

**Verhalten von Stützen-Riegel-
Verbindungen unter zyklischer
Beanspruchung**

T 2993

T 2993

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2002, ISBN 3-8167-6496-7

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>

VERHALTEN VON STÜTZEN-RIEGEL-VERBINDUNGEN UNTER ZYKLISCHER BEANSPRUCHUNG

- Abschlußbericht -

Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik
Kolonnenstraße 30
10829 Berlin

Cottbus 2002

1 Einleitung

Das nationale Anwendungsdokument (NAD) zur DIN V ENV 1993-1-1 Eurocode 3 gestattet die Anwendung des Annex J „Träger-Stützen-Verbindungen“, der ein plastisches Bemessungsverfahren für ausgesteifte Verbindungen (geschraubt, geschweißt) enthält.

Als eine grundlegende Voraussetzung für die Anwendbarkeit plastischer Bemessungsverfahren gilt das Vorliegen einer vorwiegend ruhenden Belastung. Es darf dann so getan werden, als ob die Konstruktion einmalig (monoton) belastet würde, auch wenn sie in der Realität einer wiederholten (zyklischen) Belastung unterliegt. Eine gesonderte Berücksichtigung wiederholt auftretender Plastizierungen ist also nicht erforderlich. Zur Einstufung einer Konstruktion als „vorwiegend ruhend belastet“ gilt derzeit die für die Bemessung gegen elastische Grenzlaster gültige und bewährte Abgrenzung mit Lastspielzahlen von $n < 2 \times 10^4$.

Erste Untersuchungen von Scheer [1] an zyklisch beanspruchten Walzträgern mit Endausklinkungen zeigten, dass bei $2/3$ der Traglast hohe plastische Dehnungen im ausgeklinkten Bereich auftraten, die zum Versagen durch Materialermüdung bereits nach einigen Hundert Lastspielen führten.

Zwei Pilotversuche an zyklisch beanspruchten, steifenlosen (nachgiebigen) Verbindungen mit geschraubtem Kopfplattenstoß in Cottbus zeigten, dass auch hier bereits unter Gebrauchslasten plastische Dehnungen auftreten.

Unter diesen Gesichtspunkten wurden typische Verbindungen aus dem Hallen- und Geschossbau bezüglich ihres zyklischen Tragverhaltens untersucht.

2 Beschreibung der Versuchskörper

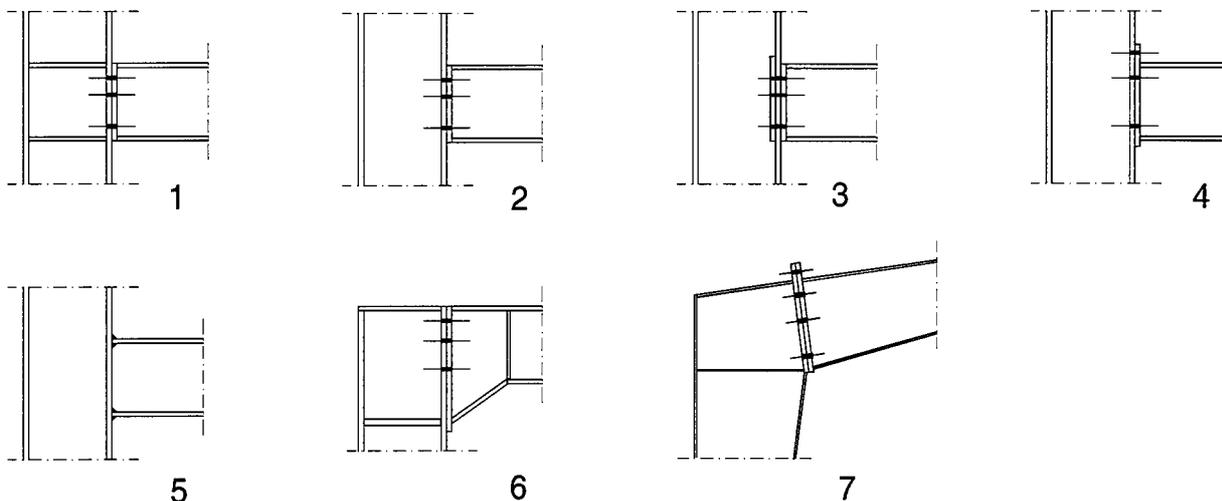


Abbildung 1 Knotenausbildung der Versuchskörper

Abbildung 1 zeigt in einer Übersicht die untersuchten Knoten. Die ersten 5 Versuchskörper wurden aus Walzträgern gefertigt. Von ihrer konstruktiven Ausbildung und ihren Abmessungen her können sie als Knoten des Geschossbaus gelten. Die Versuchskörper 6 und 7 sind nach ihrer Fertigung und Knotenausbildung dem Hallenbau zuzuordnen. Sie wurden aus geschweißten

Trägern als Rahmenecken ausgeführt. Besonders die Blechdicken der Stege sind durch große Schlankheiten gekennzeichnet.

Am Lehrstuhl für Stahlbau der BTU Cottbus bereits durchgeführte Tests an geschraubten Verbindungen [2,3] führten in einigen Fällen zu vorzeitigem (nach etwa 1000 Zyklen) Schraubenversagen unter zyklischer Beanspruchung. Das Verhältnis von Schraubendurchmesser zu Kopfplattendicke lag hier bei jeweils 1,25. Bekanntlich tritt das Versagen zugbeanspruchter Schrauben unter zyklischer Beanspruchung ohne Vorankündigung auf, d. h. es kommt bei ungenügenden Tragreserven der restlichen Schrauben zu schlagartigem Versagen der Verbindung. Hierbei ist immer eine rasche Zunahme der Relativ-Rotationen der Verbindung zu beobachten. In der Praxis ist deshalb eine Bemessung, die sich an der Zugfestigkeit der Schrauben als schwächste Komponente der Verbindung orientiert, unbedingt zu vermeiden. Um die plastischen Reserven der Kopfplatte stärker zu aktivieren bzw. die Schraubenbeanspruchung zu verringern, bestehen die Möglichkeiten der Vergrößerung des Schraubendurchmessers oder der Verringerung der Kopfplattendicke. Deshalb wurden bei den aktuellen Tests Schrauben mit einem Durchmesser von M 30 für die gewalzten und M 24 für die geschweißten Versuchskörper eingesetzt (Verhältnis Schraubendurchmesser/Kopfplattendicke 1,5). Alle Schrauben wurden planmäßig vorgespannt. Die Ausführung der Knoten wurde so gewählt, dass sie nach EC 3, Annex J [4], als nachgiebig klassifiziert werden müssen. Zeichnerische Darstellungen aller Versuchskörper sind der Anlage A zu entnehmen.

3 Voruntersuchung

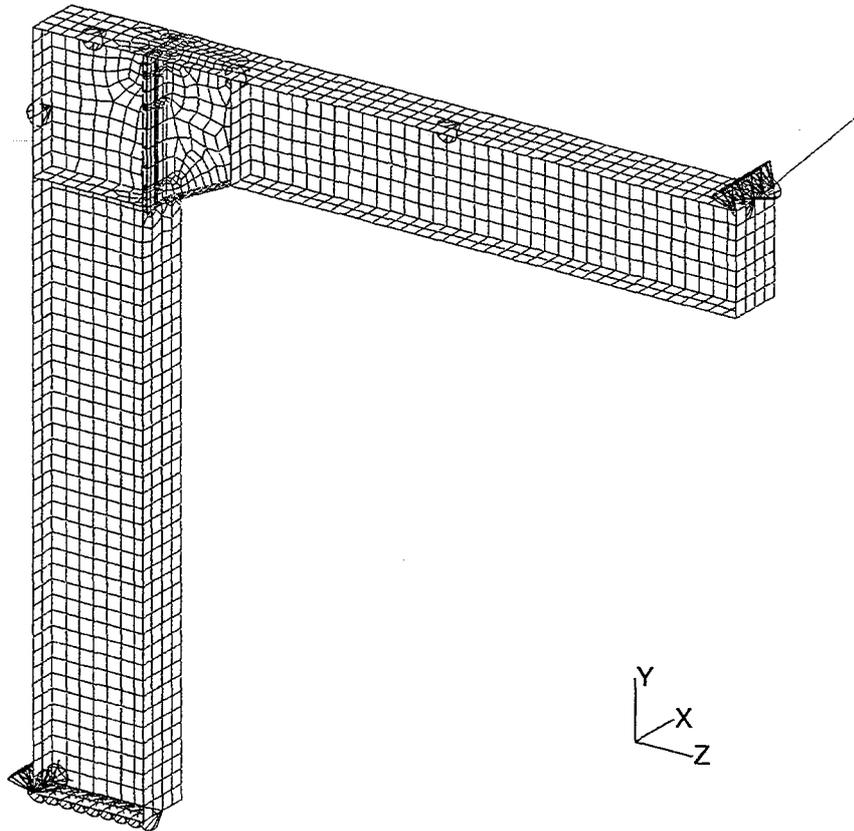


Abbildung 2 FE-Modell - Versuchskörper V6

In den Voruntersuchungen wurden Berechnungen nach EC 3, Annex J und FE-Simulationen durchgeführt. Die Bemessungen nach EC 3, Annex J, ergaben die in Tabelle 1 aufgelisteten Beanspruchbarkeiten und Rotationssteifigkeiten der jeweiligen Verbindung. Analog dazu wurden Traglastberechnungen mit Finiten Elementen durchgeführt. Dabei wurden die Versuchskörper entsprechend Abb. 2 mit verschiedenen Elementtypen diskretisiert. Steg und Flansche sowie Stirnplatten und Steifen wurden mit 4-knotigen Schalenelementen, die über die Dicke 5fach integriert werden, diskretisiert. Die Schrauben wurden mit 8-knotigen Volumenelementen abgebildet. Für die Umsetzung des Kontaktproblems wurden sogenannte Gap-Elemente eingesetzt. Diese sind nur in der Lage Druckkräfte zu übertragen und fallen unter Zugbeanspruchung aus. Damit kann das Kontaktproblem ausreichend genau nachgebildet werden. Abbildung 3 zeigt eine Zusammenstellung der Last-Verformungskurven aller Verbindungen. Der Weg wurde unter der Last in y-Richtung gemessen. Die y-Richtung entspricht bei allen Versuchskörpern der Längsachse der Stütze.

Versuch V_j	$M_{j,Rd}$ [kNm] nach EC3, Annex J, S. 49	$S_{j,ini}$ [kNm/rad] nach EC3, Annex J, S. 53
V1	145	25970
V2	133	18430
V3	133	18430
V4	203	46980
V5	179	39060
V6	207	69300
V7	225	131800

Tabelle 1 Bemessung nach EC3, Annex J

Die Versuchskörper sind hinsichtlich der Verbindungskonfiguration unterschiedlich aufgebaut. Die Versuchskörper 1-5 stellen Verbindungsknoten dar, welche im Geschossbau vorgefunden werden können. Die Verbindungen 1-3 haben hinsichtlich der Anordnung der Schraubenreihen und der bündigen Kopfplattenausbildung den gleichen Aufbau. Die Unterschiede bestehen darin, dass die Verbindung 1 einen ausgesteiften Stützensteg besitzt. Bei der Verbindung V2 ist der Stützensteg unausgesteift. Die Verbindung ist gegenüber der V1 somit nachgiebiger. Bei Verbindung V3 wurden zum Vergleich hinterlegte Bleche angeordnet. Der Stützensteg ist hier jedoch wiederum nicht ausgesteift. Die Verbindungskonfiguration des Versuchskörpers 4 beinhaltet eine überstehende Kopfplatte. Im überstehenden Teil ist eine Schraubenreihe angeordnet. Die Verbindung V5 wurde zum Vergleich mit den Verbindungen V1-V4 aus gleichen Profilen (HEB 300) hergestellt. Als Verbindungsmittel wurden jedoch keine Schrauben verwendet. Die Verbindung ist eine Schweißverbindung. Die Versuchskörper 6 und 7 sind ausgesteifte Rahmenecken. Stütze und Riegel der beiden Versuchskörper sind geschweißte Querschnitte. Die Verbindung V6 wurde mit einem gevouteten Riegelbereich ausgebildet. Es wurde eine bündige Kopfplatte angeordnet. Versuchskörper V7 hingegen besitzt überstehende Kopfplatten bei voutenförmiger Ausbildung von Stütze und Riegel. Genaue Abmessungen können der Anlage A entnommen werden.

Tabelle 2 enthält einen Vergleich für die einzelnen Verbindungen hinsichtlich der Bemessungslast nach EC3, Annex J, der Versuchslast und der Maximallast aus der FE-Berechnung.

Die von den Gutachtern aufgeworfene Frage, ob der Annex J schon ein theoretisches Defizit im Bereich ruhender Beanspruchung hat, ließ sich aus den wenigen hier durchgeführten FE-Rechnungen nicht weiter verfolgen.

Versuch V_j	Bemessungslast nach EC3, Annex J [kN]	Versuchslast [kN]	Traglast nach FE-Berechnung [kN]
V1	145	140	117
V2	133	140	110
V3	133	145	142
V4	203	168	160
V5	179	145	165
V6	183	245	207
V7	225	>250	210

Tabelle 2 Vergleich der Maximallasten

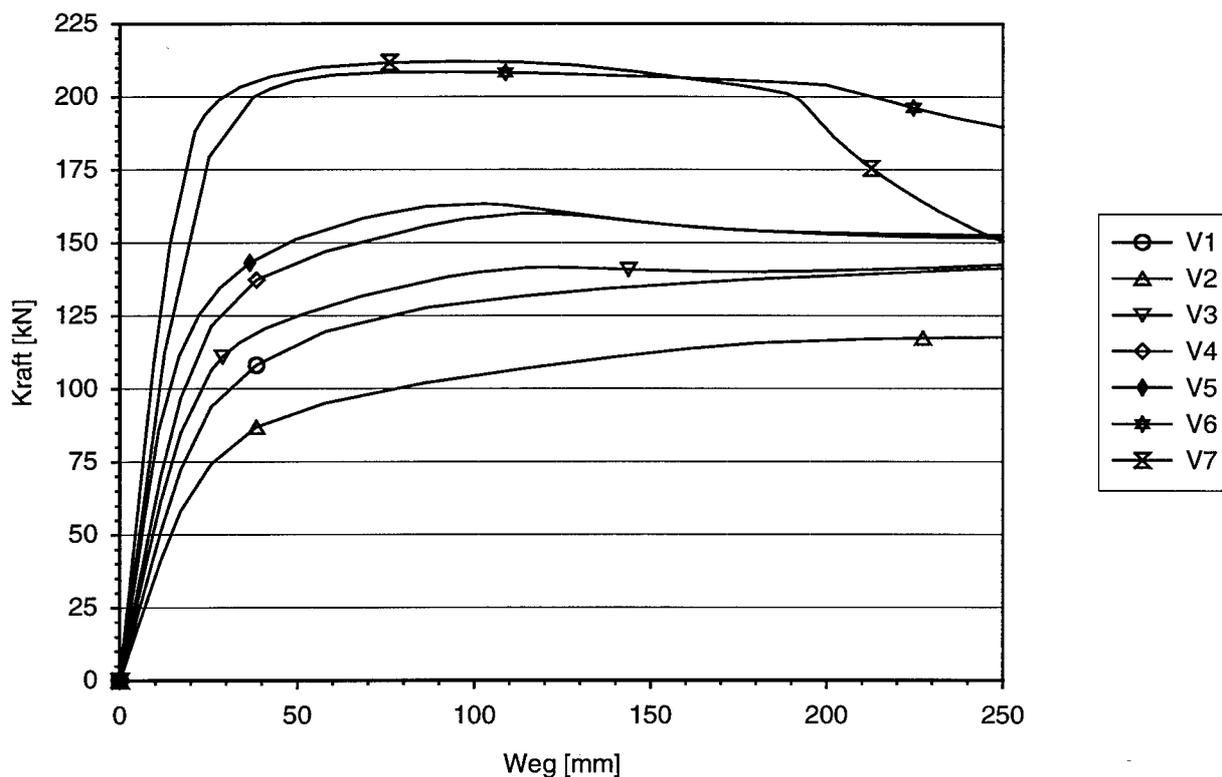


Abbildung 3 Last-Verformungskurven (FEM)

Den Berechnungen wurde bilineares Materialverhalten mit einer Fließgrenze von 360 N/mm^2 für die Versuchskörper V1-V6 sowie 240 N/mm^2 für V7 zugrunde gelegt. Der Teilsicherheitsfaktor entsprach mit 1,1 den Angaben im EC 3, Annex J.

