

Ringversteifte kreiszylindrische
Tankbehälter im leeren Zustand
unter Windbelastung. Versuche
zur Bestätigung der neuen
Bemessungsrichtlinien im Entwurf
DAST-Richtlinie 017

T 2664

T 2664

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

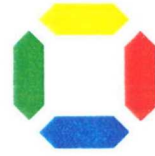
Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

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

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de



Universität
Gesamthochschule
Essen

Fachbereich 10
Bauwesen

Stahlbau
Prof. Dr.-Ing. Herbert Schmidt

Bericht 100230 - 24

**RINGVERSTEIFTE KREISZYLINDRISCHE
TANKBEHÄLTER IM LEEREN ZUSTAND
UNTER WINDBELASTUNG
- VERSUCHE ZUR BESTÄTIGUNG DER NEUEN
BEMESSUNGSREGELN IM ENTWURF
DASt-RICHTLINIE 017**

Schlußbericht
zum DIBt-Forschungsvorhaben
IV 1-5-719/93

Essen, den 23.02.1995

Dieser Bericht hat 24 Seiten Text und 29 Blatt Anlagen

INHALT

1 Einleitung

2 Versuchsprogramm

3 Versuchskörper

- 3.1 Herstellung
- 3.2 Abmessungen
- 3.3 Werkstoff
- 3.4 Geometrische Imperfektionen

4 Versuchsaufbau

5 Versuchsdurchführung

6 Versuchsergebnisse

- 6.1 Beul und Tragverhalten
 - 6.1.1 Versuch RVK 8
 - 6.1.2 Versuche RVK 9 und 10
- 6.2 Beuldrücke, Beulwellenzahlen

7 Vergleich der Versuchsergebnisse mit dem Nachweiskonzept nach DAST-Ri 017 (Entwurf 1992)

- 7.1 Nachweis gegen Zwischenringbeulen
- 7.2 Nachweis der Ringsteifen

8 Schlußbemerkung

Anlagen

- 1 - 2 Versuchskörper vor dem Versuch
- 3 - 5 Typische Zugversuch-Diagramme
- 6 Werkstoffkennwerte der Zugproben
- 7 - 9 Typische Druckversuch-Diagramme
- 10 Werkstoffkennwerte der Druckproben
- 11 Werkstoffkennwerte der Versuchskörper
- 12 Geometrische Imperfektionen RVK 8
- 13 Geometrische Imperfektionen RVK 9
- 14 Geometrische Imperfektionen RVK 10
- 15 Versuchsaufbau
- 16 Druck-Volumen-Kurve RVK 8
- 17 Druck-Volumen-Kurve RVK 9
- 18 Druck-Volumen-Kurve RVK 10
- 19 - 27 Entwicklung der radialen Beulverformungen
- 28 - 29 Versuchskörper nach dem Versuch

1 Einleitung

Der Beulfall eines leeren Tankbehälters unter Windbelastung wird üblicherweise mit einem auf der sicheren Seite angesetzten konstanten Außendruck geführt. Ist der Behälter ringversteift - wie heute aus Wirtschaftlichkeitsgründen häufig der Fall - , so fehlt für den Nachweis gegen globales Beulen bisher ein einfaches Konzept. Deshalb wurden die Regeln für ringversteifte Kreiszyinderschalen unter Außendruck in der britischen Norm BS 5500 [1] und in den ECCS-Recommendations "Buckling of Steel Shells" [2] von der Arbeitsgruppe Schalenbeulen im Deutschen Ausschuß für Stahlbau (DAST) für die geplante DAST-Richtlinie 017 [3] so modifiziert, daß sie - im Gegensatz zu den beiden genannten Quellen-Regelwerken - auch für globale Umfangsbeulwellenzahlen $m > 6$ (wie bei Tankbehältern relevant) verwendet werden können. Die Erweiterung beruhte zunächst auf Plausibilitätsüberlegungen [4]. Es war jedoch wünschenswert, diese Überlegungen wenigstens stichprobenhaft gezielt zu überprüfen und damit die vorgenannten Regeln als sicher zu bestätigen. Diesem Ziel dienten die im vorliegenden Bericht beschriebenen drei Beultraglastversuche.

Die Versuche lehnten sich versuchstechnisch an eine vorher im Stahlbaulabor der Universität Essen mit DFG-Förderung durchgeführte Beulversuchsreihe an, die die grundsätzlichen Kenntnisse über das Beultragverhalten ringversteifter stählerner Kreiszyinderschalen unter Außendruck im Übergangsbereich zwischen lokalem und globalem Beulen vertiefen sollte. Die Abmessungen jener Modellschalen hatten aber die für den Tankbau typischen globalen Beulmuster mit $m > 6$ abgedeckt. Die Ergebnisse jener experimentellen Untersuchungen werden in Kürze in einem Forschungsbericht veröffentlicht [5]. Versuchstechnische Einzelheiten zum vorliegendem Vorhaben werden deshalb nur soweit dargestellt, wie es zum unmittelbaren Verständnis erforderlich ist; darüber hinaus wird auf [5] verwiesen.

2 Versuchsprogramm

Das Tragverhalten ringverstärkter Kreiszylinderschalen hängt von zahlreichen Einflußfaktoren ab, von denen bei drei Versuchen nur wenige gezielt erfaßt werden können. Entsprechend dem in der Einleitung genannten Ziel dieser Untersuchung, das globale Beulverhalten von Kreiszylinderschalen mit Umfangsvollwellenzahlen m deutlich größer als 6 zu überprüfen, wurde die Variation der Parameter auf zwei Querschnittsschlankheiten (Radius/Dicken-Verhältnisse) r/t in Verbindung mit zwei Steifenquerschnitten beschränkt. Bild 1 zeigt die Form der verwendeten Modellschalen.

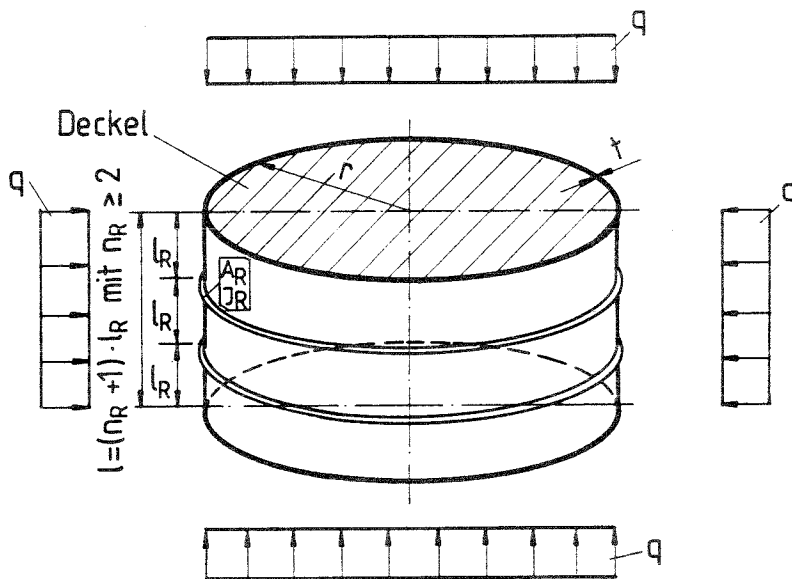


Bild 1. Ringverstärkte Modellschale für Beulversuche unter allseitigem Außendruck - Bezeichnungen

Aus versuchstechnischen Gründen wurde der Zylinderradius r mit 250 mm konstant gehalten, während die Dicke t der Schalenhaut bei einer Modellschale zu 1 mm und bei den beiden übrigen zu 0,5 mm gewählt wurde. Das aus der kleineren Wanddicke resultierende Radius/Wanddicken-Verhältnis $r/t = 500$ ist zwar im Vergleich zu baupraktischen Tankbehältern noch relativ klein; dünnwandigere Modelle mit angeschweißten Ringsteifen lassen sich jedoch kaum realisieren. Für die Zielsetzung des Vorhabens ist das keine gravierende Einschränkung, da es nur darauf ankam, durch geeignete Dimensionierung globale Beulmuster mit $m > 6$ zu erreichen. Zu diesem Zweck erhielt die dickwandigere Modellschale zwei Ringsteifen mit "stehendem" Rechteckquerschnitt 6 x 2 mm,

die beiden dünnwandigen zwei Ringsteifen mit "liegendem" Rechteckquerschnitt 2 x 6 mm (Bild 2).

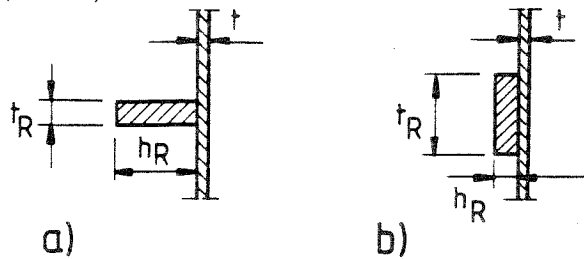


Bild 2.

(a) Stehende und

(b) liegende Rechtecksteifen

Tabelle 1 zeigt das aufgrund der vorgenannten Überlegungen aufgestellte Versuchsprogramm mit den Nennabmessungen der Modellschalen. Zur letzten Spalte in der Tabelle ist folgendes zu sagen: Ursprünglich war geplant, alle drei Versuchskörper wegen der großen Wärmeeinbringung spannungsarm zu glühen. Um aber die unmittelbar anwendungsorientierte Aussagekraft der Versuche nicht zu beeinträchtigen, wurde bei den beiden 0,5 mm-Modellschalen RVK 9 und RVK 10 auf das Spannungsarmglühen verzichtet. Da diese beiden, sonst nominell identischen Versuchskörper, schweißtechnisch sehr unterschiedlich gefertigt wurden (siehe Abschn. 3.1), haben also alle drei Versuchskörper unterschiedliche Niveaus struktureller Imperfektionen. Das ist bei der Wertung der Ergebnisse gegebenenfalls zu berücksichtigen.

Tabelle 1: Versuchsprogramm - Nennabmessungen

Vers.- Nr.	r [mm]	t [mm]	l [mm]	n _R	l _R [mm]	h _R /t _R [mm]		spannungs- armgeglüht
						6/2	2/6	
RVK 8	250	1,0	168,75	2	56,25	X		ja
RVK 9	250	0,5	168,75	2	56,25		X	nein
RVK 10	250	0,5	168,75	2	56,25		X	nein

Die konstruktiv ausgebildete Lagerung der Schalenränder entsprach einer radial unverschieblichen Lagerung ($w = 0$) und einer Biegeeinspannung ($w' = \delta_w / \delta_x = 0$) in Verbindung mit einer Wölbbehinderung ($u = 0$). Das entspricht der in DIN 18800 Teil 4 mit RB1 und im internationalen wissenschaftlichen Schrifttum üblicherweise mit CC4 bezeichneten Randbedingung. Die konstruktive Realisierung wird in [5, 6] beschrieben. In [7] wurde - durch Vergleich mit planmäßig gelenkig und wölbfrei gelagerten Versuchskörpern entsprechend RB2 nach DIN 18800 Teil 4 bzw. SS3 nach internationalem Schrifttum - nachgewiesen, daß die angestrebte Randbedingung hinreichend genau erreicht wird.

3 Versuchskörper

3.1 Herstellung

Die Modellschalen wurden in den Zentralwerkstätten der Universität GH Essen aus Feiblechen (St 1203 nach DIN 1023) hergestellt, für die Mantelbleche mit Nenndicken von $t=0,5\text{mm}$ und $t=1\text{mm}$, für die Ringsteifen mit einer Nenndicke von $t=2\text{mm}$. Die Anlagen 1 und 2 zeigen Fotos der fertigen Versuchskörper.

Aus den dünnen Blechtafeln wurden zunächst rechteckige Streifen ausgeschnitten, die anschließend kreiszylindrisch gewalzt und durch eine Längsschweißnaht mit Hilfe des WIG-Verfahrens ohne Verwendung von Zusatzwerkstoff zusammengeschweißt wurden.

Die "stehenden" Flachstahl-Ringsteifen des Versuchskörpers RVK 8 wurden als Ganzes kreisringförmig aus der 2mm-Blechtafel herausgeschnitten, über den kreiszylindrischen Mantel geschoben und einseitig mit einer WIG-Kehlnaht angeschweißt. Da der so gefertigte Versuchskörper aufgrund des geringen Steifenabstandes ausgeprägte Wärmeeinbringungszonen aufwies, wurde er anschließend spannungsarmgeglüht.

Die "liegenden" Flachstahl-Ringsteifen der Modellschalen RVK 9 und RVK 10 wurden zunächst als Streifen aus der 2mm-Blechtafel ausgeschnitten, dann kreiszylindrisch gewalzt, um den kreiszylindrischen Mantel gelegt und anschließend mit diesem verschweißt. Die Schweißverbindung erfolgte bei RVK 9 mit beidseitig angeordneten WIG-Flankenkehlnähten, allerdings unter Verwendung von entsprechendem Zusatzwerkstoff, da es sich als nicht machbar herausgestellt hatte, 2mm-Material mit 0,5mm-Material ohne Schweißzusatz zu verbinden. Dieses Verfahren führte aber trotz größter Sorgfalt zu einem wenig befriedigenden Aussehen entlang der Ringsteifen (siehe Foto auf Anlage 1), das große strukturelle Imperfektionen vermuten ließ.

Deshalb wurde der zweite 0,5 mm-Versuchskörper RVK 10 unter Verwendung einer anderen Verbindungstechnik hergestellt, die nach Augenschein deutlich geringere Imperfektionen bewirkte (siehe Foto auf Anlage 2). Hierbei wurden die Ringsteifen mit einem Punktschweißverfahren in Steifenmitte mit dem Schalenmantel verbunden. Durch die

Wahl sehr kurzer Schweißpunktabstände konnte eine ausreichend kontinuierliche Befestigung der Steifen erreicht werden, wie das Beulverhalten im Versuch später zeigte.

