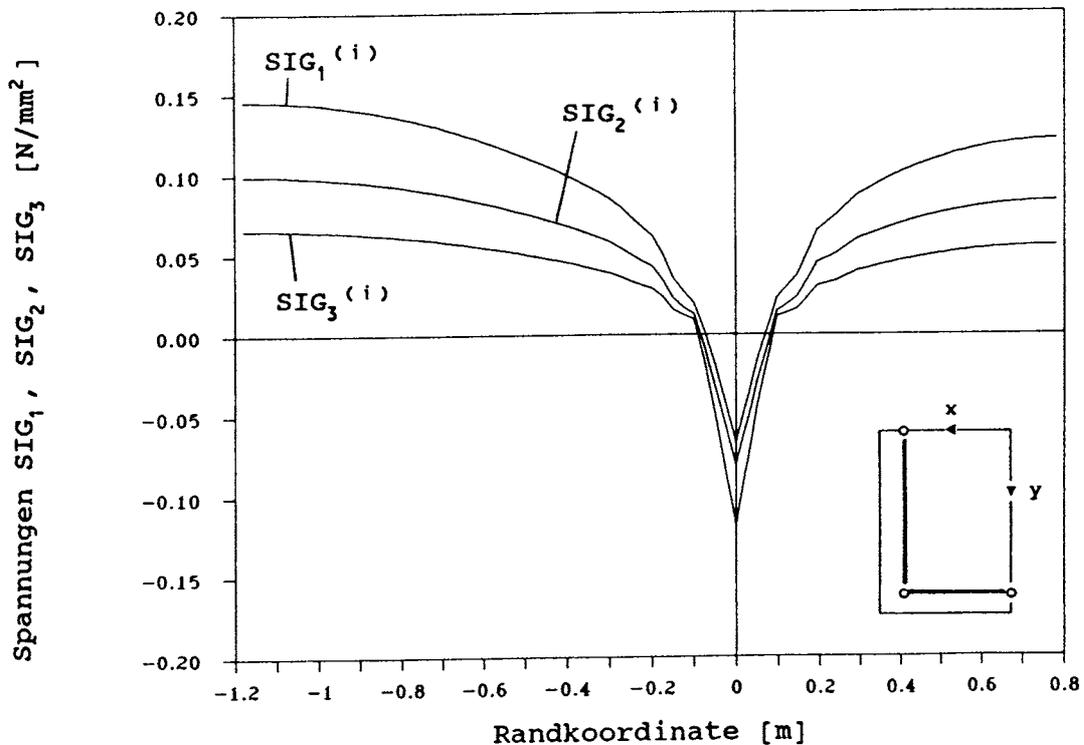


Bild 4.25. SIG_1, SIG_2, SIG_3 längs der inneren Kante der Fuge (Windsog, $q_a = 0,001 \text{N/mm}^2$)

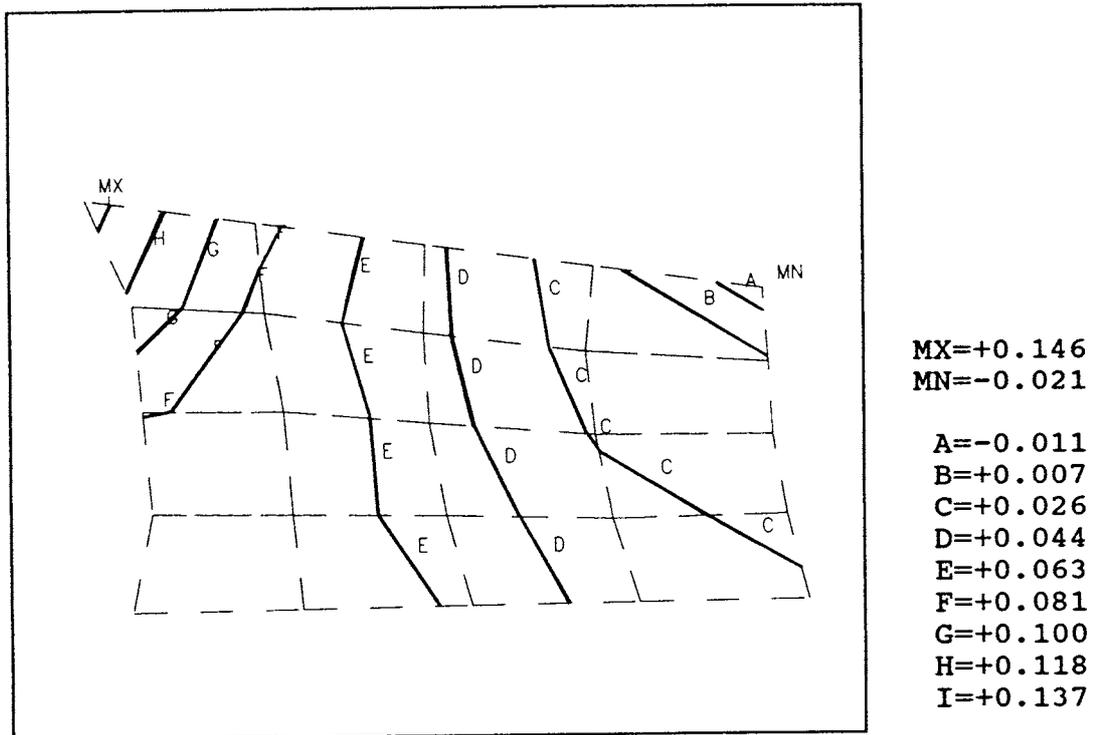


Bild 4.26. Hauptspannungskomponente SIG_1 auf dem Fugenquerschnitt (Windsog, $q_a=0,001N/mm^2$)

4.2.7 Nichtlineares Materialgesetz

Bei großen Dehnungen muß mit dem hyperelastischen Volumenelement STIF86 anstelle des Volumenelementes STIF45 gerechnet werden. Außerdem muß das lineare Werkstoffgesetz mit den Parametern E und ν durch ein nichtlineares Materialgesetz ersetzt werden, das sich zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaften von gummielastischem Material eignet. Entsprechend Abschnitt 3.2.4 wurden bei den im folgenden dargestellten Rechenergebnissen die Querkontraktionszahl zu $\nu_s=0,49$, und die MOONEY-RIVLIN-Parameter zu $A=0,001N/mm^2$ und $B=0,26N/mm^2$ gesetzt.

Da die Materialparameter der Steifigkeit der Probekörper im Detailversuch im Druck- und Zugbereich angepaßt wurden, ergeben sich beim Vergleich mit der Rechnung mit linearem Werkstoffgesetz, wie in Bild 4.27 gezeigt, bei kleinen Lasten ($q_a=0,001N/mm^2$) nur sehr geringe Unterschiede in den Verschiebungen. Aufgetragen sind die u_x -Verschiebungen längs der Fugenkante. Die in-plane Verschiebungen, die nicht dargestellt sind, sind praktisch identisch. Mit steigender Last ($q_a=0,005N/mm^2$) werden die Differenzen aufgrund der nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Kennlinie größer (Bild 4.28).

In der Spannungsverteilung erhält man qualitativ die gleichen Ergebnisse, wie bei der Rechnung mit linearem Werk-

stoffgesetz (Abb.4.29). Im Bereich der Kantenmitten der Scheibe an der inneren Fugenkante treten in allen drei Hauptspannungsrichtungen hohe Zugspannungen auf. Da das Element STIF86 in Verbindung mit dem MOONEY-RIVLIN-Werkstoffgesetz speziell zur Rechnung mit näherungsweise inkompressiblen Werkstoffen angepaßt ist, ist der Spannungsverlauf auch in den kritischen Eckbereichen glatt.

Die Spannungen sind, verglichen mit den Ergebnissen bei Rechnung mit dem linearen Werkstoffgesetz fast um einen Faktor drei höher (Bild 4.29). Hohe Spannungswerte bezogen auf die äußere Last treten aber auch bereits im einfachen Zugversuch (Detailversuch) auf. Da verschiedene Werkstoffgesetze zugrunde gelegt sind, sind diese Spannungswerte nicht direkt miteinander vergleichbar.

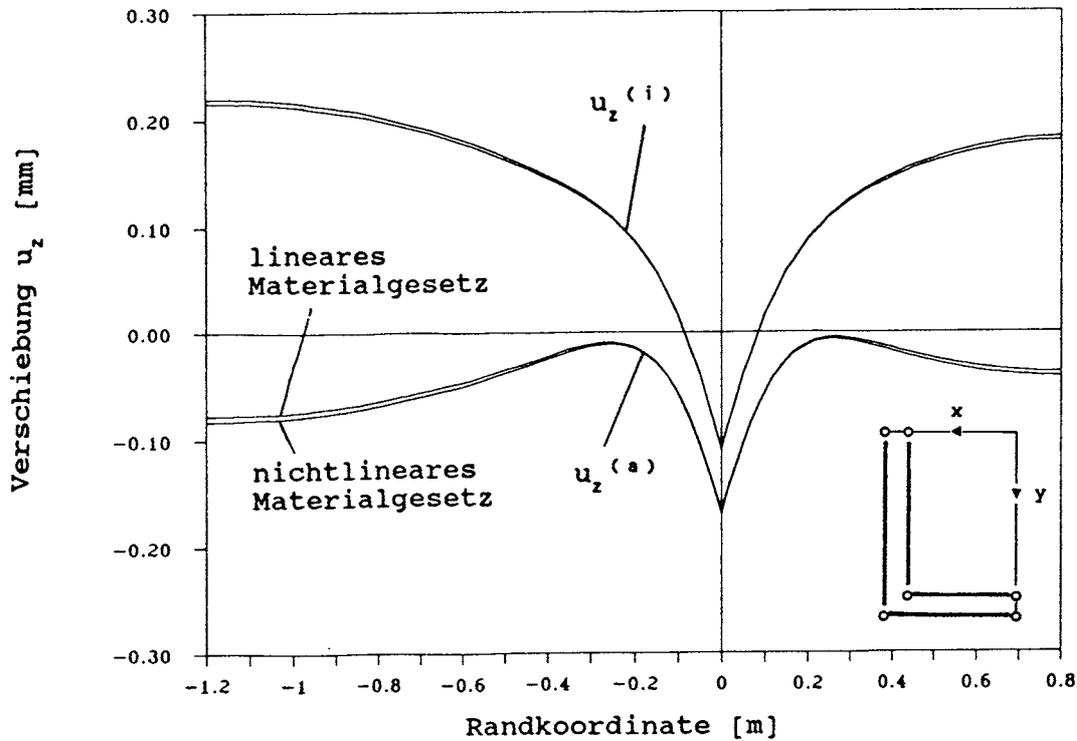


Bild 4.27. u_z längs der inneren und äußeren Fugenkante ($\bar{q}_a = 0,001\text{N/mm}^2$)

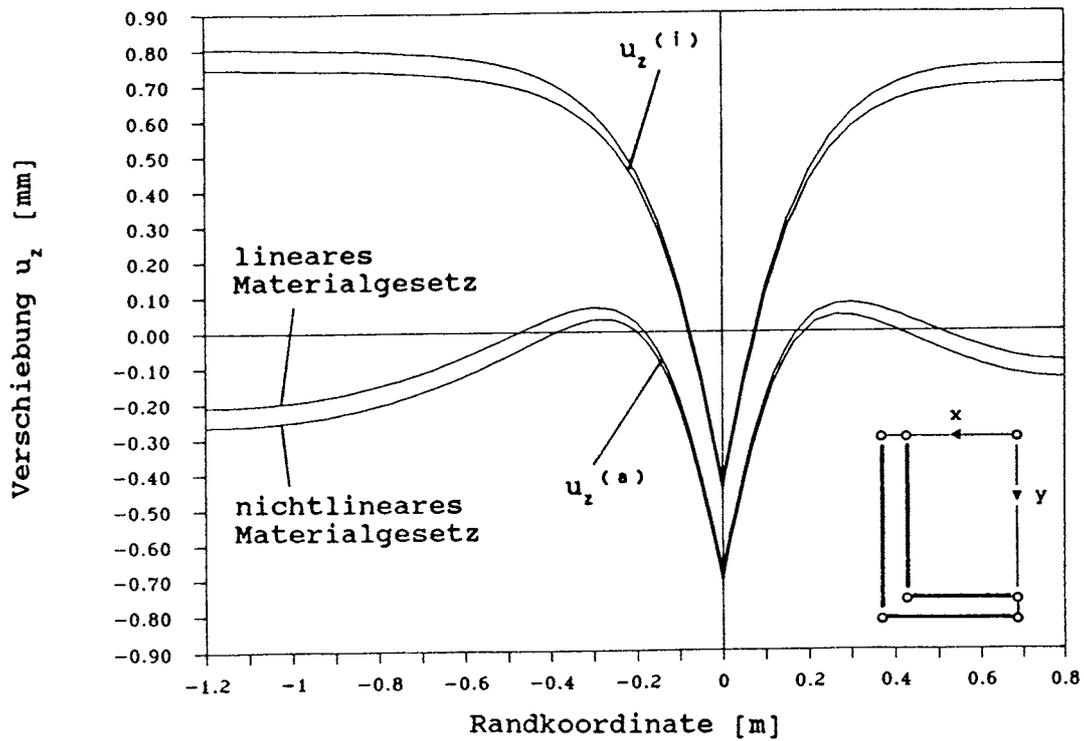


Bild 4.28. u_z längs der inneren und äußeren Fugenkante ($q_a = 0,005 \text{ N/mm}^2$)

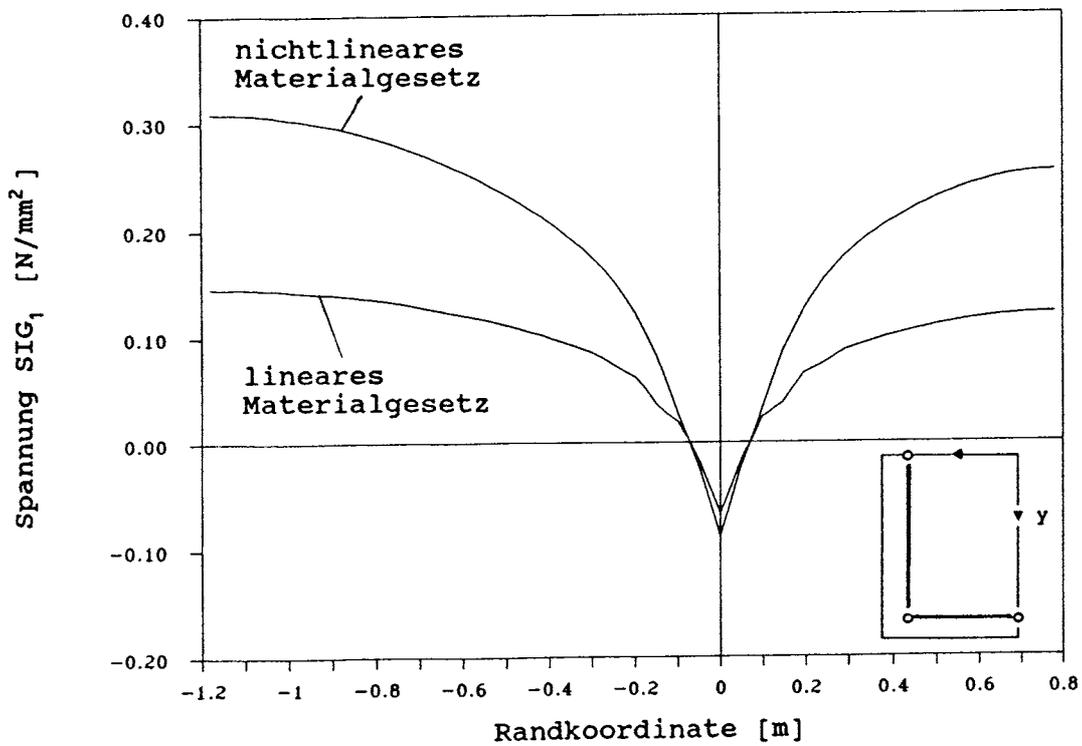


Bild 4.29. SIG_1 längs der inneren Fugenkante ($q_a = 0,001 \text{ N/mm}^2$)

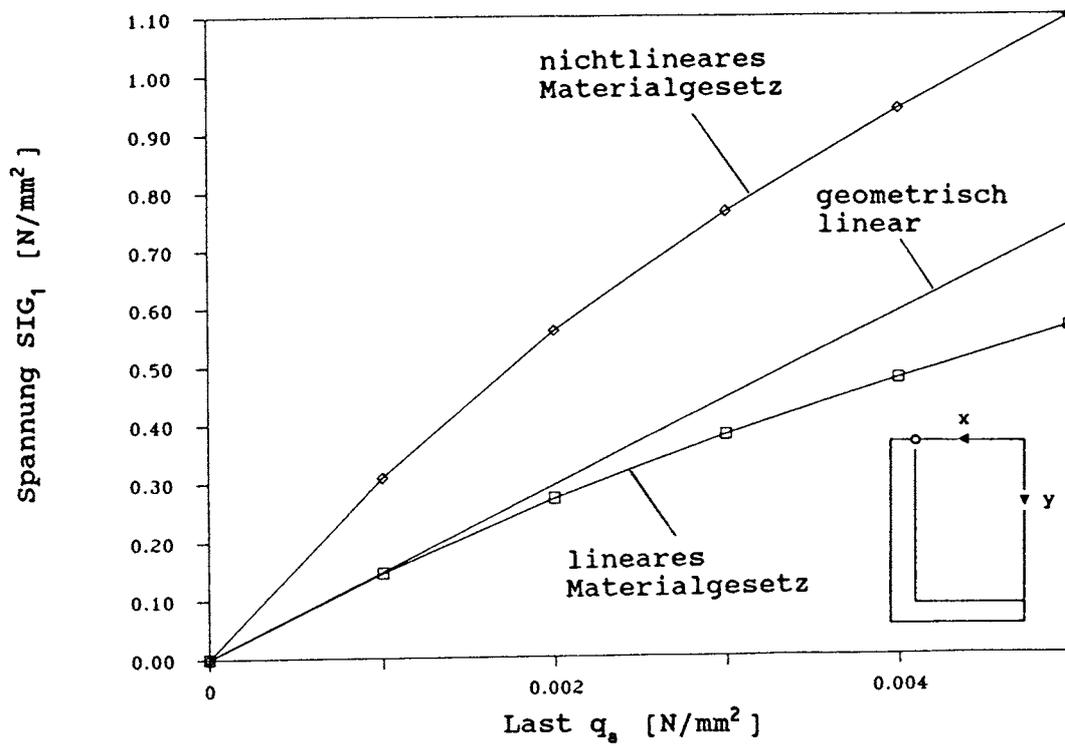


Bild 4.30. SIG_1 in Kantenmitte (Punkt D) in Abhängigkeit von der Last

4.3 Abhängigkeit des Verformungs- und Spannungszustandes von den geometrischen Abmessungen der Glasplatte und der Klebefuge

Im folgenden werden, ausgehend von den Standardmaßen (siehe Abschnitt 3.1), die geometrischen Abmessungen und damit von die Steifigkeitsverhältnisse der Glasplatte und der Klebefuge variiert.

a_x	=	800mm	kurzer Halbmesser parallel zur x-Achse,
b_y	=	1200mm	langer Halbmesser parallel zur y-Achse,
h_z	=	10mm	Plattendicke
h_r	=	10mm	Fugenhöhe,
b_r	=	20mm	Fugenbreite,

Entsprechend Abschnitt 3.2 wird mit linearem und mit nicht-linearem Materialgesetz gerechnet:

E_g	=	$6,8 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$	Elastizitätsmodul von Glas,
ν_g	=	0,22	Querkontraktionszahl von Glas,
E_s	=	$2,5 \text{ N/mm}^2$	Elastizitätsmodul und Querkontraktionszahl
ν_s	=	0,47	von Silikonkautschuk (linear elastisch),
A	=	$0,001 \text{ N/mm}^2$	MOONEY-RIVLIN-Parameter und Quer-
B	=	$0,260 \text{ N/mm}^2$	kontraktionszahl von Silikonkautschuk
ν_s	=	0,49	(nichtlineares Werkstoffgesetz).

4.3.1 Variation der Plattendicke

Die Plattendicke h_z , die in der 3. Potenz in die Biegesteifigkeit eingeht, wurde im Bereich $6\text{mm} \leq h_z \leq 14\text{mm}$ variiert.

Mit abnehmender Plattendicke steigt die Mittendurchbiegung der Platte und die Verdrehung der Klebefuge an. Außerdem verhält sich die Platte in zunehmendem Maße geometrisch nichtlinear.

Die Bilder 4.31 und 4.32 zeigen die Randverformungen für eine Plattendicke von 6mm bzw. 14mm bei einer äußeren Last von $q_a = 0,001 \text{ N/mm}^2$. In den Bildern 4.33 bis 4.35 ist die Abhängigkeit der Verschiebungskomponenten $u_x^{(a)}$, $u_z^{(a)}$ und der Verdrehung ϕ_y in der Kantenmitte der Scheibe (Punkt A) in Abhängigkeit von der Plattendicke und der äußeren Belastung aufgetragen.

In den Bildern 4.36 und 4.37 ist das Maximum von SIG_1 im Punkt D ($x=a_x - b_r$, $y=0$, $z=0$) über der Plattendicke aufgetragen. Die Rechnung erfolgte mit linearem ($\nu_s=0,47$, $E_s=2,5 \text{ N/mm}^2$) bzw. mit nichtlinearem ($\nu_s=0,49$, $A=0,001 \text{ N/mm}^2$, $B=0,26 \text{ N/mm}^2$) Werkstoffgesetz. Eine geringe Plattendicke und demnach geringe Biegesteifigkeit wirkt sich ungünstig auf die Spannungsverteilung in der Klebefuge aus.