4 Materialeigenschaften

Zur Bestimmung der charakteristischen Materialkennwerte wurden stellvertretend jeweils eine Materialprobe vom Versuchskörper 1, St 52, und eine vom Versuchskörper 7, St 37, angefertigt. Da die Profile aus einer Walzserie stammten kann von nur geringen Streuungen hinsichtlich der Festigkeit und Elastizität ausgegangen werden. In der Vergangenheit an der BTU durchgeführte Zugversuche bestätigen das. Wie die unten dargestellten Arbeitslinien der Materialproben der Versuchskörper V1 (Abb. 5) und V7 (Abb. 4) zeigen, führt die Annahme bilinearen Materialverhaltens nach Norm im allgemeinen nicht zur Überschätzung des Tragvermögens. Die Bruchdehnungen liegen für St 52 erfahrungsgemäß oberhalb 25%, für St 37 oberhalb 35%. Die Schraubenfestigkeit kann ähnlich beurteilt werden. Die Bruchdehnung der Schrauben 10.9 liegt erfahrungsgemäß etwas oberhalb der geforderten 10%.

Da bei den zyklischen Versuchen die Amplituden der Belastung so gewählt worden sind, dass sie unterhalb der Beanspruchbarkeit nach EC 3, Annex J, liegen, erfolgt eine eher konservative Beurteilung des Tragvermögens.

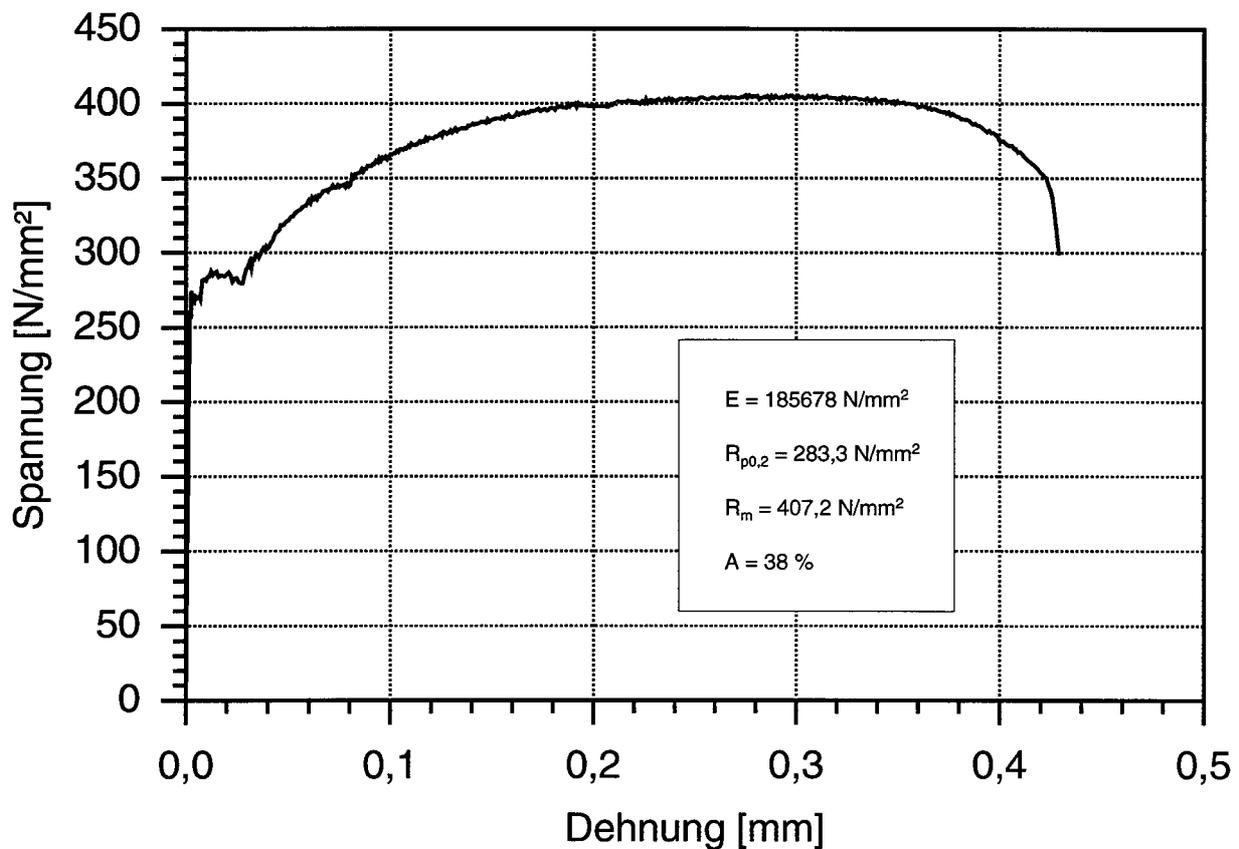


Abbildung 5 Arbeitslinie der Zugprobe des Versuchskörpers V1 (St 52)

5 Versuchsaufbau

Mit Ausnahme von V7 wurden alle Versuchskörper in horizontaler Einbaulage getestet. Die aus gewalzten Profilen hergestellten Versuchskörper wurden an den Stützenenden unverschieblich gehalten. Abbildung 6 zeigt exemplarisch den Versuchsaufbau für diesen Verbindungstyp.

Die Rahmenecke V6 wurde ebenfalls in horizontaler Einbaulage getestet, allerdings befanden sich die Stützstellen am freien Stützen- und Riegelende sowie an der Ecke selbst. Um vertikales Ausweichen zu verhindern, wurden jeweils quer über die Mitte von Stütze und Riegel verlaufend L-Profile angeordnet. Während des Tests kam es dort zu geringen Reibungsverlusten. Um auf eine zusätzliche Stützung in Versuchskörperebene im Eckbereich verzichten zu können, wurde die Last entlang der Geraden, die sich aus der Verbindung der gestützten Stütze-Riegel-Endpunkte ergibt, geführt.

Die Rahmenecke V7 wurde in senkrechter Einbaulage getestet. Dabei wurde die Last parallel zur Außenkante der Stütze am verlängerten Riegelende eingeleitet. Zusätzlich zu den Lagerungen am Stützenfuß und den seitlichen Halterungen wurde die äußere Ecke gestützt.

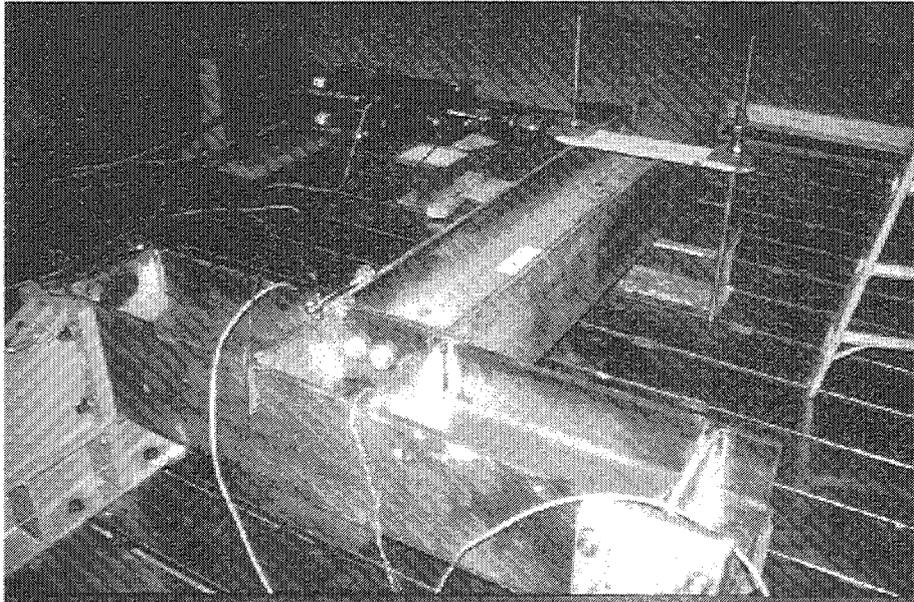


Abbildung 6 Versuchsaufbau V1 bis V6

Die Messstellenpläne der Versuchskörper sind in den Abbildungen 6 und 7 angegeben. Grundsätzlich wurde bei allen Tests die Kraft über den Weg an der Lasteinleitungsstelle gemessen. Des Weiteren waren bei den Walzprofilen lineare DMS an Riegelober- und -unterseite in unmittelbarer Nähe der Verbindung geklebt. Da im Versuch 7 höhere Traglasten zu erwarten waren, wurde nicht auf den horizontal gelagerten Prüfrahmen zurückgegriffen, sondern auf die 1000-kN-Prüfmaschine.

Bei Versuch 7 beträgt der Abstand zwischen Außenkante Stütze und Krafteinleitung 2850mm (Abbildung 9).