3.2 Abmessungen

Die Istblechdicken der kreiszylindrischen Mäntel und der Versteifungsringe wurden mit einem Ultraschalldickenmeßgerät in gleichmäßigen Abständen auf horizontalen Meßebenen gemessen. Außerdem wurden die Außendurchmesser aufgenommen. Die Mittelwerte \bar{t} und \bar{t}_R der gemessenen Blechdicken, deren Standardabweichungen s_t und s_{tR} sowie die Mittelwerte \bar{D}_a der Außendurchmesser sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Darüberhinaus wurden die Istzylinderlängen überprüft. Sie stimmen mit den Nennabmessungen sehr gut überein. (Beim Betrachten der Versuchskörper-Fotos auf den Anlagen 1 und 2 ist zu beachten, daß an beiden Schalenrändern die später zwecks Realisierung der Randbedingung zu vergießenden Randstreifen hier noch zu sehen sind; die Zahlenwerte l in Tabelle 1 sind **lichte Längen** zwischen den Deckelplatten.)

Tabelle 2: Istabmessungen

Ver- suchs- körper	Blechdicken				Außen- durch- messer
	Mantelblech		Ringsteifen		
	\bar{t} [mm]	s_t [mm]	t_R [mm]	S_{tR} [mm]	\bar{D}_a [mm]
RVK 8	1,025	0,0310	2,128	0,0129	500,9
RVK 9	0,501	0,0106	2,058	0,0414	501,1
RVK 10	0,506	0,0078	1,969	0,0117	500,8

3.3 Werkstoff

Aus den Blechtafeln, aus denen die Modellschalen hergestellt wurden, wurde in Längs- und Querrichtung Material für Zug- und Druckproben entnommen. Die daraus hergestellten Zugproben entsprechen DIN EN 10002, die Druckproben einer institutsspezifischen Standardform.

Die Durchführung der Zugversuche erfolgte mit Hilfe einer programmgesteuerten servohydraulisch geregelten 200kN-Materialprüfmaschine. Die Proportionalstäbe wurden einer über DIN EN 10002 hinausgehenden Prüfprozedur unterzogen, wobei die Probe zunächst feindehnungsgeregelt bis zu einer Dehnung von $\varepsilon = 4,5 \%$ gezogen und dort entlastet wird. Zur Bestimmung der Zugfestigkeit R_m wird bei erneuter Belastung die Probe kolbenwegeregelt bis zur Bruchlast gefahren.

Aus dem Spannung-Dehnung-Diagramm wurde die "statische" Zugstreckgrenze R_{ep}^Z , die obere Zugstreckgrenze R_{eh}^Z , der E-Modul sowie die Zugfestigkeit R_m bestimmt. Einige typische Zugversuch-Diagramme für die Blechtafeln der Mantelbleche und für die Blechtafeln der Versteifungsringe zeigen die Anlagen 3 - 5. Es läßt sich ablesen, daß alle Arbeitslinien ein sehr ausgeprägtes Fließplateau besitzen, also in sehr guter Näherung ein idealelastisch-idealplastisches Werkstoffverhalten aufweisen. Die obere Streckgrenze ist bei den 1mm- und 2mm-Blechen allerdings wesentlich deutlicher ausgeprägt als bei dem 0,5mm-Blech. In Anlage 6 sind die Werkstoffkennwerte der einzelnen Zugproben zusammengestellt.

Zur Bestimmung der Druckfließspannung (Druckstreckgrenze) wurden für die 2mm-Bleche ergänzende Versuche an Druckproben durchgeführt. Für die 1mm- und 0,5mm-Bleche wurde auf solche ergänzenden Druckversuche verzichtet, da sie schwierig durchzuführen sind und ihre Aussagekraft begrenzt ist. Die Durchführung der Druckversuche erfolgte mit Hilfe einer speziellen institutseigenen Versuchsvorrichtung. Es wurden Last-Verkürzung-Kurven aufgenommen, aus denen sich die Druckstreckgrenzenwerte R_{eh}^D und R_{ep}^D ablesen lassen (Anlagen 7 - 9). Die Tabelle in Anlage 10 enthält die Werkstoffkennwerte der Druckproben.

Die Tabelle der Anlage 11 gibt die gemittelten Werkstoffkennwerte der Versuchskörper wieder. Es ist festzustellen, daß die statische Druckstreckgrenze R_{eh}^D um durchschnittlich 8 % über der statischen Zugstreckgrenze R_{ep}^D liegt, eine Größenordnung, die bei solchen Feiblechen üblich ist [8].

3.4 Geometrische Imperfektionen

Zur Überprüfung der Kreisform wurden die abgewickelten Konturen von übereinanderliegenden Umfangslinien mit Hilfe einer speziellen Meßvorrichtung aufgenommen, in der die Versuchskörper um eine vertikale Meßachse gedreht wurden, so daß die Umfangslinien von außen abgefahren werden konnten. Die so aufgenommenen Abwicklungen wurden auf einem x-y-Schreiber aufgezeichnet und zur weiteren Datenaufbereitung anschließend digitalisiert. Die beiden systematischen Meßfehler, die in solchen aufgezeichneten Umfangslinien enthalten sind - zum einen die unvermeidbare Abweichung zwischen Versuchskörperachse und Meßachse und zum anderen die Abweichung zwischen Kreisradius und Meßbezugsradius - wurden mit Hilfe einer Fourier-Reihenentwicklung eliminiert. Die auf diese Weise bereinigten geometrischen Imperfektionen $w_0(\varphi)$ der Versuchskörper sind in den Anlagen 12 - 14 dargestellt. Sie repräsentieren die radialen Abweichungen der einzelnen Umfangslinien jeweils von ihrem "mittleren" Kreis, dessen exakter Radius bei der beschriebenen Vorgehensweise aber unbekannt bleibt. Für die hier vorliegende Zielsetzung ist das belanglos.

Die gemessenen geometrischen Imperfektionen sind wie folgt zu bewerten:

(a) Die Imperfektionsmuster waren im wesentlichen prismatisch, offenbar als Ergebnis des Walzens der Schalenhaut bei der Modellfertigung oder infolge nicht exakter Kreisform der Ringsteifen. Insbesondere hatte das mittlere Teilschalenfeld zwischen den beiden Ringsteifen etwa dieselbe Form in Umfangsrichtung wie die Ringsteifen selbst. Es sind also beim Anschweißen der Ringsteifen infolge der dabei verursachten Umfangschrumpfkraft keine kurzwelligen lokalen Vorbeulmuster hinzugekommen (diese hätten Umfangswellenzahlen in der Größenordnung von 25). Die Druckeigenstressungen in Umfangsrichtung in den beiden nicht spannungsarmgeglühten Versuchskörpern müssen also - selbst bei RVK 9 (!) - deutlich kleiner als die reale lokale Umfangsbeulspannung gewesen sein (ca. 65 N/mm^2).

(b) Aus dem prismatischen Imperfektionsmuster folgt, daß in Meridianrichtung keine signifikanten oszillierenden Vorverformungen vorhanden waren. Das bedeutet, daß für den Einfluß des Deckeldruckes, der bei den vorliegenden niedrigen Modellschalen relativ

groß ist (siehe Kap. 7), von höchstens "normalen" Meridianimperfektionen ausgegangen werden kann.

(c) In Umfangsrichtung waren die Imperfektionsverläufe bei RVK 8 und RVK 10 etwa periodisch mit $m = 3$, wobei jeweils an der Längsschweißnaht ein geringfügiger Knick vorhanden war (bei RVK 8 nach außen, bei RVK 10 nach innen). Bei RVK 9 war der Imperfektionsverlauf in Umfangsrichtung unregelmäßiger und kurzweiliger: Einer "globalen" Vorverformung mit $m \approx 4$ überlagerten sich an und neben den Ringsteifen kurzweilige "lokale" Schweißverwerfungen, die auch auf dem Foto (Anlage 1) deutlich zu erkennen sind.

(d) Die Toleranzwerte zur t_V für die Herstellungsungenauigkeit der Schalenwand nach DIN 18800 Teil 4, Element 302, mit $l_{m\phi}$ nach Gl. (19a) werden in den Teilschalenfeldern im großen und ganzen eingehalten, an einigen Stellen (besonders an der Längsschweißnaht) jedoch bis zum 1,8-fachen überschritten (siehe Eintragungen in den Anlagen 12 - 14).

(e) Die Toleranzwerte zur a für die Herstellungsungenauigkeit der Ringsteifen nach E-DAST-Ri 017, Element 311, werden nur bei RVK 9 und RVK 10 überschritten, und zwar maximal bis zum 1,9-fachen (siehe Eintragungen in den Anlagen 12 - 14).

(f) Zusammenfassend ist festzuhalten, daß alle drei Versuchskörper formal nicht ausreichend herstellgenau im Sinne von E-DAST-Ri 017 waren. Als Grundlage für die Überprüfung des E-DAST-Ri 017-Konzeptes waren sie aber durchaus geeignet, da auf der sicheren Seite liegende Versuchsergebnisse zu erwarten waren.

4 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau, der in der Anlage 15 in Fotos zu sehen ist, besteht insgesamt aus vier Elementen:

- den beiden Deckelplatten zur randbedingungsgerechten Lagerung der Versuchskörper,
- dem Prüfbehälter, im dem ein hydrostatischer Außendruck erzeugt wird,
- dem servohydraulischen Belastungssystem zur Erzeugung des Außendruckes und
- den drei Meßsystemen.

Die Versuchskörper wurden, mit der oberen Deckelplatte versehen, auf der bereits fest im Prüfbehälter installierten unteren Deckelplatte montiert. Durch Verwendung von Gummimanschetten wurde die erforderliche Druckwasserdichtigkeit an den Rändern erreicht. Einzelheiten zur konstruktiven Ausbildung der Verbindung Schalenrand-Deckelplatte siehe [5, 6]. Wie bereits in Kap. 2 ausgeführt, handelte es sich aus beulmechanischer Sicht um RB1-Randbedingungen im Sinne von DIN 18800 Teil 4.

Die im Prüfbehälter eingebauten Versuchskörper wurden durch äußeren Wasserdruck belastet, der sowohl auf den Zylindermantel als auch auf die Deckelplatten wirkte und somit einen "hydrostatischen", d.h. allseitigen Außendruck darstellte. Der aufgebrachte Druck wurde elektrisch und mechanisch kontrolliert. Die Regelverformungsgröße für die servohydraulische Regelung war die Änderung der Druckwassermenge, die direkt in Beziehung mit dem vom Versuchskörper eingeschlossenen Volumen stand. Gemessen wurde die sich bei steigendem Außendruck ergebende Volumenminderung ΔV mit Hilfe eines drucklosen zweiten Wassersystems wie folgt: Das aus dem Versuchskörper herausgedrückte drucklose Wasser wurde über einen Schwimmer in einem Meßbehälter mittels induktivem Wegaufnehmer in ein elektrisches Meßsignal umgesetzt, das zusammen mit dem aufgebrachten Außendruck q als Druck-Volumen-Kurve $q = f(\Delta V)$ analog mitgeschrieben wurde.

Im Inneren des Versuchskörpers befand sich eine spezielle Meßvorrichtung mit mehreren rotierenden, wasserresistenten, induktiven Wegaufnehmern. Mit ihnen konnten während

des Versuchs mehrere ausgewählte Umfangslinien von innen laufend abgetastet werden. Dadurch war es möglich, die Entwicklung der radialen Beulverformungen der Teilschalenfelder und der Ringsteifen zu verfolgen. Weitere Einzelheiten zum Versuchsaufbau siehe [5, 6].

5 Versuchsdurchführung

Die Belastung wurde, wie bereits beschrieben, stufenweise druckwassermengengeregelt aufgebracht. Das entspricht einer "Quasi-Verformungsregelung". Auf den einzelnen Laststufen erfolgten die oben beschriebenen Messungen, wobei die Druckwassermenge konstant gehalten wurde. Im elastischen Vorbeulbereich war dabei auch der Druck konstant.

Der Druck konnte solange gesteigert werden, bis bei dem Beuldruck q_{u1} die erste Beule schlagartig einfiel und der Druck zurückging (siehe q - ΔV -Kurven auf den Anlagen 16 - 18). Nach Abklingen der Fließ-, Kriech- und Relaxationsumlagerungen wurde vollständig entlastet. Es verblieb eine bleibende Volumenminderung, da sich die Beule nicht vollständig zurückgebildet hatte. Der Versuchskörper wurde nun in analoger Weise wiederbelastet, wobei die Druck-Volumen-Kurve nach leichter Hysterese wieder den nach dem Einfallen der ersten Beule erreichten Gleichgewichtszustand durchlief.

Bei weiterer Drucksteigerung über diesen ersten Nachbeul-Gleichgewichtszustand hinaus wurde der Verlauf der Druck-Volumen-Kurve mehr oder weniger nichtlinear. Anschließend fiel bei dem Beuldruck q_{u2} die 2. Beule ein, wobei beim Versuchskörper RVK 8 der Beuldruck q_{u2} geringfügig unter dem Erstbeuldruck lag (Anlage 16), während bei den Versuchskörpern RVK 9 und RVK 10 die Beuldrücke q_{u1} und q_{u2} von praktisch gleicher Größe waren (Anlagen 17, 18). Im weiteren Versuchsverlauf, der in der beschriebenen Art und Weise weitergeführt wurde, waren die Drücke q_{ui} beim Einfallen der i -ten Beule stetig abfallend.

In den Anlagen 16 -18 sind zusätzlich zu den aufbereiteten Druck-Volumen-Kurven im Vorbeulzustand rechnerisch ermittelte elastische Nennkurven eingetragen. Es ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Versuch zu erkennen, die die Versuche als meßtechnisch einwandfrei bestätigt.

Wie bereits erwähnt, wurde während des gesamten Versuches die Entwicklung der radialen Beulverformungen aufgenommen. Die Aufnahme der Beulverformungen erfolgte jeweils in der Mitte der Teilschalenelemente sowie an den Ringsteifen. Die Anlagen 19 - 27 zeigen die bereinigten Umfangsabwicklungen der je Versuch insgesamt fünf aufgenom-

men Umfangslinien für ausgewählte Laststufen, deren Zuordnung zum Versuchsablauf mit Hilfe der Laststufennummern, die in der entsprechenden Druck-Volumen-Kurve eingetragen sind, möglich ist.

Fotos der Versuchskörper nach den Versuchen sind auf den Anlagen 28 - 29 zu sehen.

6 Versuchsergebnisse

6.1 Beul- und Tragverhalten

Die Druck-Volumen-Kurven der drei Versuche zeigen zwei unterschiedliche Charakteristiken.