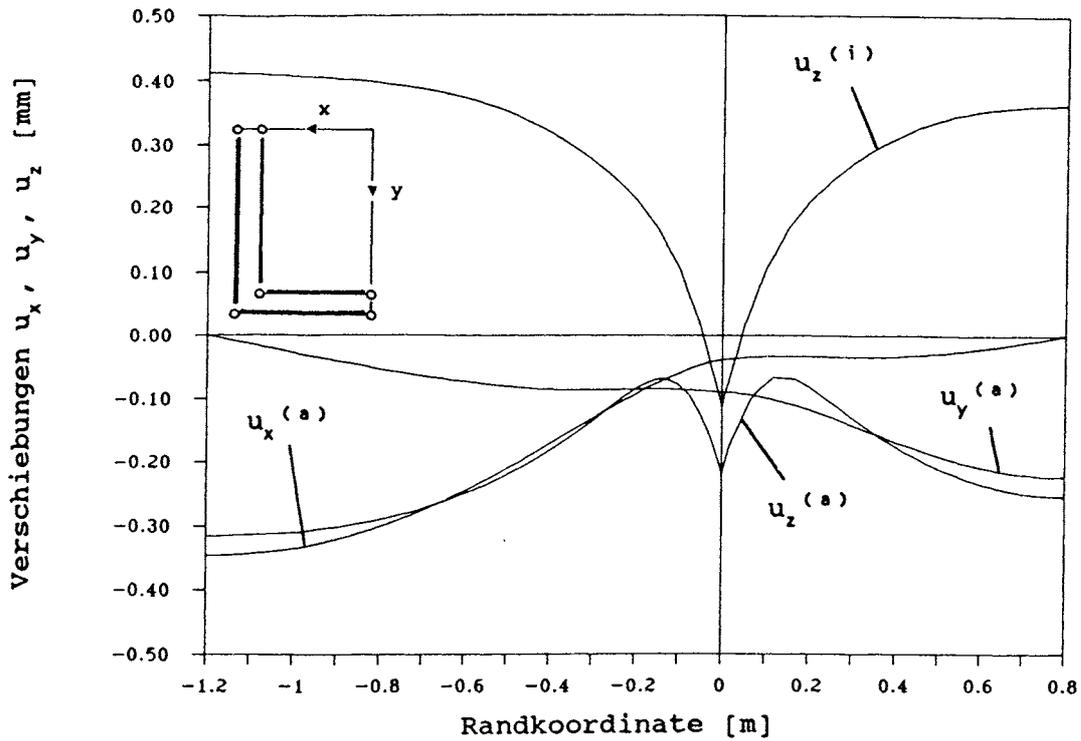


Bild 4.31. $u_x^{(a)}$, $u_z^{(a)}$, $u_z^{(i)}$ längs der Fugenkante ($h_z=6\text{mm}$, $\nu_s=0,47$, $E_s=2,5\text{N/mm}^2$)

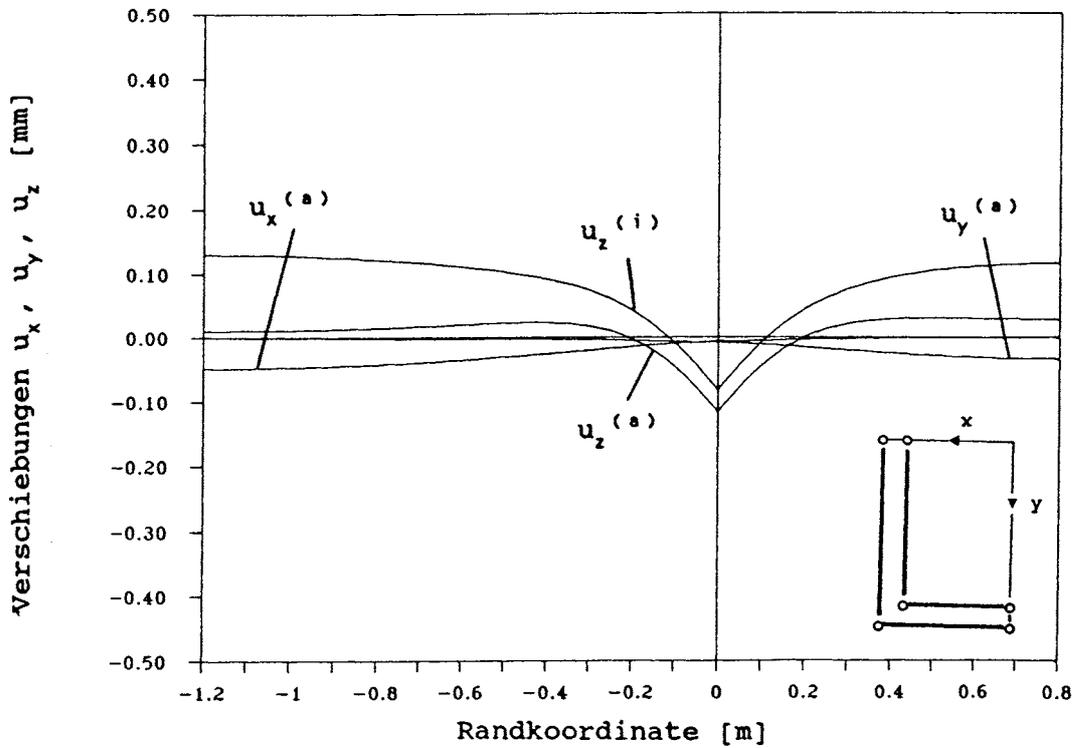


Bild 4.32. $u_x^{(a)}$, $u_z^{(a)}$, $u_z^{(i)}$ längs der Fugenkante ($h_z=14\text{mm}$, $\nu_s=0,47$, $E_s=2,5\text{N/mm}^2$)

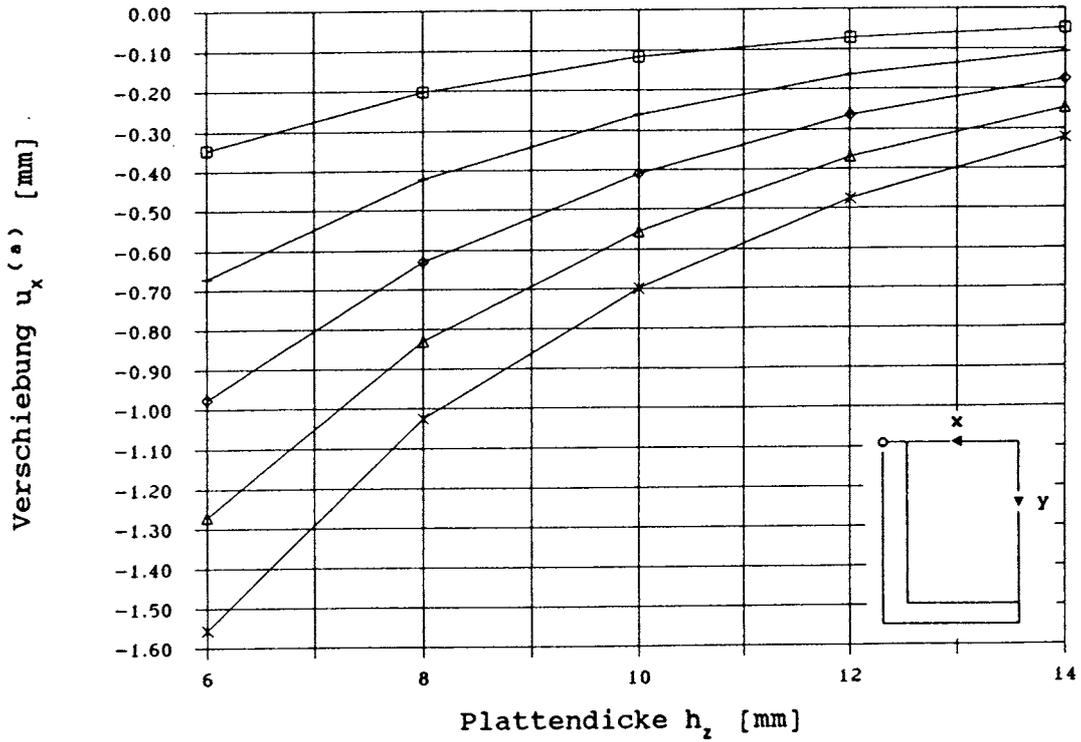


Bild 4.33. $u_x^{(a)}$ in Punkt A in Abhängigkeit von der Plattendicke ($\nu_s=0,47$, $E_s=2,5N/mm^2$)

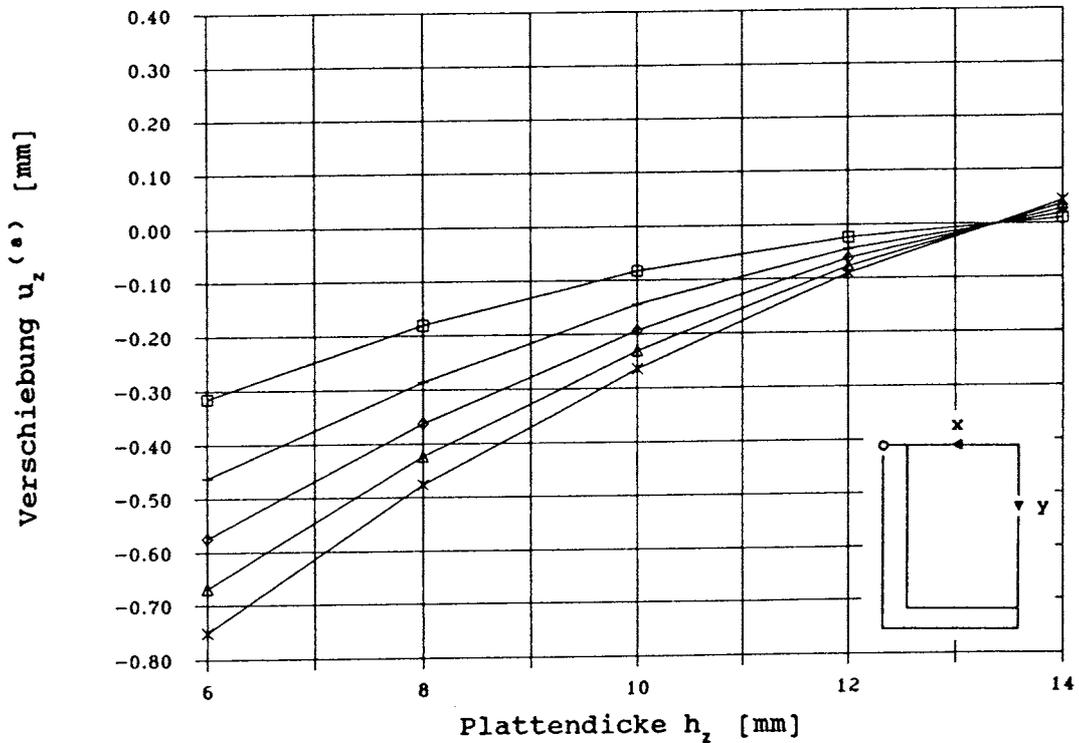


Bild 4.34. $u_z^{(a)}$ in Punkt A in Abhängigkeit von der Plattendicke ($\nu_s=0,47$, $E_s=2,5N/mm^2$)

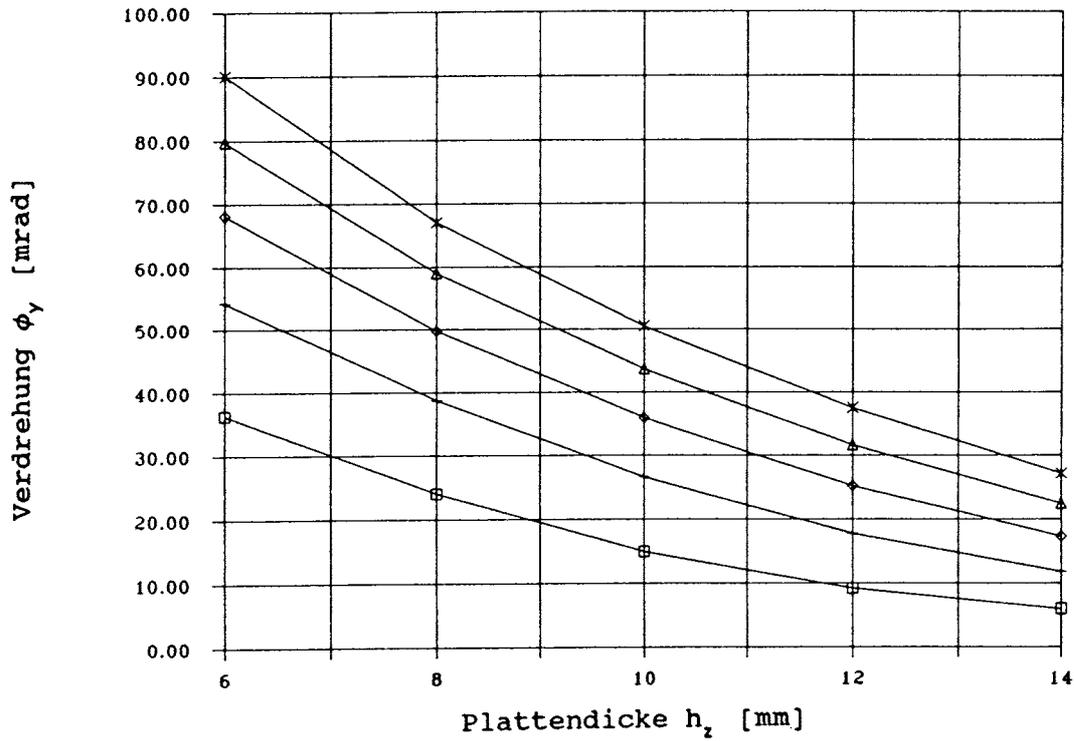


Bild 4.35. ϕ_y in Abhängigkeit von der Plattendicke ($\nu_s=0,47, E_s=2,5N/mm^2$)

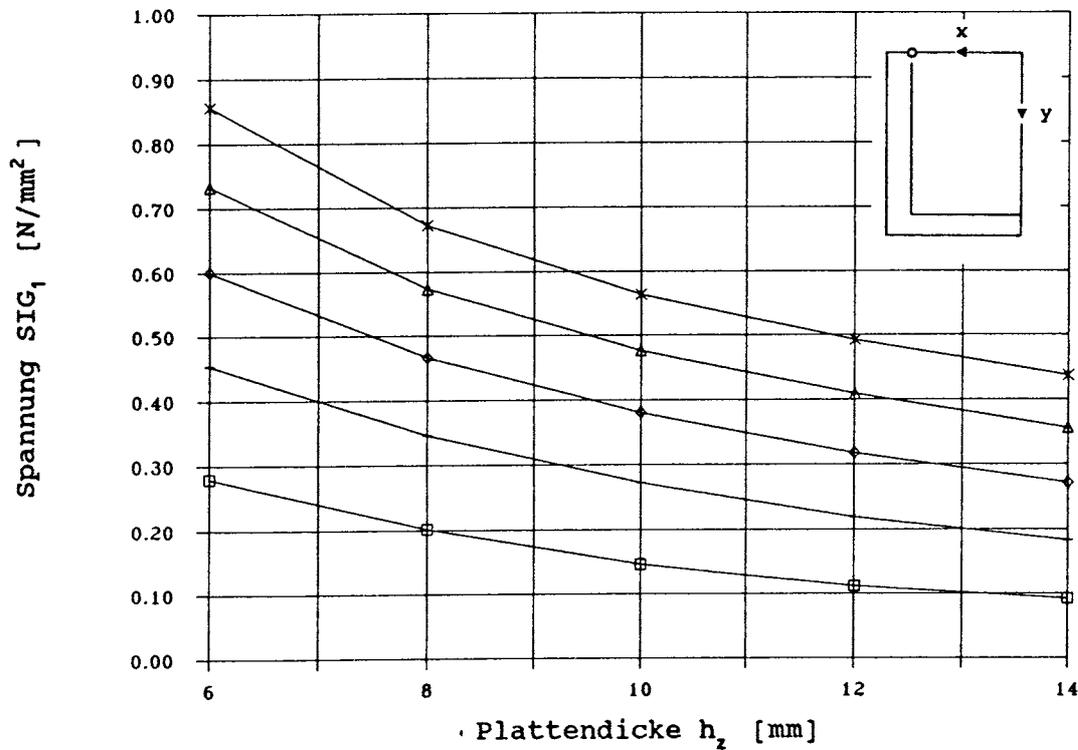


Bild 4.36. SIG_1 in Punkt D in Abhängigkeit von der Plattendicke ($\nu_s=0,47, E_s=2,5N/mm^2$)

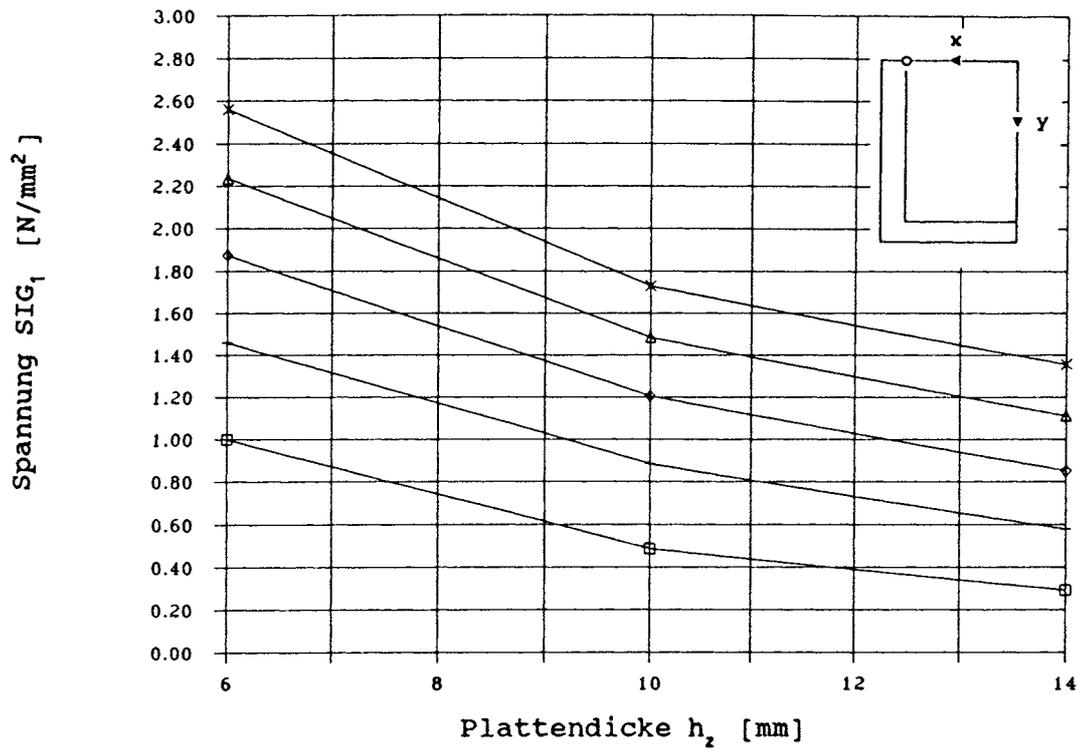


Bild 4.37. SIG_1 in Abhängigkeit von der Plattendicke
 ($\nu_1=0,49$, $A=0,001N/mm^2$, $B=0,26N/mm^2$)

4.3.2 Variation des Seitenverhältnisses

Das Verhältnis $n=a_x/b_y$ der kurzen Halbachse a_x zur langen Halbachse b_y wurde im Bereich zwischen $n=0,5$ ($a_x=800\text{mm}$, $b_y=1600\text{mm}$) und $n=1$ ($a_x=b_y=800\text{mm}$) variiert. Die Randverschiebungen $u_x^{(a)}$, $u_y^{(a)}$, $u_z^{(a)}$ und $u_z^{(i)}$ für die Fälle $n=0,5$ und $n=1$ sind in den Bildern 4.38 und 4.39 aufgetragen.

In den Bildern 4.40 bis 4.42 sind die Randverschiebungen $u_x^{(a)}$, $u_z^{(a)}$ sowie der Drehwinkel ϕ_y in Punkt A ($x=a_x-b_r$, $y=z=0$) in Abhängigkeit vom Seitenverhältnis aufgetragen.

Die resultierende Maximalspannung SIG_1 (in Punkt D) in Abhängigkeit vom Seitenverhältnis und der Last ist in Bild 4.43 (lineares Materialgesetz) und Bild 4.44 (nichtlineares Materialgesetz) gegeben.

Die maximale in der Klebefuge auftretende Zugspannung SIG_1 steigt mit sinkendem $n=a_x/b_y$ an. Hierbei ist jedoch zu beachten, daß mit Variation von $n=a_x/b_y$ bei $a_x=\text{konstant}$ und $d_r=\text{konstant}$ sich das Verhältnis von Lastangriffsfläche zu Fugenfläche verändert. Berücksichtigt man dies durch einen Korrekturfaktor, dann ist allerdings immer noch ein Anstieg von SIG_1 mit sinkendem n zu verzeichnen.

Das Seitenverhältnis und damit die Abmessung der langen Halbachse geht in die Biegesteifigkeit der Platte ein. Wie bereits bei dem Parameter Plattendicke gezeigt wurde, resultiert aus einer hohen Biegesteifigkeit der Platte eine gleichmäßige Spannungsverteilung in der Klebefuge. Ein weiterer Parameter, der linear in die Biegesteifigkeit eingeht, ist der Elastizitätsmodul des Glases.

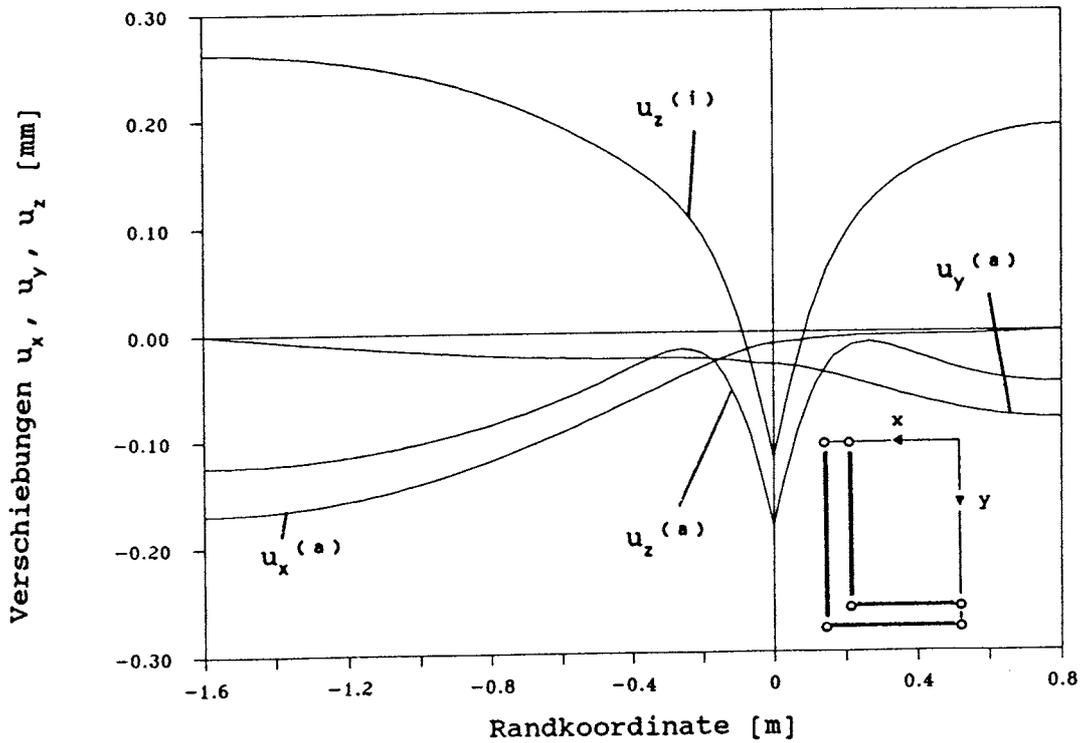


Bild 4.38. $u_x^{(a)}$, $u_z^{(a)}$, $u_z^{(i)}$ längs der Fugenkante
 ($n=a_x/b_y=0,5$, $\nu_s=0,47$, $E_s=2,5\text{N/mm}^2$)

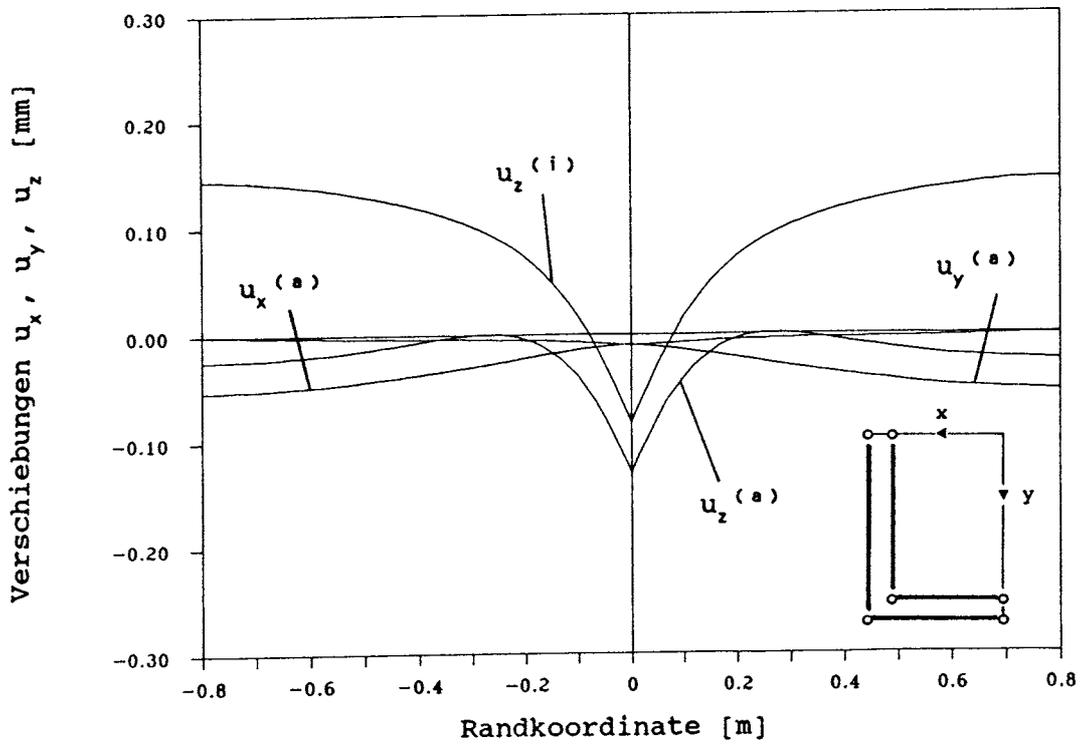


Bild 4.39. $u_x^{(a)}$, $u_z^{(a)}$, $u_z^{(i)}$ längs der Fugenkante
 ($n=a_x/b_y=1$, $\nu_s=0,47$, $E_s=2,5\text{N/mm}^2$)