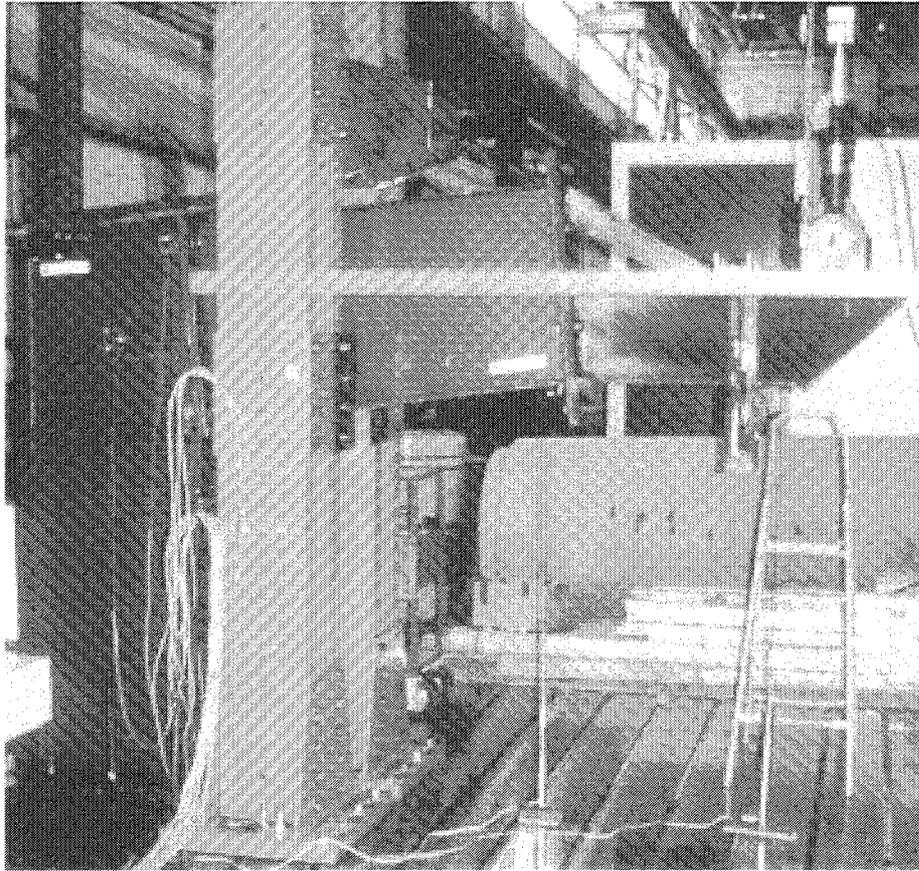


Abbildung 7 Versuchsaufbau V7

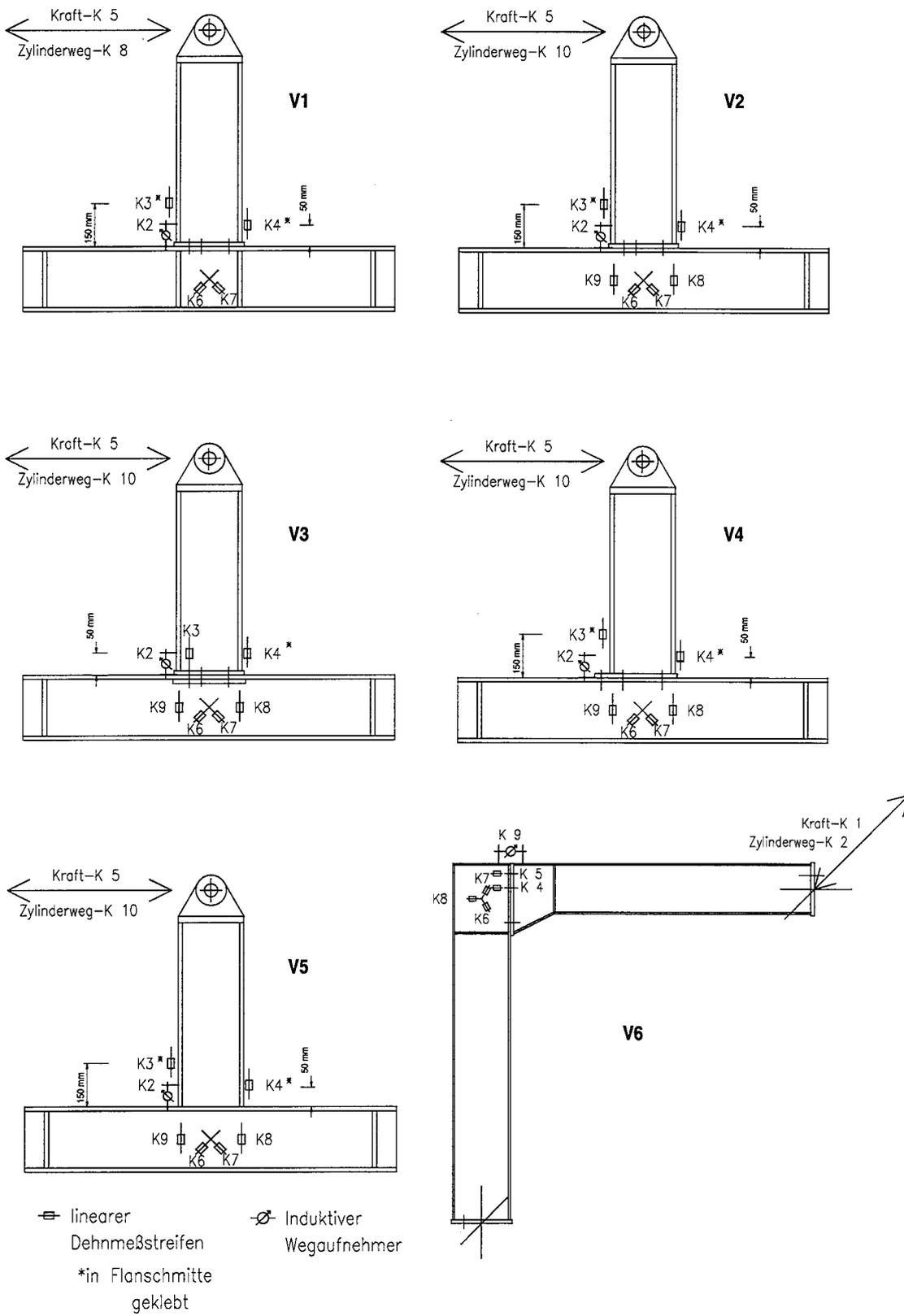


Abbildung 8 Messstellenpläne Versuchskörper 1-6

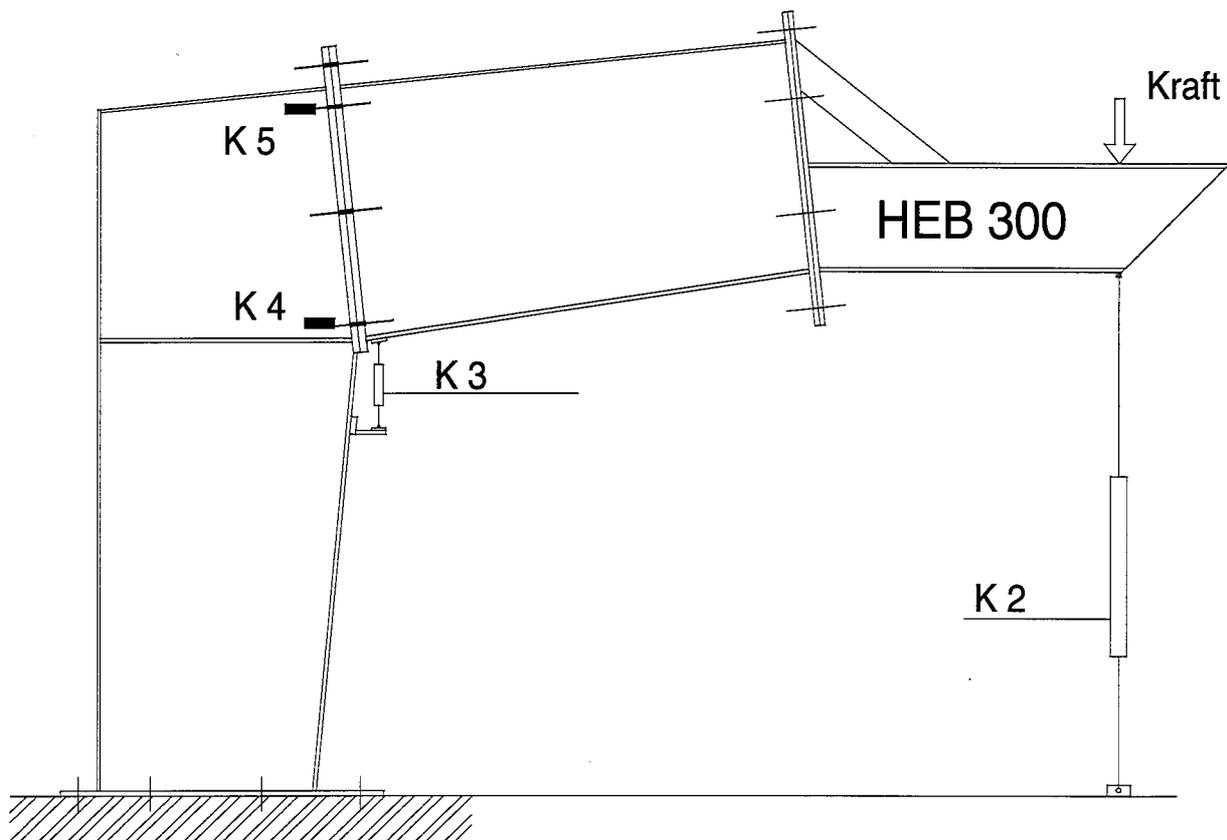


Abbildung 9 Messstellenplan Versuchskörper 7

6 Versuchsdurchführung

Wichtige Daten zur Belastungsgeschichte enthält Tabelle 3.

Für die Durchführung der Versuche 1-6 kam eine 250-kN-Pressen der Firma MTS zum Einsatz, für Versuch 7 - wie bereits erwähnt - die 1000-kN-Prüfmaschine. Die Belastung wurde schwellend mit einer Frequenz von 1 Hz (Ausnahme Versuch 3 - 1,234 Hz) eingeleitet. Zur Messwertaufzeichnung wurde ein Vielstellenmeßgerät DMC Plus der Firma HBM verwendet. Aufgrund der Vielzahl an Messstellen war eine Abtastrate von nur 5 Hz sinnvoll.

Die Versuchsdurchführung war so angelegt, dass für alle Versuchskörper dreimal 2000 Lastzyklen mit jeweils höherer Lastamplitude geplant waren. In Tabelle 2 sind die Belastungsfolgen aller Versuche angegeben.

Im Anschluss an die zyklischen Belastungsfolgen wurde die Last monoton bis zum Versagen gesteigert. Die Spalte 4 dieser Tabelle enthält die Versagenslasten die dabei erreicht worden sind. Zur Ausschaltung von eventuell vorhandenem Schlupf in der Verbindung wurde bei allen Versuchen eine Vorlast von 50 kN aufgebracht.

Versuch	F [kN]	M [kNm]	Zyklusanzahl	Bemessungslast [kN]	Versagenslast [kN]	Versagemoment [kNm]	Versagensart
V1	95	95	2000	145	140	140	Schraubenzugbruch der oberen Reihe
	120	120	2000				
	140	140	726				
V2	75	75	2000	133	140	140	Schraubenzugbruch der oberen Reihe
	95	95	2000				
	105	105	2000				
V3	95	95	2000	133	145	145	Schraubenzugbruch der oberen Reihe
	120	120	2000				
	145	145	247				
V4	95	95	2000	203	168	168	Fließgelenkbildung im überstehenden Teil der Kopfplatte
	120	120	2000				
	140	140	2000				
V5	95	95	2000	179	145	145	Versagen der zugbeanspruchten Schweißnaht
	120	120	2000				
	145	145	210				
V6	140	158	2000	183	245	276	Stabilitätsversagen des Voutenflansches
	160	180	2000				
	180	203	2000				
V7	150	318	2000	225	>250	>530	Versuchsabbruch

Tabelle 3 Belastungsgeschichte

7 Versuchsauswertung

Für alle Versuchskörper erfolgt die Auswertung anhand von Weg-Zeit-Diagrammen. Da die Lastfrequenz 1 Hz betrug, lässt sich die Zyklusanzahl direkt ablesen (Ausnahme Versuch 3). Zwischen den einzelnen Belastungsblöcken gab es Ruhezeiten von maximal 10 min. Aufgrund der Kraftregelung werden Dehnungsänderungen im Zusammenhang mit der zunehmenden Zykluszahl sichtbar.

Die Messwerte der Versuche V1 bis V5 wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit als Hüllkurven dargestellt.

7.1 Versuch 1

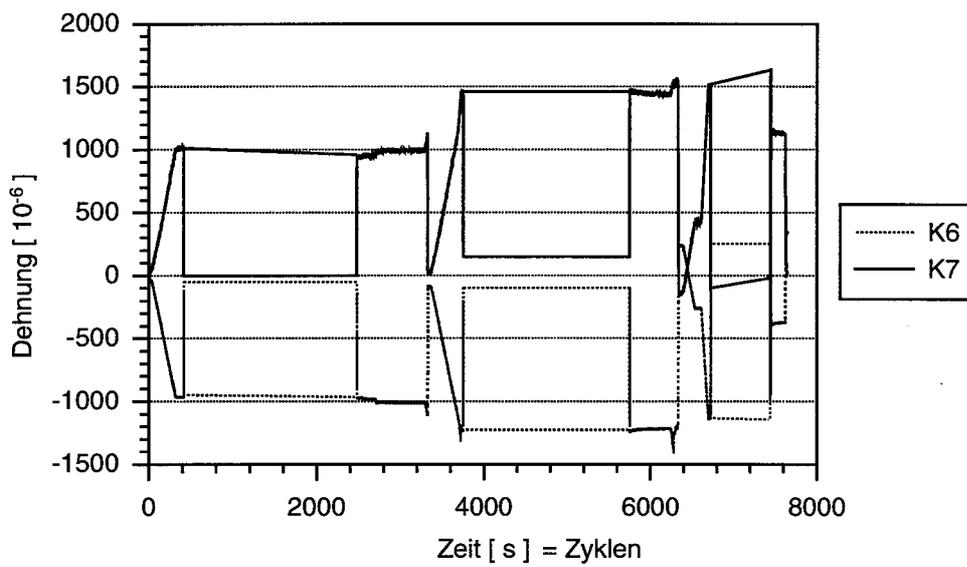
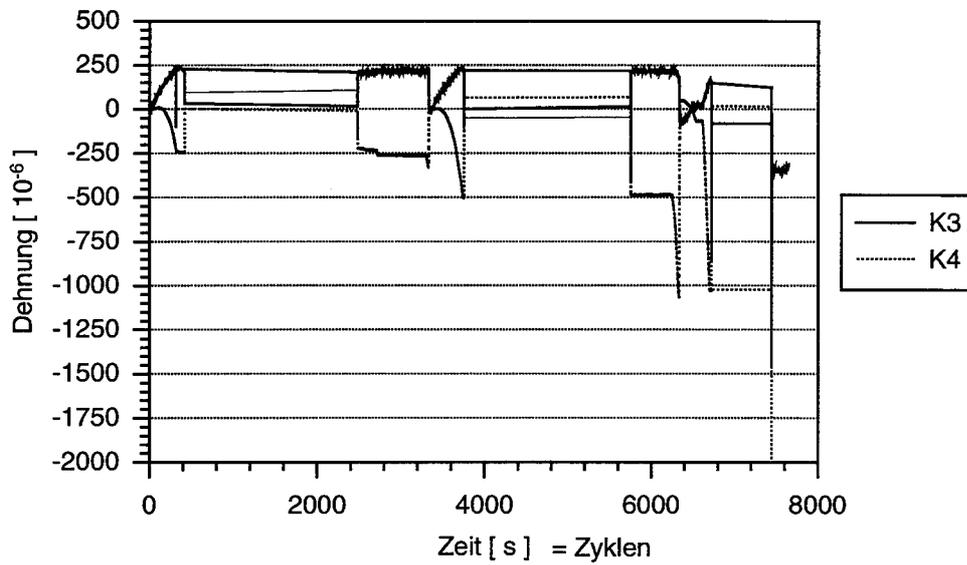


Abbildung 10 Messkurven V1

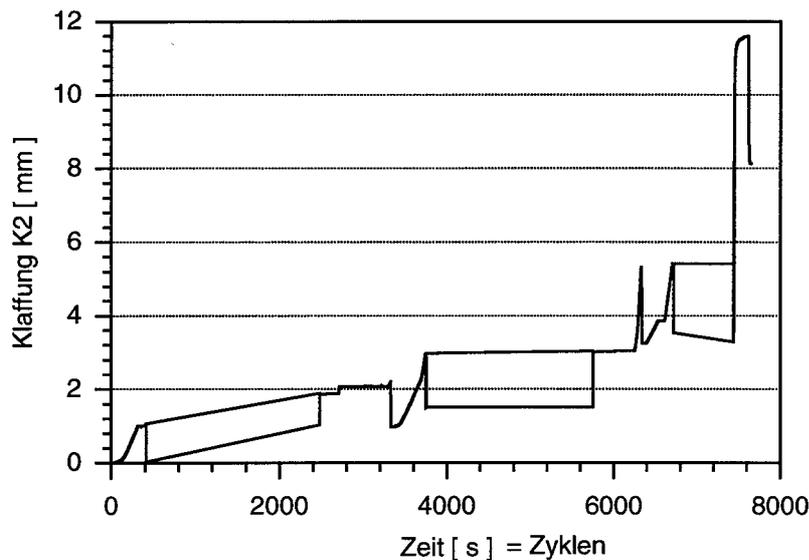


Abbildung 10 Messkurven V1 - Fortsetzung

Die Dehnungen der Kanäle 3 und 4 zeigen, dass sich eine Erhöhung der Lastamplitude nur unwesentlich auf den gezogenen Riegelflansch nahe der Verbindung auswirkt. Die Dehnungsmaxima bleiben weitestgehend konstant. Im dritten Lastabschnitt ist eine kontinuierliche Abnahme der Zugdehnungen erkennbar, was auf eine Umlagerung der inneren Kräfte hinweist. Anhand der Stauchungen des Riegelflansches ist dieses Verhalten nicht zu interpretieren. Die gegenüber den Stauchungen geringeren Zugdehnungen resultieren aus dem größeren Abstand des DMS von der Verbindungsfuge

Betrachtet man die Kurven der diagonal auf den Stützensteg geklebten DMS K6 und K7, so wird die Annahme der inneren Kraftumlagerung untermauert. Auch hier vollzieht sich im dritten Zyklenabschnitt eine kontinuierliche Dehnungszunahme sowohl im Zug- als auch im Druckbereich. Die aus den Dehnungen errechneten Spannungen aller Messstellen liegen aber noch unterhalb der Fließgrenze, bei maximal 315 N/mm^2 für K7.

An der Messstelle K2 ist die Klaffung des Stirnplattenstoßes ablesbar. Hier zeigt sich, dass bereits nach den ersten 2000 Zyklen eine bleibende Lücke von ca. 2 mm vorhanden ist, wobei Schlupf aufgrund der Vorbelastung ausgeschlossen werden kann. Es muss also bereits in diesem Abschnitt zu plastischen Deformationen von Kopfplatte, Stützenflansch oder und Schrauben gekommen sein.

Das nach 726 Zyklen im dritten Abschnitt eintretende Versagen der oberen Schraubenreihe ließ sich mit einiger Sicherheit anhand der Messstellen K3, K6 und K7 vorhersagen.