6.1.1 Versuch RVK 8

Die Druck-Volumen-Kurve RVK 8 (Anlage 16) fällt nach Erreichen des Erstbeuldrucks q_{u1} , der gleichzeitig der maximale Beuldruck $q_{u \max}$ ist, zunächst ab (die mit q_{u1} , q_{u2} und q_{u3} markierten Beulvorgänge sind zusammen zu sehen, siehe weiter unten), steigt dann aber nach einem Minimum auf der Laststufe 23 wieder an, um erst nach großen Verformungen und weiteren Beulvorgängen (q_{u5}) wieder abzufallen. Der Druckabfall im Nachbeulbereich ist insgesamt wesentlich geringer als bei den Versuchskörpern RVK 9 und RVK 10 (Anlagen 17, 18).

Beides steht im Zusammenhang mit dem Beulverhalten. Der erste Druckabfall geht einher mit dem Einfallen einer globalen Beule im Längsschweißnahtbereich, die sich nach dem dritten Teilbeulvorgang auf Laststufe 23 eindeutig über die ganze Höhe ausgebildet hat (Anlagen 19 - 21). Der anschließende Anstieg der Druck-Volumen-Kurve ist auf eine sekundäre Umlagerung der Beanspruchung in der Schalenhaut zurückzuführen, die allerdings mit größeren plastischen Verformungen verbunden war. Der sich diesem Anstieg anschließende erneute Abfall der Druck-Volumen-Kurve (Beulvorgänge 4, 5, 6) ist verbunden mit dem Auftreten lokaler Beulen im unteren Teilschalenfeld, die sich, ausgehend von der globalen Beule, immer mehr ausbreiteten (Anlage 19, oben).

Der drastische Druckabfall auf der Laststufe 59 ist dadurch zu erklären, daß ein tertiärer Versagensmechanismus eintrat, der aus dem Einknicken der scharfkantigen Grate zwischen den lokalen Beulen besteht. Das ist auf dem Foto (Anlage 28, oben) deutlich zu erkennen.

6.1.2 Versuche RVK 9 und RVK 10

Die Druck-Volumen-Kurven RVK 9 und RVK 10 (Anlagen 17, 18) zeigen untereinander ein ähnliches Aussehen. Bei beiden Versuchskörpern war der Erstbeuldruck ebenfalls

gleich dem maximalen Beuldruck. Die Darstellungen der Beulentwicklung (Anlagen 22 - 27) zeigen, daß beide Versuchskörper nahezu gleichzeitig lokal und global ausgebeult sind. Dieser Hauptbeulvorgang umfaßte mehrere Einzelvorgänge und war bei Laststufe 28 (RVK 9) bzw. 32 (RVK 10) abgeschlossen. Es hatten sich zwei bzw. "anderthalb" globale Beulen im Längsschweißnahtbereich und eine Reihe von lokalen Beulen in den beiden Rand-Teilfeldern (RVK 9) bzw. im unteren und mittleren Teilfeld (RVK 10) ausgebildet.

Im Nachbeulbereich fallen die Druck-Volumen-Kurven beider Versuchskörper stetig ab, wobei sich auf den einzelnen Laststufen weitere lokale und globale Beulen ausbildeten. Auch diese Versuche wurden soweit in den Nachbeulbereich gefahren, daß das Einknicken der Grate zwischen den lokalen Beulen als tertiärer Versagensmechanismus auftrat (Fotos auf den Anlagen 28 und 29).

6.2 Beuldrücke, Beulwellenanzahlen

Da bei den vorliegenden Versuchen mit dem Auftreten der ersten Beule jeweils bereits der Tragbeuldruck q_u erreicht war, erübrigt sich das bei Außendruckbeulversuchen sonst erforderliche Unterscheiden in Erstbeuldruck und Tragbeuldruck [5, 6]. Die aus den Druck-Volumen-Kurven ablesbaren Tragbeuldrücke q_u sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Bei allen drei Versuchen war mit dem Tragbeuldruck **globales Beulen** verbunden; der Tragbeuldruck ist also identisch mit dem "globalen Beuldruck". Die zugehörigen Beulwellenzahlen m_{global} lassen sich aus den aufgenommenen Beulentwicklungen der Ringsteifen (Anlagen 19 - 27, Umfangslinien 2 und 4) näherungsweise ermitteln, indem man sich die vorhandenen Beulen zu einem den ganzen Umfang erfassenden vollständigen Beulmuster ergänzt denkt. Man erhält so $m_{\text{global}} \approx 8$ für RVK 8 und $m_{\text{global}} \approx 10$ bzw. 11 für RVK 9 und RVK 10.

Bei Versuch RVK 8 trat **lokales Beulen** erst sekundär auf. Der zugehörige Beuldruck q_{u4} (Anlage 16) darf also nicht als "lokaler Beuldruck" interpretiert werden, da er ja beim Druckanstieg vor dem globalen Beulen zunächst ohne lokales Beulen ertragen worden

war. Man kann aber aus dem lokalen Beulmuster im unteren Teilfeld (Anlage 19, oben) eine "vollständige" Beulwellenzahl $m_{\text{lokal}} \approx 18$ herauslesen.

Bei den Versuchen RVK 9 und 10 trat das **lokale Beulen** simultan mit dem globalen Beulen auf, so daß hier "lokale" und "globale" Beuldrücke identisch sind. Die zugehörigen Beulwellenzahlen m_{lokal} betragen etwa 25 (RVK 9, Anlage 24) bzw. 22 (RVK 10, Anlage 25 oben).

Tabelle 3: Versuchsergebnisse

Versuch	globales Beulen		lokales Beulen	
	$q_{u,\text{global}}$ [N/mm ²]	m_{global}	$q_{u,\text{lokal}}$ [N/mm ²]	m_{lokal}
RVK 8	0,695	8	> 0,695	18
RVK 9	0,188	10	0,188	25
RVK 10	0,171	11	0,171	22

7 Vergleich der Versuchsergebnisse mit dem Nachweis-konzept nach DAST-Richtlinie 017 (Entwurf 1992)

Im Sinne der Zielsetzung des vorliegenden Forschungsvorhabens (vgl. Einleitung) werden nachfolgend die Versuchsergebnisse mit den rechnerischen Vorhersagen nach E-DAST-Ri 017 verglichen. Zum besseren Verständnis der angestellten Vergleiche werden die Grundzüge des Nachweiskonzeptes jeweils kurz erläutert (siehe auch [4, 10]). In E-DAST-Ri 017 wird zwischen dem "Nachweis gegen Zwischenringbeulen" (gemeint ist das lokale Beulen der Schalenhaut zwischen den Ringsteifen) und dem "Nachweis der Ringsteifen" unterschieden.

7.1 Nachweis gegen Zwischenringbeulen

Gemäß E-DAST-Ri 017, Element 313, ist der Nachweis gegen lokales Zwischenringbeulen nach DIN 18800 Teil 4 zu führen, wobei bei allseitigem Außendruck die Interaktion zwischen Axialdruck- und Umfangsdruckbeanspruchung zu berücksichtigen ist. An den Ringsteifen sind dabei die Randbedingungen RB2 (gelenkige und wölbefreie Lagerung) zugrundezulegen. Tabelle 4 enthält in den Spalten 4, 6, 8, 9 die rechnerisch ermittelten idealen und realen Beulspannungen in Axial- und Umfangsrichtung. Dazu ist erläuternd folgendes zu sagen:

- Es wurde für das End-Teilschalenfeld und für das Mittel-Teilschalenfeld mit unterschiedlichen Randbedingungen gerechnet: Für ersteres mit RB1-RB2 (wegen des in der Deckelplatte biege- und wölbbehindert eingegossenen Randes, vgl. Kap. 2), für letzteres mit RB2-RB2 (wie in E-DAST-Ri 017 vorgeschrieben).
- Es wurden die Istwerte für Abmessungen und Werkstoffkenngrößen verwendet. Als Streckgrenzenwerte $f_{y,k}$ wurden alternativ die "statische" Streckgrenze R_{ep} und die obere Streckgrenze R_{eh} eingesetzt (Anlage 11). Da bei den dünnen Blechen keine Druckversuche gefahren worden waren (vgl. 3.3), handelt es sich um die Werte aus dem Zugversuch, wobei aber gemäß [8] näherungsweise $R_{ep}^D = 1,05 \cdot R_{ep}^Z$ gesetzt wurde.

- Bei RVK 9 wurde in Anlehnung an DIN 18800 Teil 4, Tabelle 3, die Teilschalenfeldlänge nur bis zum angeschweißten Rand der "liegenden" Rechtecksteifen gerechnet.

Die theoretischen Beulwellenzahlen m_φ und m_x in Umfangsrichtung (Spalten 5 und 7 in Tabelle 4) wurden mit den bekannten Formeln aus der linearen Beultheorie berechnet (siehe z.B. [10]). Der rechnerische reale Beuldruck $q_{Rk,lok}$ (Spalte 10) ergibt sich aus $\sigma_{\varphi SRk}$ und $\sigma_{x SRk}$ durch Anwenden der Interaktionsgleichung (50) in DIN 18800 Teil 4.

Tabelle 4: Vergleich Regelwerk/Versuch - Zwischenringbeulen

Vers. Nr.	Teilschale	Streckgrenze	Rechnung DIN 18800 Teil 4							Versuch		
			$\sigma_{\varphi Si}$ [N/mm ²]	m_φ	$\sigma_{x Si}$ [N/mm ²]	m_x	$\sigma_{\varphi SRk}$ [N/mm ²]	$\sigma_{x SRk}$ [N/mm ²]	$q_{Rk,lok}$ [N/mm ²]	m_{lok}	$q_{u,lok}$ [N/mm ²]	$\frac{q_{u,glob}}{q_{Rk,glob}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
RVK 8	Mitte	R_{ep}	344	23	576	14	149,0	135,6	0,458	18	>0,695	(>1,52)
		R_{eh}	344	23	576	14	191,5	162,9	0,568			(>1,22)
	Rand	R_{ep}	402	27	576	14	156,5	135,6	0,465			(>1,49)
		R_{eh}	402	27	576	14	196,2	162,9	0,575			(>1,21)
RVK 9	Mitte	R_{ep}	116	29	264	20	75,5	83,0	0,121	25	0,188	1,55
		R_{eh}	116	29	264	20	75,5	83,0	0,121			1,55
	Rand	R_{ep}	123	31	262	19	80,5	83,0	0,123			1,53
		R_{eh}	123	31	262	20	80,5	83,0	0,123			1,53
RVK 10	Mitte	R_{ep}	102,4	27	266	19	66,5	83,7	0,108	22	0,171	1,58
		R_{eh}	102,4	27	266	19	66,5	83,7	0,108			1,58
	Rand	R_{ep}	117,4	31	266	19	76,2	83,7	0,119			1,44
		R_{eh}	117,4	31	266	19	76,2	83,7	0,119			1,44

(...) wäre für die Bemessung rechnerisch nicht maßgebend

Aus dem Vergleich Rechnung/Versuch in Tabelle 4 ergeben sich folgende Erkenntnisse zum Nachweis gegen Zwischenringbeulen:

(a) Der Nachweis nach DIN 18800 Teil 4 ist bei den hier vorliegenden Parametern sehr sicher. Das ist besonders beachtenswert, weil

- die Versuchskörper geometrisch ziemlich imperfekt waren (vgl. 3.4) und
- bei den Modellschalen RVK 9 und RVK 10 das lokale Beulen ungünstig interaktiv mit dem globalen Beulen erfolgte (wie von der Zielsetzung her beabsichtigt, vgl. Einleitung).

(b) Die Schweiß-Eigenstressungen haben bei den hier vorliegenden Parametern keinen signifikanten Einfluß auf das lokale Beulen, denn die Versuche RVK 9 und RVK 10 mit sehr unterschiedlichem Eigenstressungsniveau (vgl. 3.1) unterscheiden sich praktisch nicht im Beultragverhalten.

(c) Die Umfangswellenzahlen der lokalen Beulmuster im Versuch stimmen mit den kritischen Beulwellenzahlen nach linearer Beultheorie recht gut überein, wenn man die Mitwirkung des Deckeldruckes beachtet.

7.2 Nachweis der Ringsteifen

Für die Ringsteifen sind nach E-DAST-Ri 017 insgesamt drei Nachweise zu führen:

- Ausreichende Steifigkeit in der Ringebene,
- ausreichende Tragsicherheit gegen Biegeknickversagen in der Ringebene und
- ausreichende Tragsicherheit gegen Biegedrillknicken aus der Ringebene und gegen Beulversagen der Einzelbleche.

Der letztgenannte Punkt war nicht Gegenstand dieses Vorhabens. Die Steifenquerschnitte waren deshalb so gedungen, daß kein örtliches Versagen möglich war. Bei keinem der drei Versuche wurden Anzeichen für lokale Steifeninstabilitäten festgestellt (vgl. Fotos auf den Anlagen 28, 29).

Der **Nachweis ausreichender Steifigkeit** wird mittels des vorhandenen Steifigkeitsbeiwertes γ_R und der Mindeststeifigkeit γ_R^* geführt, wobei die vorhandene Steifigkeit über der Mindeststeifigkeit liegen muß. Diese Bedingung soll im Fall unterschiedlicher Streckgrenzwerte in Zylinderwand und Ringsteife (z.B. höherfester Stahl für die Ringsteife oder unterschiedliche Berechnungstemperaturen) sicherstellen, daß trotzdem bei der diskret ringversteiften Kreiszylinderschale das Zwischenringbeulen die (zumindest stabilitätstheoretisch) kritische Beulform ist. Tabelle 5 enthält in den Spalten 3 und 4 die Werte γ_R und γ_R^* für die vorliegenden Versuchskörper.

Man sieht, daß die Bedingung selbst von den liegenden Ringsteifen der Versuchskörper RVK 9 und RVK 10 erfüllt wird, bei denen in der Tat die Streckgrenze der Ringsteifen 30 - 40 % höher lag als im Mantelblech. Beide beulten gleichzeitig lokal und global, obwohl rechnerisch eindeutig lokales Beulen maßgebend war. Man hätte bei Ausnutzung des Nachweises $\gamma_R = \gamma_R^*$ die Steifen sogar noch etwas schwächer machen können; dann wäre möglicherweise ~~kein~~ globales Beulen eingetreten. Der Sinn dieses Nachweises muß also in Frage gestellt werden. Vertiefte Überlegungen hierzu werden zur Zeit angestellt [11].