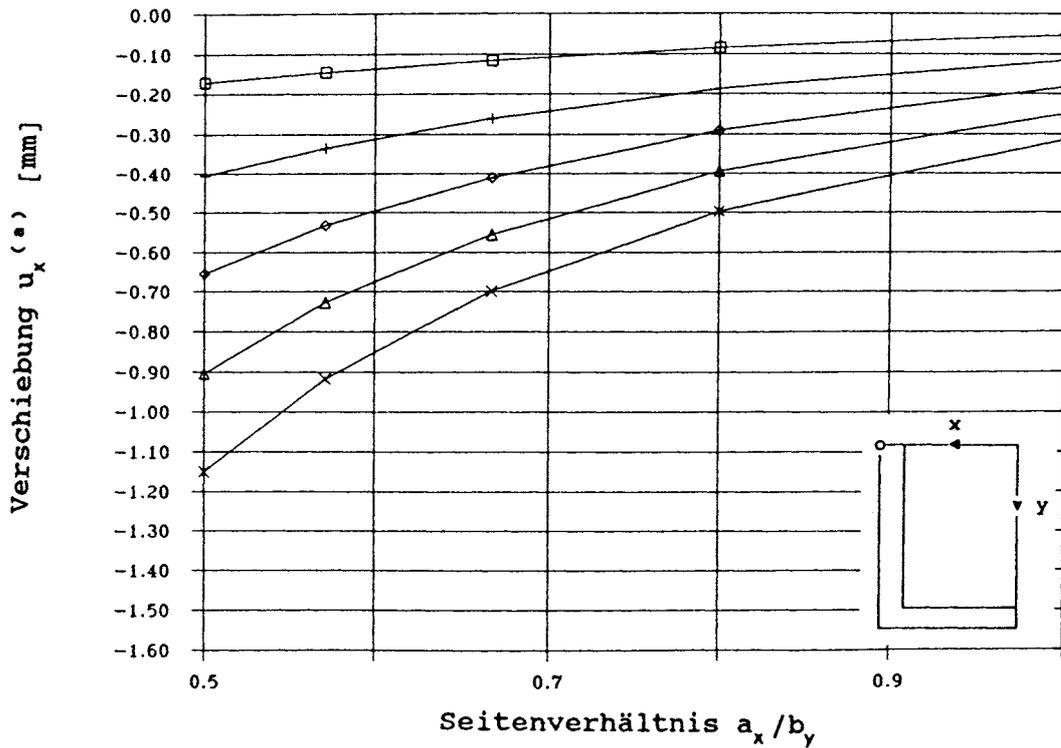


Bild 4.40. $u_x^{(a)}$ in Punkt A in Abhängigkeit vom Seitenverhältnis ($\nu_s=0,47, E_s=2,5N/mm^2$)

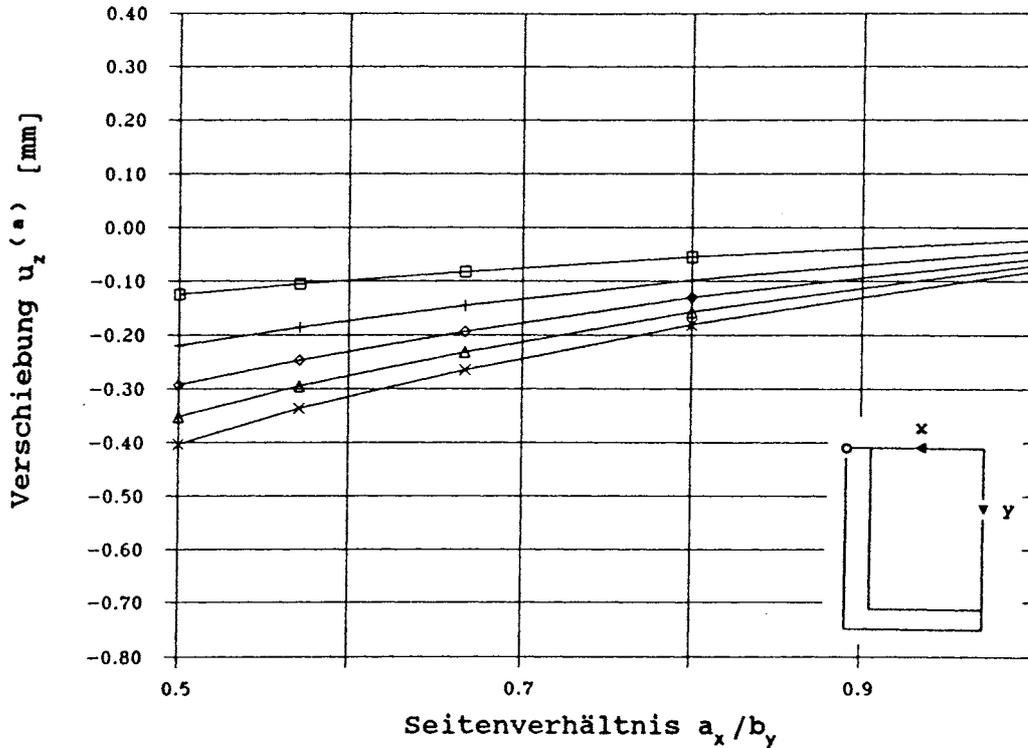


Bild 4.41. $u_z^{(a)}$ in Punkt A in Abhängigkeit vom Seitenverhältnis ($\nu_s=0,47, E_s=2,5N/mm^2$)

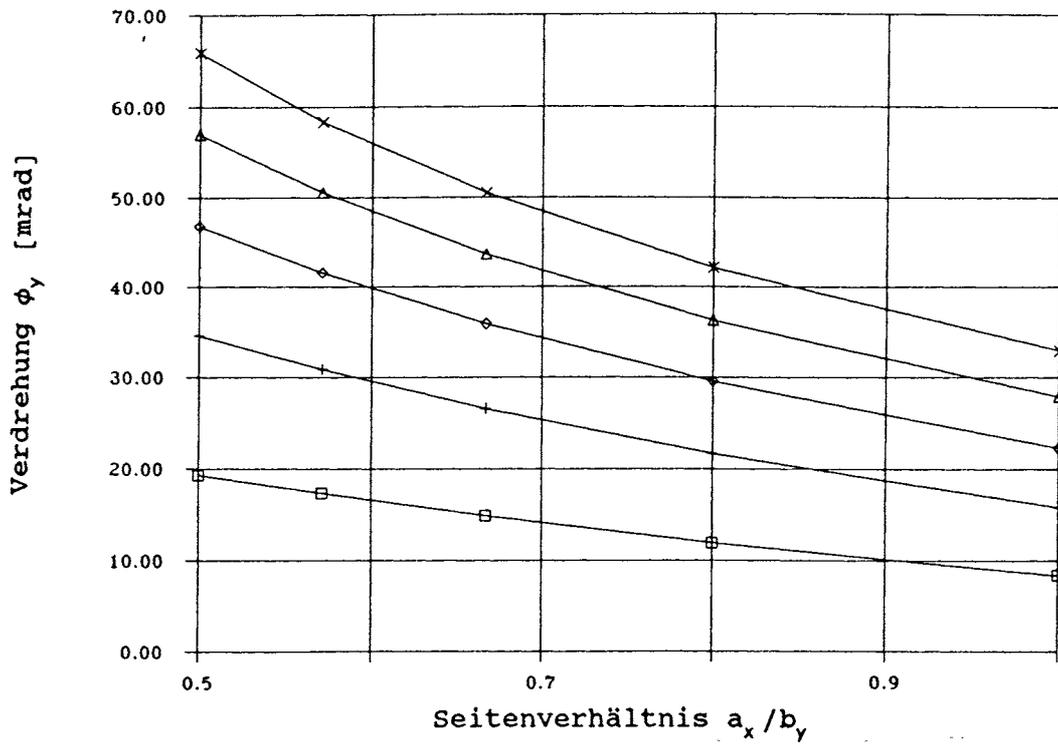


Bild 4.42. ϕ_y in Abhängigkeit vom Seitenverhältnis ($\nu_s = 0,47, E_s = 2,5N/mm^2$)

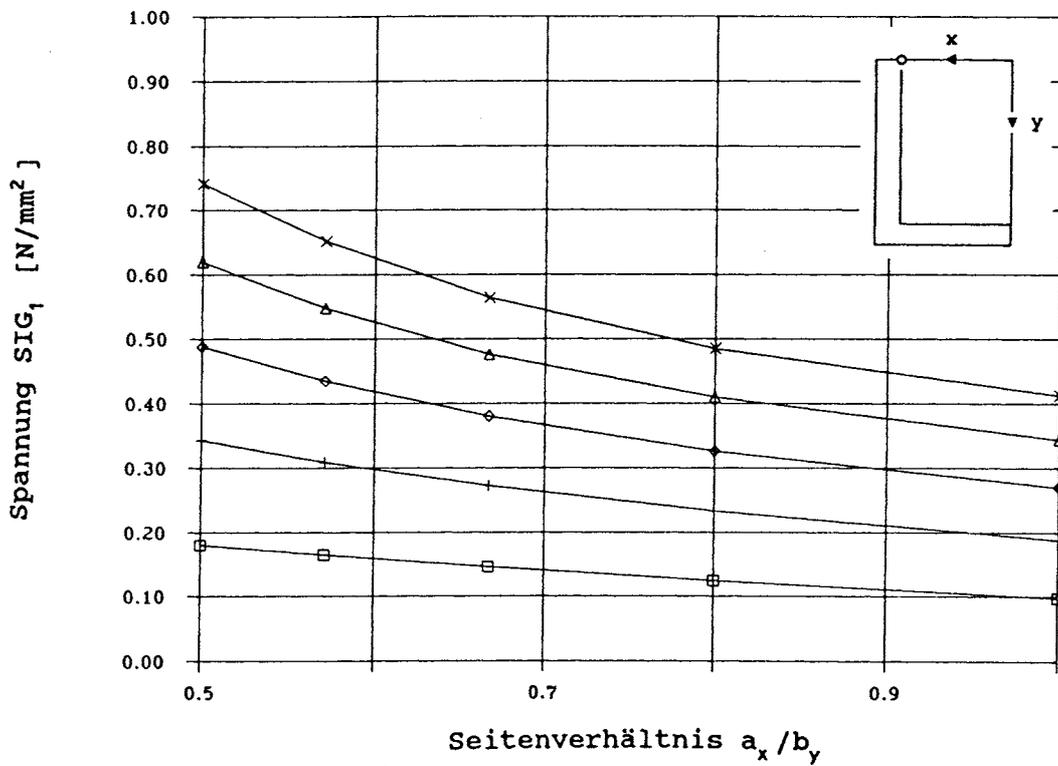


Bild 4.43. SIG_1 in Punkt D in Abhängigkeit vom Seitenverhältnis ($\nu_s = 0,47, E_s = 2,5N/mm^2$)

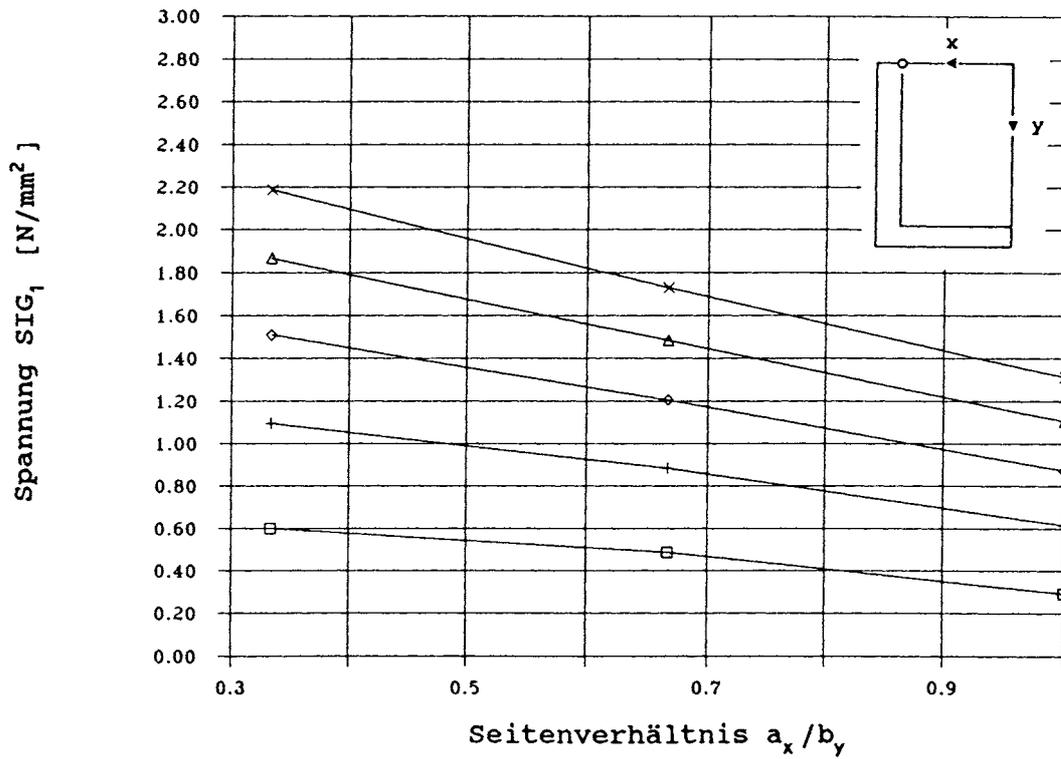


Bild 4.44. σ_{IG_1} in Abhängigkeit vom Seitenverhältnis
 ($\nu_1=0,49$, $A=0,001\text{N/mm}^2$, $B=0,26\text{N/mm}^2$)

4.3.3 Variation der Fugenhöhe

Die Fugenhöhe h_r wurde im Bereich $8\text{mm} \leq h_r \leq 12\text{mm}$ variiert. Die Verschiebungen $u_x^{(a)}$ und $u_z^{(a)}$ sowie die Verdrehung ϕ_y der Scheibe in Punkt A ($x=a_x - b_r, y=z=0$) sind in den Bildern 4.45 bis 4.47 dargestellt.

Der Einfluß der Fugenhöhe in dem betrachteten Variationsbereich ist vergleichsmäßig gering. Mit zunehmender Fugenhöhe wird die Lastabtragung längs der Fuge gleichmäßiger, so daß die maximale Zugspannung in der Kantenmitte (Punkt D) abnimmt (Bilder 4.48 und 4.49).

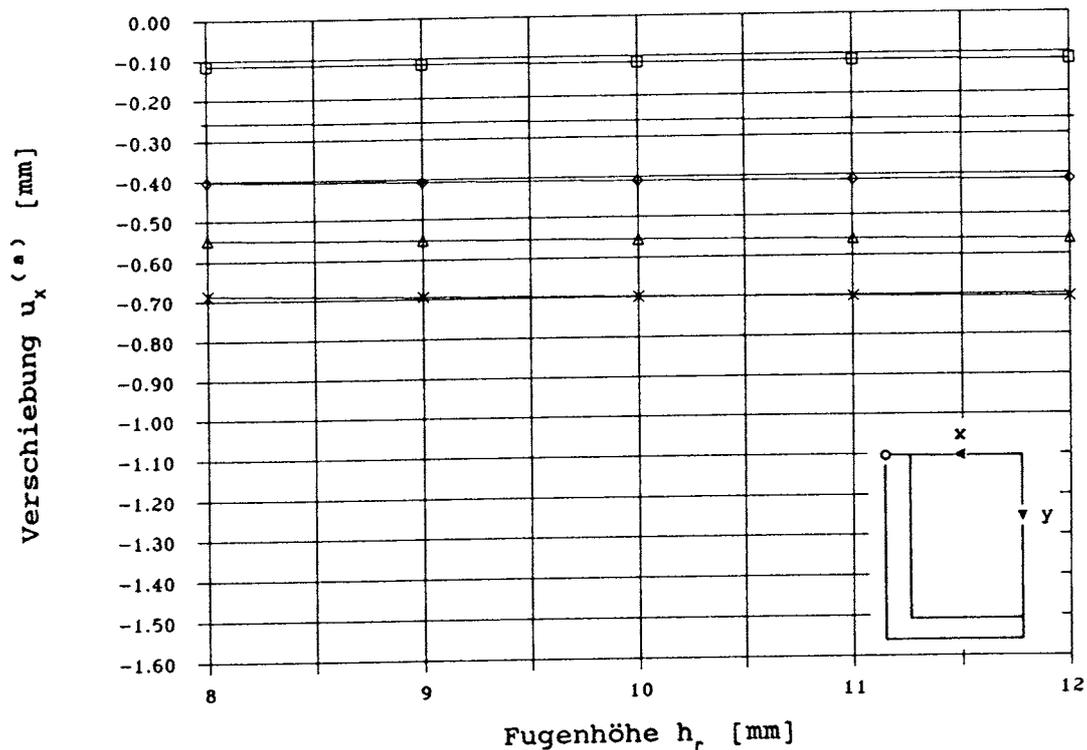


Bild 4.45. $u_x^{(a)}$ in Punkt A in Abhängigkeit von der Fugenhöhe ($\nu_s=0,47, E_s=2,5\text{N/mm}^2$)

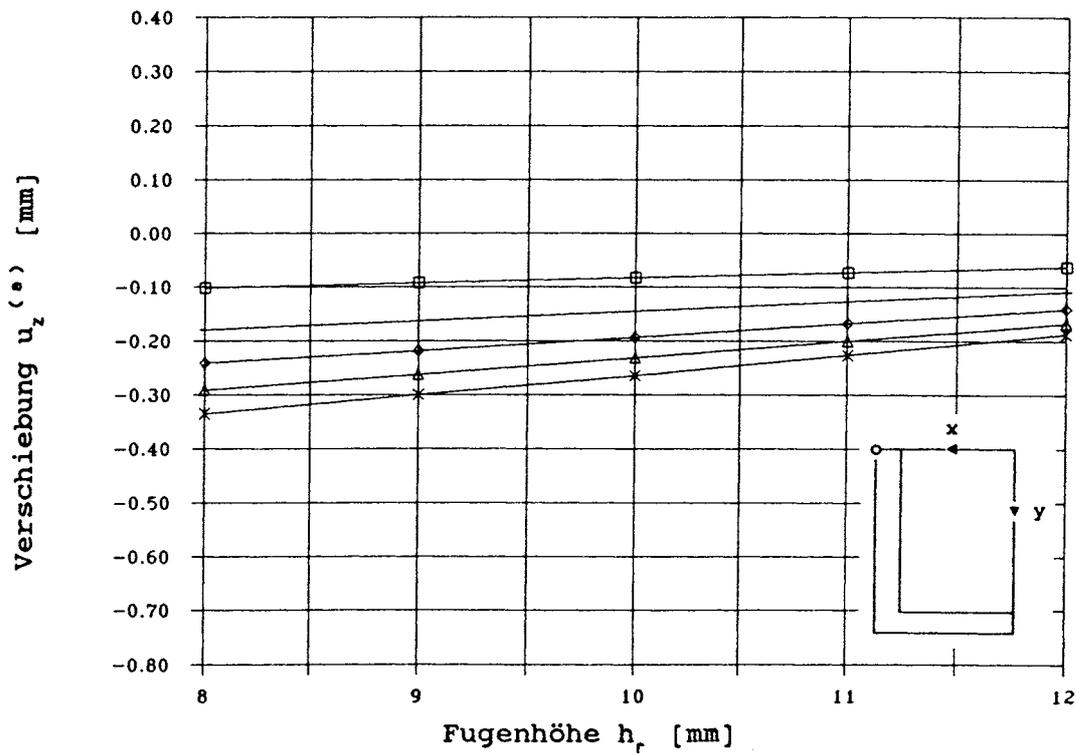


Bild 4.46. u_z (a) in Punkt A in Abhängigkeit von der Fugenhöhe ($\nu_s = 0,47$, $E_s = 2,5 \text{ N/mm}^2$)

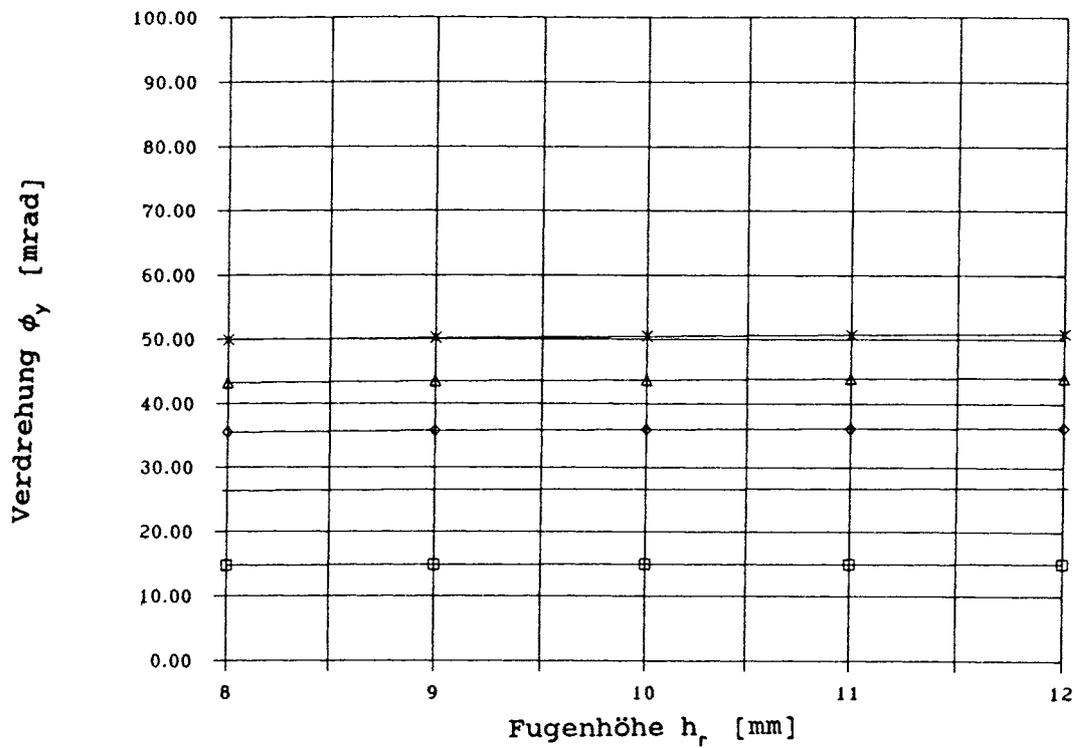


Bild 4.47. ϕ_y in Abhängigkeit von der Fugenhöhe ($\nu_s = 0,47$, $E_s = 2,5 \text{ N/mm}^2$)

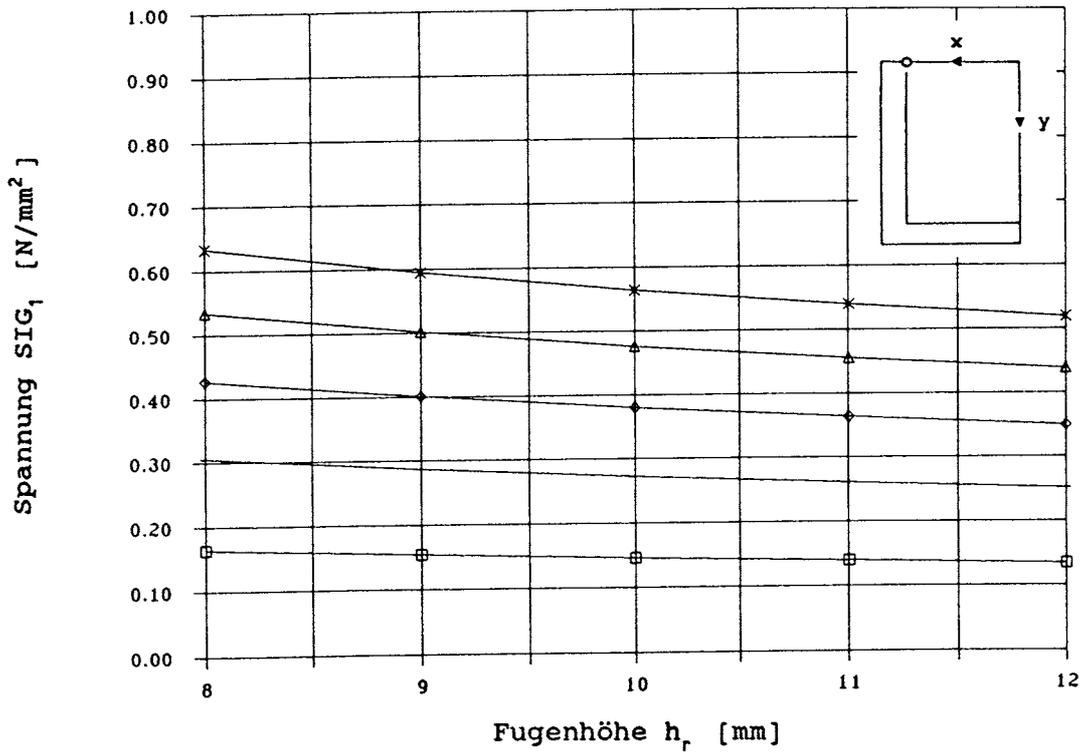


Bild 4.48. SIG_1 in Punkt D in Abhängigkeit von der Fugenhöhe ($\nu_s = 0,47$, $E_s = 2,5N/mm^2$)