7.2 Versuch 2

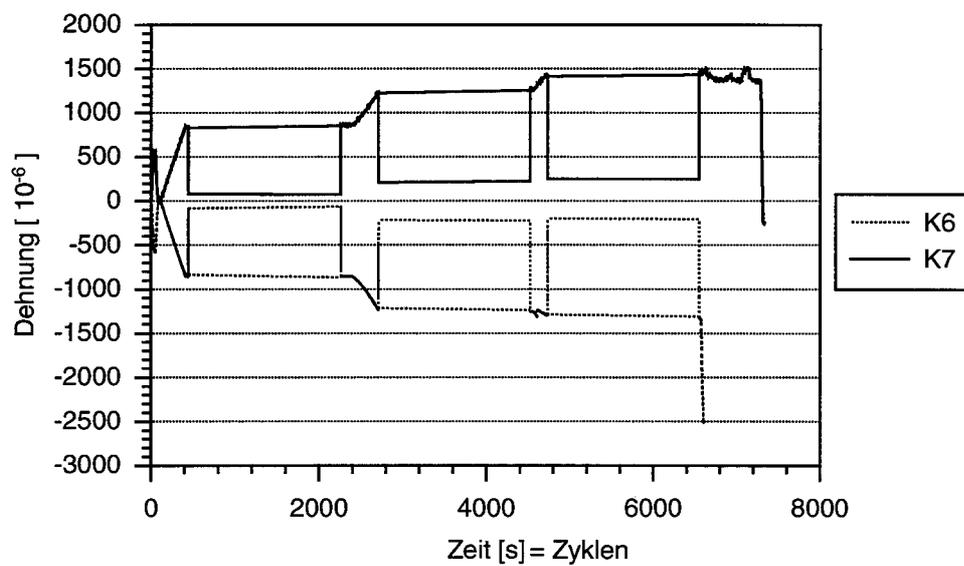
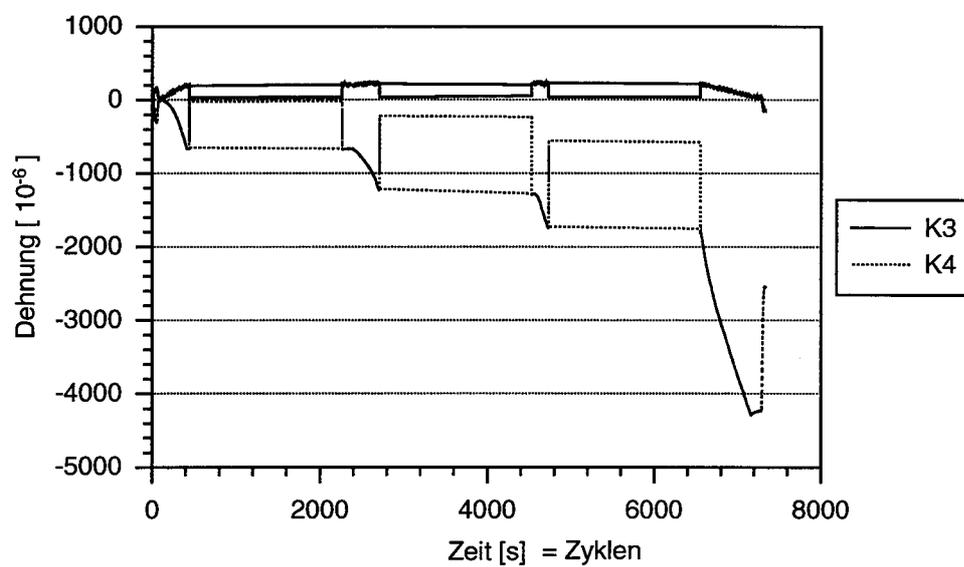


Abbildung 11 Messkurven V2

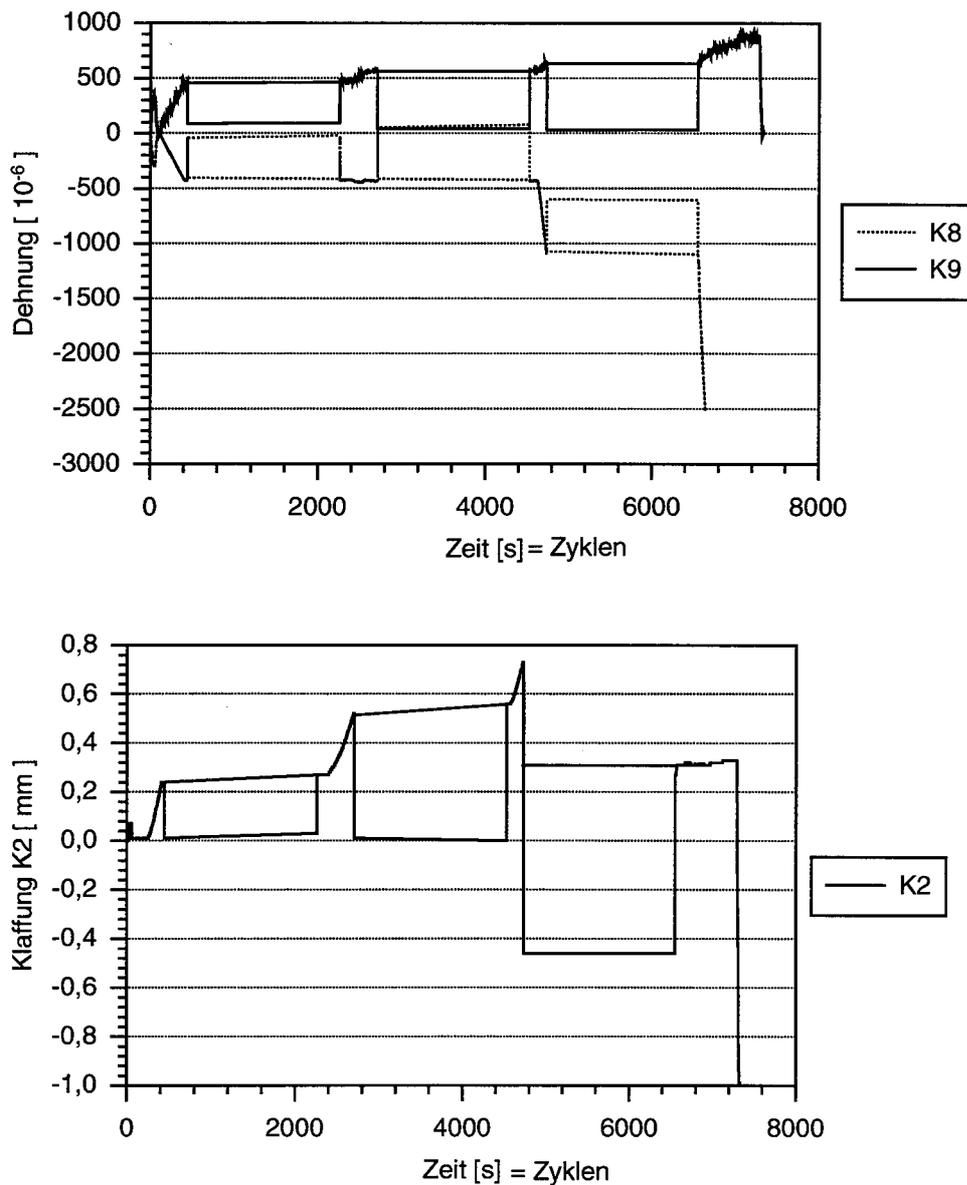


Abbildung 11 Messkurven V2 - Fortsetzung

Die Riegelflanschmessstellen K3 und K4 unterstreichen das schon beim vorhergehenden Versuch beobachtete innere Tragverhalten des Riegels, wonach die Zugdehnungsmaxima bei allen drei Belastungsabschnitten nahezu konstant bleiben - die Stauchungen jedoch um entsprechende Beträge zunehmen. Es ist ebenfalls zu beobachten, dass sich im Druckbereich bleibende Riegelverformungen einstellen, die auf das Erreichen der Fließgrenze hindeuten.

Die Stützenstegmessstellen K6, K7 weisen innerhalb der Belastungsabschnitte konstant bleibende Dehnungsmaxima und -minima auf. Der Anteil plastischer Deformationen bei Entlastung ändert sich zwischen dem zweiten und dritten Belastungsabschnitt nicht mehr. Die größere Lastamplitude schlägt sich im wesentlichen nur noch bei den Dehnungsmaxima der Messstelle K7 nieder.

Das relativ ausgeglichene Verformungsverhalten ist auch an den Messstellen K8 und K9 ablesbar. Im dritten Belastungsabschnitt gibt es aber einen deutlichen Zuwachs am Anteil bleibender plastischer Stauchungen. Ein vorzeitiges Versagen der Verbindung ist bei diesem Versuchskörper nicht ablesbar.

7.3 Versuch 3

Aufgrund eines Steuerungsfehlers lag bei diesem Versuch die Lastwechselfrequenz bei 1,234 Hz.

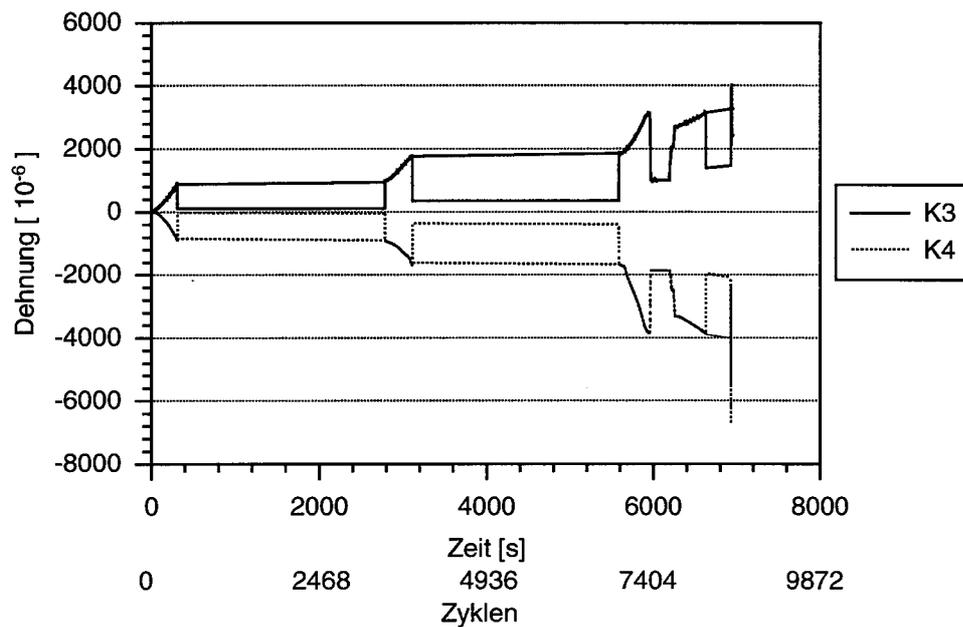


Abbildung 12 Messkurven V3

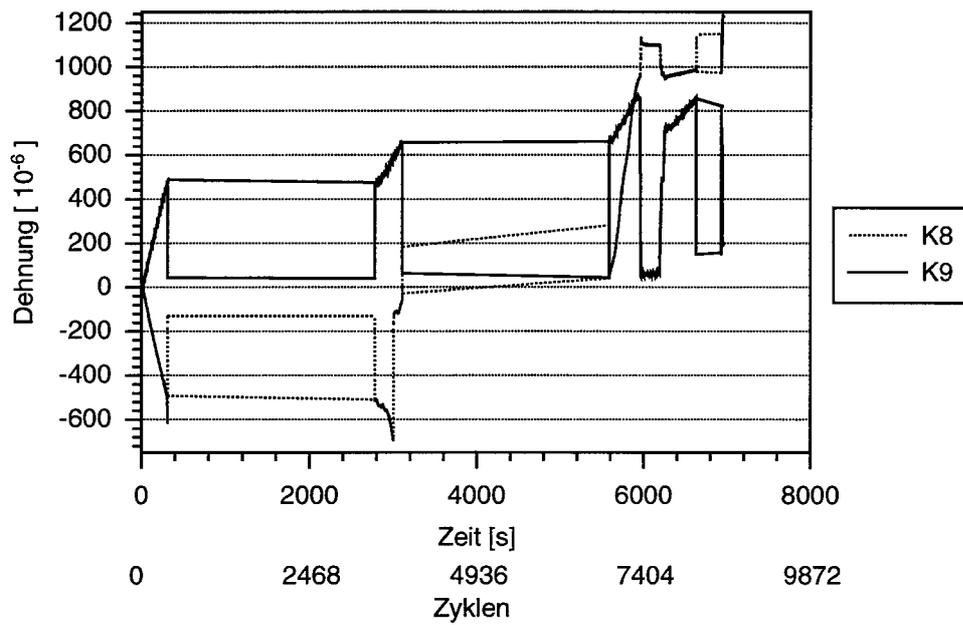
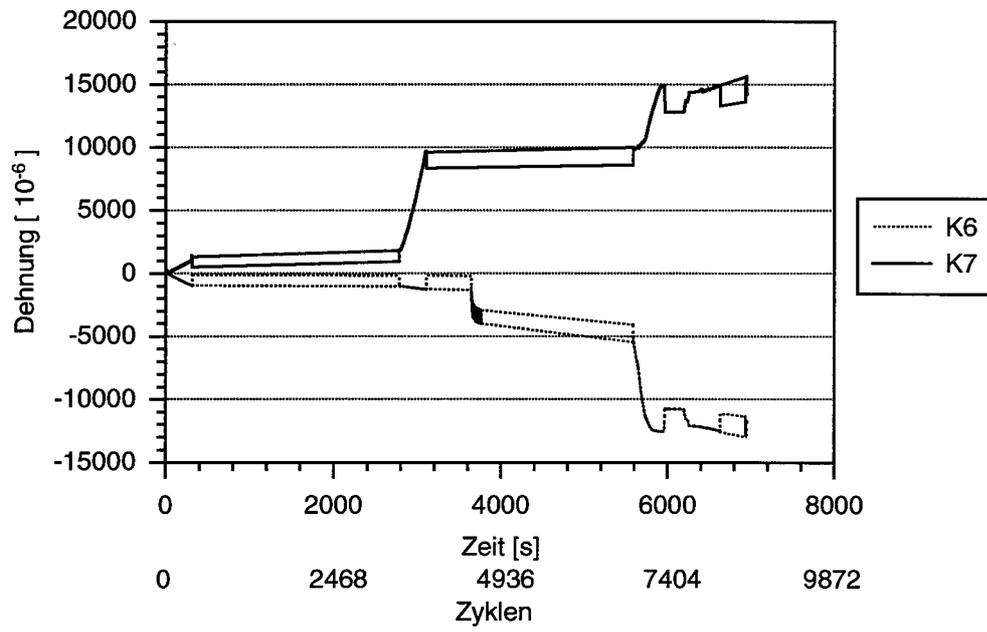