Der **Nachweis der Biegeknicksicherheit der Ringsteife** ist als Spannungsnachweis nach Elastizitätstheorie II. Ordnung (Verfahren Elast.-Elast. nach DIN 18800 Teil 2) zu führen. Der Nachweis soll in erster Linie eine ausreichende Tragsicherheit gegen **globales Beulen** der gesamten ringversteiften Kreiszyinderschale gewährleisten. Da in der Regel globales Beulen schwerwiegendere Folgen hat als lokales Zwischenringbeulen, hat man die angesetzte geometrischen Ersatzimperfektion (Amplitude a der periodischen Vorkrümmung der Ringsteifen) größer gewählt als die einschlägigen Vorkrümmungstiche für Stäbe und Steifen in DIN 18800 Teil 2 und 3. Damit soll erreicht werden, daß bei rechnerisch gleichem Ausnutzungsgrad der Nachweise gegen Zwischenringbeulen und gegen Biegeknicken der Ringsteifen lokales Beulversagen der Wand zwischen den Ringsteifen vor dem globalen Beulversagen der ringversteiften Kreiszyinderschale auftritt.

Tabelle 5 enthält in den Spalten 5 und 8 die rechnerisch ermittelten idealen und realen Beuldrücke. Dazu ist erläuternd folgendes zu sagen:

- Den in E-DAST-Ri 017 für den idealen Beuldruck q_i angegebenen Gleichungen (311) und (312) liegen RB2-Randbedingungen zugrunde. Die vorliegenden Versuchskörper hatten aber RB1-Randbedingungen, da die experimentelle Realisierung von RB2-Randbedingungen in Wasserdruck-Beulversuchen sehr schwierig und aufwendig ist (vgl. Kap. 2). Das ist beim Vergleich zu berücksichtigen.
- Es wurden die Istwerte für Abmessungen und Werkstoffkenngrößen verwendet. Wie beim lokalen Beulen wurden als Streckgrenzenwerte $f_{y,k}$ alternativ die "statische"

Streckgrenze R_{ep} und die obere Streckgrenze R_{eh} , beides für das 2 mm-Ringsteifenmaterial, eingesetzt. Als R_{ep} wurde, da bei Biegung sowohl Zug- als auch Druckbeanspruchungen beteiligt sind, der Mittelwert aus R_{ep}^D und R_{ep}^Z verwendet. Als R_{eh} diente der Wert aus dem Zugversuch, da dieser den technischen Lieferbedingungen für Feinbleche zugrundeliegt.

- Der rechnerische reale Beuldruck $q_{RK, glob}$ (Spalte 8) ist derjenige allseitige Außen- druck, der beim Spannungsnachweis nach Gl. (317 - 319) in E-DAST-Ri 017 als Randspannung $\sigma_{\varphi R}$ an Außenkante Ringsteife gerade die Streckgrenze liefert. Um diesen Nachweis besser einordnen zu können, sind die zugrundeliegende Vorkrüm- mungsamplitude a (Spalte 7) und die drei Spannungsanteile

$$\sigma_{\varphi R}^N = \text{Normalkraftanteil,}$$

$$\sigma_{\varphi R}^{M\varphi} = \text{Biegeanteil aus Manteldruck,}$$

$$\sigma_{\varphi R}^{Mx} = \text{Biegeanteil aus Abtriebskräften infolge Deckeldruck}$$

angegeben (Spalten 9 - 11).

Tabelle 5: Vergleich Regelwerk/Versuch - Ringsteifen

Vers.- Nr.	Streck- grenze	Rechnung E-DAST-Ri-017										Versuch		
		Steifig- keit	Biegeknicken							m_{glob}	$q_{u, glob}$	$\frac{q_{u, glob}}{q_{RK, glob}}$		
			γ_R	γ_R^*	q_i	crit m	a	$q_{RK, glob}$	$\sigma_{\varphi R}^N$				$\sigma_{\varphi R}^{M\varphi}$	$\sigma_{\varphi R}^{Mx}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RVK 8	R_{ep}	8,6	≈ 3	2,74	8	1,219	0,241	40,2	135,2	52,1	227,5	9	0,695	2,88
	R_{eh}						0,312	52,0	183,4	70,6	306			2,23
RVK 9	R_{ep}	6,4	2,3	0,40	10	0,975	0,104	25,3	179,9	46,3	241,5	10	0,188	(1,81)
	R_{eh}						0,120	29,2	279,8	56,1	305			(1,57)
RVK 10	R_{ep}	5,9	2,3	0,39	10	0,975	0,0093	23,1	158,6	42,3	224,0	11	0,171	(1,82)
	R_{eh}						0,111	27,5	202,6	54,9	285			(1,59)

(...) wäre für die Bemessung rechnerisch nicht maßgebend

Aus dem Vergleich Rechnung/Versuch in Tabelle 5 ergeben sich folgende Erkenntnisse zum Nachweis der Biegeknicksicherheit der Ringsteife (Beulsicherheitsnachweis gegen globales Beulen):

(a) Wenn - wie bei **RVK 8** - rechnerisch eindeutig globales Beulen maßgebend ist (hier: $q_{Rk,lok}/q_{Rk,glob} = 0,458/0,241$), versagt die Schale im Versuch folgerichtig ausschließlich global. Die zugehörige Vorhersage des globalen Beuldruckes durch das Nachweiskonzept nach E-Dast-Ri 017 ist konservativ. Das gilt selbst dann, wenn man für den verzweigungstheoretischen Einfluß der Randbedingung RB1 gegenüber RB2 dieselbe Größenordnung wie bei der unversteiften Schale annehmen würde (konkret: $q_{i,RB1} \approx 1,5 q_{i,RB2}$, $\text{crit } m_{RB1} \approx \sqrt{1,5} \cdot \text{crit } m_{RB2}$), was in diesem Falle $q_{Rk,glob}$ um ca. 30 % vergrößern würde.

(b) Wenn - wie bei **RVK 9 und RVK 10** - rechnerisch lokales und globales Beulen etwa gleichermaßen maßgebend sind (hier: $q_{Rk,lok}/q_{Rk,glob} = 0,121/0,104$), versagt die Schale im Versuch folgerichtig simultan lokal/global. Das entspricht zwar nicht der weiter oben erläuterten Zielsetzung des Nachweiskonzepts E-DAST-Ri 017 - daß nämlich in einem solchen Falle lokales Beulen vor globalem Beulen erfolgen sollte. Die Verfasser messen aber dieser Zielsetzung weniger Bedeutung zu, sofern nur der rechnerisch vorhergesagte reale Beuldruck konservativ ist. Das ist hier der Fall, selbst wenn man wieder die Erhöhung infolge falscher Randbedingung überschlägig in Rechnung stellt.

(c) Die Aussage in (a) und (b) wird erhärtet, wenn man die in allen drei Modellschalen zu großen Herstellungsgenauigkeiten (vgl. 3.4) bedenkt.

(d) Die Schweiß-Eigenstressungen haben bei den hier vorliegenden Parametern auch auf das globale Beulen keinen signifikanten Einfluß (vgl. 7.1 (b)).

(e) Die Umfangswellenzahlen der globalen Beulmuster im Versuch stimmen mit den kritischen Beulwellenzahlen nach linearer Theorie (wie in den Gln. (313) - (316) in E-DAST-Ri 017 zugrundeliegt) sehr gut überein.

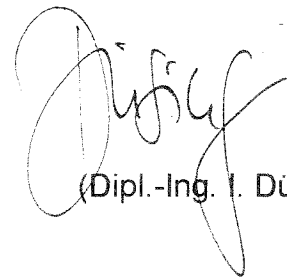
8 Schlußbemerkung

Die im vorliegenden Bericht beschriebenen drei Beultraglastversuche haben gezeigt, daß das Konzept in E-DAST-Ri 017 für den Tragsicherheitsnachweis ringversteifter Kreiszy-linderschalen unter Außendruck über den bisherigen Erfahrungsbereich ($m \leq 6$) hinaus bis $m = 10$ sichere Konstruktionen liefert. Der festgestellte Sicherheitsüberschuß läßt darüberhinaus den Schluß zu, daß auch für noch größere globale Umfangsbeulwellen-zahlen das Konzept ohne Bedenken angewendet werden kann. Lediglich das in E-DAST-Ri 017 explizit genannte Bemessungsziel "lokales Beulen vor globalem Beulen" wird nicht eindeutig erreicht. Es hat aber nach Meinung der Verfasser untergeordnete Bedeutung und sollte überdacht werden.



(Prof.Dr.-Ing. H. Schmidt)

Die Bearbeiterin



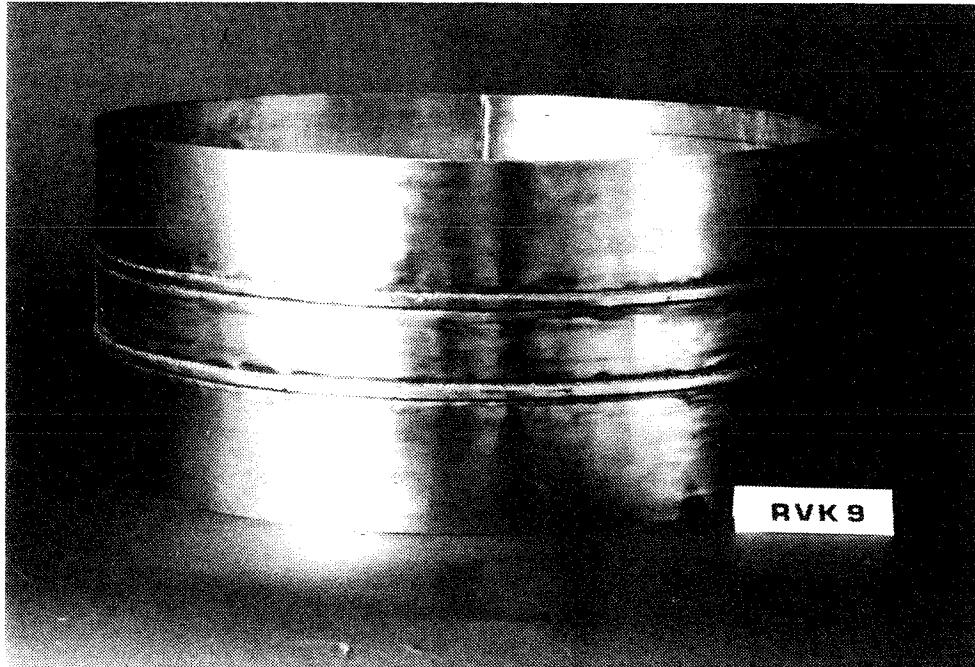
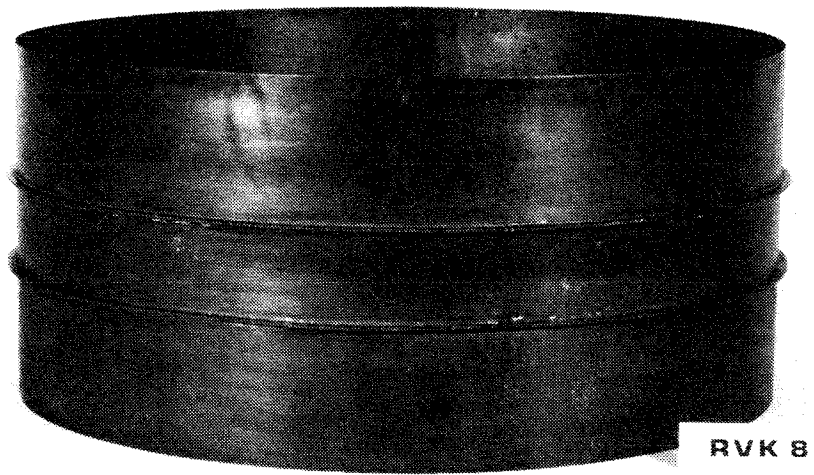
(Dipl.-Ing. I. Düsing)

Literatur

- [1] **British Standards Institution (Hrsg.):** BS 5500 specification for unfired fusion welded pressure Vessels. London: BSI 1988
- [2] **European Convention for Constructional Steelwork ECCS-Techn. Working Group TWG 8.4 (Hrsg.):** ECCS Recommendations Buckling of Steel Shells, 4th ed. Brüssel: ECCS 1988
- [3] **Deutscher Ausschluß für Stahlbau DASt (Hrsg.):** Entwurf für DASt-Richtlinie 017 - Beulsicherheitsnachweis für Schalen - spezielle Fälle. Köln: Stahlbau Verlagsgesellschaft mbH 1992
- [4] **Greiner, R.:** Ringstiffened Cylindrical Shells under External Pressure - an extended proposal for design recommendations. In: Proc. Int. Coll. „Stability of Plates and Shell Structures“, S. 373-384. Gent ECCS 1987
- [5] **Düsing, I., Schmidt, H.:** Beulversuche an stählernen Kreiszyinderschalen mit angeschweißten Ringsteifen unter Außendruckbelastung im elastisch-plastischen Bereich. Forsch.ber. FB Bauwesen, Universität Essen (in Vorbereitung)
- [6] **Stracke, M., Schmidt, H.:** Beulversuche an längsnahtgeschweißten stählernen Kreiszyinderschalen unter Außendruck im elastisch-plastischen Bereich. Forsch.ber. Bauwesen Universität Essen, H. 28. Essen: Selbstverlag 1984
- [7] **Stracke, M.:** Stabilität kurzer stählerner Kreiszyinderschalen unter Außendruck. Diss. Uni Essen 1987. Schweißtechn. Forsch.ber., H. 12. Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS 1987
- [8] **Siebold, H.:** Die plastischen Eigenschaften von Stahl unter Druckbeanspruchung und ihre Berücksichtigung bei der theoretischen Ermittlung des Tragverhaltens gedrückter Stäbe. Diss. Uni. Essen 1989. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 4: Bauingenieurwesen Nr. 92
- [9] **Schmidt, H.:** Beulsicherheitsnachweise für weitere versteifte Schalen sowie allgemeingültige Rechenkonzepte für komplexere Schalenstrukturen. In: Stahlbauhandbuch, Bd. 1, Teil A, S. 774-790. Köln: Stahlbau-Verlagsgesellschaft mbH 1993