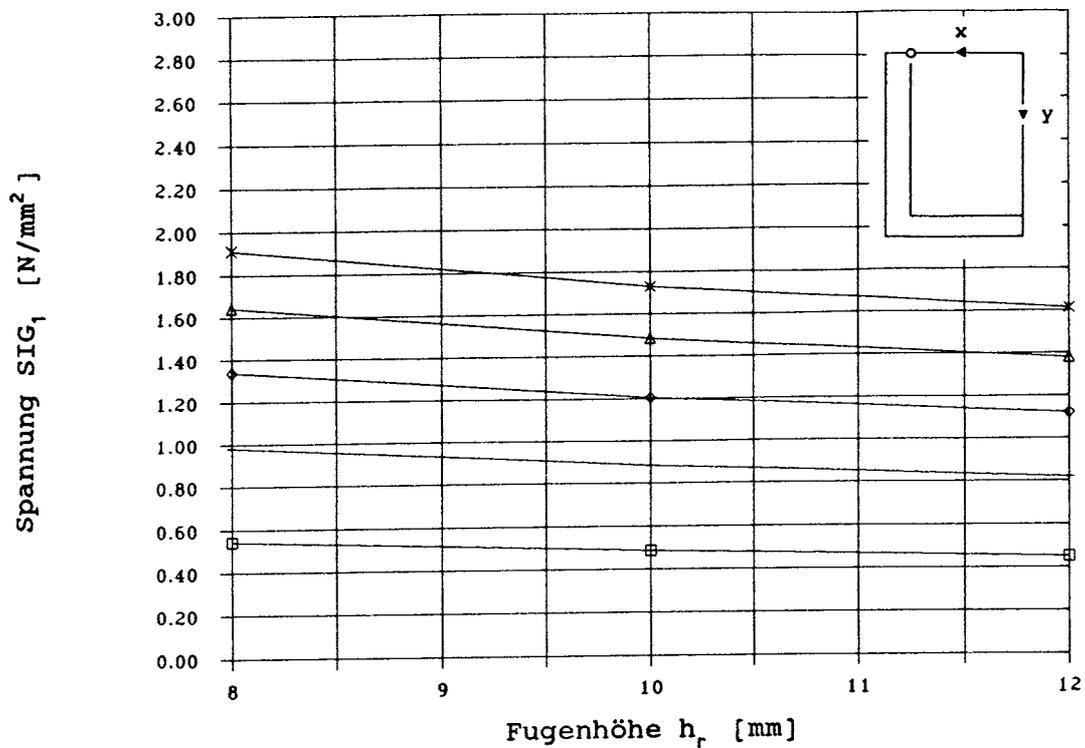


Bild 4.49. SIG_1 in Abhängigkeit von der Fugenhöhe ($\nu_s = 0,49$, $A = 0,001N/mm^2$, $B = 0,26N/mm^2$)

4.3.4 Variation der Fugenbreite

Die Fugenbreite b_f wurde im Bereich $10\text{mm} \leq d_f \leq 40\text{mm}$ variiert. Mit abnehmender Fugenbreite d_f und damit abnehmender Steifigkeit der Fuge steigen die Verschiebungen und die Verdrehung der Scheibe an (Bilder 4.50 bis 4.52). In Bild 4.51 ist zu erkennen, daß bei einer Fugenbreite von ca. 15mm der Drehpunkt genau in der äußeren Fugenkante ($x=a_x, y=0$) liegt.

Die Fugenbreite geht als geometrische Größe proportional zu b_f^{-1} in die Bemessungsformel (1) ein. Demnach steigen die Spannungen in der Klebefuge mit sinkender Fugenbreite an. Dies folgt auch aus den Finite-Elemente-Rechnungen, jedoch zeigen die berechneten maximalen Zugspannungen an der Stelle $a_x - d_f, y=z=0$ in Abhängigkeit der Fugenbreite ein flaches Minimum bei $d_f=20\text{mm}$ (Bilder 4.53 und 4.54). Der flache Anstieg bei großen d_f erklärt sich daraus, daß sich mit der Fugenbreite auch die absolute Lage des Maximums in der xy -Ebene ändert.

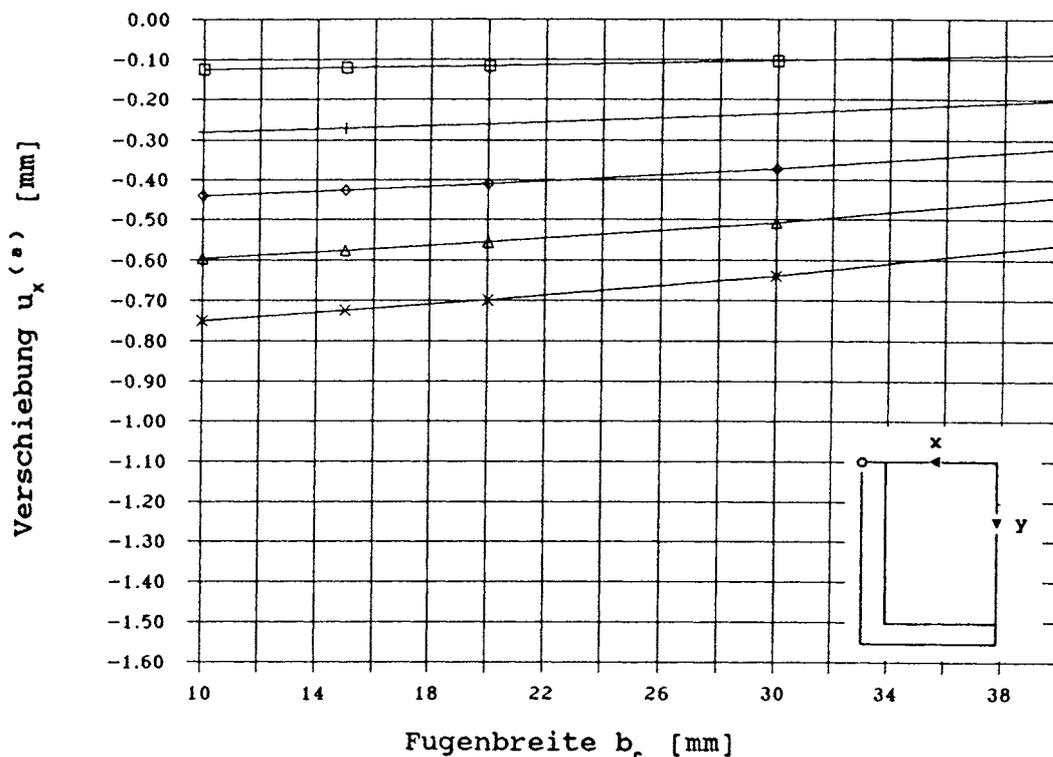


Bild 4.50. $u_x^{(a)}$ in Punkt A in Abhängigkeit von der Fugenbreite ($\nu_s=0,47, E_s=2,5\text{N/mm}^2$)

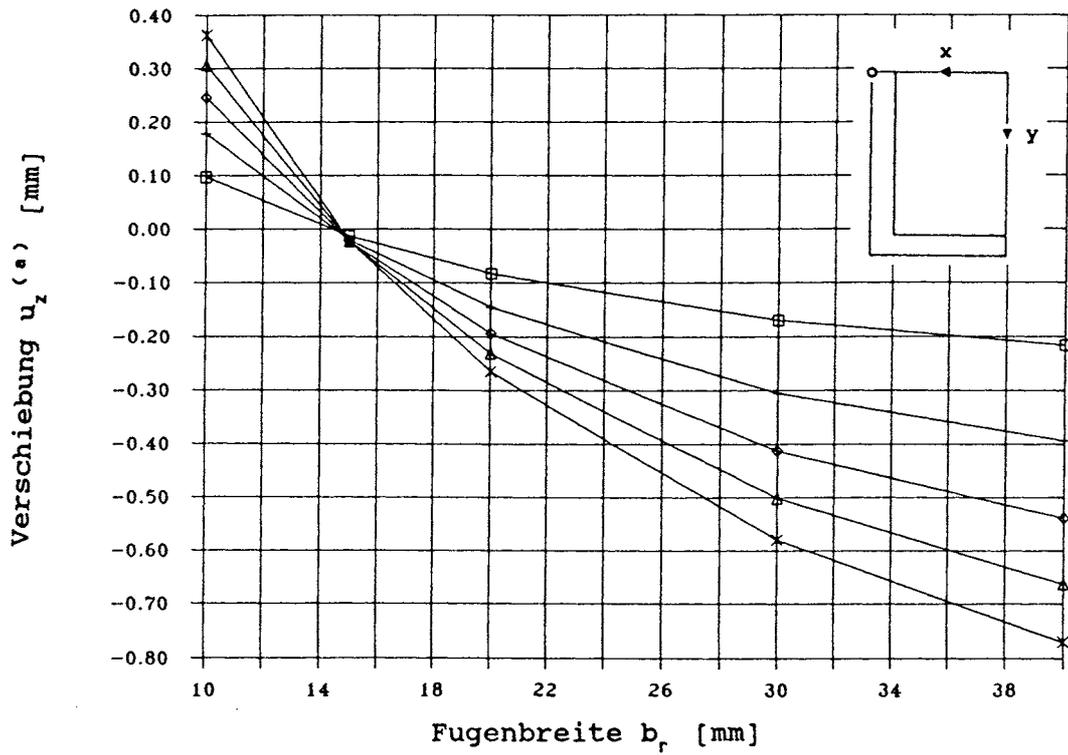


Bild 4.51. $u_z^{(a)}$ in Punkt A in Abhängigkeit von der Fugenbreite ($\nu_s=0,47$, $E_s=2,5N/mm^2$)

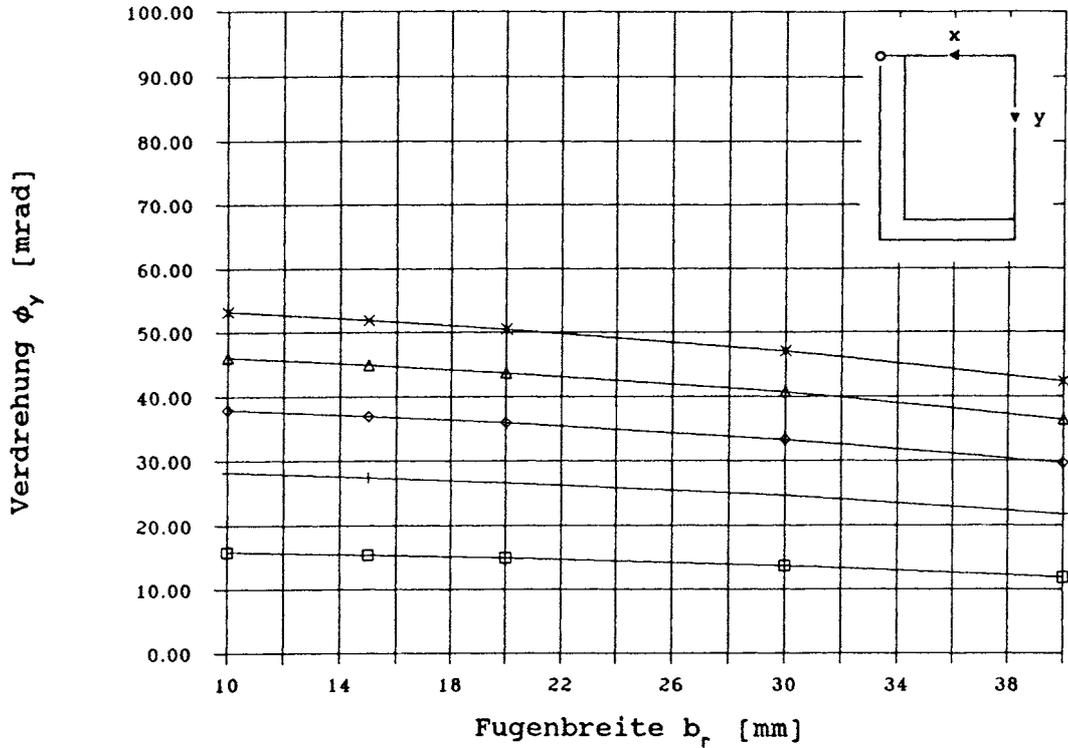


Bild 4.52. ϕ_y in Abhängigkeit von der Fugenbreite ($\nu_s=0,47$, $E_s=2,5N/mm^2$)

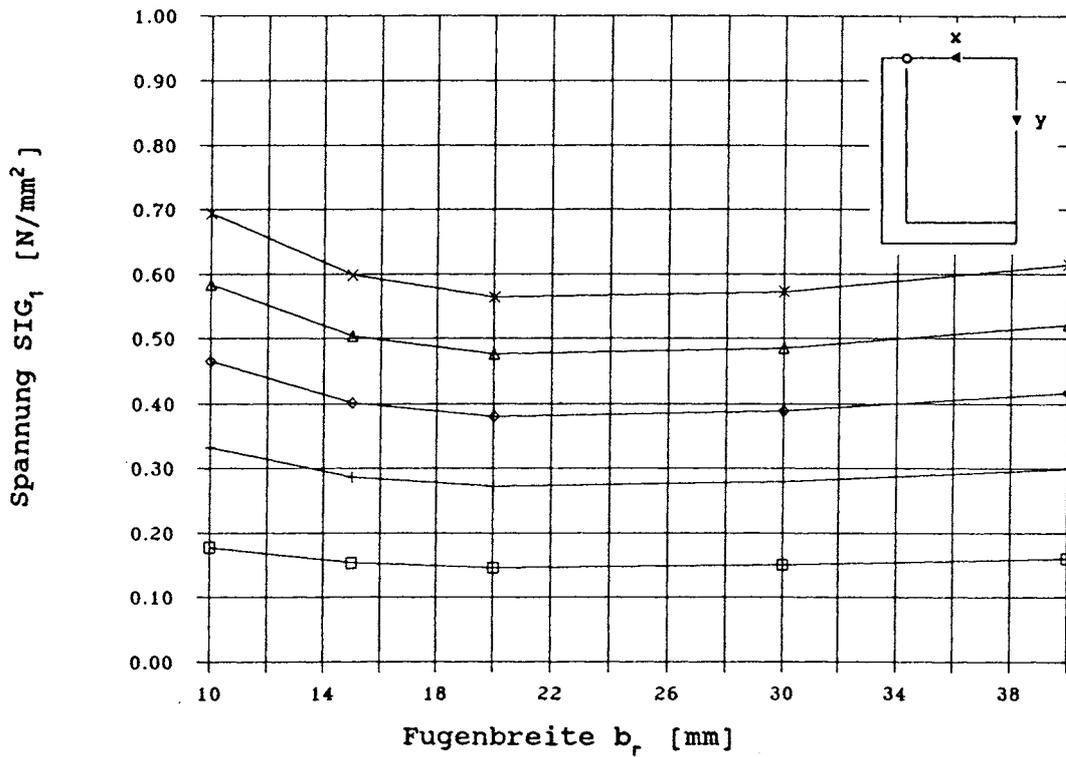


Bild 4.53. SIG_1 in Punkt D in Abhängigkeit von der Fugenbreite ($\nu_s=0,47, E_s=2,5N/mm^2$)

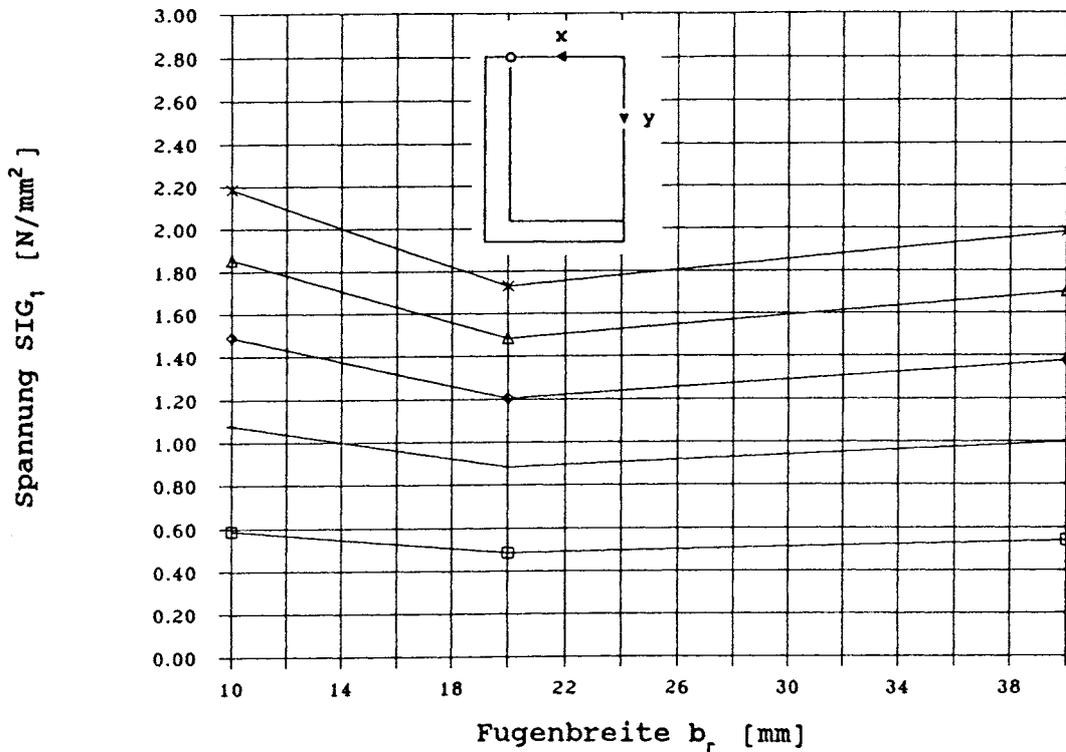


Bild 4.54. SIG_1 in Abhängigkeit von der Fugenbreite ($\nu_s=0,49, A=0,001N/mm^2, B=0,26N/mm^2$)

5. Bauteilversuche

5.1 Versuchsaufbau, Durchführung

Die Bauteilversuche hatten zum Ziel, die Ergebnisse der FE-Rechnung qualitativ und quantitativ zu verifizieren. Die Materialparameter des Silikonklebers wurden bereits aus den Detailversuchen ermittelt.

Die Versuchskörper wurden nach baupraktischen Gesichtspunkten ausgewählt. In der Tabelle 2 sind die Abmessungen der in den Versuchen Nr.1 bis 5 verwendeten Structural-Glazing-Elemente angegeben. Ausgehend von den Standardmaßen (Nr.1) wurden die Parameter Scheibendicke h_z , Fugenhöhe h_r , Seitenverhältnis a_x/b_x und Rahmensteifigkeit $E \cdot I$ erfaßt.

Nr.	a_x	b_y	h_z	b_r	h_r	$E \cdot I$
1	800mm	1200mm	10mm	20mm	10mm	∞
2	800mm	1200mm	12mm	20mm	10mm	∞
3	800mm	1200mm	10mm	20mm	12mm	∞
4	800mm	800mm	10mm	20mm	10mm	∞
5	800mm	1200mm	10mm	20mm	10mm	$7 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$

Tabelle 2. Abmessungen der Structural-Glazing-Elemente

Der Aufbau eines Structural-Glazing-Elementes ist in Bild 5.1 dargestellt. Wie in Bild 5.2 skizziert, war das Structural-Glazing-Element mit einem rechteckigen Aluminiumprofil (Querschnitt 80·60mm) und einem massiven Strahlrahmen verschraubt. Der Stahlrahmen war durch Dübel fest mit einer Betonplatte verbunden, so daß sichergestellt war, daß bei Belastung der Scheibe durch Luftsäcke sich der Rahmen nicht ($<10^{-2}$ mm) verformen kann. Bei Versuch Nr.5 wurde die feste Schraubverbindung zwischen Aluminiumprofil, Aluminiumrahmen und Stahlrahmen im Bereich der längeren Seiten mit Ausnahme der Ecken der Glasplatte gelöst. Das Aluminiumprofil und der Aluminiumrahmen blieben verbunden und konnten sich bei Belastung verformen.

Die Verformungen der Platte wurden mit ohmschen und induktiven Wegaufnehmern gemessen. Die Anordnung der Wegaufnehmer erfolgte gemäß Bild 5.3 entlang der Plattendagonalen, an den Ecken und an der Seitenmitte der Glasscheibe. Mit der in Bild 5.3 skizzierten Anordnung wurden die out-of-plane-Verschiebung u_z entlang der Diagonalen und an den Kantenmitten der Glasscheibe, die in-plane-Verschiebungen u_x bzw. u_y und die Verdrehungen ϕ_y bzw. ϕ_x an den Kantenmitten der Glasscheibe gemessen.

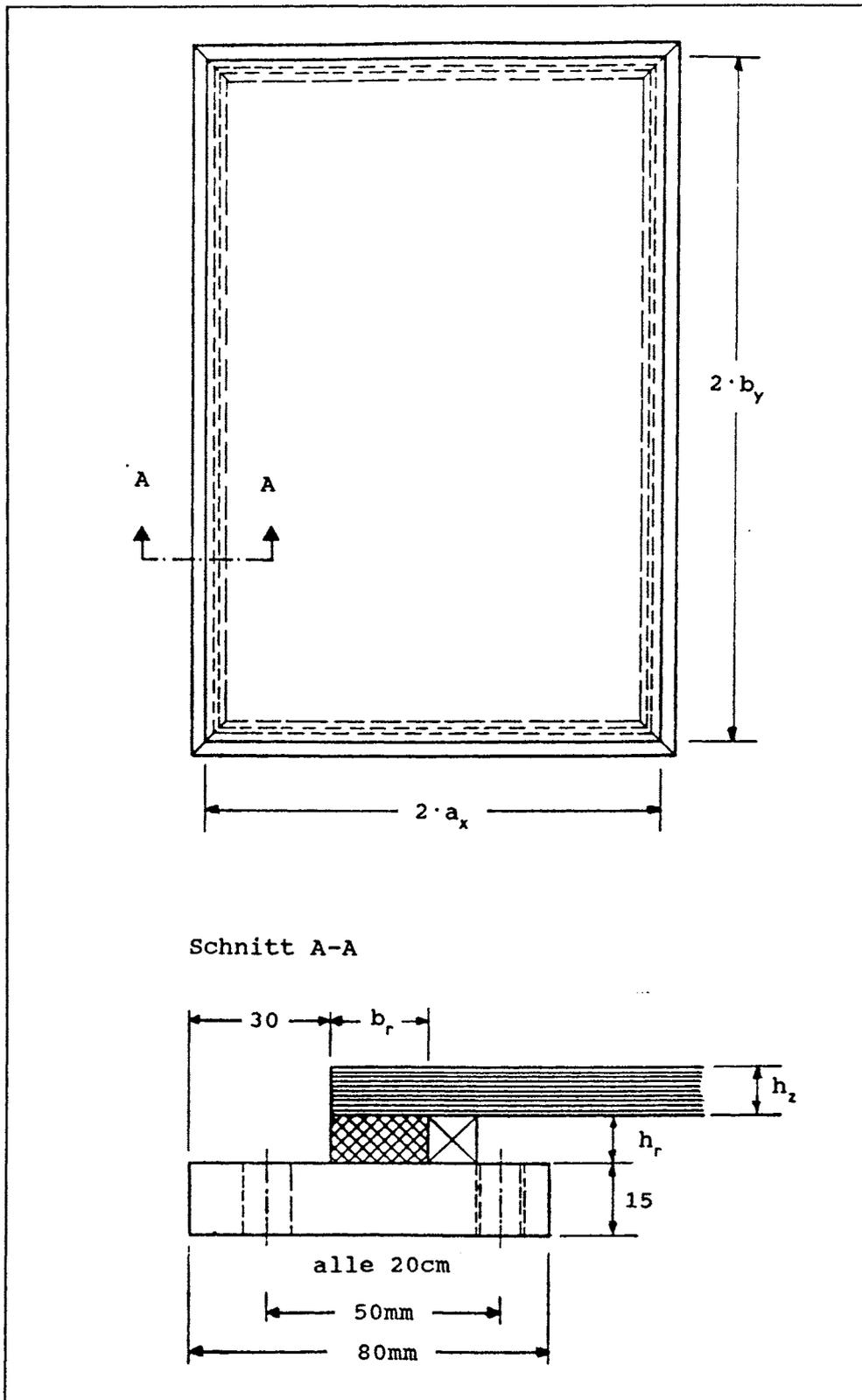


Bild 5.1. Aufbau eines Structural-Glazing-Elementes

Die Wegaufnehmer zur Messung der in-plane-Verschiebung wurden auf der Höhe der Mitte der Scheibe ($z=h_z/2$) angesetzt. Bei bekannter Verdrehung wurden die Meßwerte dann auf die Höhe $z=0$ (Punkt A) extrapoliert.