Abbildung 12 Messkurven V3 - Fortsetzung

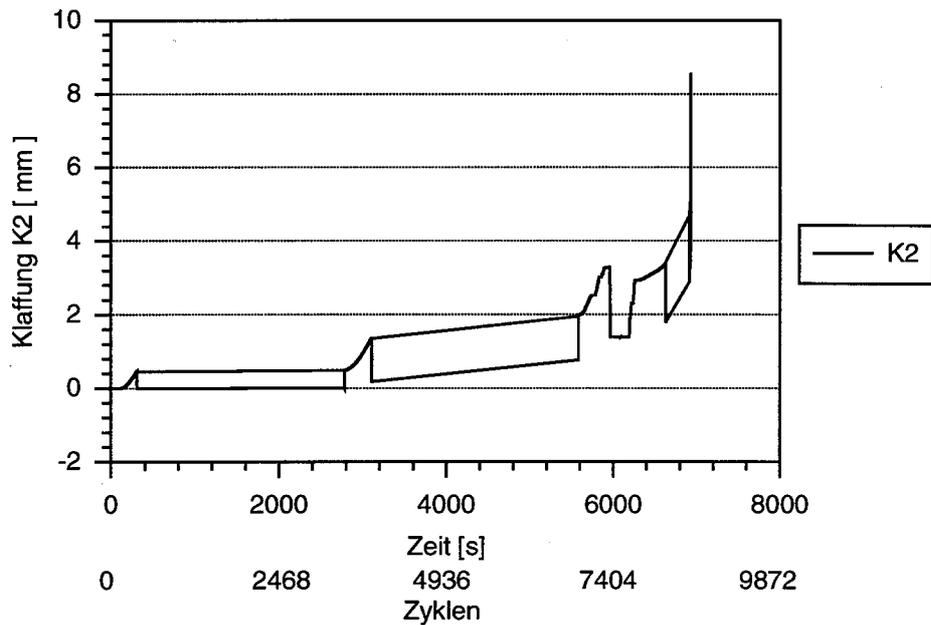


Abbildung 12 Messkurven V3 - Fortsetzung

Der DMS K3 wurde hier in Höhe der oberen Schraubenreihe des Zugbereiches auf den Steg geklebt. Damit stellt sich ein nahezu spiegelsymmetrischer Dehnungsverlauf an den Messstellen K3 und K4 ein. Hier ist zu erkennen, dass bereits im zweiten Belastungsabschnitt Dehnungen nahe der Fließgrenze auftreten, mit progressivem Verlauf bei den Dehnungsamplituden. Das Versagen trat als logische Folge innerhalb des dritten Belastungsabschnitts ein, da hier die Fließdehnungen bereits deutlich überschritten waren. Die Stützenstegmessstellen K6, K7 weisen ebenfalls eine höhere Beanspruchung des Steges gegenüber den vorangegangenen Versuchen aus. Auch hier werden die Fließdehnungen schon im zweiten Belastungsabschnitt wesentlich überschritten.

An der Messstelle K9 sind die im Vergleich zum Versuch V2 größeren Dehnungen erkennbar, die aus der höheren Steifigkeit des Zugbereiches resultieren. Die Fließdehnungen wurden nicht erreicht. Das Umschlagen der Dehnungen an der Messstelle K8 nach dem ersten Belastungsabschnitt deutet auf eine Beule senkrecht zur Zugdiagonalen hin, die im Verlauf des Versuches aber nicht erkennbar war.

Eine bleibende Klaffung der Verbindungsfuge stellt sich erst nach dem zweiten Belastungszyklus ein.

7.4 Versuch 4

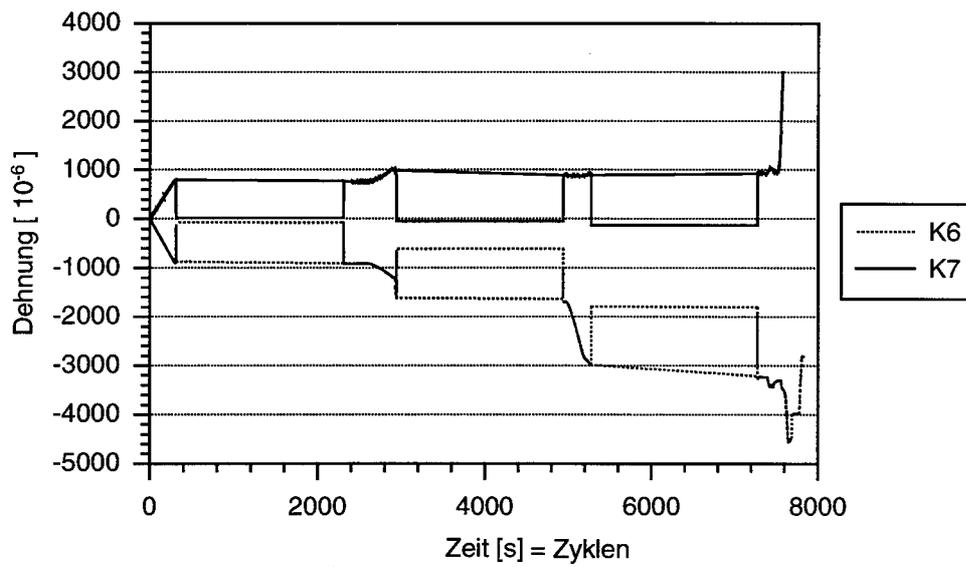
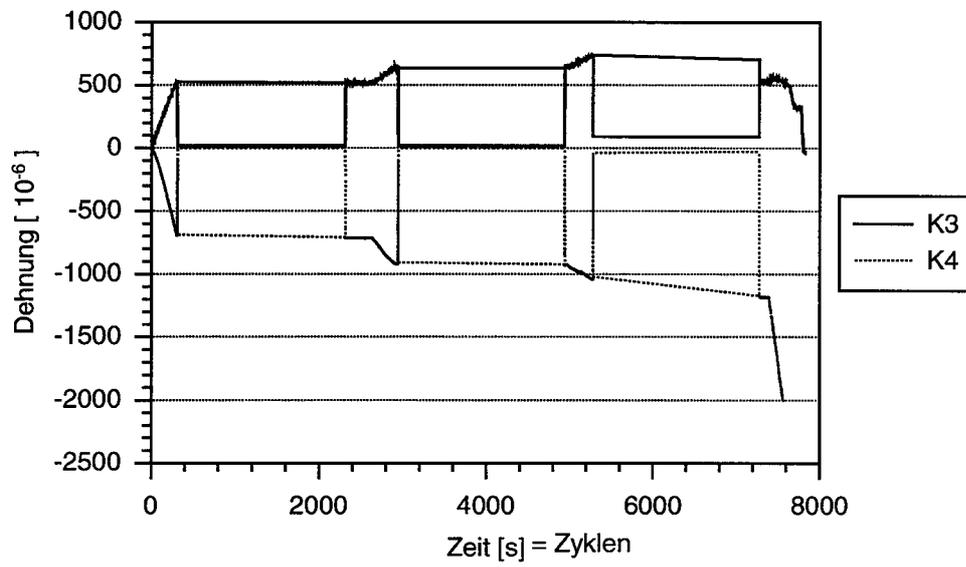


Abbildung 13 Messkurven V4

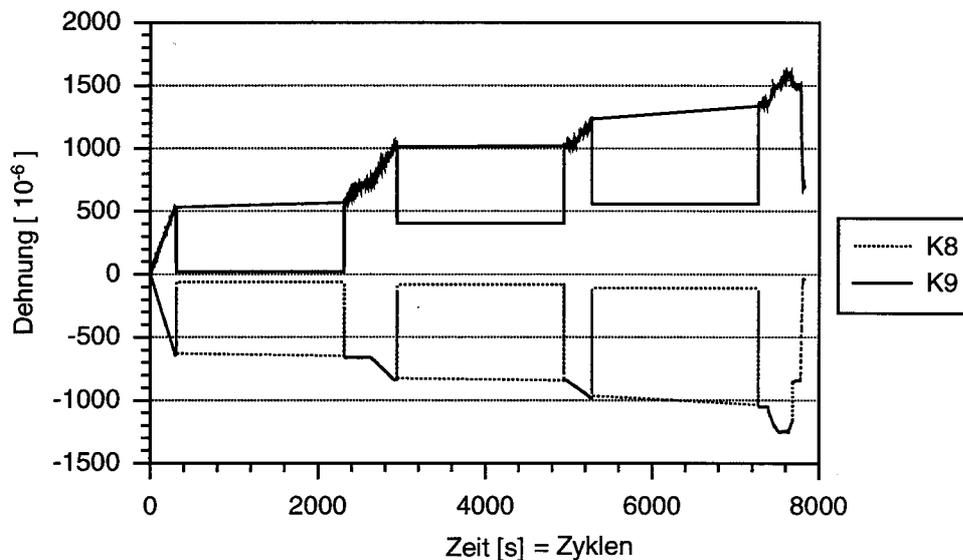


Abbildung 13 Messkurven V4 - Fortsetzung

Am Verlauf der Dehnungen an den Messstellen K3, K4 wird sichtbar, dass nach dem zweiten Belastungszyklus eine innere Kräfteumlagerung von der ersten hin zur zweiten Schraubenreihe des Zugbereiches stattfindet. Deutlich wird dies insbesondere durch den kontinuierliche Abfall der Dehnungsamplituden des DMS K3. Ursache dafür ist die zunehmende Nachgiebigkeit des überstehenden Teils der Kopfplatte aufgrund plastischer Verformungen.

Die relativ große Beanspruchung des Stützensteiges spiegelt der Verlauf der Messstellen K6 bis K9 wieder. Hier fällt auf, dass die Beanspruchungen senkrecht zur Zugdiagonalen mit jedem Belastungsabschnitt stark zunehmen. Der Anteil der bleibenden Verformungen liegt dabei im Bereich der Fließdehnung. Der Verlauf der Messkurven K8 und K9 lässt im dritten Belastungsabschnitt eine stetige Zunahme der Spannungsamplituden erkennen. Die dort gemessenen Dehnungen liegen aber noch unterhalb der Fließdehnung, wenngleich bleibende Deformationen zu verzeichnen sind.

Insgesamt lässt die Analyse der Messwerte den Schluss zu, dass auch bei diesem Verbindungstyp ein vorzeitiges Versagen (unterhalb 10000 Zyklen) aufgetreten wäre. Die Messwerte des induktiven Wegaufnehmers K2 sind nicht auswertbar.

7.5 Versuch 5

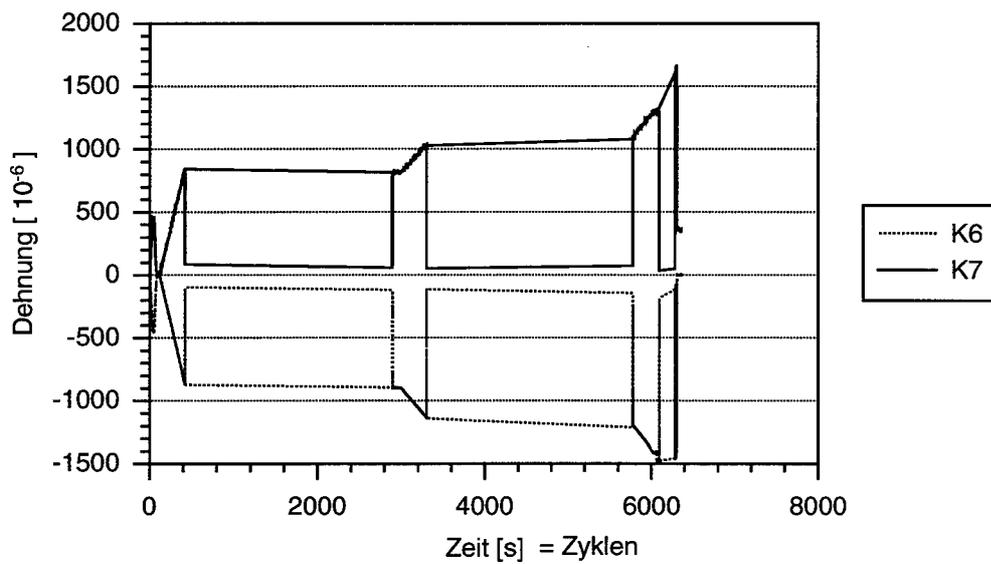
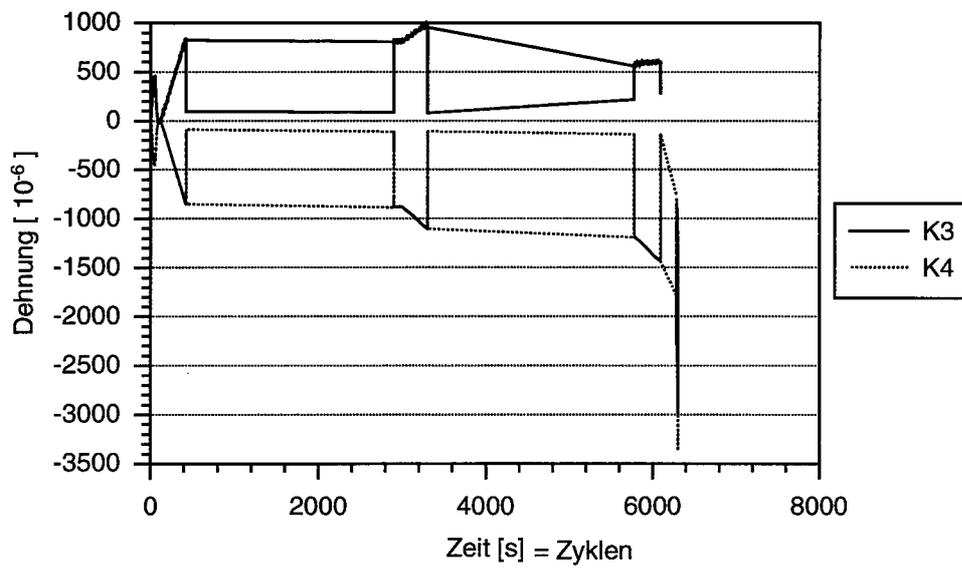


Abbildung 14 Messkurven V5

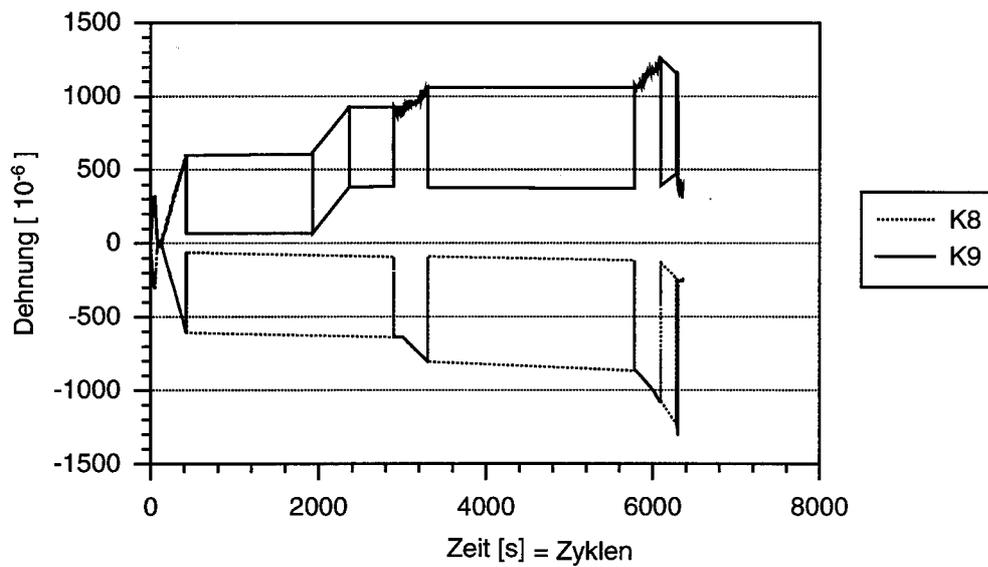


Abbildung 14 Messkurven V5 - Fortsetzung

Der erste Belastungszyklus lässt bis auf K8 keine Unregelmäßigkeiten in den Messwerten erkennen. Das Anwachsen der Dehnungsamplitude bei K8 innerhalb der ersten 2000 Zyklen kann nicht interpretiert werden. Es wird von einer Anomalie des DMS ausgegangen.