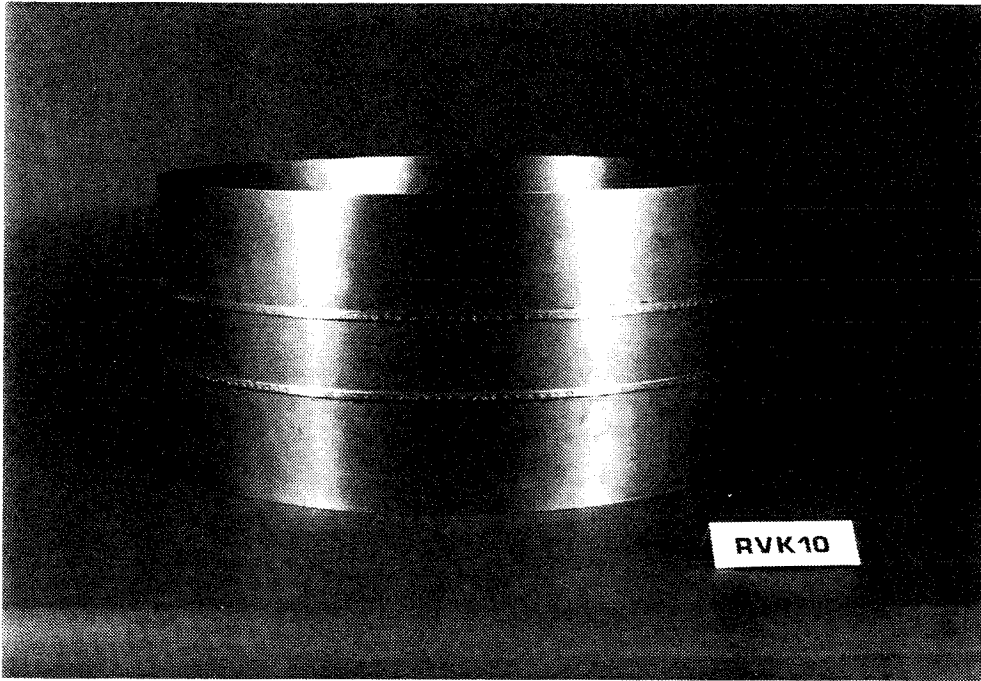
- [10] **Lindner, J., Scheer, J., Schmidt, H. (Hrsg.):** Kommentar zur DIN 18800 Teile 1 bis 4 Berlin: Beuth und Ernst & Sohn 1993
- [11] **Düsing, I.:** Stabilität ringversteifter stählerner Kreiszyinderschalen unter Außen-
druck Diss. Uni. Essen (in Vorbereitung)

Anlage 1



Versuchskörper vor dem Versuch

Anlage 2

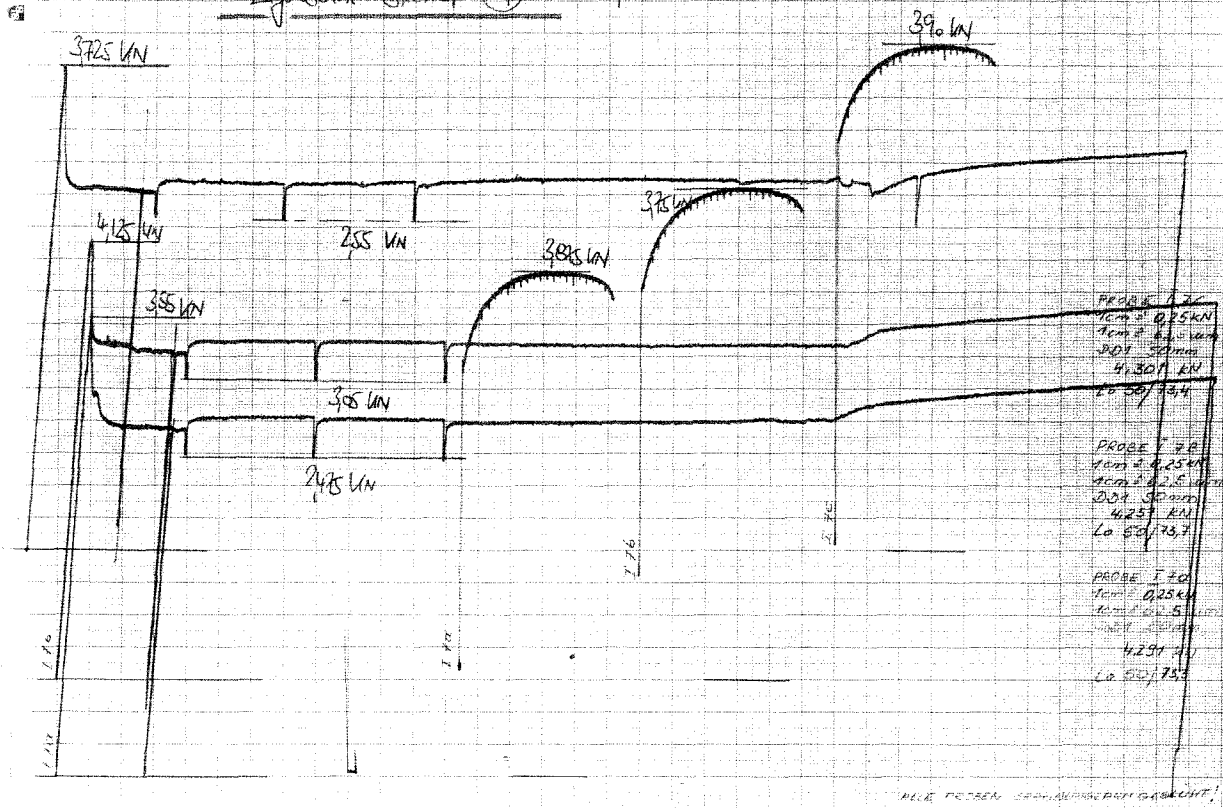


Versuchskörper vor dem Versuch

Anlage 3

1.07.1993

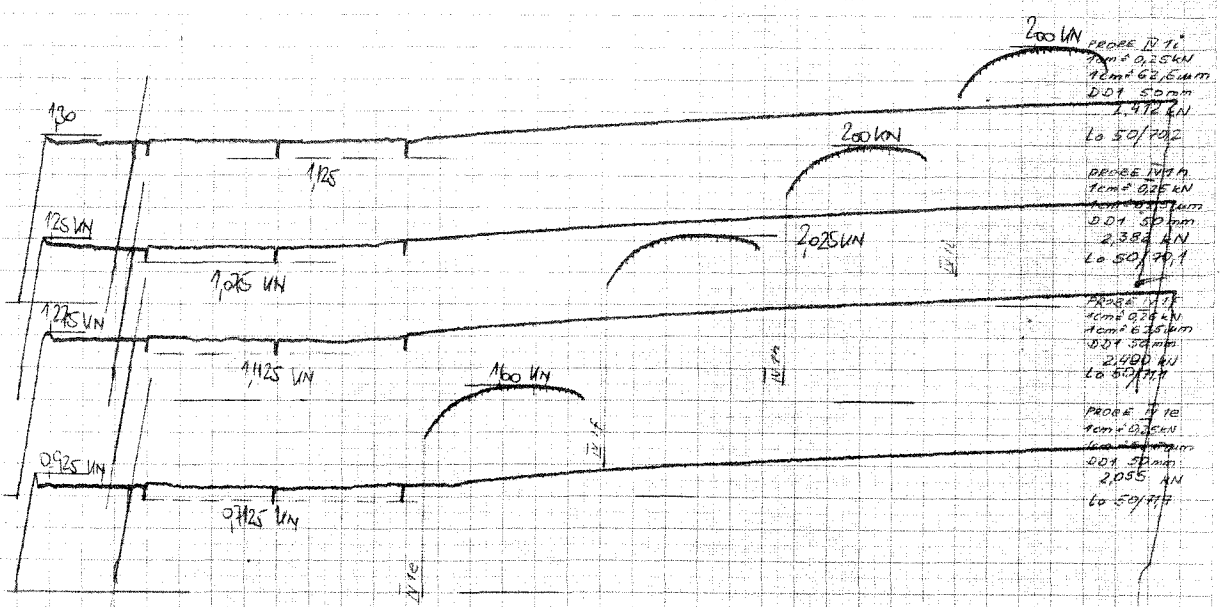
Zugversuche - Blechtafel (I_q) t = 100 mm



ALLE PROBEN SIND AN DER BRUCHSTELLE!

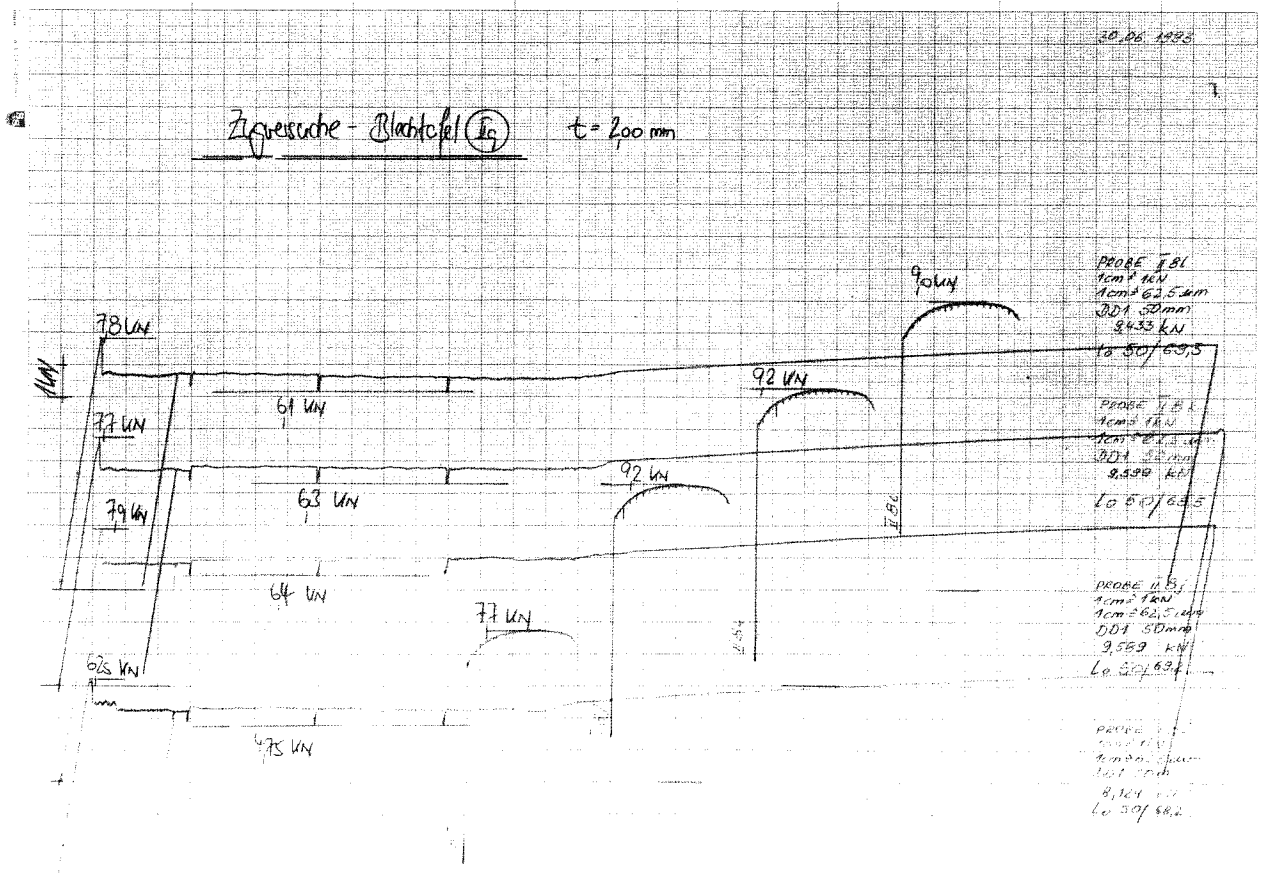
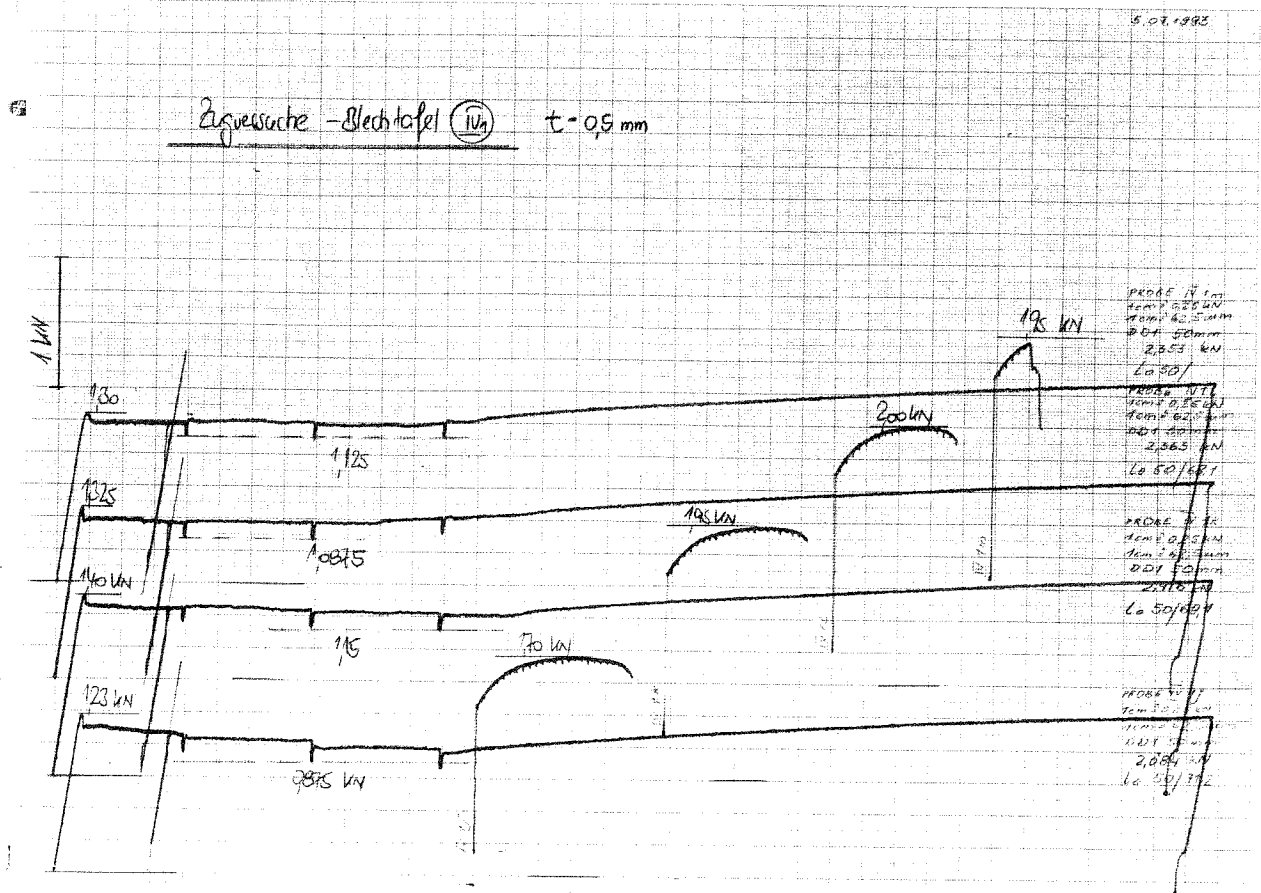
1.07.1992