An der Klebefuge und an den Kanten der Glasscheibe treten nur sehr kleine Verformungen auf, die nur mit einem relativ hohen meßtechnischen Aufwand hinreichend genau bestimmt werden können. Deshalb wurden die Meßstellen Plattenmitte, Ecke und Kantenmitte der Glasscheibe ausgewählt, an denen relativ große Verschiebungen auftreten. Die Mittendurchbiegung der Platte wird maßgeblich durch die Steifigkeit der Glasscheibe, aber nur in zweiter Linie durch die Steifigkeit der Klebefuge, d.h. durch die Lagerbedingungen am Rand, bestimmt. Die u_z -Verschiebungen der Ecke sowie die in-plane-Verschiebungen an den Kantenmitten der Glasscheibe hingegen hängen auch stark von der Steifigkeit der Klebefuge und des Abstandshalters ab.

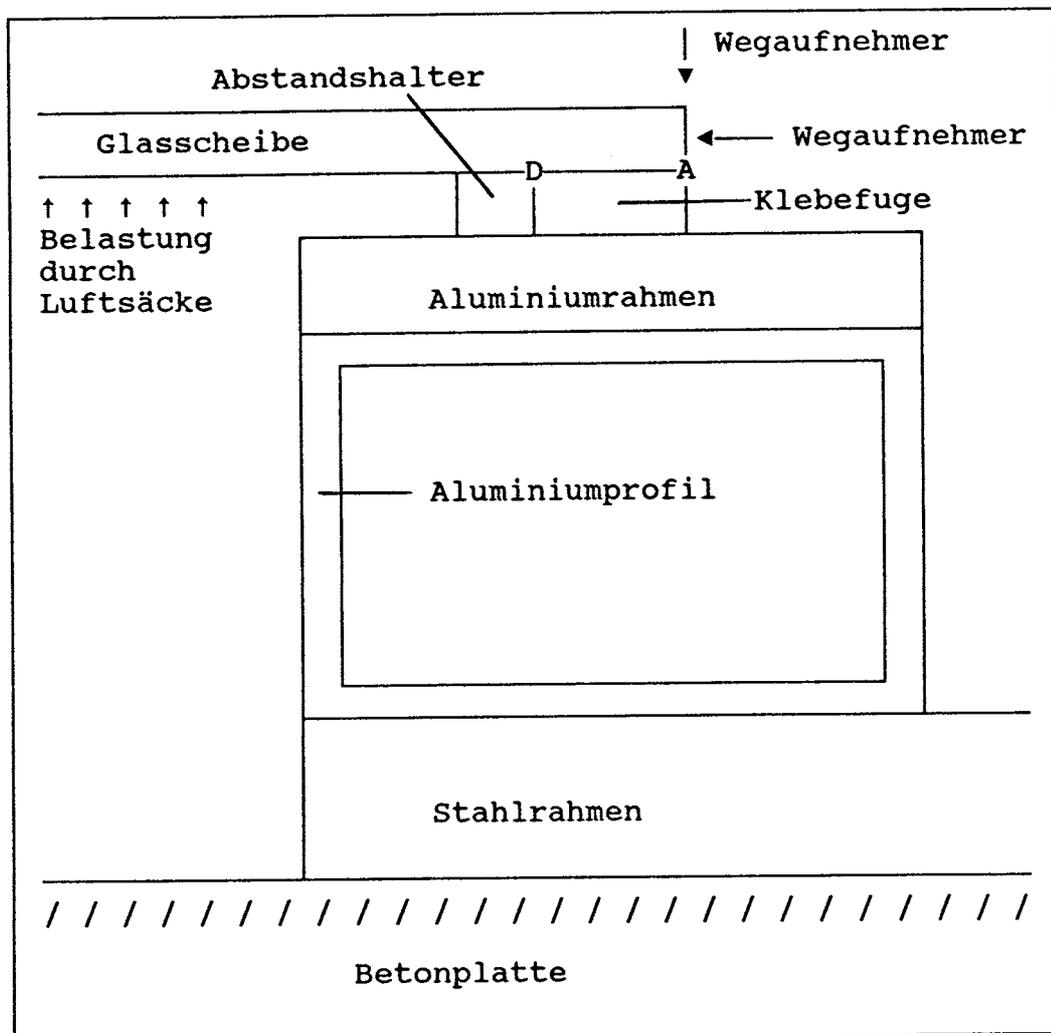


Bild 5.2. Versuchsaufbau

5.2 Versuchsergebnisse, Vergleich mit den Ergebnissen der Finite-Elemente-Berechnungen

5.2.1 Vorgehensweise

Die Meßergebnisse wurden mit Ergebnissen der Finite-Elemente-Berechnungen verglichen, wobei die Materialparameter von Glas zu $E_g = 7,2 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$, $\nu_g = 0,22$ und die Materialparameter von Silikonkautschuk zu $E_s = 2,5 \text{ N/mm}^2$, $\nu_s = 0,47$ gesetzt wurden. Die Abstandshalter wurden (entsprechend Abschnitt 3.1.3) mit nichtlinearen Balkenelementen STIF10 modelliert. Außerdem wurde in der Rechnung berücksichtigt, daß bei den Versuchen die Drucklast nicht auf der vollen Fläche der Glasscheibe angreift.

5.2.2 Versuchskörper mit Standardabmessungen

Der Versuchskörper hatte folgende Abmessungen:

Halbe Kantenlänge a_x	=	800mm	
Halbe Kantenlänge b_y	=	1200mm	
Plattendicke h_z	=	10mm	(Geometrie der Platte)
Höhe der Klebefuge h_r	=	10mm	
Breite der Klebefuge b_r	=	20mm	(Geometrie der Fuge)
Rahmensteifigkeit $E \cdot I$	\approx	∞	

Die Ergebnisse der Bauteilversuche sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Bild 5.4 zeigt die gemessene u_z -Verschiebung entlang der Plattendiagonalen für Laststufen von 1 kN/m^2 bis 5 kN/m^2 . In den Bildern 5.5 bis 5.7 sind in Abhängigkeit der Last die gemessenen (—■—) und die berechneten (—) u_z -Verschiebungen in der Plattenmitte und der Ecke (Punkt B) sowie die u_x -Verschiebung in der Mitte der längeren Kante (Punkt A) der Scheibe aufgetragen.

Die eingezeichneten Fehlerbalken wurden aus den Meßfehlern in der Ortmessung, der Wegmessung und der Druckmessung ermittelt und liegen im Bereich von ca. 5% bis 10% des Meßwertes. Weitere Fehlereinflüsse (z.B. bedingt durch die Hysterese) sind nicht berücksichtigt. Wie im weiteren gezeigt wird, ergibt sich qualitativ und quantitativ eine gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Versuch. Tendenziell liegen die Rechenwerte gegenüber den Meßwerten etwas zu hoch. Dies könnte in der Finite-Elemente-Rechnung durch einen höheren Elastizitätsmodul E_g kompensiert werden. Außerdem ist die Wirkung des Abstandshalters durch die einfache Modellierung nicht vollständig erfaßt.

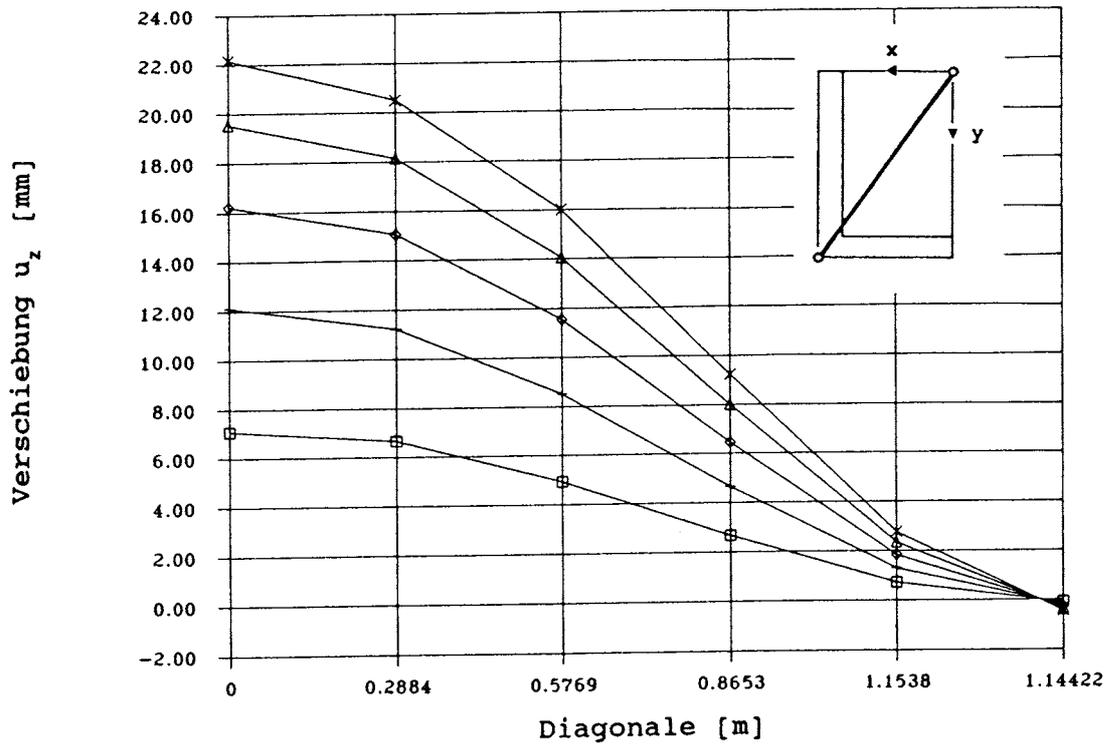


Bild 5.4. Gemessene u_z -Verschiebung längs der Plattendiagonalen

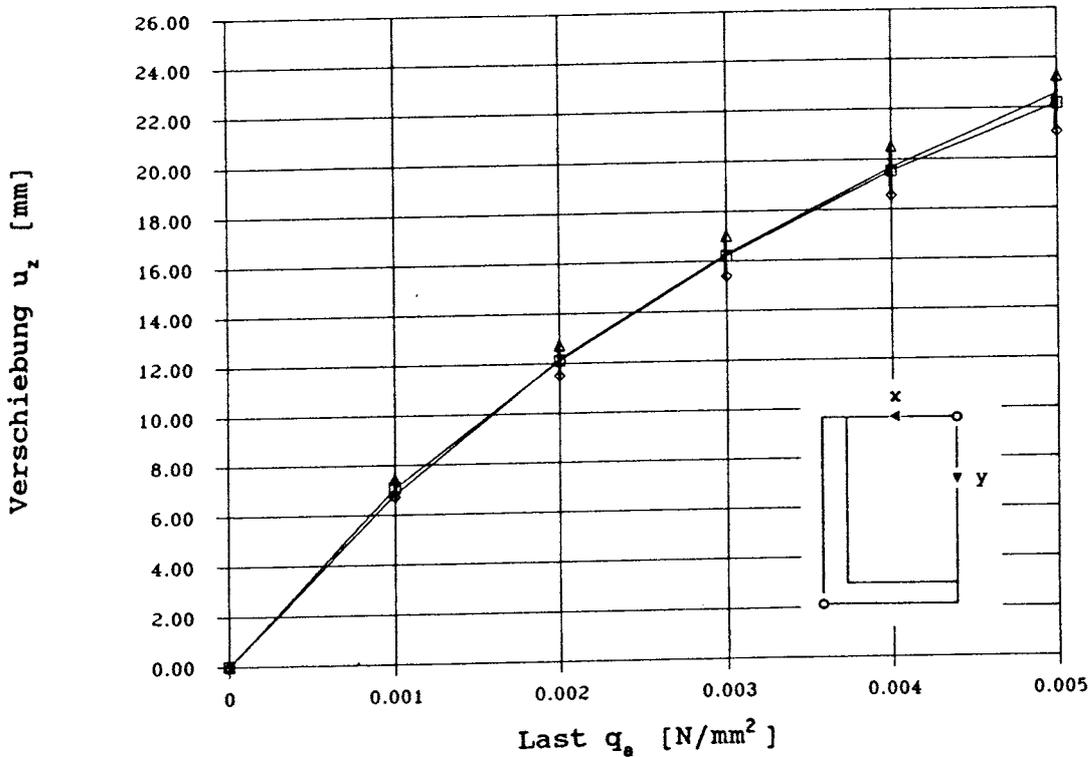


Bild 5.5. Gemessene (---) und gerechnete Mittendurchbiegung in Abhängigkeit von der Last

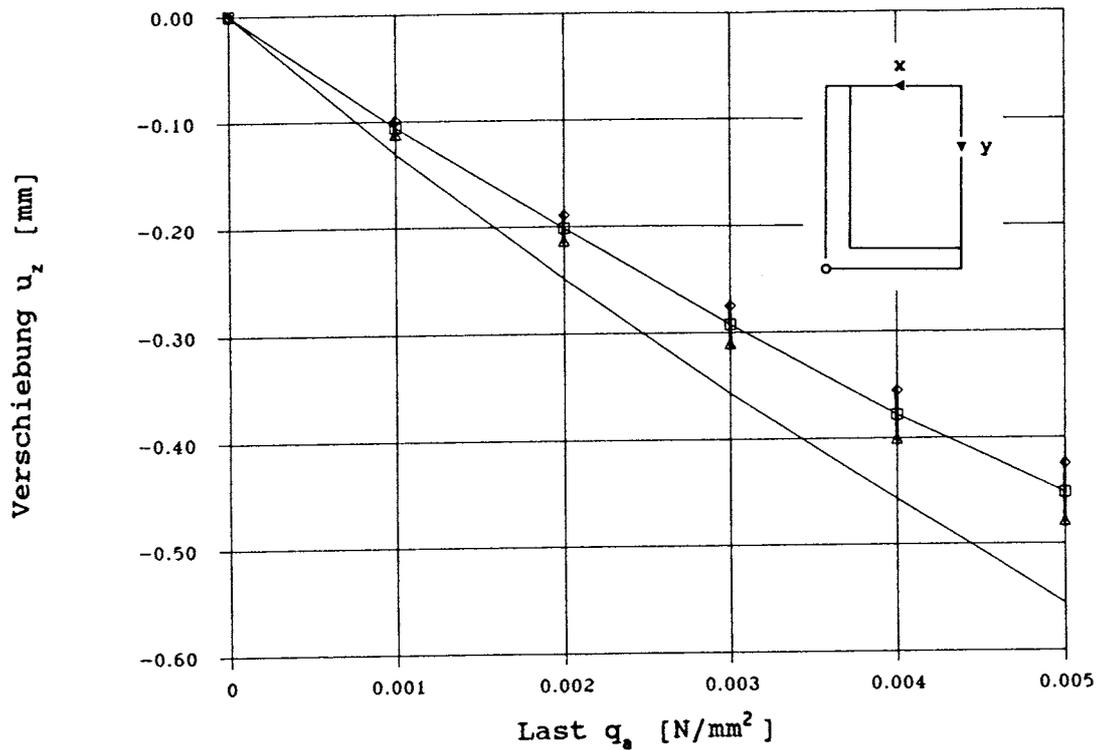


Bild 5.6. Gemessene (\square) und gerechnete u_z -Verschiebung in der Ecke in Abhängigkeit von der Last

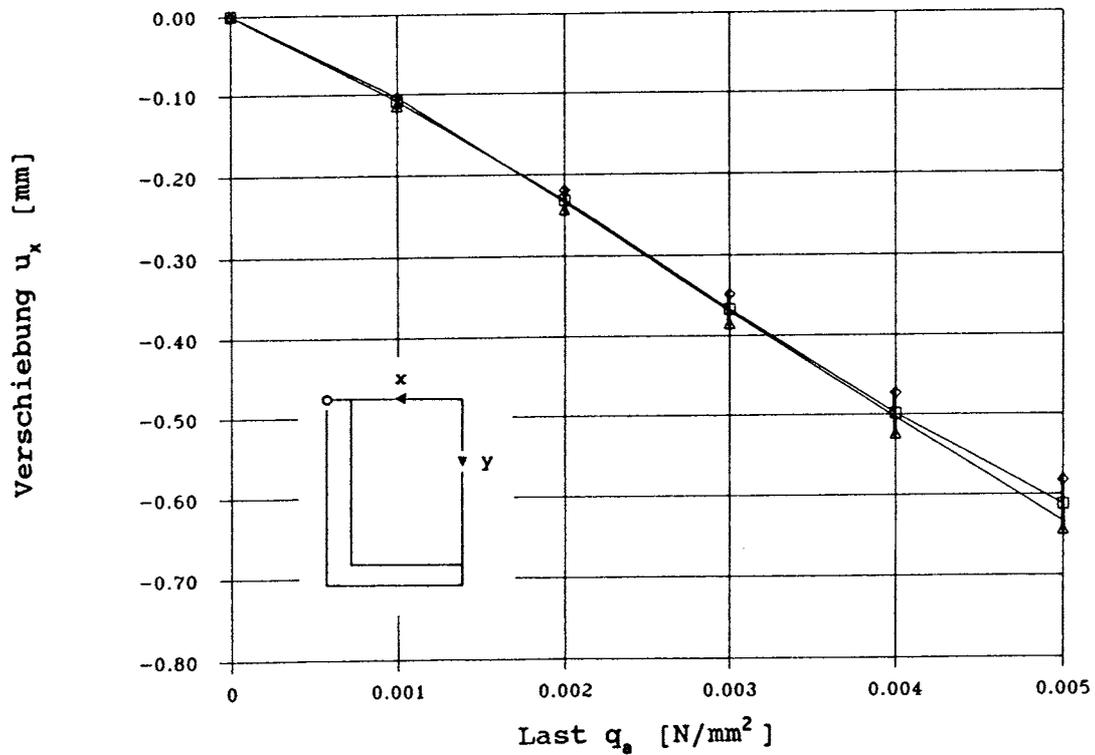


Bild 5.7. Gemessene (\square) und gerechnete u_x -Verschiebung in der Kantenmitte der Scheibe über der Last

5.2.3 Veränderung der Plattendicke

Der Versuchskörper hatte folgende Abmessungen:

- Halbe Kantenlänge a_x = 800mm
- Halbe Kantenlänge b_y = 1200mm
- Plattendicke h_z = 12mm (Geometrie der Platte)
- Höhe der Klebefuge h_r = 10mm
- Breite der Klebefuge b_r = 20mm (Geometrie der Fuge)
- Rahmensteifigkeit $E \cdot I = \infty$

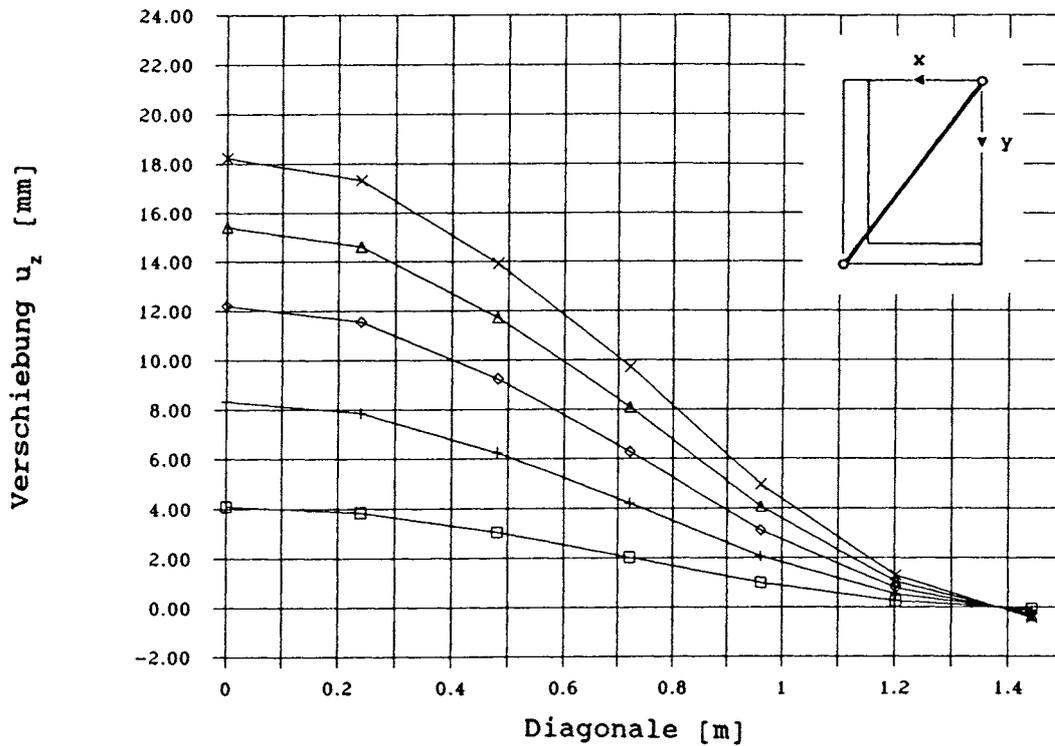


Bild 5.8. Gemessene u_z -Verschiebung längs der Plattendiagonalen

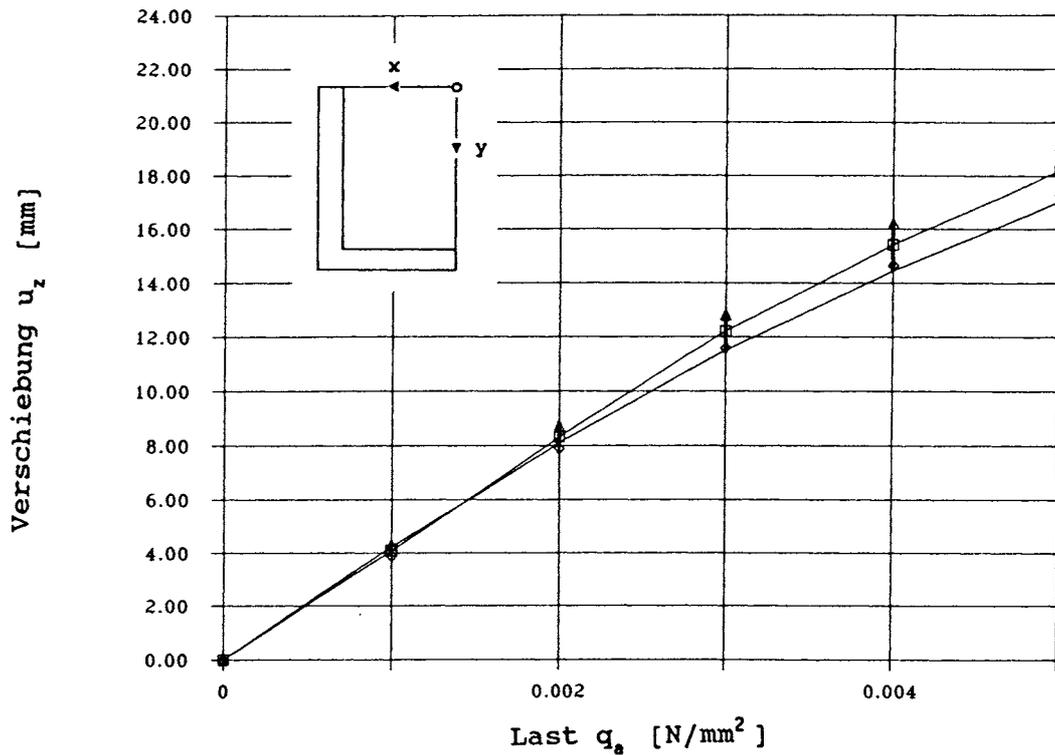


Bild 5.9. Gemessene (—□—) und gerechnete Mittendurchbiegung in Abhängigkeit von der Last