Der Graph der Messwerte K3 und K4 des zweiten Belastungszyklus zeigt, dass es wiederum zu einer Umlagerung der inneren Kräfte kommt. Hier ist mit Sicherheit von fortschreitender Rissbildung im Bereich der Schweißnaht auszugehen.

Das Versagen trat dann erwartungsgemäß zu Beginn des dritten Belastungsabschnitts auf.

7.6 Versuch 6

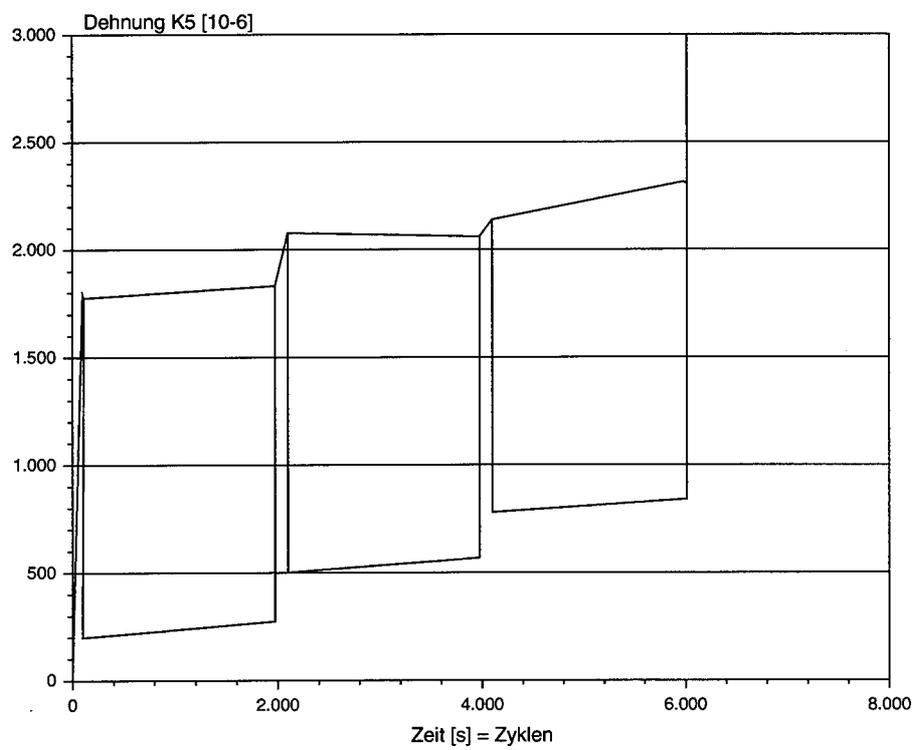
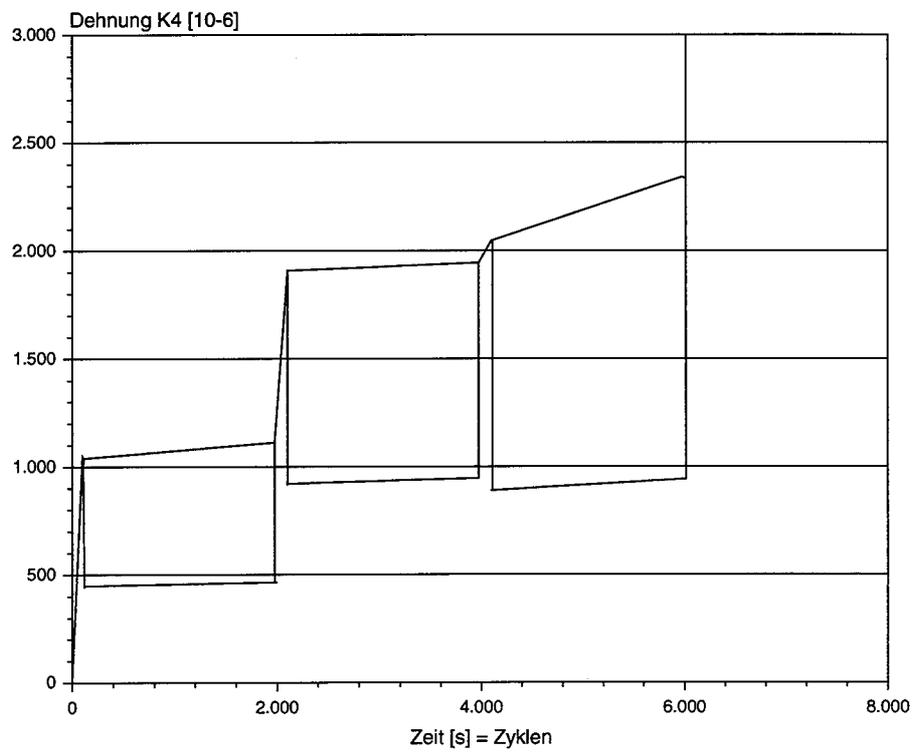


Abbildung 15 Messkurven V6

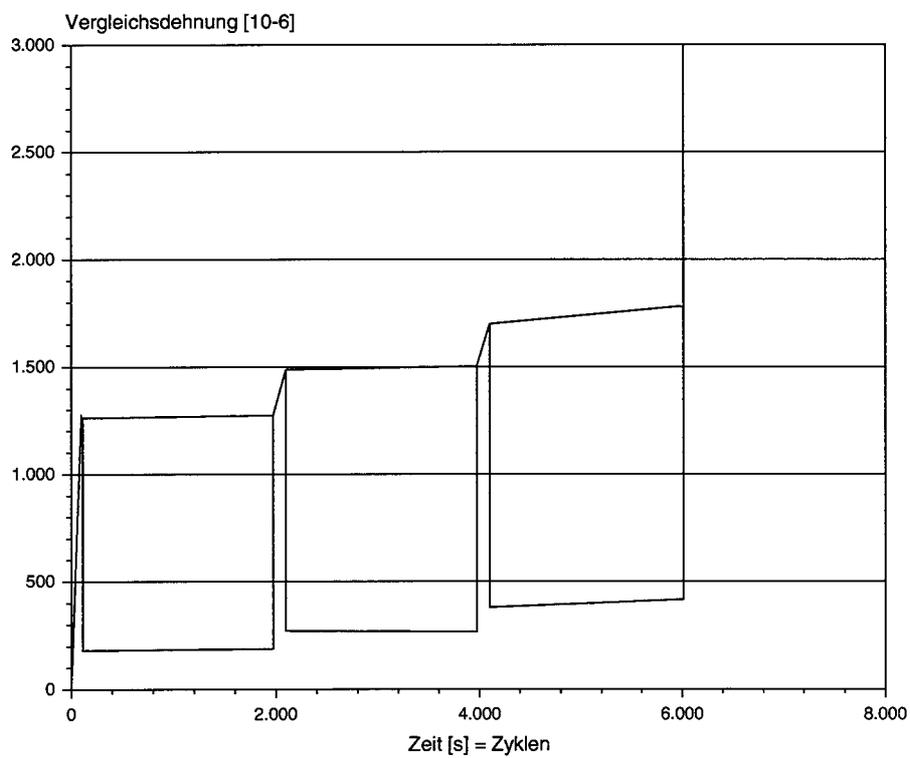
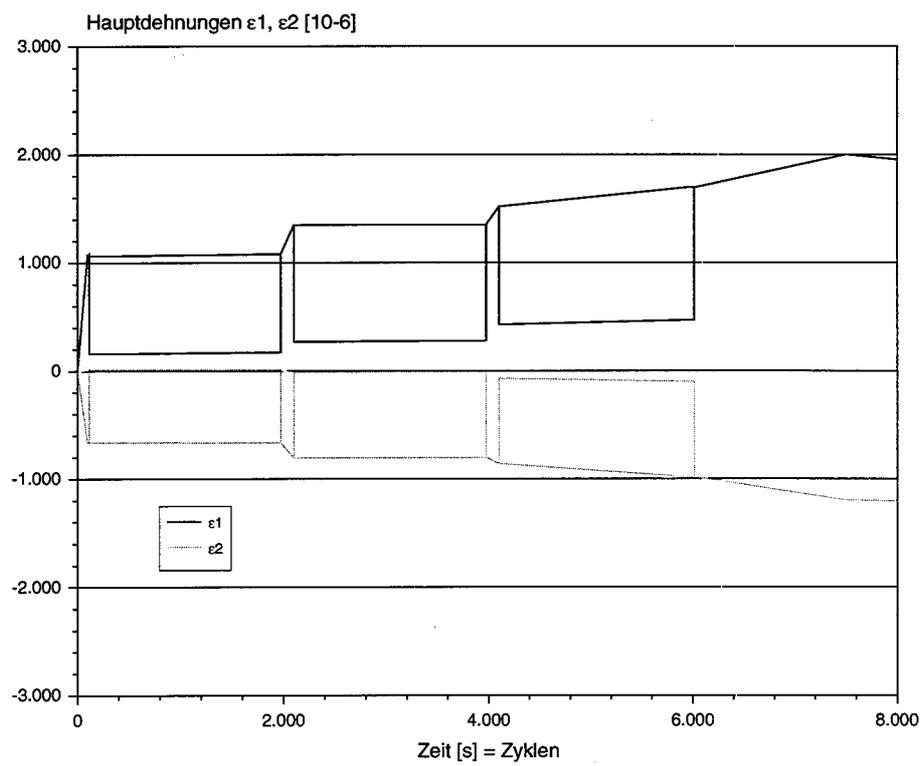


Abbildung 15 Messkurven V6 - Fortsetzung

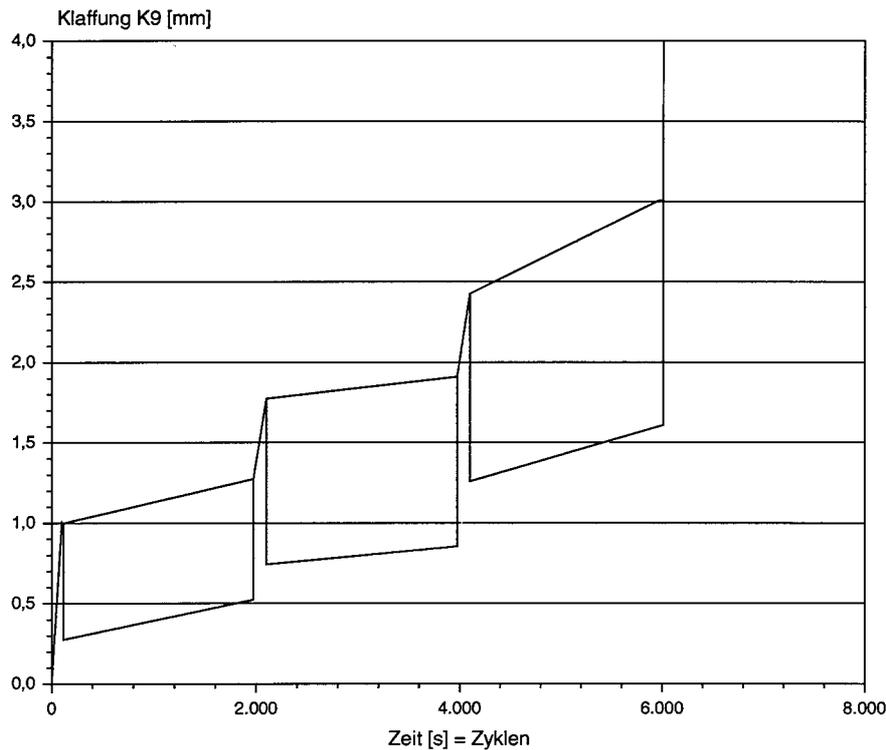


Abbildung 15 Messkurven V6 - Fortsetzung

Die Auswertung der Messwerte wies für den Stützensteg erst im dritten Belastungszyklus eine Überschreitung der Vergleichs-Fließdehnungen aus. Beide Hauptdehnungen liegen dagegen über alle Lastzyklen im elastischen Bereich. An den gemessenen Zugdehnungen des Stegbleches unmittelbar hinter den Schraubenreihen lässt sich nach dem ersten Belastungsabschnitt noch teilweise die elastische Schraubenkraftverteilung der Kopfplattenverbindung ablesen. Danach findet erkennbar ein Ausgleich der Schraubenkraftverteilung wie auch der Stegspannungen statt, der nach dem dritten Belastungszyklus nahezu identische Dehnungsmaxima liefert. Die Fließdehnungen sind dann bereits deutlich überschritten.

Der Anteil bleibender Verformungen fällt für die untere zugbeanspruchte Schraubenreihe gravierender aus als für die äußere.

An der Messstelle K9 kann die Klaffung der Verbindungsfuge über der Stegachse abgelesen werden. Gut zu sehen sind die fortschreitenden Plastizierungen unter Be- und Entlastung. Diese resultieren zum überwiegenden Teil aus den plastischen Verformungen des Stützenflansches im Anschluss.

Der Versuchskörper hielt der Beanspruchung über den gesamten Zyklenbereich stand, obwohl bereits deutlich sichtbare plastische Verformungen des Riegeluntergurtes im gevouteten Abschnitt auftraten. Nach der Demontage der Verbindung war an einer äußeren zugbeanspruchten Schraube der erste Gewindengang angerissen. Im Zusammenhang mit der Verformungsfigur muss ursächlich eine kombinierte Zug-Biegebeanspruchung dazu geführt haben.