Zugversuche - Blechtafel (I_q) t = 95 mm



Typische Zugversuch-Diagramme

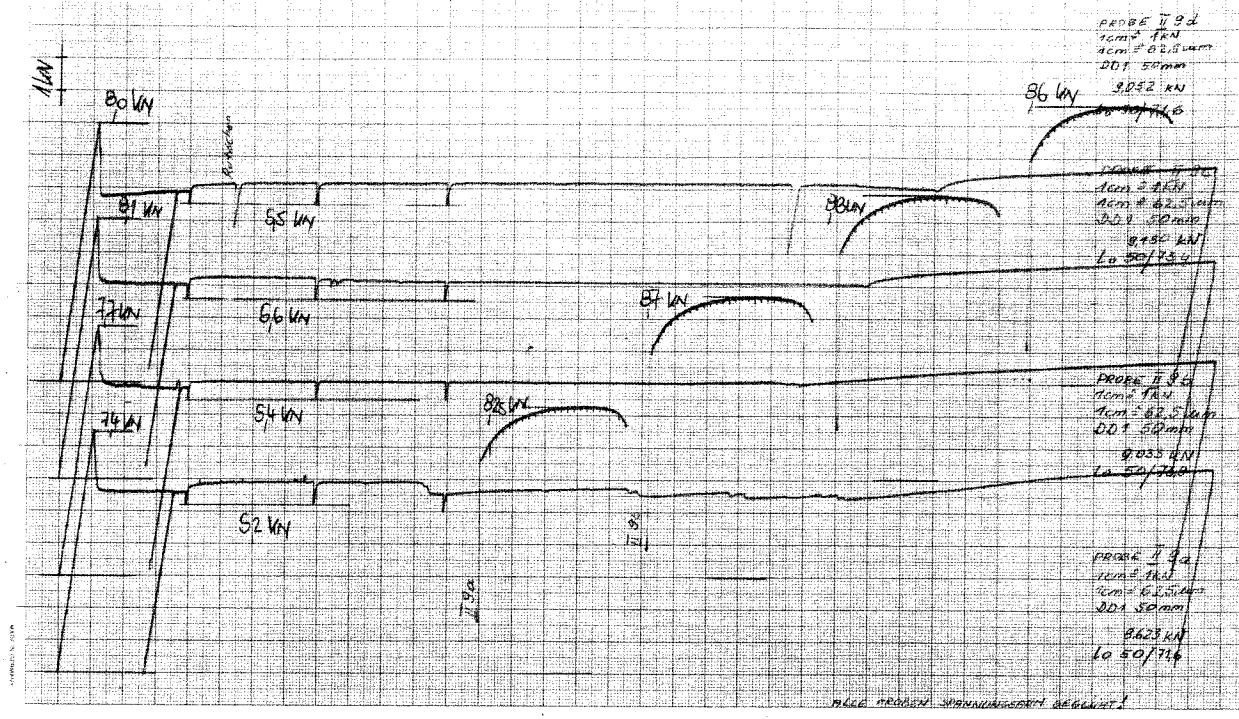
Anlage 4



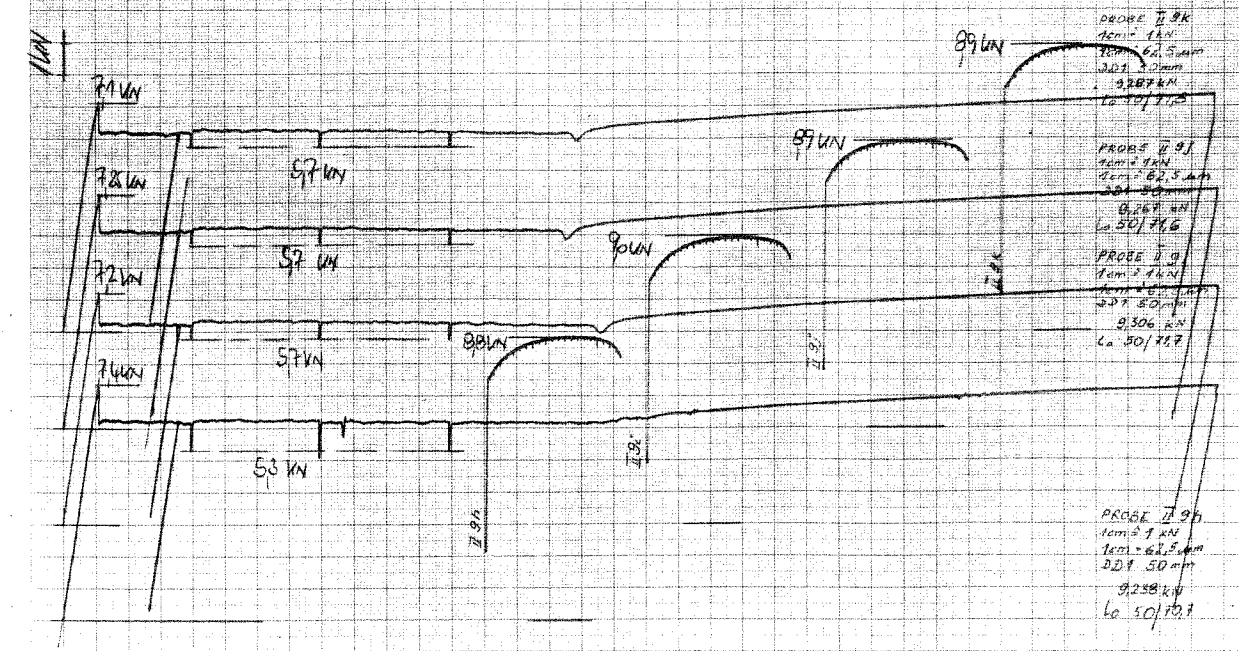
Typische Zugversuch-Diagramme

Anlage 5

Zugversuch - Blechtafel (IIg) $t = 200 \text{ mm}$



Zugversuch - Blechtafel (IIg) $t = 200 \text{ mm}$

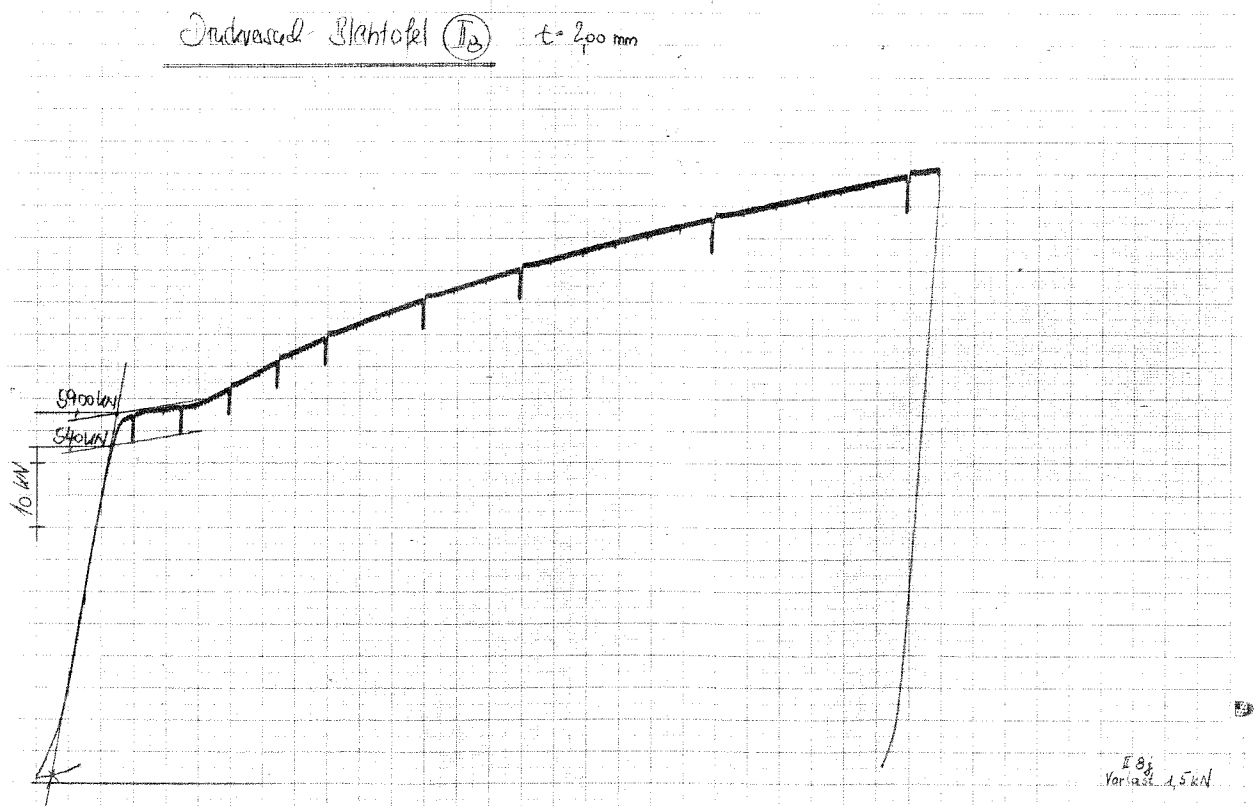
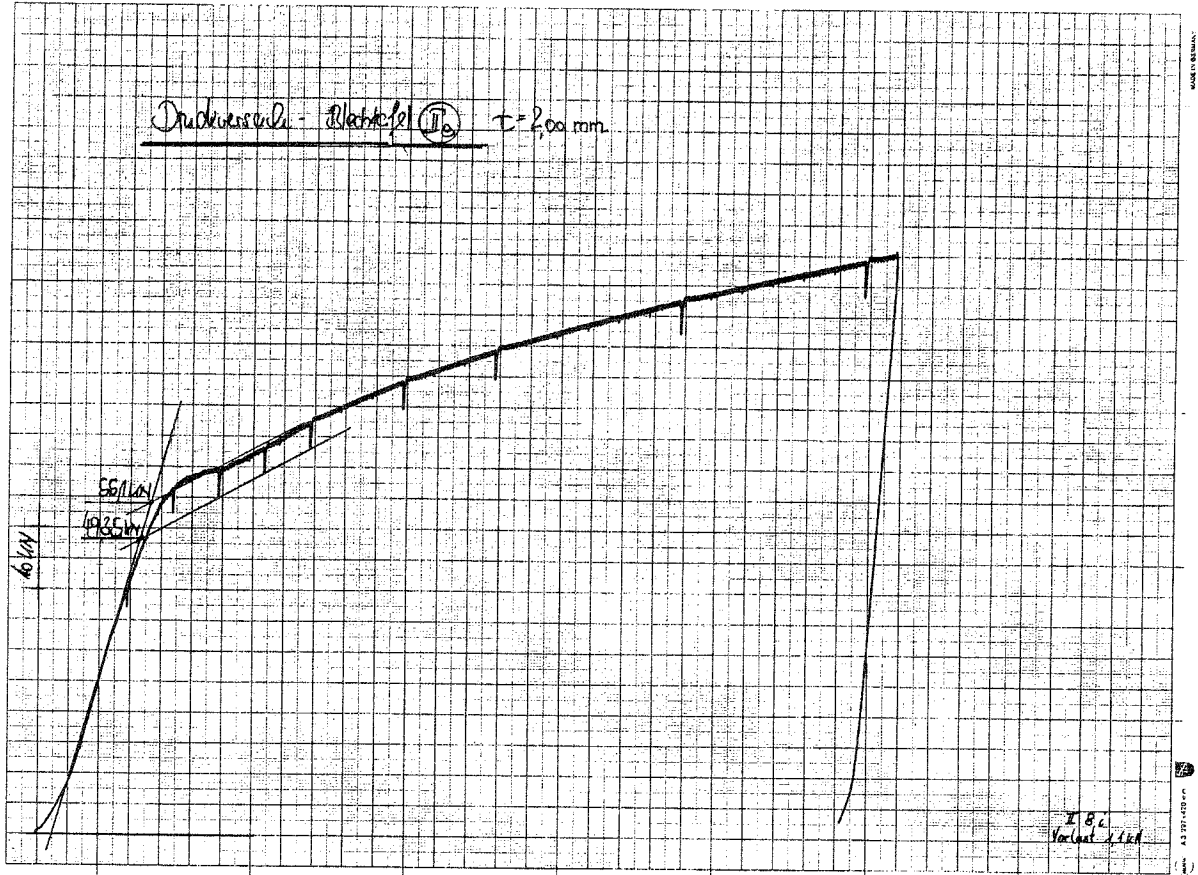