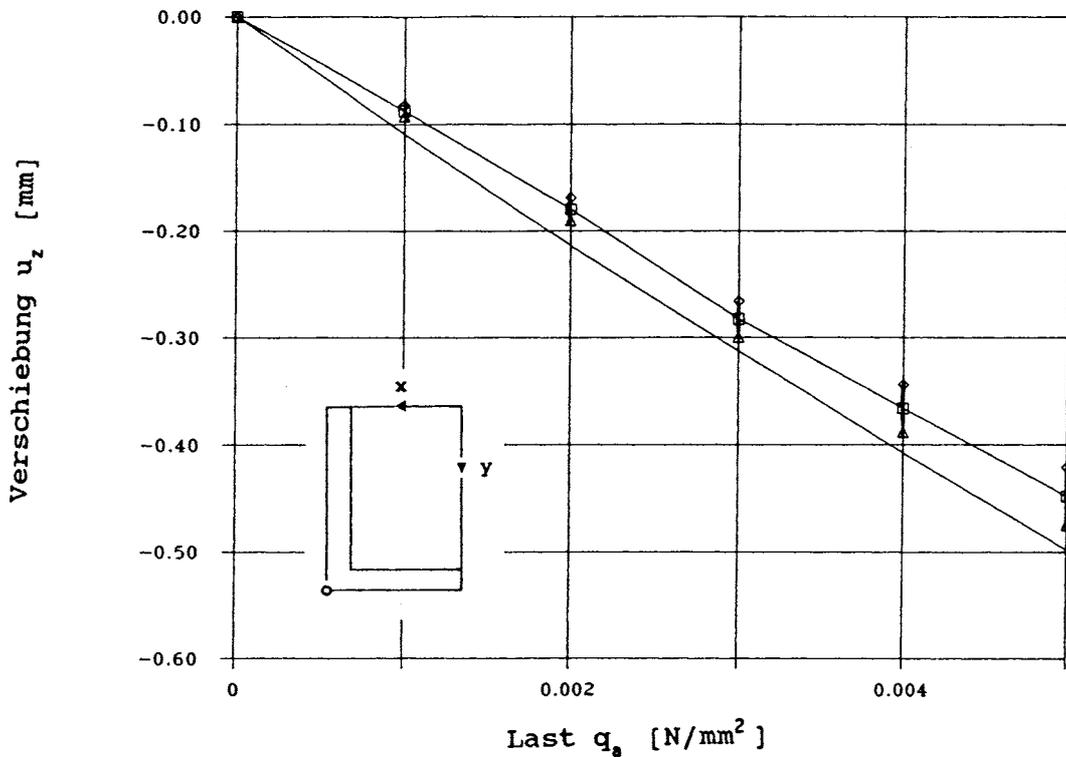


Bild 5.10. Gemessene (—□—) und gerechnete u_z -Verschiebung in der Ecke in Abhängigkeit von der Last

- 70 -

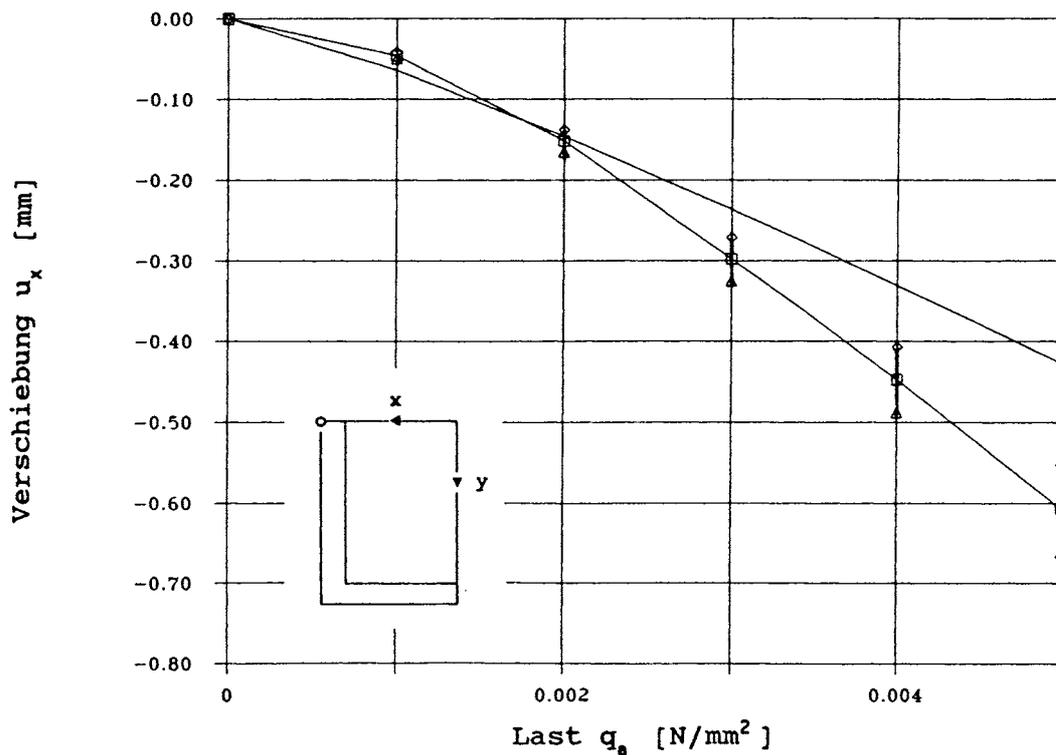


Bild 5.11. Gemessene (—■—) und gerechnete u_x -Verschiebung in der Kantenmitte der Scheibe über der Last

5.2.4 Veränderung der Fugenhöhe

Der Versuchskörper hatte folgende Abmessungen:

Halbe Kantenlänge a_x	=	800mm	
Halbe Kantenlänge b_y	=	1200mm	
Plattendicke h_z	=	10mm	(Geometrie der Platte)
Höhe der Klebefuge h_r	=	12mm	
Breite der Klebefuge b_r	=	20mm	(Geometrie der Fuge)
Rahmensteifigkeit $E \cdot I$	=	∞	

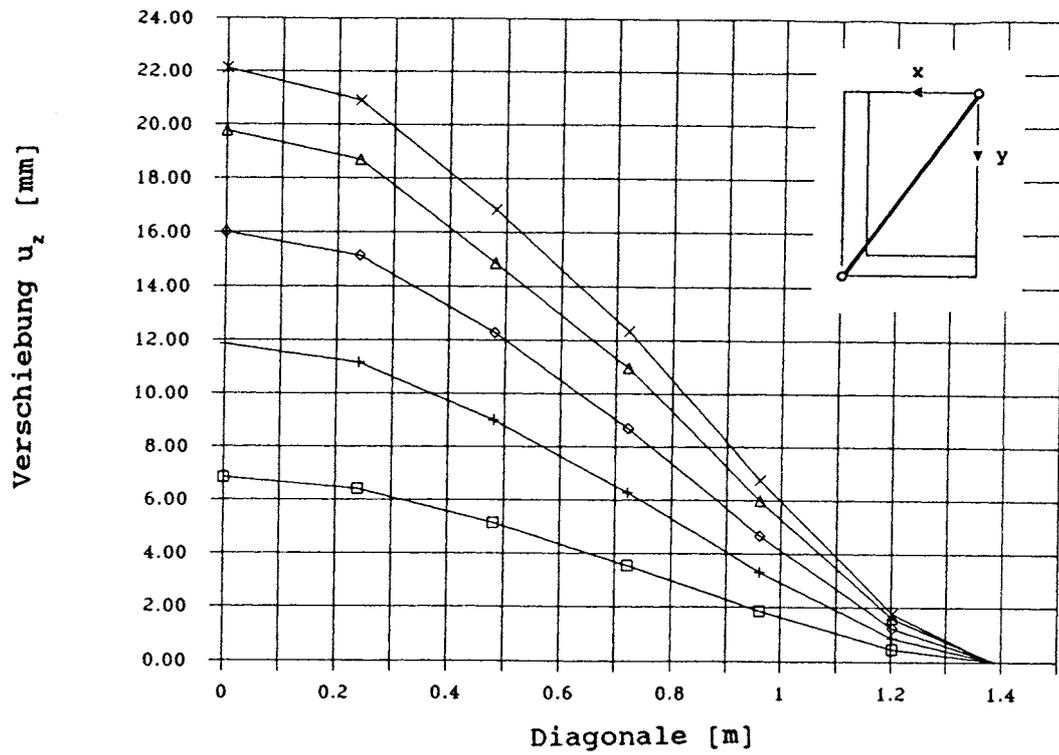


Bild 5.12. Gemessene u_z -Verschiebung längs der Plattendiagonalen

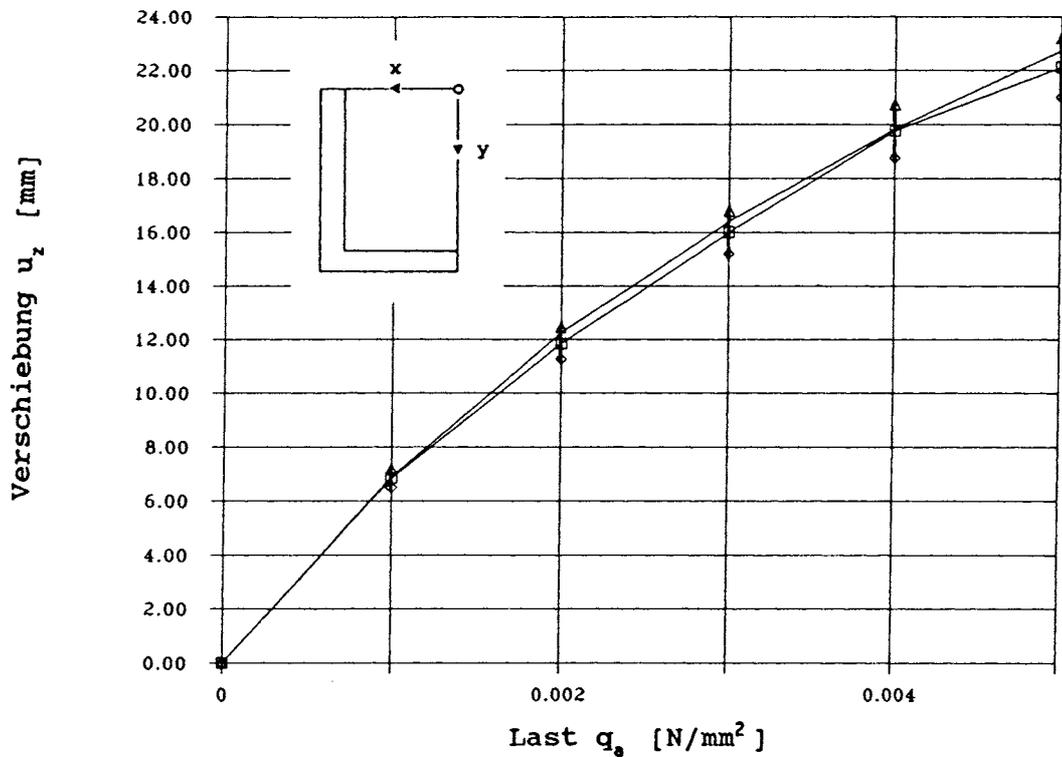


Bild 5.13. Gemessene (---) und gerechnete Mittendurchbiegung in Abhängigkeit von der Last

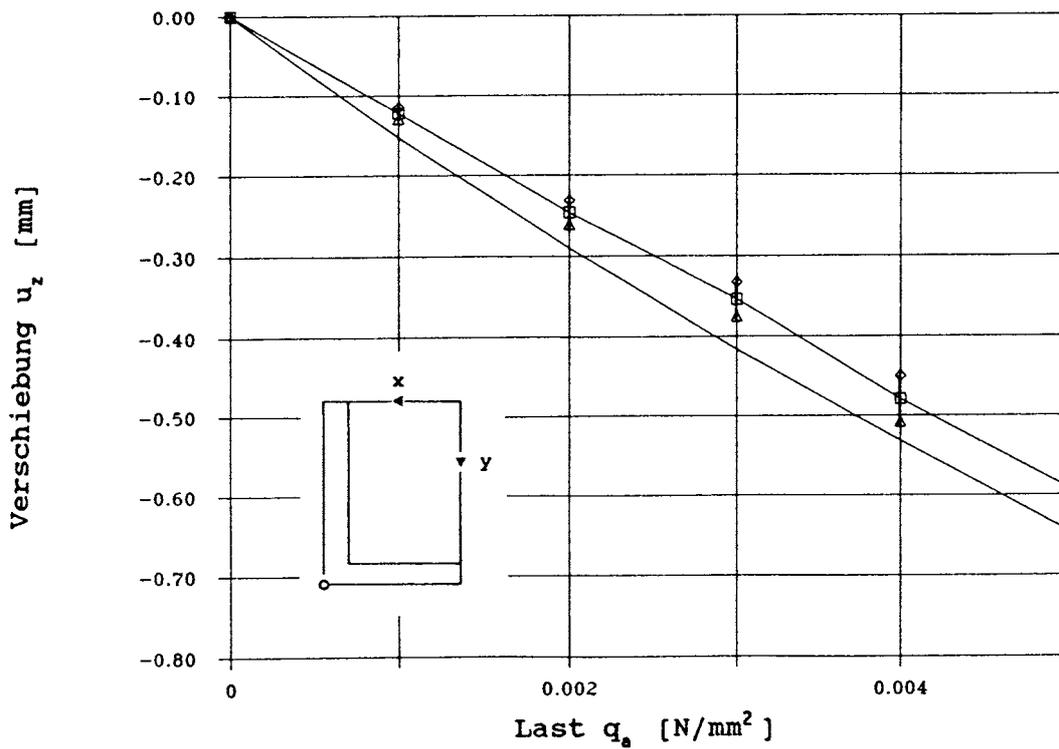


Bild 5.14. Gemessene (—□—) und gerechnete u_z -Verschiebung in der Ecke in Abhängigkeit von der Last

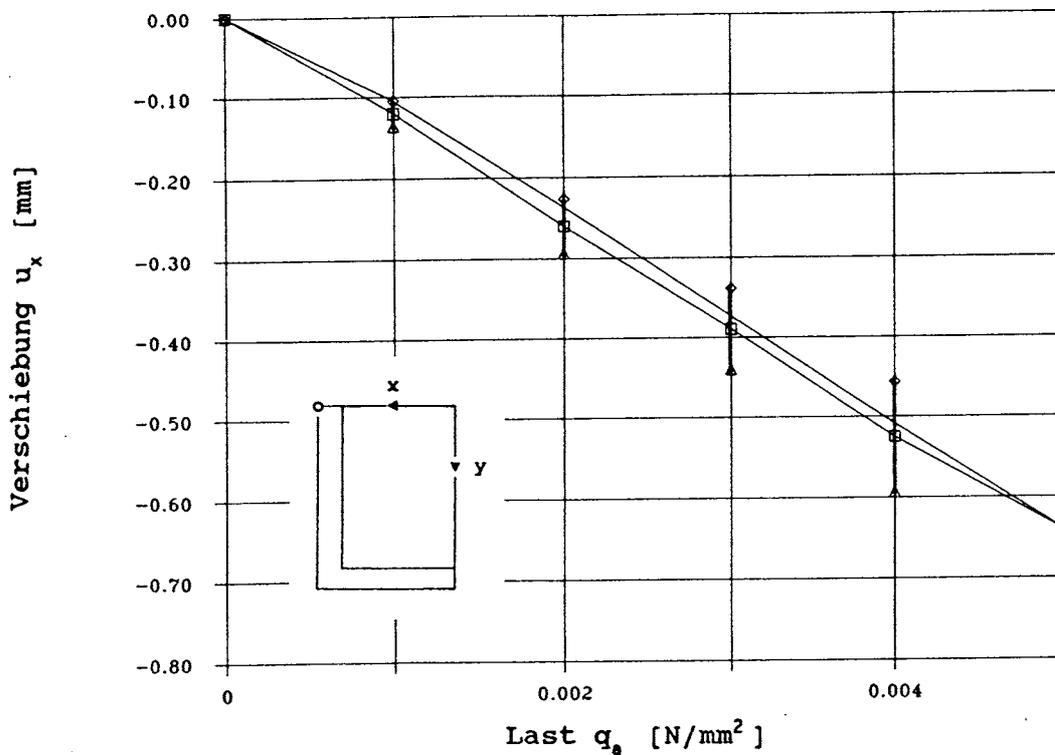


Bild 5.15. Gemessene und gerechnete u_x -Verschiebung in der Kantenmitte der Scheibe über der Last

5.2.5 Veränderung des Seitenverhältnisses

Der Versuchskörper hatte folgende Abmessungen:

Halbe Kantenlänge a_x = 800mm
 Halbe Kantenlänge b_y = 800mm
 Plattendicke h_z = 10mm (Geometrie der Platte)

Höhe der Klebefuge h_r = 10mm
 Breite der Klebefuge b_r = 20mm (Geometrie der Fuge)

Rahmensteifigkeit $E \cdot I \approx \infty$

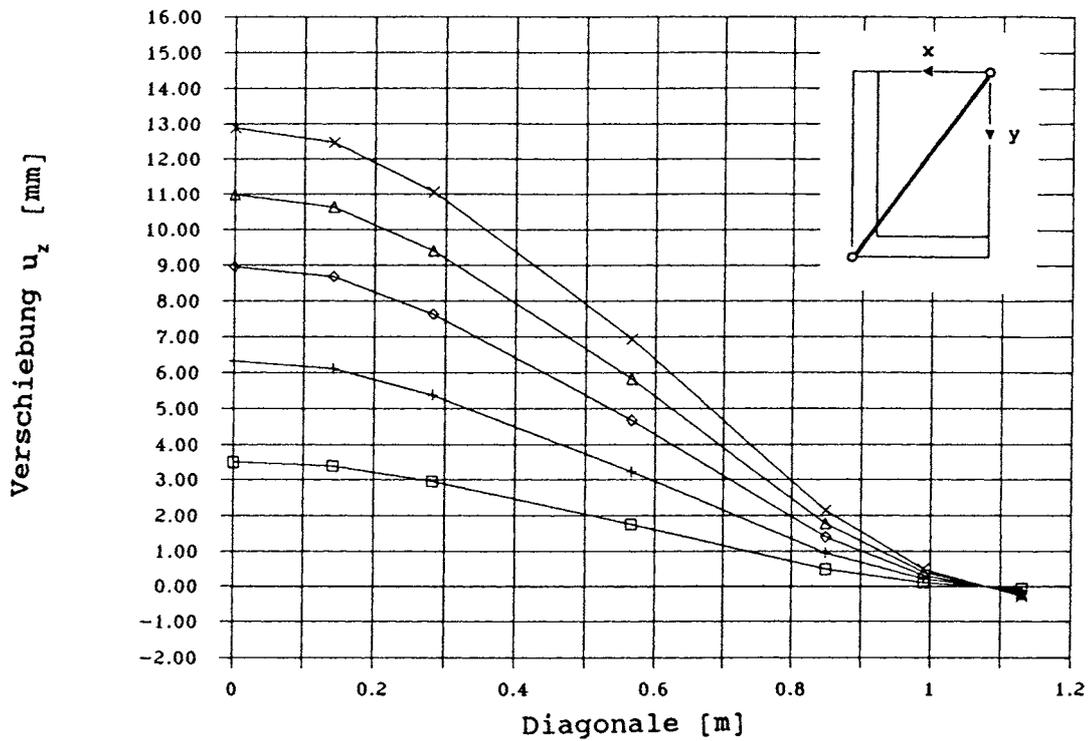


Bild 5.16. Gemessene u_z -Verschiebung längs der Plattendiagonalen

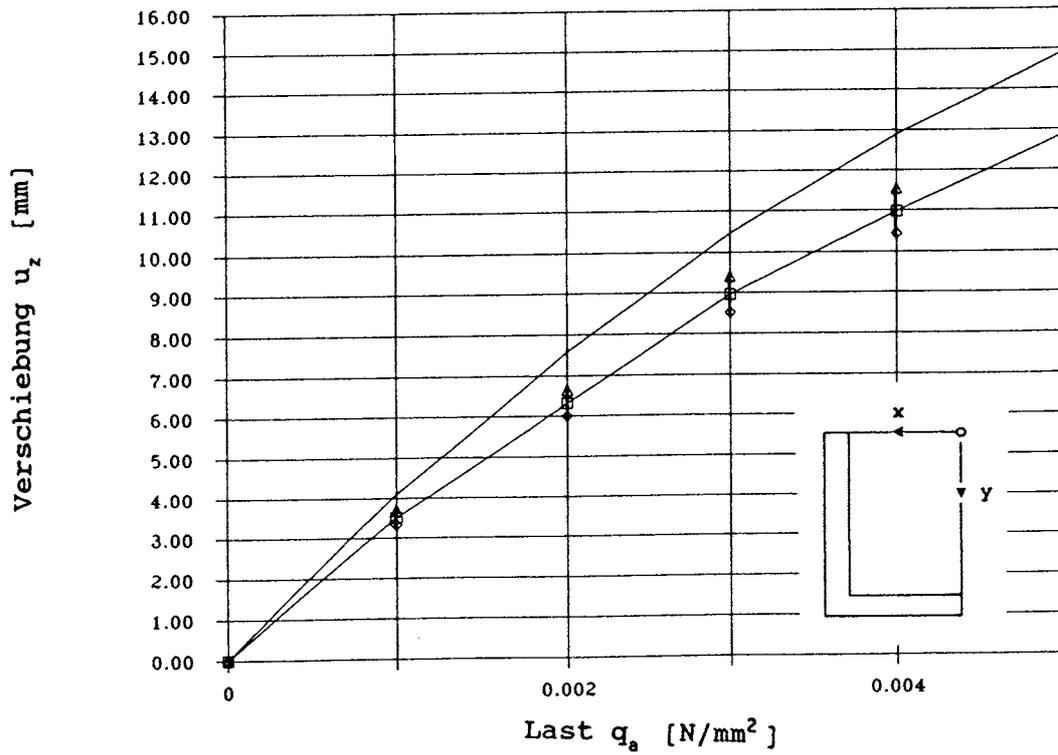


Bild 5.17. Gemessene (—■—) und gerechnete Mittendurchbiegung in Abhängigkeit von der Last

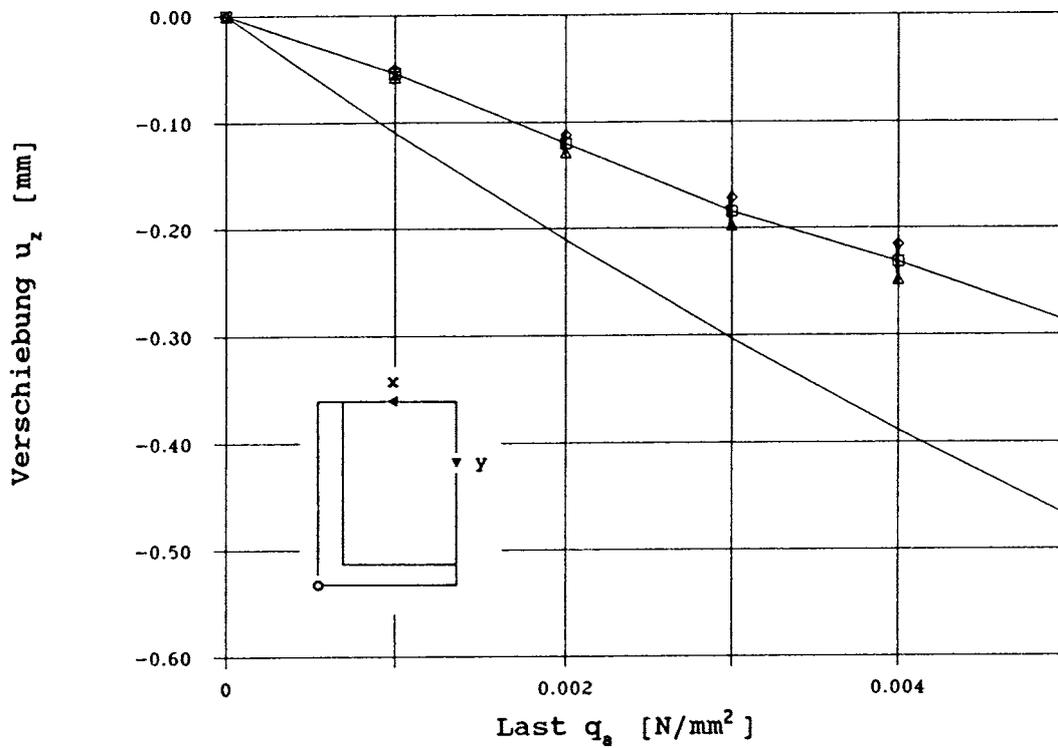


Bild 5.18. Gemessene (—■—) und gerechnete u_z -Verschiebung in der Ecke in Abhängigkeit von der Last