7.7 Versuch 7

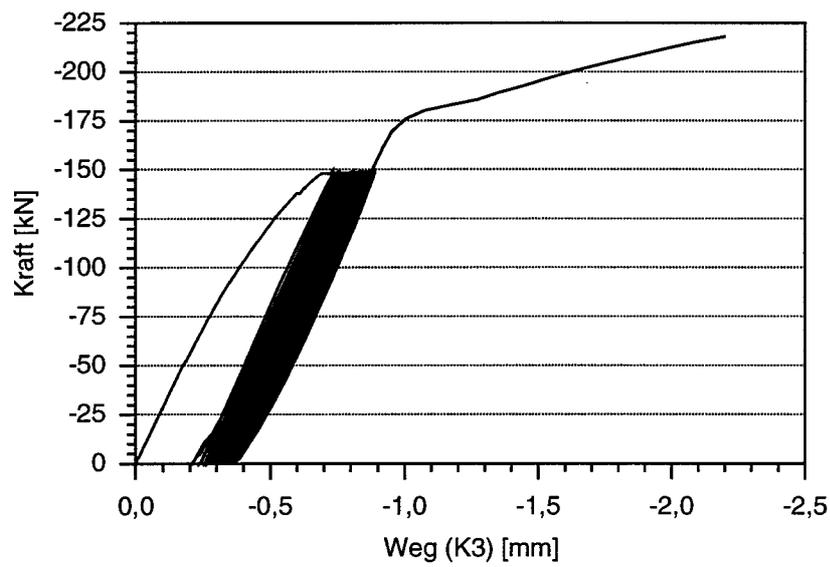
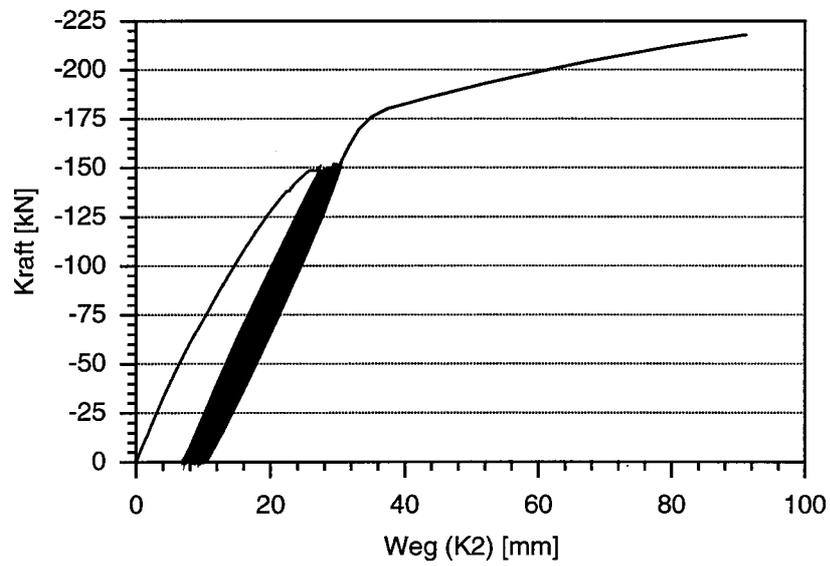


Abbildung 16 Messkurven V7

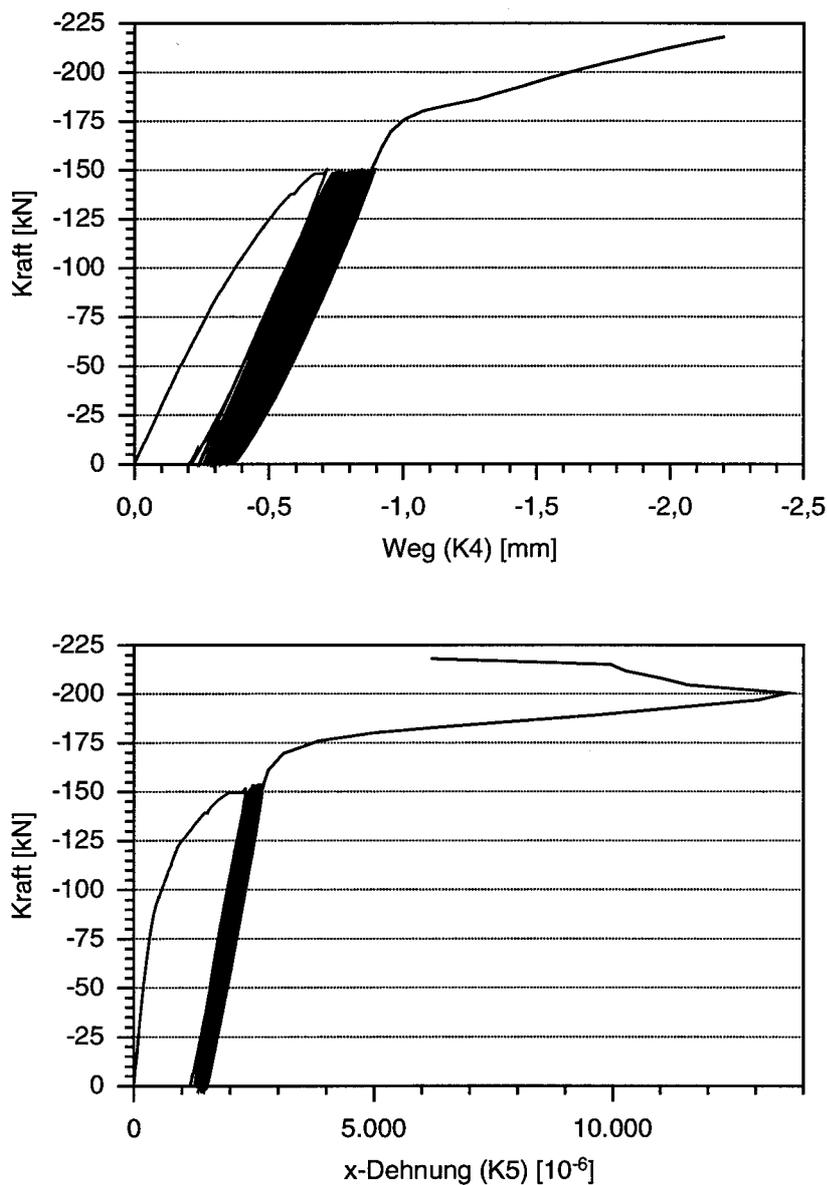


Abbildung 16 Messkurven V7 - Fortsetzung

In Abbildung 14 sind in den oberen Diagrammen die Verläufe der Kraft über den Weg für die Kanäle 2 und 3 dargestellt. Diese Darstellungen zeigen, dass sich relativ stabile Hysteresen einstellen, wobei geringe, aber stetig wachsende bleibende Verformungsanteile erkennbar sind. Ursprünglich sollte die Lastamplitude für diesen Test 175 kN betragen. Aufgrund überproportionaler Verformungszuwächse wurde jedoch die Lastamplitude auf 150 kN abgesenkt. Die Messwerte des unmittelbar an der inneren Ecke angeordneten Wegaufnehmers (K3) machen deutlich, dass die bleibenden Verformungsanteile aus der Quasi-Rotation der Ecke resultieren müssen.

Bestätigt wird diese Annahme, durch den Verlauf der Kraft-Dehnungskurven der unteren beiden Bilder. Im linken Bild sind die Druckdehnungen im rechten die Zugdehnungen des Eckbleches in

Höhe der jeweiligen Schraubenreihen dargestellt. In beiden Fällen gab es Dehnungen $> 0,2\%$, was lokale Plastifizierungen vermuten lässt.

Der Versuchskörper V7 zeigte ein sehr „gutmütiges“ Verhalten. Über die gesamte Zyklenzahl waren im Eckbereich keine Verformungen sichtbar. Bei etwa 225 kN musste der Versuch aus technischen Gründen abgebrochen werden. Bild 15 zeigt das deformierte Eckblech bei 225 kN. Das sich leicht abzeichnende Zugfeld in der Rahmenecke bildete sich erst oberhalb von 200 kN.

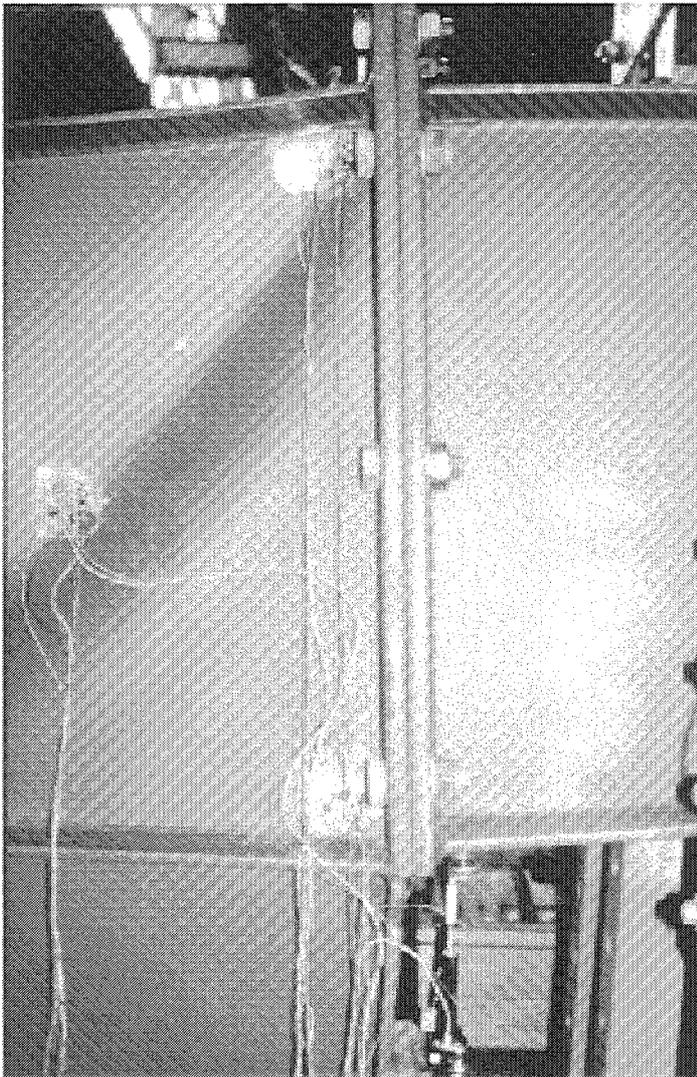


Abbildung 17 V7-Eckblech bei 225 kN

Die relativ große Schlankheit des Eckbleches, führte zu keinem vorzeitigen Versagen. Der sehr steife Kopfplattenstoß wies im Verlauf der Versuchsdurchführung keine Deformationen auf.

8 Schlussfolgerungen

Die neuen plastischen Bemessungsverfahren von geschraubten oder geschweißten nachgiebigen Verbindungen verlangen nach Auswertung der 7 exemplarisch durchgeführten Versuche nach einer Präzisierung des Begriffs „vorwiegend ruhend“.

Es wurde gezeigt, dass der komplizierte Tragmechanismus zu lokalen Überbeanspruchungen führen kann, die bei ungünstigen Lastumlagerungen vor allem Überbeanspruchungen der Schrauben bewirken können. Dies führt dann, wie die Versuche V1 und V3 zeigten, zum vorzeitigen Schraubenversagen, ohne dass damit vorherige große Deformationen verbunden sind. Selbst die empfohlene Schraubendimensionierung von Schraubendurchmesser/Kopfplattendicke = 1,5 kann diesen Versagensmechanismus nicht abfangen.

Betrachtet man lediglich den ersten Belastungszyklus, dessen Lastamplitude bei allen Versuchskörpern unterhalb von 2/3 der rechnerischen Beanspruchbarkeit lag, so sind bereits hier bei allen geschraubten Versuchskörpern an verschiedenen Messstellen deutliche bleibende Deformationen vorhanden.

Legt man die Beanspruchbarkeit für geschraubte Verbindungen nach EC 3, Annex J, zu Grunde (Tab. 1), so führte das in drei Fällen (V 1, V3, V5) zu „vorzeitigem“ Versagen (bei Lastwechseln unterhalb von 10000 Zyklen).

Bei Beachtung der aktuellen Konstruktionsregeln für nachgiebige Verbindungen ist aufgrund des großen Kerbeeinflusses in Verbindung mit der begrenzten Duktilität hochfester Schrauben ein Versagen dieser am wahrscheinlichsten. Verlässt man diesbezüglich die Empfehlungen in Richtung dünnere Kopfplatte, wird sich zusätzlich zur Zug- eine Biegebeanspruchung einstellen. Der einseitige Schraubenanriss im Versuch 6 unterstreicht dies.

Die einzige geschweißte Verbindung im Versuchsprogramm (V4) zeigte sich sehr anfällig gegenüber zyklischer Beanspruchung. Berücksichtigt man, dass es sich „nur“ um eine schwellende zyklische Beanspruchung handelte, erscheint dieser Umstand umso bedeutsamer. Auch hier muss davon ausgegangen werden, dass der hohe Kerbeeinfluss der Schweißnähte zum vorzeitigen Versagen führte. Für die Ausführung derartiger, sehr weicher geschweißter Verbindungen ergibt sich daraus eine besondere Sorgfaltspflicht. Auf keinem Fall sollten einseitige bzw. unterdimensionierte Kehlnähte vorgesehen werden.

Als relativ unempfindlich gegenüber zyklischer Beanspruchung können nach der Erfahrung mit dem Versuchskörper 7 Verbindungen eingestuft werden, deren Nachgiebigkeit überwiegend aus dem Stützenstegblech resultiert.

Vor dem Hintergrund der am Lehrstuhl für Stahlbau der BTU Cottbus durchgeführten Versuche wird empfohlen, bei erwarteter niedrig-zyklischer Beanspruchung die statische Beanspruchbarkeit nach EC3, Annex J, auf 80% zu vermindern. Des Weiteren sollte die Lastspielzahl 2000 Zyklen nicht überschreiten. Dies sollte vor allem bei bündig abschließenden Kopfplattenverbindungen mit maximal zwei Schraubenreihen im Zugbereich bzw. Verhältnissen von Schraubendurchmesser/Kopfplattendicke < 1,5 beachtet werden.

Die Frage nach einer Schädigungshypothese für schwellend beanspruchte nachgiebige Kopfplattenverbindungen wird Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein.