Typische Zugversuch-Diagramme

Anlage 6

Blech- tafel	Probe	Abmessungen			E	R _{eh} ^Z	R _{ep} ^Z	R _m
		t	b	A				
		[mm]	[mm]	[mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
I ₁	a	1,02	12,54	12,79	195500	278	194	303
	b	1,01	12,55	12,76	202200	323	239	294
	c	1,01	12,55	12,76	220200	292	200	306
	d	1,02	12,55	12,80	208300	210	188	297
	e	1,03	12,56	12,94	193200	265	159	274
	f	1,02	12,56	12,81	220000	226	148	263
IV ₁	a	0,50	12,47	6,24	192300	176	128	256
	b	0,50	12,47	6,24	192300	220	192	308
	c	0,50	12,47	6,24	213700	208	192	317
	d	0,50	12,48	6,24	213700	192	168	290
	e	0,51	12,48	6,36	198600	(145)	(112)	252
	f	0,52	12,49	6,49	205400	196	171	312
	h	0,52	12,49	6,49	205400	193	166	308
	i	0,51	12,49	6,37	198300	204	177	314
	j	0,51	12,50	6,38	209000	193	137	266
	k	0,50	12,50	6,25	213300	224	184	312
	l	0,50	12,51	6,26	212990	212	173	319
	m	0,50	12,51	6,26	191700	208	180	311
	II ₈	i	1,94	12,53	24,31	219400	257	195
j		1,92	12,48	23,96	212500	329	167	384
k		1,96	12,56	24,62	221900	313	256	373
l		1,94	12,57	24,39	208700	320	250	369
II ₉	a	2,03	12,55	25,48	209300	290	204	324
	b	2,03	12,55	25,48	219800	302	212	341
	c	2,04	12,56	25,62	218600	316	219	348
	d	20,4	12,56	25,62	218600	312	215	336
	e	2,05	12,58	25,79	206800	(240)	(255)	(279)
	f	2,05	12,58	25,79	206800	302	217	341
	g	2,01	12,60	25,33	217800	317	217	336
	h	2,02	12,61	25,47	209400	291	208	346
	i	2,01	12,61	25,35	220900	284	225	355
	j	2,01	12,61	25,35	200825	286	225	351
	k	2,01	12,62	25,36	210305	280	225	351
	l	2,05	12,61	25,85	199700	304	210	329

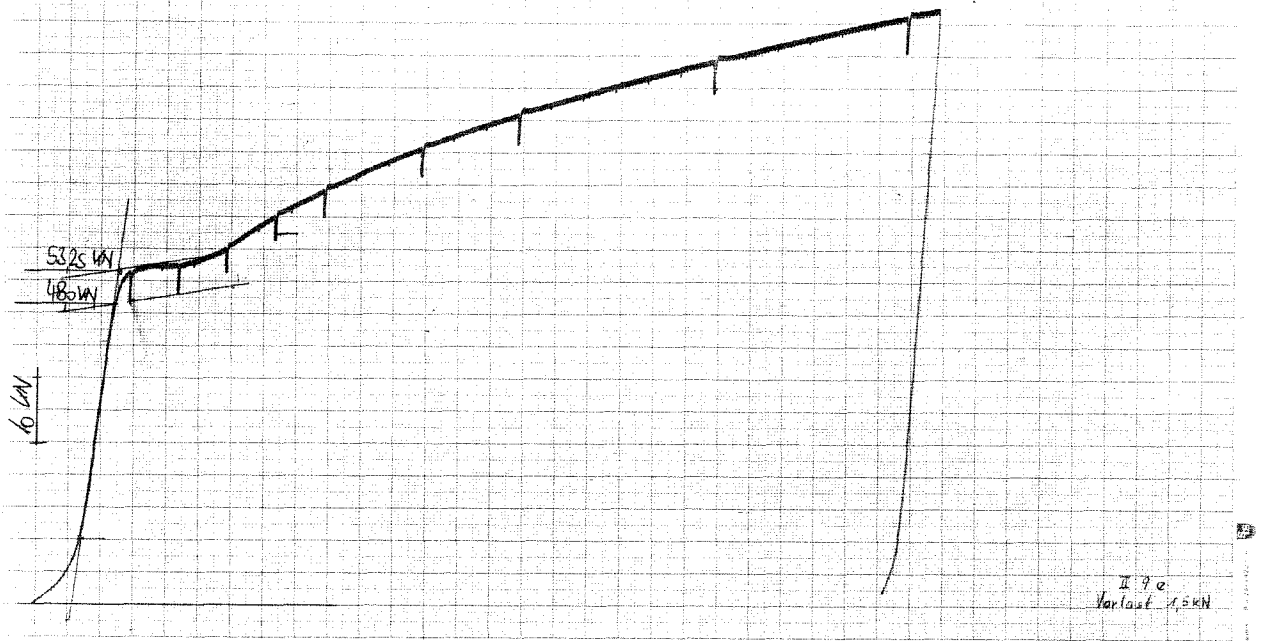
Anlage 7



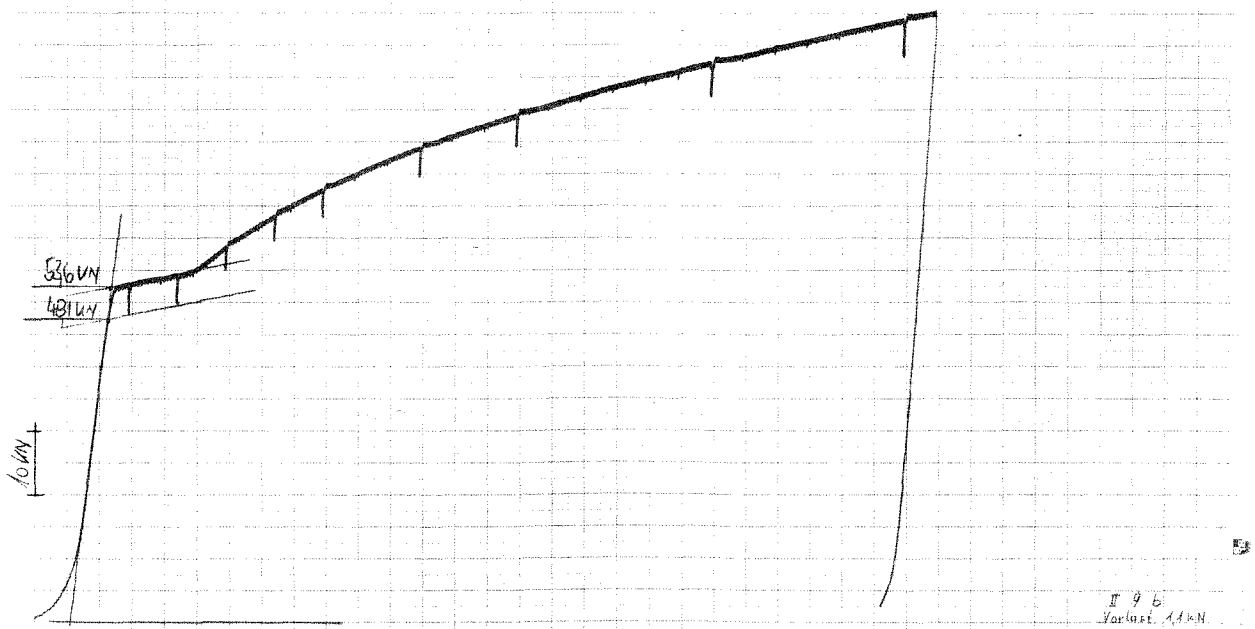
Typische Druckversuch-Diagramme

Anlage 8

Druckversuch-Blatttafel (I₉) $t = 200\text{mm}$



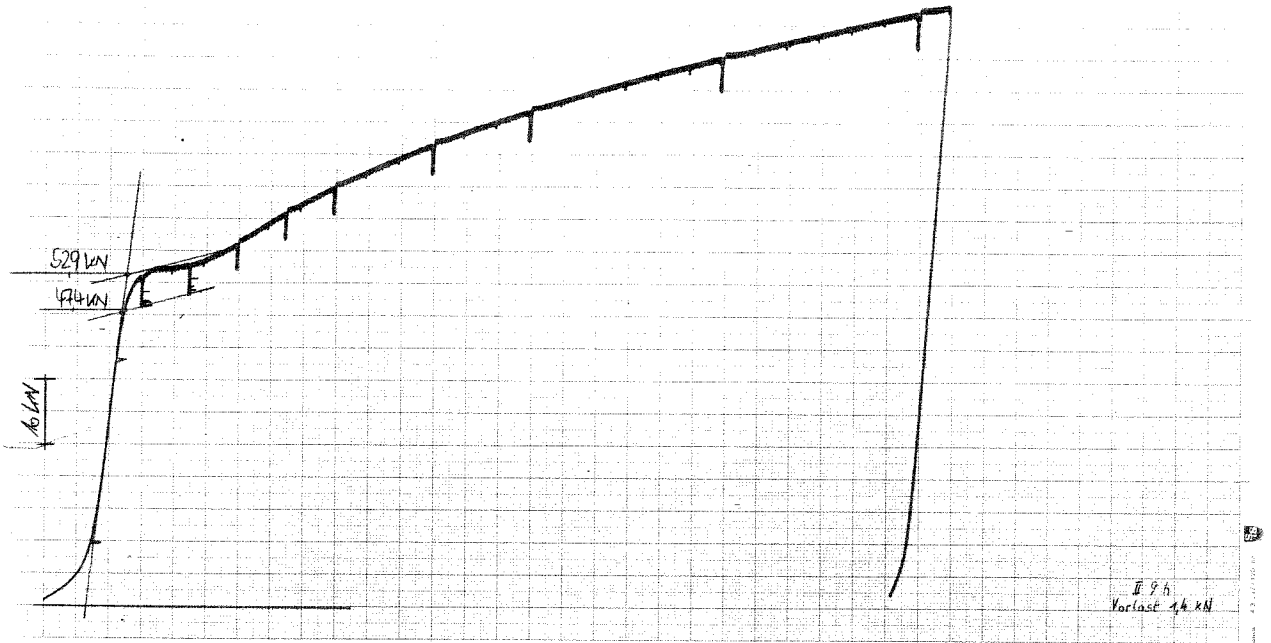
Druckversuch-Blatttafel (I₉) $t = 200\text{mm}$