- 75 -

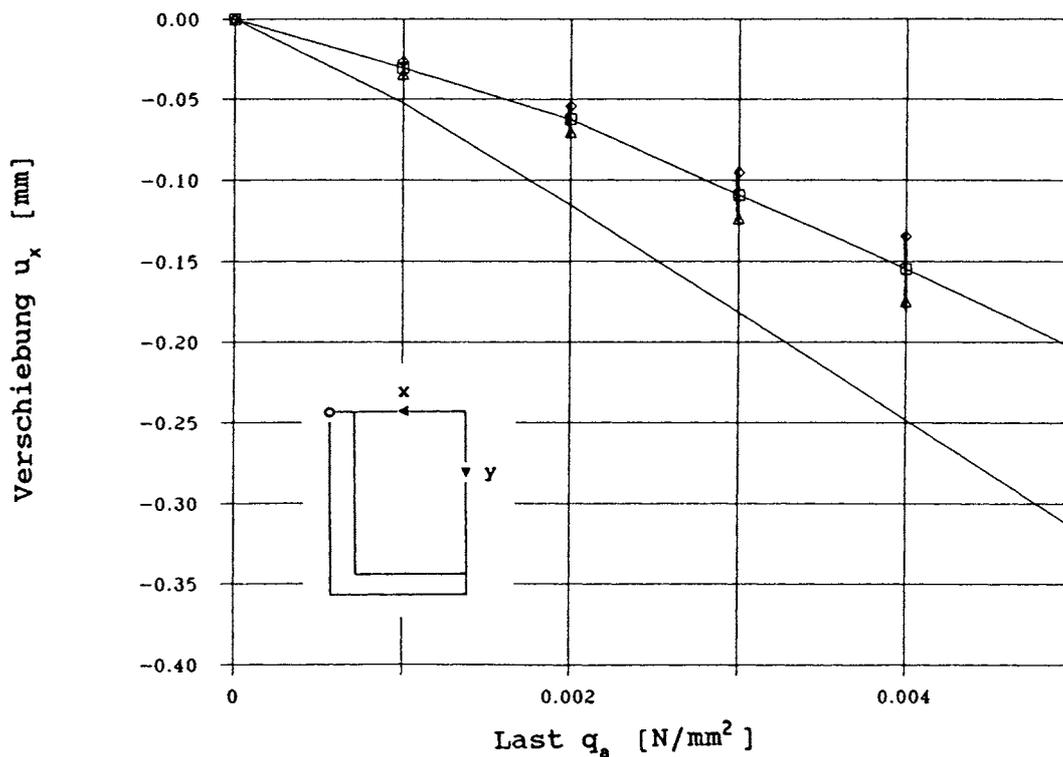


Bild 5.19. Gemessene (-■-) und gerechnete u_x -Verschiebung in der Kantenmitte der Scheibe über der Last

5.2.6 Veränderung der Rahmensteifigkeit

Der Versuchskörper hatte folgende Abmessungen:

Halbe Kantenlänge a_x = 800mm
 Halbe Kantenlänge b_y = 1200mm
 Plattendicke h_z = 10mm (Geometrie der Platte)

Höhe der Klebefuge h_r = 10mm
 Breite der Klebefuge b_r = 20mm (Geometrie der Fuge)

Rahmensteifigkeit $E \cdot I \approx 7 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$

Der Rahmensteifigkeit berechnet sich aus der Biegesteifigkeit des Aluminiumrahmens und der Biegesteifigkeit des Aluminiumprofils bezüglich des gemeinsamen Schwerpunktes. Eine gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und ergibt sich, wenn bei den FE-Rechnungen mit einem Aluminiumrahmen mit den Abmessungen $d_r \cdot h_a$ ($E \cdot I = 11 \cdot 10^6 \text{ N/mm}^2$) gerechnet wird.

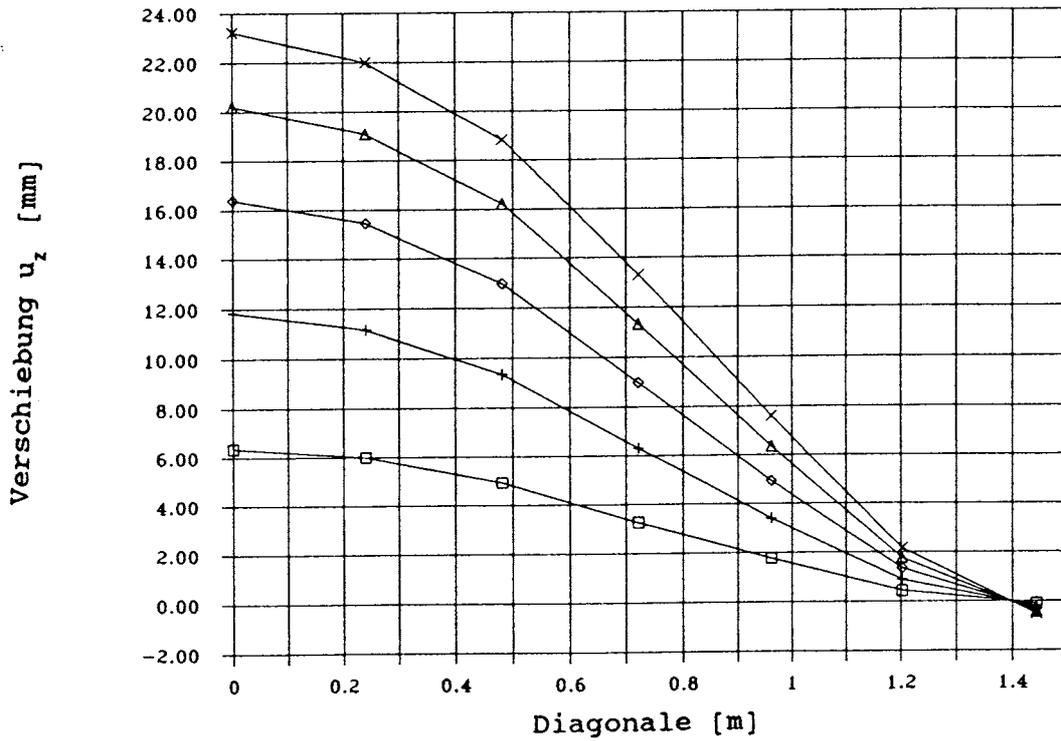


Bild 5.20. Gemessene u_z -Verschiebung längs der Plattendiagonalen

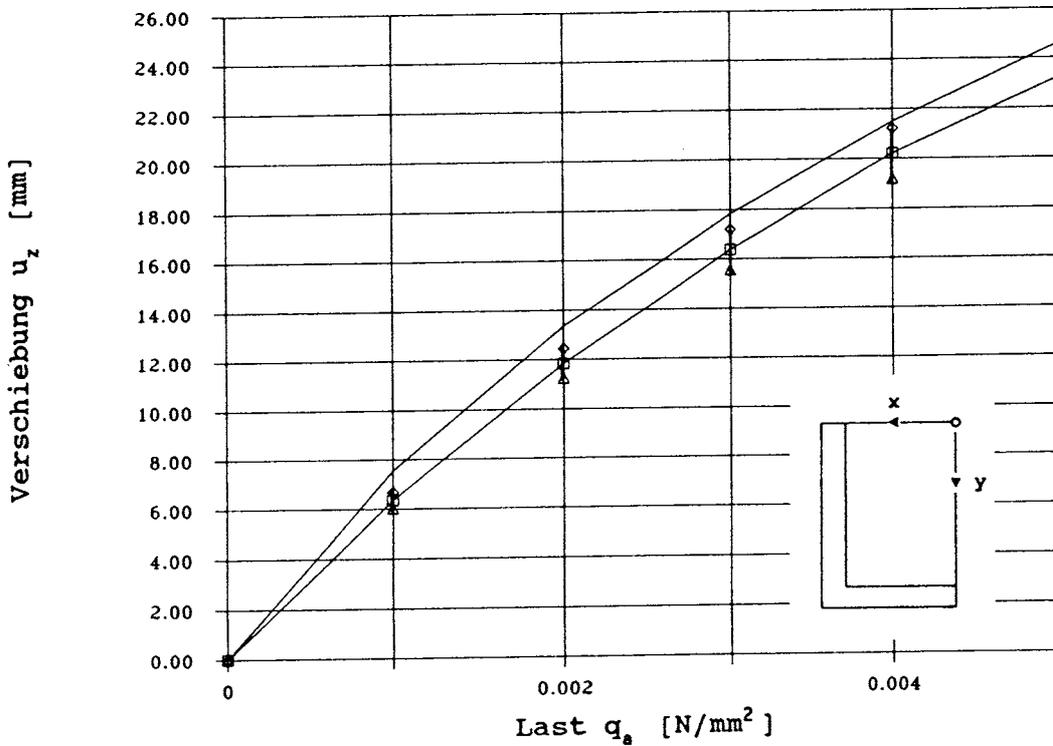


Bild 5.21. Gemessene (---) und gerechnete Mittendurchbiegung in Abhängigkeit von der Last

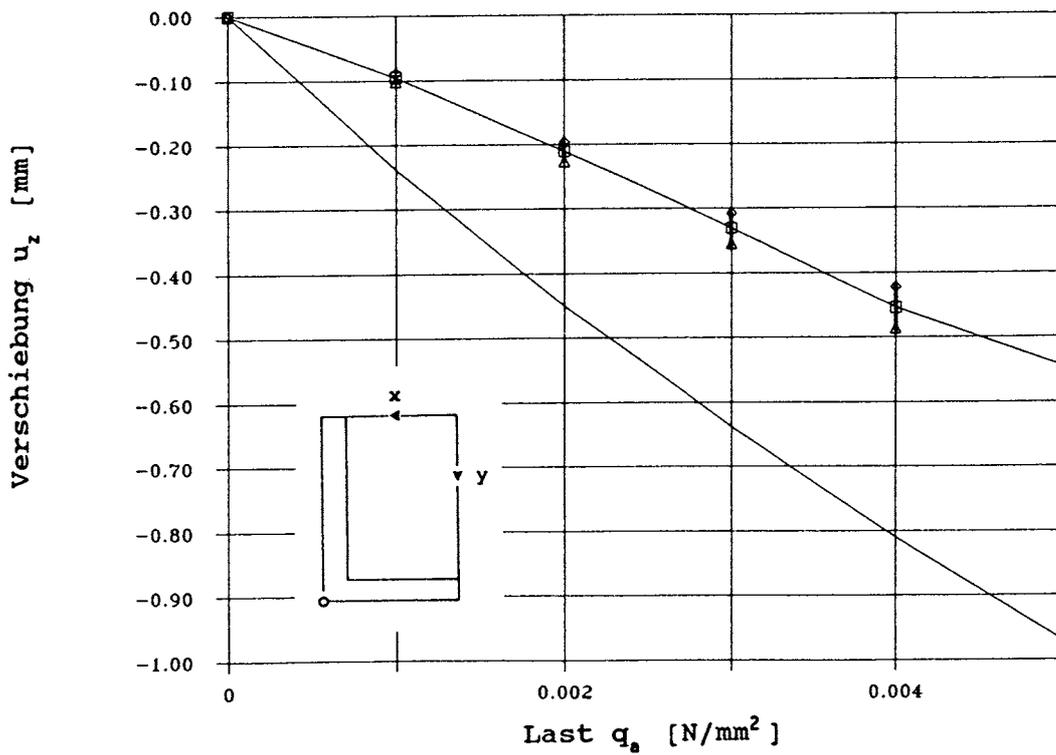


Bild 5.22. Gemessene u_z -Verschiebung in der Ecke in Abhängigkeit von der Last

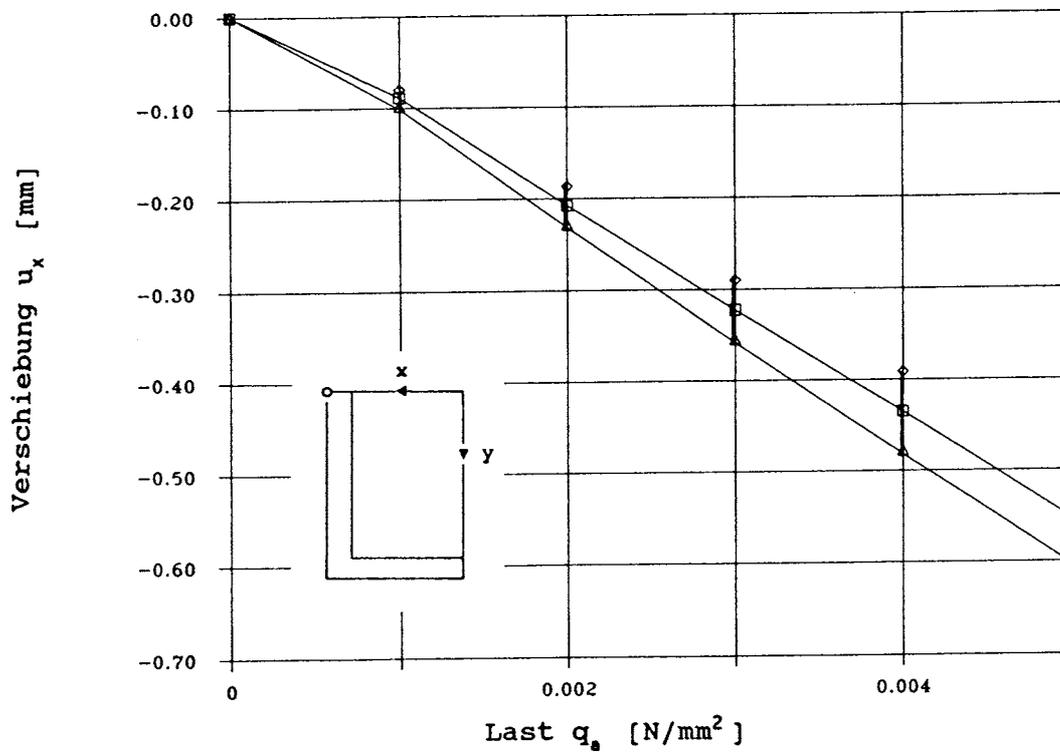


Bild 5.23. Gemessene und gerechnete u_x -Verschiebung in der Kantenmitte der Scheibe über der Last

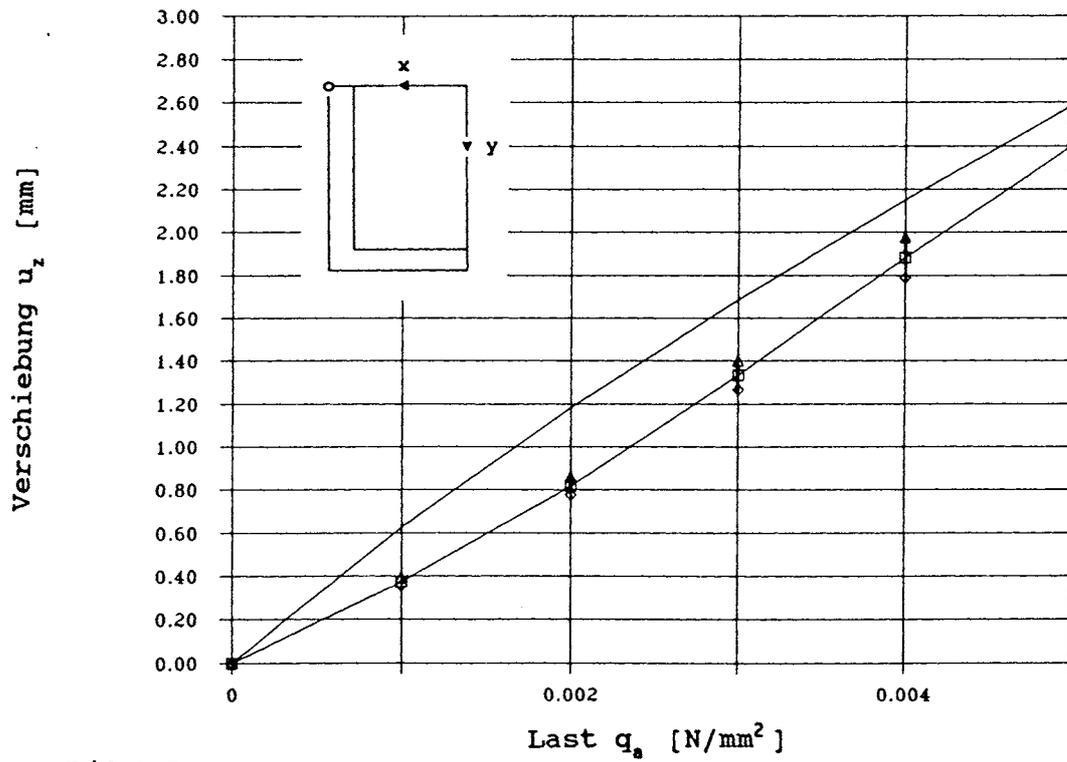


Bild 5.24 Gemessene (—□—) und gerechnete Durchbiegung des Rahmens in der Kantenmitte

6. ZUSAMMENFASSUNG UND BEWERTUNG DER ERGEBNISSE

Die derzeit zur Bemessung der Klebefuge von Structural-Glazing-Elementen verwendete Bemessungsformel bildet in zweierlei Hinsicht eine starke Vereinfachung. Zum einen wird das statische System durch Annahme einer trapezförmigen Lastabtragung von der Platte auf die als Linienlagerung idealisierte Klebefuge grob vereinfacht. Zum zweiten gehen die Materialeigenschaften des Silikonklebers nur durch einen zulässigen Spannungswert ein.

Mittels Finite-Elemente-Rechnungen wurde der Verformungs- und Spannungszustand der Klebefuge bei Einwirkung von Windlast auf die Glasscheibe bestimmt, wobei das statische System, bestehend aus Glasscheibe, Klebefuge mit Abstandshalter und Unterkonstruktion mit Volumenelementen in ein Finite-Elemente-Netz abgebildet wurde und verschiedene Materialgesetze für den Silikon-Kleber zugrunde gelegt wurden.

Der Vergleich der Lastfälle Windsog und Winddruck zeigt, daß bei gleicher Belastungsgröße der Lastfall Windsog zu den höheren Spannungen in der Klebefuge führt. Bei den betrachteten Abmessungen der Klebefuge und der Glasscheibe treten im Lastfall Windsog die maximalen Zugspannungen in der Klebefuge im Bereich der Kantenmitten der Scheibe auf. Der Abstandshalter hat in diesem Fall keine nennenswerten Auswirkungen auf die Spannungsverteilung in der Klebefuge, da Druckkräfte auf den Abstandshalter nur im Eckbereich auftreten.

Im Lastfall Winddruck liegen die maximalen Zugspannungen in den Ecken. Durch das Vorhandensein eines Abstandshalters erhöht sich der maximale in der Klebefuge auftretende Wert der Zugspannung, liegt aber in dem verwendeten Modell immer noch niedriger als der maximale Spannungswert im vergleichbaren Lastfall Windsog.

Wegen der Verformung des Rahmens, auf dem die Scheibe verklebt ist, verformen kann, werden Spannungsmaxima in der Klebefuge abgebaut. Mit sinkender Biegesteifigkeit des Rahmens wachsen allerdings die Spannungen im Bereich der Ecken an, wo die Verformungen zu null vorgegeben wurden. Die optimale Rahmensteifigkeit ist durch die Randbedingungen und das Verhältnis von Rahmensteifigkeit zu Plattensteifigkeit bestimmt.

Was die geometrischen Abmessungen der Platte und der Fuge betrifft, wurde gezeigt, daß sich eine hohe Biegesteifigkeit der Glasplatte und ein großes Volumen der Klebefuge günstig auf die Spannungsverteilung in der Klebefuge auswirken. Außer den geometrischen Parametern kurze Halbachse der Platte und Breite der Klebefuge, die auch in die Bemessungsformel (1) eingehen, sind die lange Halbachse und die Dicke

der Scheibe, der Elastizitätsmodul des Glases sowie die Höhe der Klebefuge von Bedeutung.

Der aus der einfachen Bemessungsformel abgeleitete Spannungswert stellt eine über ein Volumen gemittelte Größe dar. Die spezifischen Materialeigenschaften des Silikonklebers werden nicht miteinbezogen. Das Material Silikonkautschuk zeigt gummielastisches Verhalten und ist näherungsweise inkompressibel. Da die Finite-Elemente-Rechnung die Behandlung von ideal inkompressiblem Material nicht zuläßt, stellen die aus Detailversuchen bestimmten linearen und nichtlinearen Werkstoffparameter eine Näherung dar, mit der jedoch die Steifigkeitsverhältnisse und damit die Verformungen der Klebefuge gut erfaßt werden können. Die Absolutwerte der berechneten Spannungen hängen aber vom verwendeten Materialgesetz ab und sind deshalb nicht direkt untereinander und mit dem aus der Bemessungsformel bestimmten Spannungswert vergleichbar.

Ein direkter Vergleich mit der Bemessungsformel ist nur dann möglich, wenn das Materialgesetz stark vereinfacht und insbesondere die Querkontraktion des Materials ignoriert wird. Ansonsten müssen die echten Materialparameter in geeigneter Weise aus Versuchen ermittelt werden und der zulässige Spannungswert von $0,14\text{N/mm}^2$ durch ein werkstoffspezifisches Versagenskriterium ersetzt werden.

Die Ermittlung von Materialparametern zur Eingabe bei den Finite-Elemente-Rechnungen erfolgte aus den Detailversuchen. Die Bauteilversuche konnten für diesen Zweck nicht herangezogen werden, da am Plattenrand, wo die Steifigkeit der Klebefuge die Verformungen maßgeblich beeinflusst, nur sehr kleine Verformungen auftreten, die nur mit einem sehr hohen meßtechnischen Aufwand hinreichend genau bestimmt werden können. Im Rahmen der Meßgenauigkeit war aber eine gute Übereinstimmung zwischen die Rechen- und Versuchsergebnissen gegeben.

7. AUSBLICK

Das vorliegende Forschungsvorhaben diente dem Ziel, Schnittgrößen und Spannungen sowie Verformungen der Kleberaupe von Structural-Glazing-Elementen unter möglichst realistischer Abbildung der Konstruktion und bei Variation wesentlicher konstruktiver Parameter zu bestimmen.

Während das Verformungsverhalten (Steifigkeit) der Klebefuge mit Näherungen gut abgebildet werden kann, zeigte sich auf der anderen Seite, daß bei der Bestimmung von Spannungen das Materialgesetz eine ausschlaggebende Rolle spielt. Die bisher üblichen Detailversuche mit einem Standardprobekörper liefern Werkstoffkenngrößen wie Elastizitätsmodul oder Zug-

festigkeit nicht direkt, wie sie etwa bei einem Zugversuch mit einer Stahlprobe einfach bestimmt werden können.

Bei den Standardprobekörpern spielen die Abmessungen der Klebefuge, also die Geometrie eine wesentliche Rolle. Aus den Zugversuchen kann zwar eine Zugsteifigkeit ermittelt werden. Aus dieser Steifigkeit läßt sich jedoch nicht der Elastizitätsmodul des Werkstoffs ableiten, bei Änderungen der Abmessungen ändert sich die Steifigkeit. Ebenso kann nicht aus der im Detailversuch bestimmten Bruchlast die Werkstoffkenngröße Zugfestigkeit durch Teilung durch den Fugenquerschnitt einfach berechnet werden. In den Ecken der Klebefuge treten infolge der Querdehnungsbehinderung Spannungsspitzen auf, deren Größe wiederum von den Abmessungen abhängt.

Zur vollständigen Bemessung einer Klebefuge sind über die Fragen der Statik hinaus, die mit dem vorliegenden Forschungsvorhaben untersucht wurden, weitere Untersuchungen erforderlich.