Literatur

- [1] Scheer, j., Scheibe, H.-J., Kuck, D.: „Zum Verhalten ausgeklinkter Träger unter zyklischer Beanspruchung, Bauingenieur 65 (1990), S. 463-468
- [2] Pasternak, H., Kocker, R.: Steel & Composite Frames, Deutsch-griechisches Programm, Projekt-Nr. 5 BOA.6., Jülich 1995
- [3] Pasternak, H., Kocker, R., Katula, L.: AIF-Abschlußbericht, Projekt-Nr. 10088B
- [4] Eurocode 3, ENV – 1993-1-1, Revised Annex J, Design of Steel Structures, CEN, European Committee for Standardisation, Brussels, June 1994



Prof. Dr.-Ing. habil. H. Pasternak

Dipl.-Ing. R. Kocker



überarbeitet von Dipl.-Ing. A. Schwarzlos

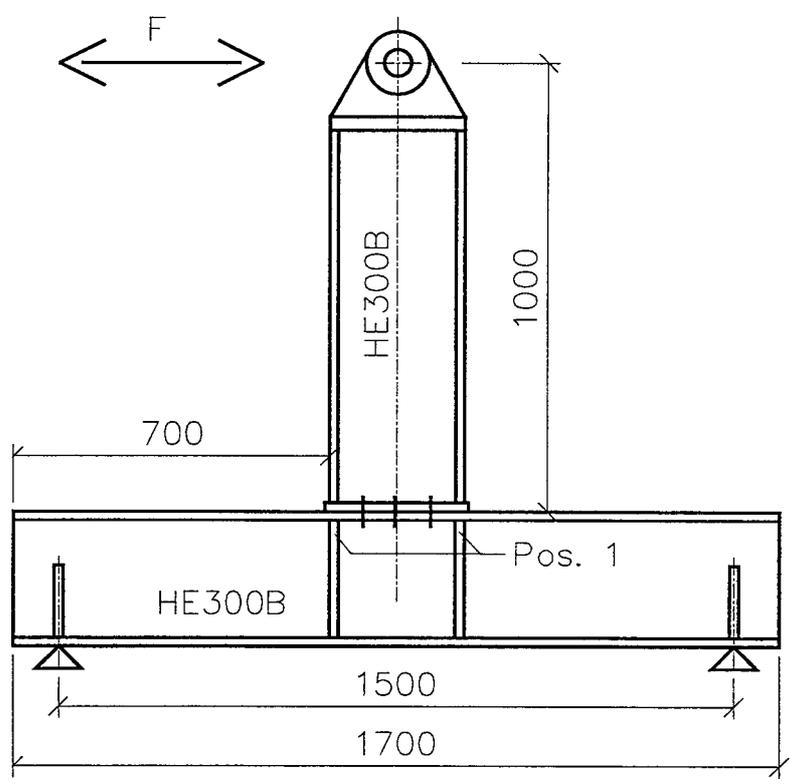
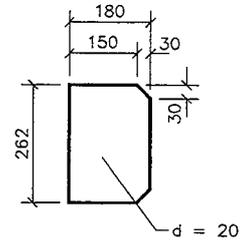
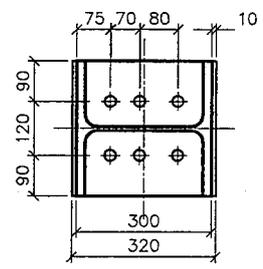
Cottbus, Juni 2002

Verteiler:

- Dr.-Ing. Eggert
- Prof. Dr.-Ing. Scheer

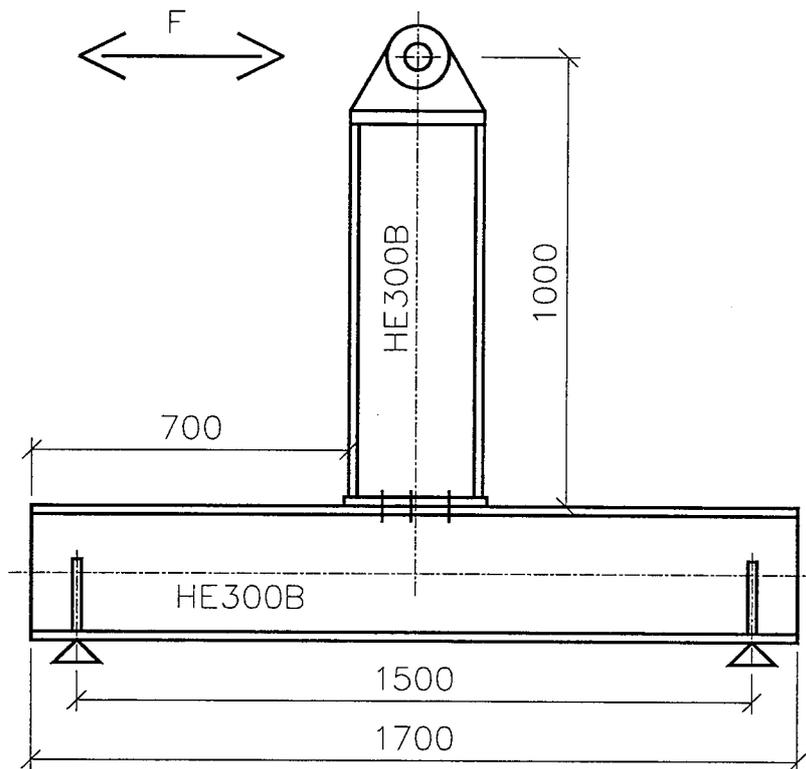
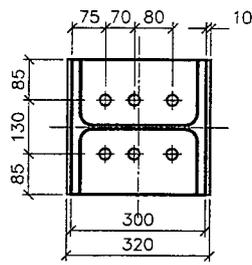
St 52-3
M30 10.9

Pos. 1



Versuchskörper 1

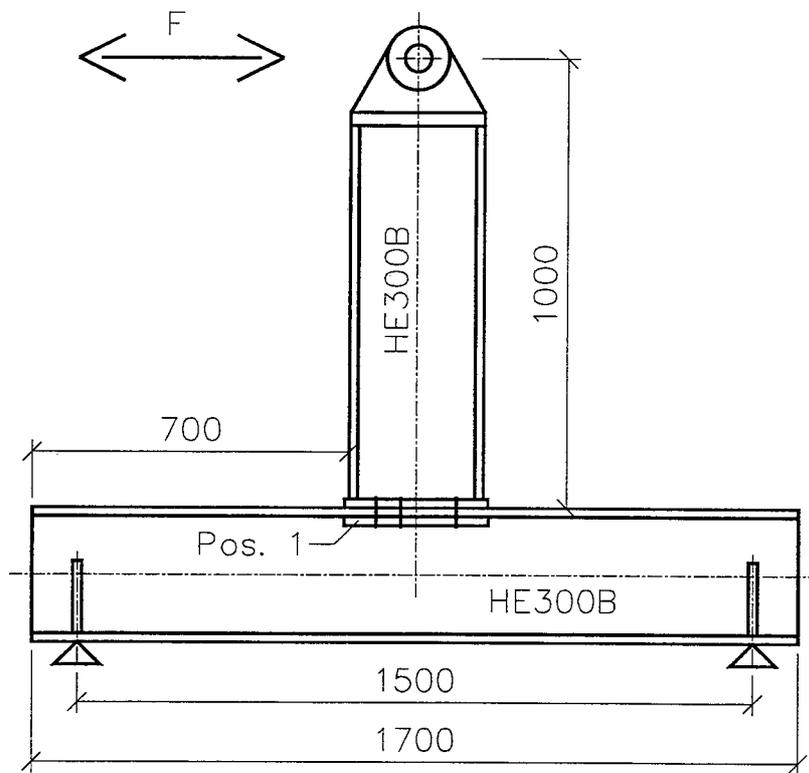
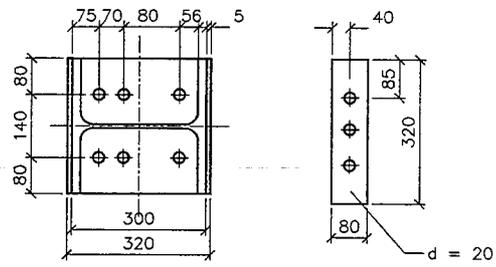
St 52-3
M30 10.9



Versuchskörper 2

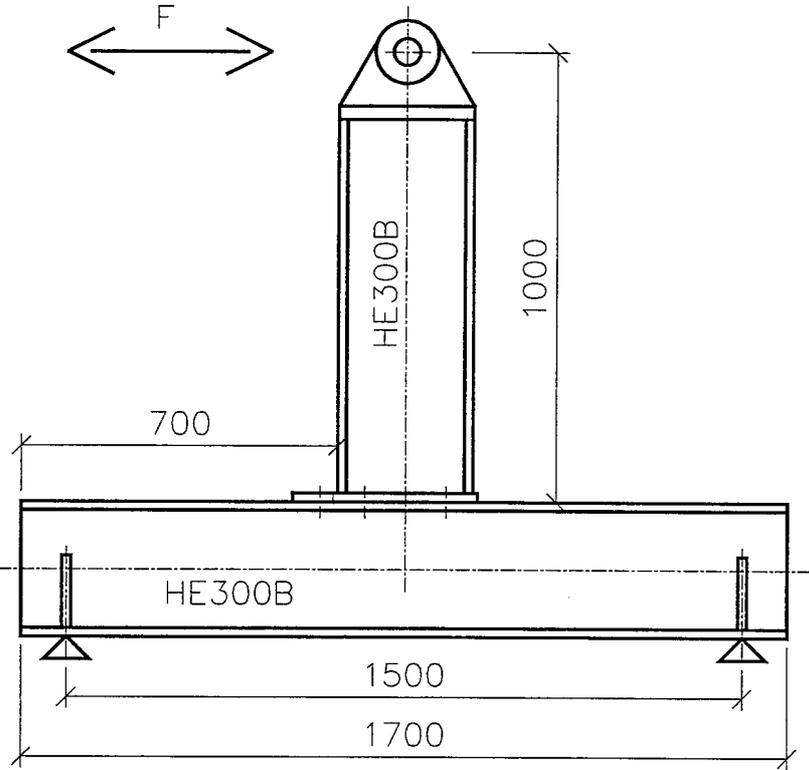
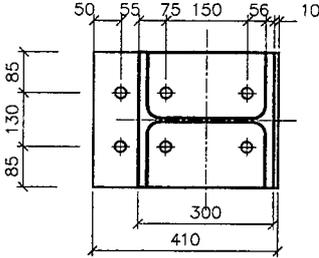
St 52-3
M30 10.9

Pos. 1



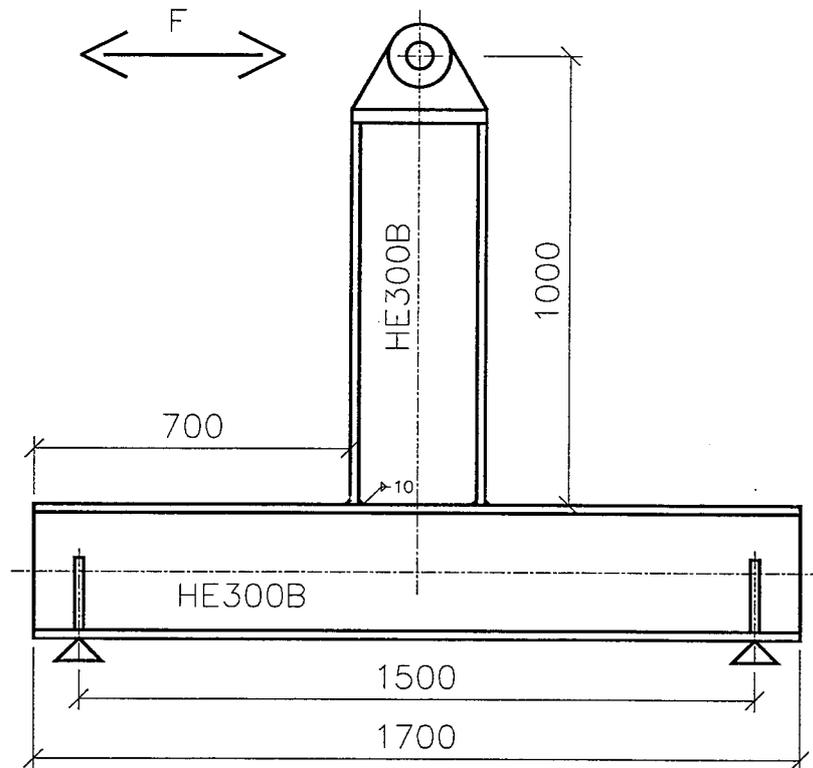
Versuchskörper 3

St 52-3
M30 10.9

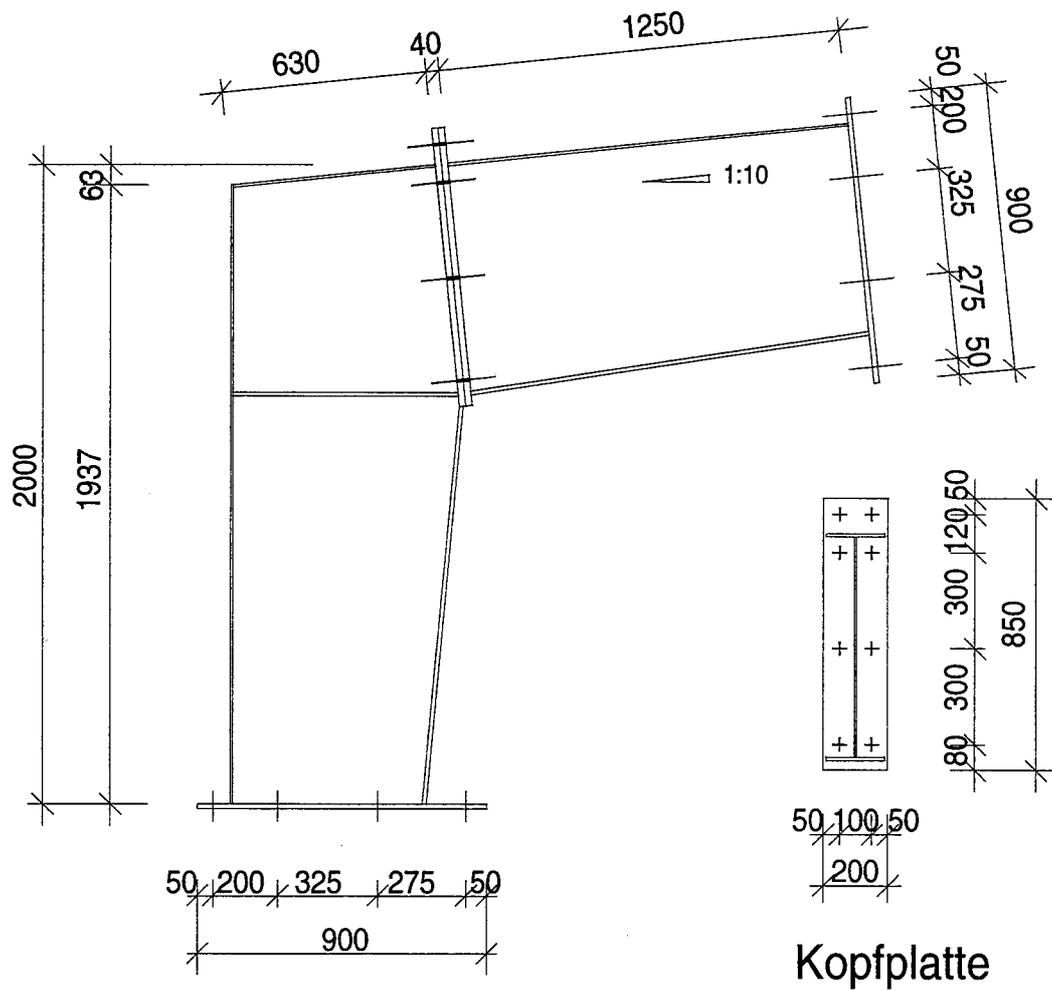


Versuchskörper 4

St 52-3



Versuchskörper 5



Versuchskörper 7