- (1) Es ist ein Versagenskriterium für kombinierte Beanspruchung (Zug, Scherung, Biegung) für die Klebefuge zu entwickeln. Dabei erscheint eine mehr makroskopische Betrachtungsweise baupraktisch sinnvoll. Es könnten wie bisher Detailversuche durchgeführt werden. Kombinierte Beanspruchung könnte durch eine geeignete Interaktionsbeziehung erfaßt werden. Allerdings müßten solche Detailversuche für jede Abmessungsvariante durchgeführt werden. Versuch mit einem Standard-Probekörper genügen nicht. Möglicherweise kann der Einfluß der Abweichung vom Standard-Probekörper einmal vorab untersucht werden und dann durch Korrekturfaktoren berücksichtigt werden.

Die Berechnung eines ganzen Structural-Glazing-Elementes und die Bestimmung von Schnittgrößen für die Klebefuge kann dann in einem einfachen Modell erfolgen. Die Ergebnisse gehen in die Interaktionsformel ein. Möglicherweise kann anstelle jeweiliger neuer FE-Berechnungen der Einfluß verschiedener Parameter (Steifigkeitsverhältnisse Glasplatte/Klebefuge/Unterstützungsrahmen; Abmessungen) durch Korrekturfaktoren in Tabellen- oder Diagrammform oder durch einfache linearisierte Beziehungen erfaßt werden.

- (2) Darüber hinaus sollten in einer grundlegenden Untersuchung die echten Werkstoffkenngrößen von Silikon-Klebern bestimmt und damit realistische Spannungen berechnet werden. Davon ausgehend könnte dann in einer mehr mikroskopischen Betrachtungsweise ein genaueres Versagenskriterium für Silikon-Kleberauren bestimmt werden.

8. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] IKER, J, NEMETH, C., WOLF, A.:
Structural-Glazing - Eine neue Technik für die
Ganzglasfassade, Teil 1;
Glasforum 37 (1987), pp.37-40
- [2] KLOSOWSKY, J.: Sealants in Construction; Verlag Marcel
Dekker, New York (1989)
- [3] General Electric: Silicones, Guide Structural Glazing,
Vitrage extérieur collé
- [4] Kunststoff Handbuch Band I; Hrsg. Becker, Braun;
Hanser Verlag München (1990)
- [5] Elias, Vohwinkel;
Neue polymere Werkstoffe für die industrielle
Anwendung, 2; Hanser Verlag München (1983)
- [6] Kunststoff Handbuch, Band XI; Hrsg. Vieweg, Reiher,
Scheurlen; Hanser Verlag München (1971)
- [7] Kunststoff Handbuch Band I; Hrsg. Vieweg, Braun;
Hanser Verlag München (1975)
- [8] Polymere Werkstoffe Band I, Chemie und Physik;
Hrsg. Batzer, H.; Thieme Verlag Stuttgart (1985)
- [9] RIVLIN, R.S.; Large Deformations;
Rheology, Theory and Applications, Vol.1 pp.361-385
Ed. Eirich, F.R.; Academic Press, New York (1956)
- [10] BLATZ, P.J.; Application of large deformation theory
to the thermomechanical behavior of rubberlike
polymers -porous, unfilled, and filled;
Rheology, Theory and Applications, Vol.5 pp.1-55
Ed. Eirich, F.R.; Academic Press, New York (1969)
- [11] DE BORST, R., VAN DEN BOGERT, P.A.J., ZEILMAKER, J:
Modelling and analysis of rubberlike materials;
Heron, Vol.33, No.1 (1988)
- [12] SMITH, T.L.; Strength and Extensibility of Elastomers;
Rheology, Theory and Applications, Vol.5 pp.127-220
Ed. Eirich, F.R.; Academic Press, New York (1969)
- [13] SANDBERG, L.B., AHLBORN, T.M.:
Combined Stress Behavior of Structural Glazing Joints;
J.Struct.Engrg., ASCE 115(5) (1989), pp.1212-1224;

- [14] SANDBERG, L.B., CARBARY, T.M., GILSON, A.E.:
Specimen Length Effects on Mechanical Properties of a
Silicone Elastomeric Sealant;
Science and technology of glazing systems,
ASTM STP 1054, pp. 105-111 (1989)
- [15] VALLABHAN, G., YAO-TING WANG, B., CHOU, G.D.,
MINOR, J.E.:
Thin glass plates on elastic supports;
J.Struct.Engrg., ASCE 111(11) (1985), pp.2416-2426
- [16] VALLABHAN, G.; CHOU, G.D.; MINOR, J.E.:
Seal forces in structural glazing systems;
J.Struct.Engrg., ASCE, 116(4) (1990), pp.1080-1089
- [17] ANSYS User's Manual Rev.4.4 VOL.I, II
- [18] WOLMIR, A.S.:
Biegsame Platten und Schalen;
VEB Verlag für Bauwesen, Berlin (1962)
- [19] VALLABHAN, G.:
Iterative analysis of nonlinear glass plates;
J.Struct.Engrg., ASCE 109(2) (1983), pp.489-502
- [20] GORA, P., KIEFER, W., SACK, W., SEIDEL, H.:
Technisches Vorspannen von Spezialgläsern durch Ab-
schrecken in Mineralölen und geschmolzenen Salzen;
Glastechn. Ber. 50 (1977) Nr.12 pp. 319-327

Bauforschung für die Praxis

- Brandschutzkosten im Wohnungsbau**
Karl Deters
Band 59, 2001, 245 S., Abb., Tab., kart.,
ISBN 3-8167-4258-0
€ 50,- | sFr 86,-
- Gemeinschaftliches Wohnen im Alter**
R. Weeber, G. Wölflle, V. Rösner
Band 58, 2001, 175 S., Abb., Tab., kart.,
ISBN 3-8167-4257-2
€ 46,- | sFr 79,-
- Entwicklung eines Bewertungssystems für ökonomisches und ökologisches Bauen und gesundes Wohnen**
C.J. Diederichs, P. Getto, S. Streck
Band 57, 2002, 230 S., mit CD-ROM, Abb., Tab., kart., ISBN 3-8167-4256-4
€ 50,- | sFr 86,-
- Vergabeverfahren und Baukosten**
Hannes Weeber, Simone Bosch
Band 56, 2001, 192 S., Abb., Tab., kart.,
ISBN 3-8167-4255-6
€ 50,- | sFr 86,-
- Konzepte für die praxisorientierte Instandhaltungsplanung im Wohnungsbau**
Ralf Spilker, Rainer Oswald
Band 55, 2000, 71 S., 5 Abb., zahlr. Tab., kart., ISBN 3-8167-4254-8
€ 22,- | sFr 39,50
- Bewährung innen wärmedämmter Fachwerkbauten**
Problemstellung und daraus abgeleitete Konstruktionsempfehlungen
Reinhard Lamers, Daniel Rosenzweig, Ruth Abel
Band 54, 2000, 173 S., 123 Abb., kart.,
ISBN 3-8167-4253-X
€ 25,- | sFr 44,-
- Überprüfbarkeit und Nachbesserbarkeit von Bauteilen - untersucht am Beispiel der genutzten Flachdächer**
Rainer Oswald, Ralf Spilker, Klaus Wilmes
Band 53, 1999, 133 S., 49 Abb., 4 Tab., kart.,
ISBN 3-8167-4252-1
€ 37,- | sFr 63,-
- Bauschadensfibel für den privaten Bauherrn und Hauskäufer**
Rainer Oswald, Ruth Abel, Volker Schnapauff
Band 52, 1999, 140 S., 19 Abb., 3 Tab., fester Einband, ISBN 3-8167-4251-3
€ 25,- | sFr 44,-
- Balkone, kostengünstig und funktionsgerecht**
Hannes Weeber, Margit Lindner
Band 51, 1999, 146 S., 102 Abb., 26 Tab., kart., ISBN 3-8167-4250-5
€ 38,- | sFr 65,-
- Kostenfaktor Erschließungsanlagen**
Hannes Weeber, Michael Rees
Band 50, 1999, 226 S., 107 Abb., 15 Tab., kart., ISBN 3-8167-4249-1
€ 50,- | sFr 86,-
- Eigenleistung beim Bauen**
Wie Eigentümer und Mieter sich am Bau ihrer Wohnung beteiligen können
R. Weeber, H. Weeber, S. Kleebaur, H. Gerth, W. Pohrt
Band 49, 1999, 154 S., 25 Abb., 12 Tab.,
ISBN 3-8167-4248-3
€ 22,- | sFr 39,50
- Kosteneinsparung durch Bauzeitverkürzung**
Barbara Bredenbals, Heinz Hullmann
Band 48, 1999, 174 S., 38 Abb., 36 Tab.,
ISBN 3-8167-4247-5
€ 37,- | sFr 64,-
- Das wärme- und feuchteschutztechnische Verhalten von stählernen Fassadendurchdringungen**
Lutz Franke, Gernod Deckelmann
Band 47, 1998, 74 S., 38 Abb., 13 Tab., kart.,
ISBN 3-8167-4246-7
€ 15,- | sFr 26,-
- Kostengünstige bauliche Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs im Wohnungsbestand**
R. Oswald, R. Lamers, V. Schnapauff, R. Spilker, K. Wilmes
Band 46, 1998, 100 S., 57 Abb., kart.
ISBN 3-8167-4245-9
€ 17,- | sFr 30,50
- Sicherung des baulichen Holzschutzes**
Horst Schulze
Band 45, 1998, 168 S., 136 Abb., 10 Tab., kart., ISBN 3-8167-4244-0
€ 22,- | sFr 39,50
- Luftdichtigkeit von industriell errichteten Wohngebäuden in den neuen Bundesländern**
Wolfgang Richter, Dirk Reichel
Band 44, 1998, 88 S., 34 Abb., 15 Tab., kart.,
ISBN 3-8167-4243-2
€ 15,- | sFr 26,-
- Leitfaden Kostendämpfung im Geschoßwohnungsbau**
Karl Deters, Joachim Arlt
Band 43, 1998, 162 S., 135 Abb., 34 Tab., kart., ISBN 3-8167-4242-4
€ 22,- | sFr 39,50
- Langzeitbewährung und Entwicklungstendenzen von Kunststoff-Bauprodukten im Wohnungsbau**
Dieter Arlt, Rainer Weltring
Band 42, 1998, 137 S., 90 Abb., 7 Graph., kart., ISBN 3-8167-4241-6
€ 20,- | sFr 35,-
- Ausschreibungshilfen für recyclinggerechte Wohnbauten**
Barbara Bredenbals, Wolfgang Willkomm
Band 41, 1998, 172 S., 28 Abb., kart.
ISBN 3-8167-4240-8
€ 22,- | sFr 39,50
- Gebrauchsanweisung für Häuser**
Volker Schnapauff, Silke Richter-Engel
Band 40, 1997, 116 S., 4 Abb., 7 Tab., kart.,
ISBN 3-8167-4239-4
€ 19,- | sFr 34,-
- Ergänzender Neubau in bestehenden Wohnsiedlungen**
H. Weeber, R. Weeber, M. Lindner, u. a.
Band 39, 1997, 194 S., 230 Abb., kart.,
ISBN 3-8167-4238-6
€ 25,- | sFr 44,-
- Lüftung in industriell errichteten Wohnhäusern**
Wilfried Jank
Band 37, 1997, 66 S., 17 Abb., 12 Tab., 13 Tafeln, kart., ISBN 3-8167-4236-X
€ 15,- | sFr 26,-
- Auswirkungen der neuen Wärmeschutzverordnung auf den Schallschutz von Gebäuden**
Siegfried Koch, Werner Scholl
Band 36, 1997, 72 S., 33 Abb., 2 Tab., kart.,
ISBN 3-8167-4235-1
€ 15,- | sFr 26,-
- Baukostensenkung durch gesicherte Schadensbeurteilung an haufwerksportigen Leichtbetonelementen der industriell errichteten Wohnbauten der ehemaligen DDR**
Mirko Neumann, Mathias Reuschel
Band 35, 1997, 320 S., 227 Abb., 105 Tab., kart., ISBN 3-8167-4234-3
€ 41,- | sFr 70,-
- Verhinderung von Emissionen aus Baustoffen durch Beschichtung**
Lutz Franke, Martin Wesselmann
Band 34, 1997, 68 S., 11 Abb., 9 Tab., kart.,
ISBN 3-8167-4233-5
€ 15,- | sFr 26,-
- Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) im Wohnungsbau**
Institut für Bauforschung e.V., Hannover
Band 32, 1997, 250 S., 128 Abb., 20 Tab., kart., ISBN 3-8167-4231-9
€ 30,- | sFr 51,50

BESTELLSCHEIN

■ Titel ankreuzen und im Umschlag oder
 ■ per Fax (07 11) 970 - 25 08 oder -25 07
 ■ senden an:
 ■
 ■ **Fraunhofer IRB Verlag**
 ■ Fraunhofer-Informationszentrum
 ■ Raum und Bau IRB
 ■
 ■ Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart
 ■ Telefon (07 11) 970 - 25 00
 ■ E-Mail: info@irb.fhg.de
 ■ URL: <http://www.IRBbuch.de>
 ■
 ■ Absender
 ■
 ■
 ■
 ■ Straße/PF
 ■
 ■ PLZ/Ort
 ■
 ■ Datum
 ■
 ■ Unterschrift

02/2002 [BfP-alleTitel-Anzeige.axd]

- Niedrigenergiehäuser unter Verwendung des Dämmstoffes Styropor**
Teil 1, Konstruktionsempfehlungen und optimierte Anschlusssituationen (Details)
W.-H. Pohl, S. Horschler, R. Pohl
Teil 2, Quantitative Darstellung der Wirkung von Wärmebrücken
Gerd Hauser, Horst Stiegel
Band 31, 1997, 294 S., 169 Abb., kart., ISBN 3-8167-4230-0
€ 14,- | sFr 25,-
- Fenster - Sanierung und Modernisierung**
Hans-Rudolf Neumann
Band 30, 1997, 134 S., 90 Abb., 11 Tab., kart., ISBN 3-8167-4229-7
€ 20,- | sFr 35,-
- Schäden an nicht industriell hergestellten Wohnbauten der neuen Bundesländer**
R. Oswald, R. Spilker, V. Schnapauff, u. a.
Band 29, 1996, 116 S., 66 Abb., 30 Tab., kart., ISBN 3-8167-4228-9
€ 17,- | sFr 30,50
- Parkierungsanlagen im verdichteten Wohnungsbau**
Hannes Weeber, Rotraut Weeber
Band 28, 1997, 156 S., 60 Abb., 28 Tab., kart., ISBN 3-8167-4227-0
€ 22,- | sFr 39,50
- Möglichkeiten der Einsparung von Wohnkosten durch Mieterbeteiligung**
M. Efff, K. Goldt, B. Harms, u. a.
Band 27, 1997, 157 S., 3 Abb., 8 Tab., kart., ISBN 3-8167-4226-2
€ 22,- | sFr 39,50
- Die Berechnung von Flachdecken über Zustands- und Einflußflächen**
Max Baerschneider
Band 26, 1996, 380 S., 196 Tab., kart., zweibändig, ISBN 3-8167-4225-4
€ 49,- | sFr 83,50
- Feuchttransportvorgänge in Stein und Mauerwerk - Messung und Berechnung**
M. Krus, H.-M. Künzel, K. Kießl
Band 25, 1996, 75 S., 31 Abb., 2 Tab., kart., ISBN 3-8167-4224-6
€ 15,- | sFr 26,-
- Wohngebäudesanierung und Privatisierung**
Hannes Weeber, Michael Rees
Band 24, 1996, 107 S., 51 Abb., 17 Tab., kart., ISBN 3-8167-4223-8
€ 20,- | sFr 35,-
- Der Feuchtehaushalt von Holz-Fachwerkwänden**
Helmut Künzel
Band 23, 1996, 85 S., 32 Abb., 10 Tab., kart., ISBN 3-8167-4222-X
€ 15,- | sFr 26,-
- Neue Konstruktionsalternativen für recyclingfähige Wohngebäude**
Barbara Bredenbals, Wolfgang Willkomm
Band 22, 1996, 110 S., 26 Abb., 3 Tab., kart., ISBN 3-8167-4221-1
€ 17,- | sFr 30,50
- Standsicherheit der Wohnbauten in Fertigteilbauweise in den neuen Bundesländern**
E. Cziesielski, N. Fouad, F.-U. Vogdt
Band 21, 1996, 226 S., 71 Abb., kart., ISBN 3-8167-4220-3
€ 30,- | sFr 51,50
- Sicherheit von Glasfassaden**
X. Shen, H. Techen, J. D. Wörner
Band 20, 1996, 38 S., 26 Abb., 4 Tab., kart., ISBN 3-8167-4219-X
€ 12,- | sFr 21,50
- Kostengünstige Umnutzung aufgegebener militärischer Einrichtungen für Wohnzwecke, Wohnergängungseinrichtungen und andere Nutzungen**
B. Jacobs, J. Kirchhoff, J. Mezler
Band 19, 1996, 204 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4218-1
€ 28,- | sFr 47,50
- Holztafelbauweise im mehrgeschossigen Wohnungsbau**
Barbara Bredenbals, Heinz Hullmann
Band 18, 1996, 237 S., 116 Abb., 23 Tab., kart., ISBN 3-8167-4217-3
€ 30,- | sFr 51,50
- Gefährdungspotentiale asbesthaltiger Massenbaustoffe in den neuen Bundesländern**
Klaus Bergner, unter Mitarbeit von Franka Stodollik und Hans-Otto Eckler
Band 17, 1996, 75 S., 26 Abb., 9 Tab., kart., ISBN 3-8167-4216-5
€ 15,- | sFr 26,-
- Transparent gedämmte Altbauten**
G. H. Bondzio, K. Brandstetter, P. Sulzer, S. Al Bosta, u. a.
Band 15, 1996, 130 S., 44 Abb., 7 Tab., kart., ISBN 3-8167-4214-9
€ 22,- | sFr 39,50
- Kosten und Techniken für das "Überwintern" erhaltenswerter Bausubstanz**
Michael Rees, Hannes Weeber
Band 14, 1995, 190 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4213-0
€ 25,- | sFr 44,-
- Menschengerechte Raumklimatisierung durch Quelllüftung und Flächenkühlung**
Erhard Mayer (Hrsg.)
Band 13, 1995, 190 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4212-2
€ 25,- | sFr 44,-
- Zusätzliche Wärmedämmsysteme bei Fertigteilbauten**
Typenserie P2
P. Bauer, B. Loeser, H. Schwarzgig, T. Spengler
Band 12, 1995, 118 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4211-4
€ 20,- | sFr 35,-
- Körperschalldämmung von Sanitärräumen**
Karl Gösele, Volker Engel
Band 11, 1995, 76 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4210-6
€ 15,- | sFr 26,-
- Bauschäden an Holzbalkendecken in Feuchtraumbereichen**
Gertraud Hofmeister
Band 9, 1995, 210 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4208-4
€ 25,- | sFr 44,-
- Ökologische Auswirkungen von Hochhäusern**
Band 8, 1995, 418 S., 114 Abb., kart., ISBN 3-8167-4207-6
€ 50,- | sFr 86,-
- Wohnhochhäuser heute**
H. Weeber, R. Weeber, M. Hasenmaier, u. a.
Band 7, 1995, 165 S., zahlreiche Abb., kart., ISBN 3-8167-4206-8
€ 25,- | sFr 44,-
- Abfallvermeidung in der Bauproduktion**
Barbara Bredenbals, Wolfgang Willkomm
Band 6, 1994, 198 S., 75 Abb., 16 Tab., kart., ISBN 3-8167-4205-X
€ 25,- | sFr 44,-
- Barrierefreie Erschließungssysteme von Wohngebäuden**
R. Weeber, M. Rees, H. Weeber
Band 5, 1994, 64 S., 52 Abb., 6 Tab., kart., ISBN 3-8167-4204-1
€ 12,- | sFr 21,50
- Die Ausführung des Umkehrdaches bei erhöhten Anforderungen an den Wärmeschutz**
Lutz Franke, Gernod Deckelmann
Band 4, 1994, 80 S., zahlreiche Abb. und Tab., kart., ISBN 3-8167-4203-3
€ 20,- | sFr 35,-
- Niveaugleiche Türschwellen bei Feuchträumen und Dachterrassen**
R. Oswald, A. Klein, K. Wilmes
Band 3, 1994, 56 S., 48 Abb., kart., ISBN 3-8167-4202-5
€ 12,- | sFr 21,50
- Wohnbauten in Fertigteilbauweise in den neuen Bundesländern**
R. Oswald, V. Schnapauff, R. Lamers, u. a.
Band 2, 1995, 333 S., 515 Abb., kart., ISBN 3-8167-4201-7
€ 40,- | sFr 69,50
- Heizung und Lüftung im Niedrigenergiehaus**
Gerhard Hausladen, Peter Springl
Band 1, 1994, 214 S., 74 Abb., 17 Tab., kart., ISBN 3-8167-4200-9
€ 25,- | sFr 44,-
- Informieren Sie mich bitte laufend über neue **Fachbücher**

BESTELLSCHEIN

☛ Titel ankreuzen und im Umschlag oder
☛ per Fax (07 11) 970 - 2508 oder -2507
☛ senden an:

☛ **Fraunhofer IRB Verlag**

☛ Fraunhofer-Informationszentrum
☛ Raum und Bau IRB

☛ Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart

☛ Telefon (07 11) 970 - 2500

☛ E-Mail: info@irb.fhg.de

☛ URL: <http://www.IRBbuch.de>

☛ Absender

☛

☛

☛ Straße/PF

☛ PLZ/Ort

☛ Datum

☛ Unterschrift

Die »Bauschäden-Sammlung« in 13 Bänden

Herausgegeben von Professor Günter Zimmermann



In der Fachwelt hat diese Zusammenstellung von typischen Bauschadensfällen als wichtiger Beitrag zur Verbesserung der Bau- und Planungsleistungen großes Ansehen erlangt.

Die 13 Bände mit dem Untertitel »Sachverhalt - Ursachen - Sanierung« enthalten Schadensberichte aus allen baukonstruktiven Bereichen und sind durch Themen- und Sachregister erschlossen.

Der Nutzer kann so auf Anhieb feststellen,

- ob ein gleicher oder ähnlicher Schaden bereits dokumentiert ist,
- welche Schäden für ein bestimmtes Bauteil typisch sind,
- wie diese Schäden vermieden werden können oder welche Maßnahmen zu ihrer Behebung in Frage kommen.

Seit 3 Jahrzehnten ist die »Bauschäden-Sammlung« eine ständige Rubrik des »Deutschen Architektenblattes«.

Bauschäden-Sammlung, Band 13 Sachverhalt - Ursachen - Sanierung

2001, 184 Seiten,
zahlreiche, überwiegend farbige
Abbildungen, fester Einband,
ISBN 3-8167-4185-1
€ 27,- | sFr 44,-

Der Herausgeber

Professor Günter Zimmermann, ein bekannter Bausachverständiger mit langjähriger Erfahrung, betreut seit 3 Jahrzehnten die »Bauschäden-Sammlung« im »Deutschen Architektenblatt« und ist auch für die Herausgabe der Buchausgabe verantwortlich.

BESTELLSCHEIN

- Band 1: 168 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 2: 168 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 3: 168 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 4: 168 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 5: 168 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 6: 168 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 7: 168 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 8: 168 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 9: 184 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 10: 184 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 11: 184 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 12: 184 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-
- Band 13: 184 Seiten
€ 27,- | sFr 44,-

Sie sparen € 36,- bei Abnahme der

- Bände 1-13 komplett:
€ 315,- | sFr 476,-

Alle Bände im Format A 5 quer, mit zahlreichen, zum Teil farbigen Abbildungen, festem Einband und Fadenheftung

Titel ankreuzen und im Umschlag oder per Fax (07 11) 970 - 25 08 oder -25 07 senden an:

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum
Raum und Bau IRB

Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart
Telefon (07 11) 970 - 25 00
E-Mail: info@irb.fhg.de
URL: <http://www.IRBbuch.de>

Absender

.....

.....

.....

Straße/PF

PLZ/Ort

Datum

Unterschrift

Abb. 3: Starke Ausblühungen unterhalb von durchfeuchteten Fassadenbereichen.

Abb. 4: Durchfeuchtung mit Ausblühung unter einer Fensterbank.

Abb. 5: Fehlstellen und undichte Fugen in den Fensterbänken.

Abb. 3



Abb. 4

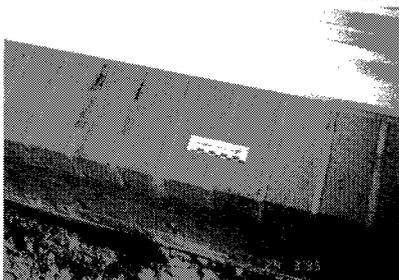


Abb. 5