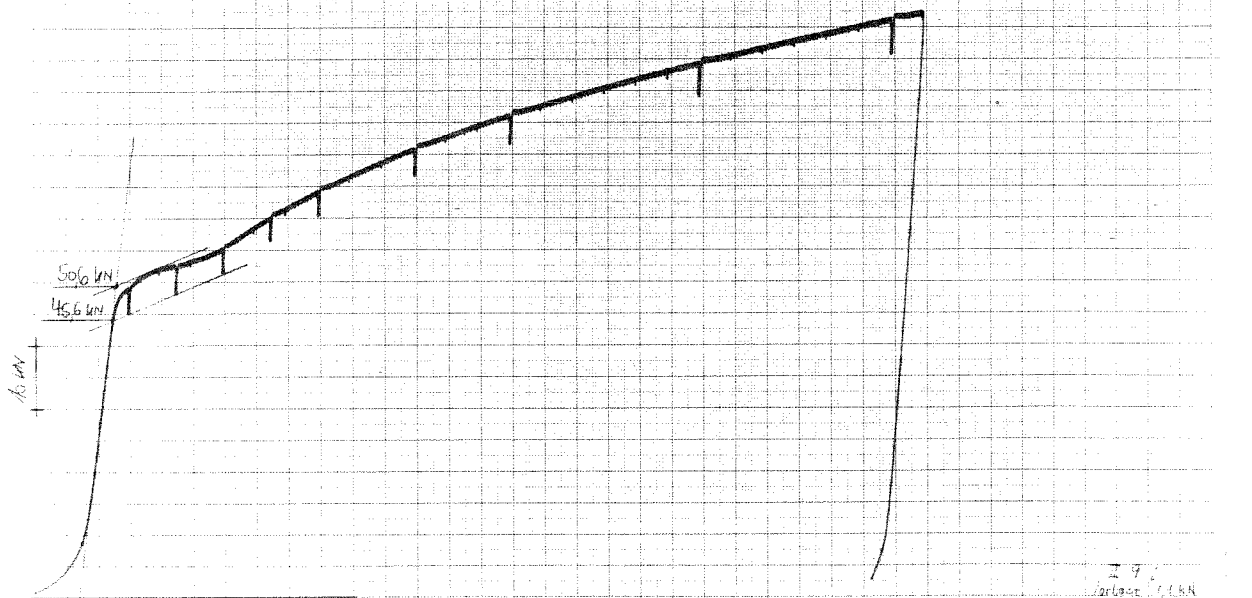
Typische Druckversuch-Diagramme

Anlage 9

Druckversuch - Blechtafel (Iq) $t = 200 \text{ mm}$



Druckversuch - Blechtafel (Iq) $t = 200 \text{ mm}$



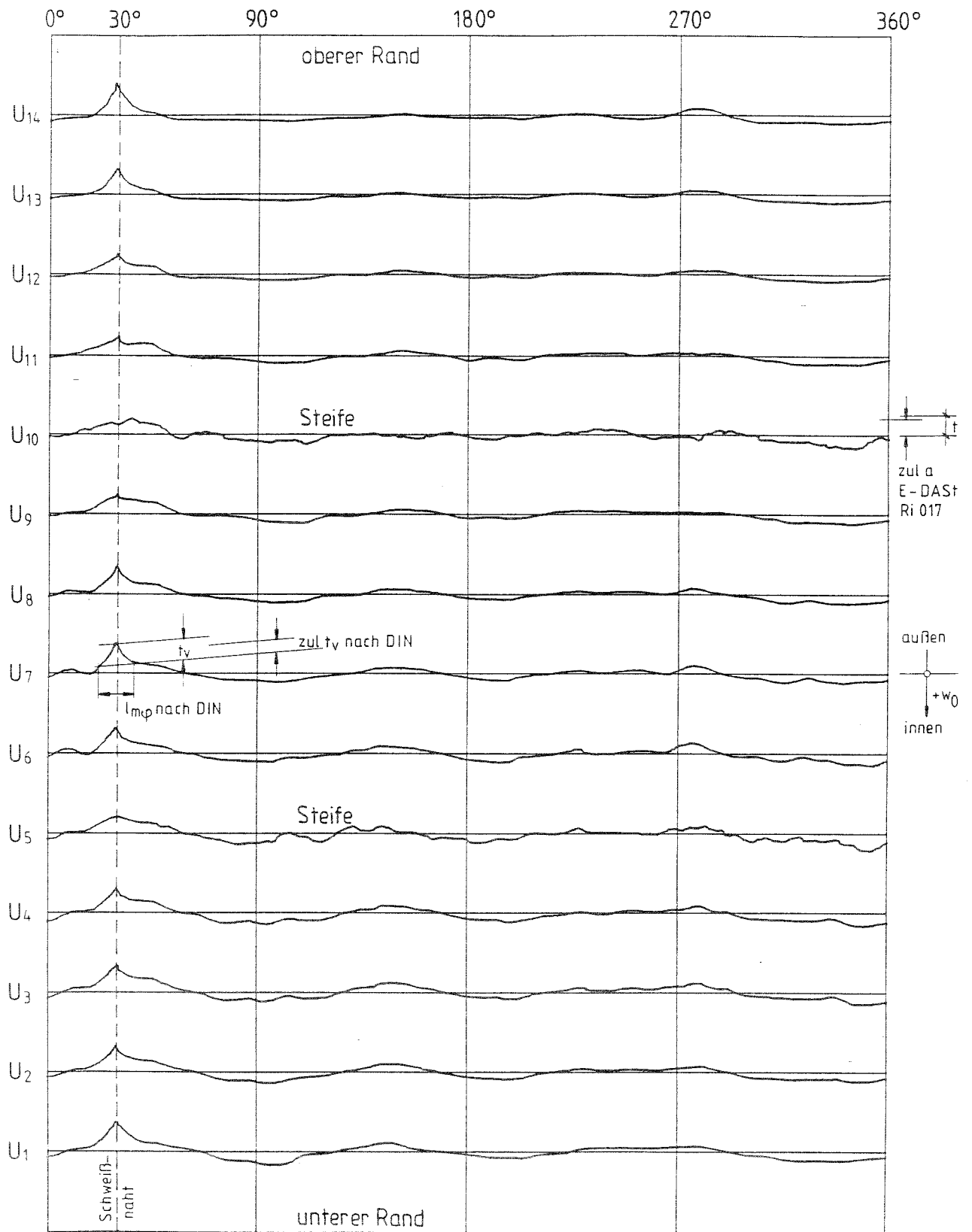
Typische Druckversuch-Diagramme

Anlage 10

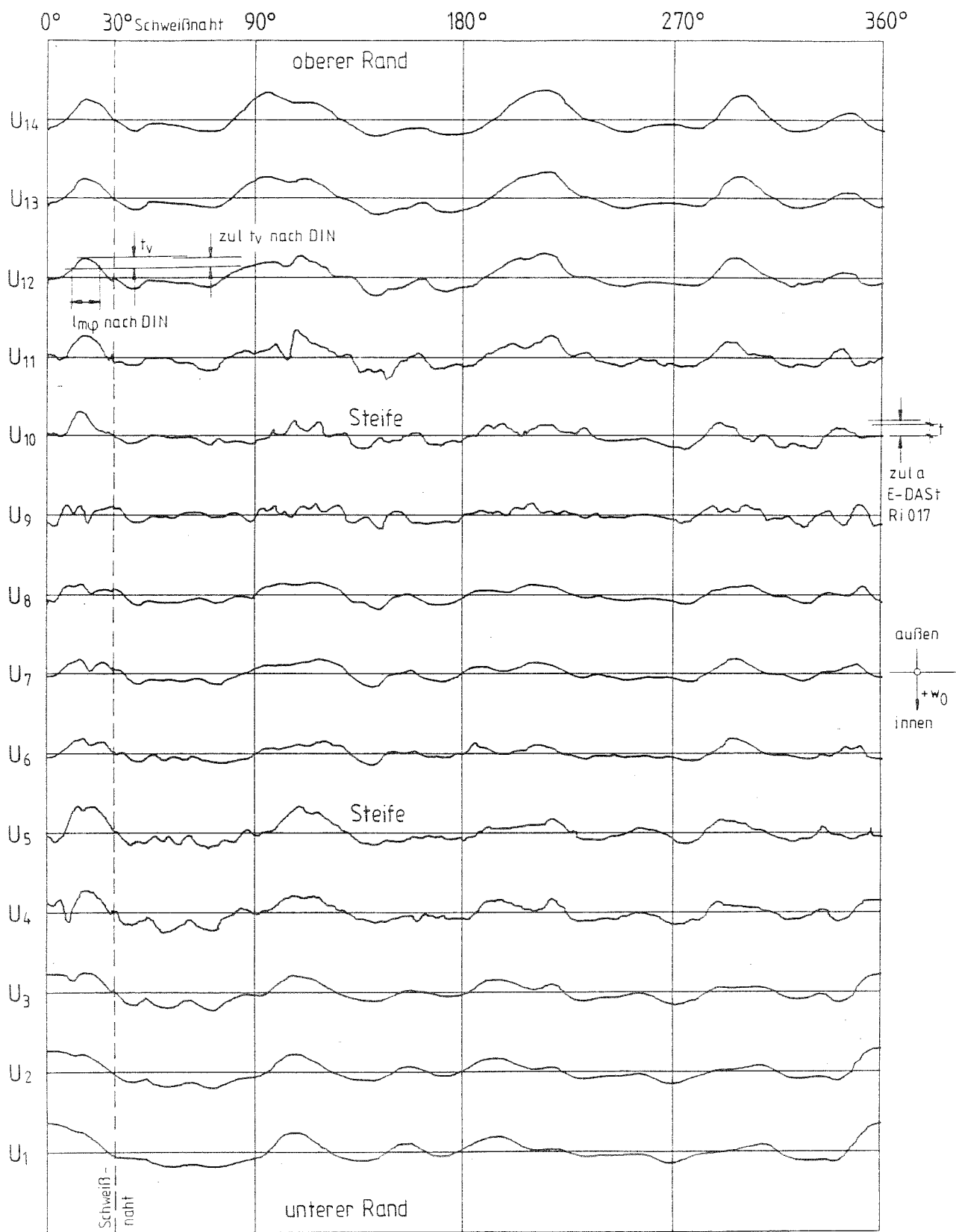
Blech- tafel	Probe		Abmessungen			R_{eh}^D [N/mm ²]	R_{ep}^D [N/mm ²]
			t [mm]	b [mm]	A [mm ²]		
II ₈	i	1	1,96	35,0	204,4	270	241
		2	1,92	35,0			
		3	1,96	35,0			
	j	1	1,90	35,0	199,5	296	271
		2	1,90	35,0			
		3	1,90	35,0			
	k	1	1,95	34,9	203,83	286	261
		2	1,95	34,9			
		3	1,94	34,9			
	l	1	1,93	34,9	202,08	296	272
		2	1,93	34,9			
		3	1,93	34,9			
II ₉	a	1	2,03	35,1	213,76	268	244
		2	2,03	35,1			
		3	2,03	35,1			
	b	1	2,03	35,1	213,76	255	228
		2	2,03	35,1			
		3	2,03	35,1			
	c	1	2,01	35,0	211,05	253	224
		2	2,01	35,0			
		3	2,01	35,0			
	d	1	2,03	35,1	213,76	263	242
		2	2,03	35,1			
		3	2,03	35,1			
	e	1	2,00	35,0	210,0	254	229
		2	2,00	35,0			
		3	2,00	35,0			
	f	1	1,99	35,0	209,65	251	227
		2	2,00	35,0			
		3	2,00	35,0			
	g	1	2,02	35,0	212,10	259	238
		2	2,02	35,0			
		3	2,02	35,0			
	h	1	2,01	35,0	210,35	251	225
		2	2,00	35,0			
		3	2,00	35,0			
i	1	1,99	35,0	208,95	242	218	
	2	1,99	35,0				
	3	1,99	35,0				
j	1	2,01	35,0	211,05	249	226	
	2	2,01	35,0				
	3	2,01	35,0				
k	1	2,00	35,1	210,20	253	238	
	2	2,00	35,0				
	3	2,00	35,0				
l	1	2,03	35,1	213,76	262	239	
	2	2,03	35,1				
	3	2,03	35,1				

Ver- suchs- körper	Mantelblech					Ringsteifen						
	E [N/mm ²]	R ^Z _{eh} [N/mm ²]	R ^Z _{ep} [N/mm ²]	R _m [N/mm ²]	R _m [N/mm ²]	E [N/mm ²]	R ^Z _{eh} [N/mm ²]	R ^Z _{ep} [N/mm ²]	R _m [N/mm ²]	R ^D _{eh} [N/mm ²]	R ^D _{ep} [N/mm ²]	
RVK 8	207000	266	188	290	290	214000	306	214	336	263	241	
RVK 9	203000	198	170	297	297	217000	305	242	361	287	261	
RVK 10	205000	206	170	305	305	210000	285	221	351	249	227	

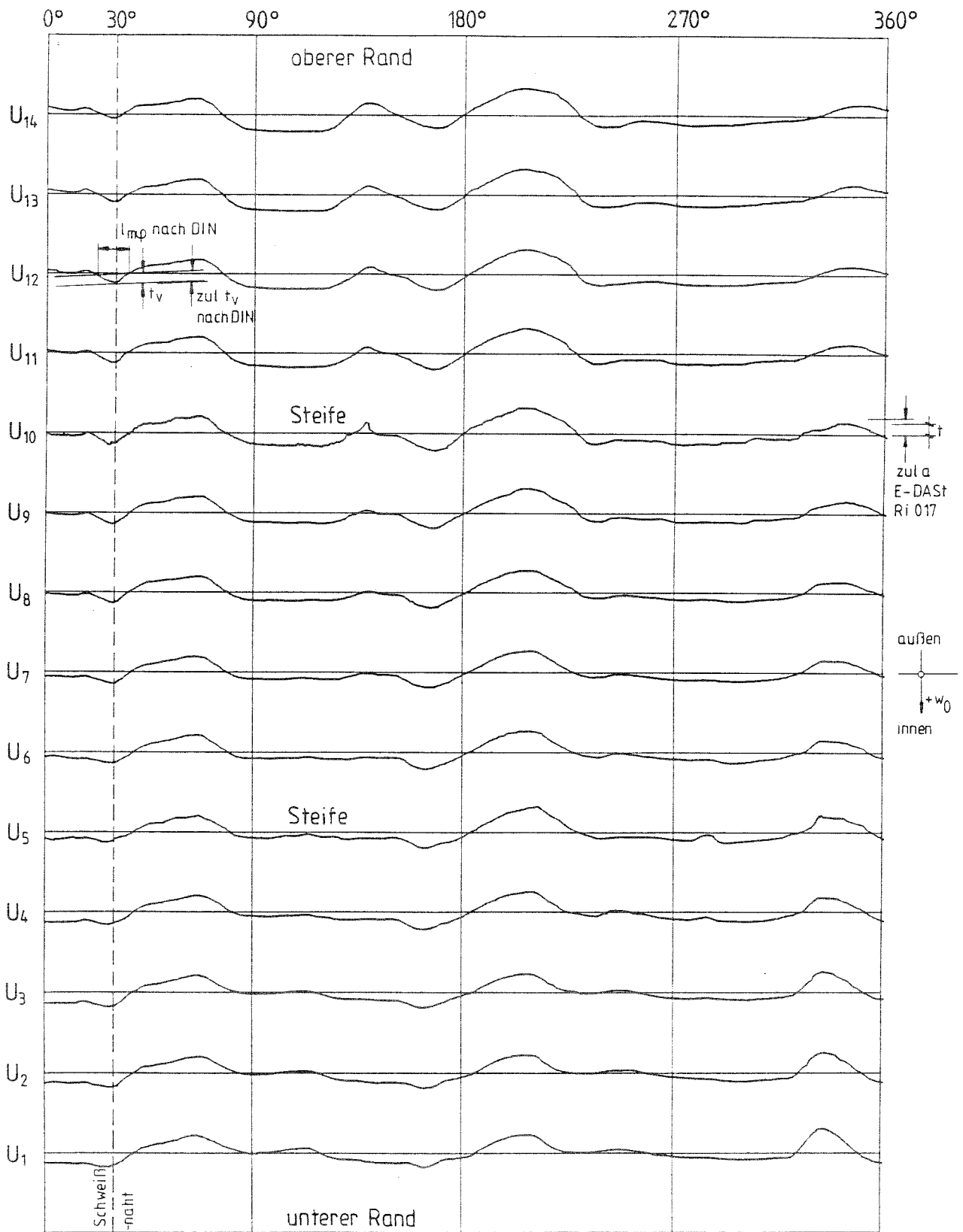
Anlage 12

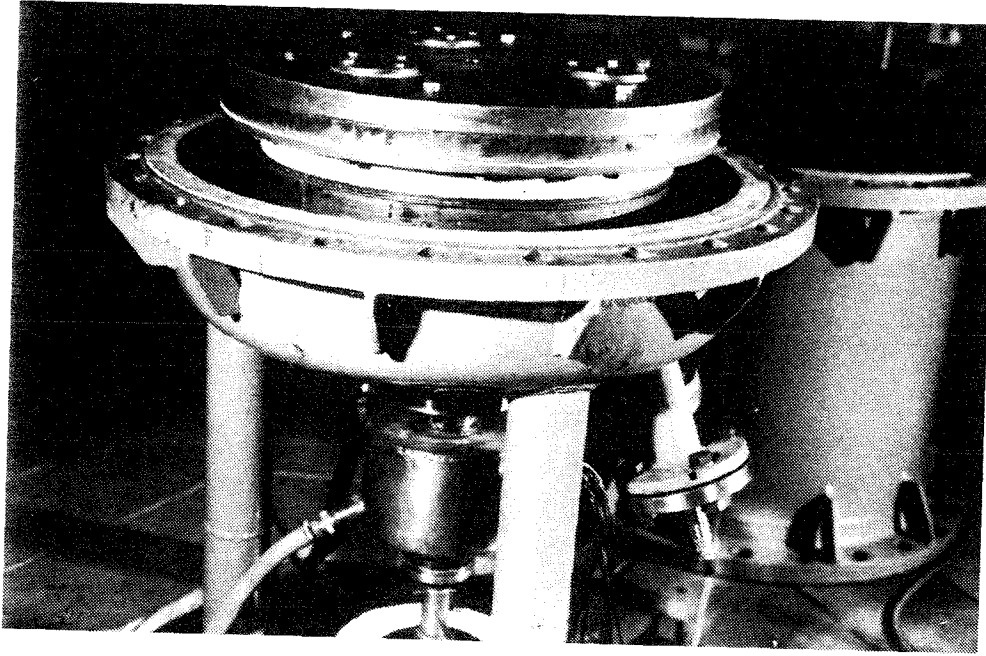


Anlage 13

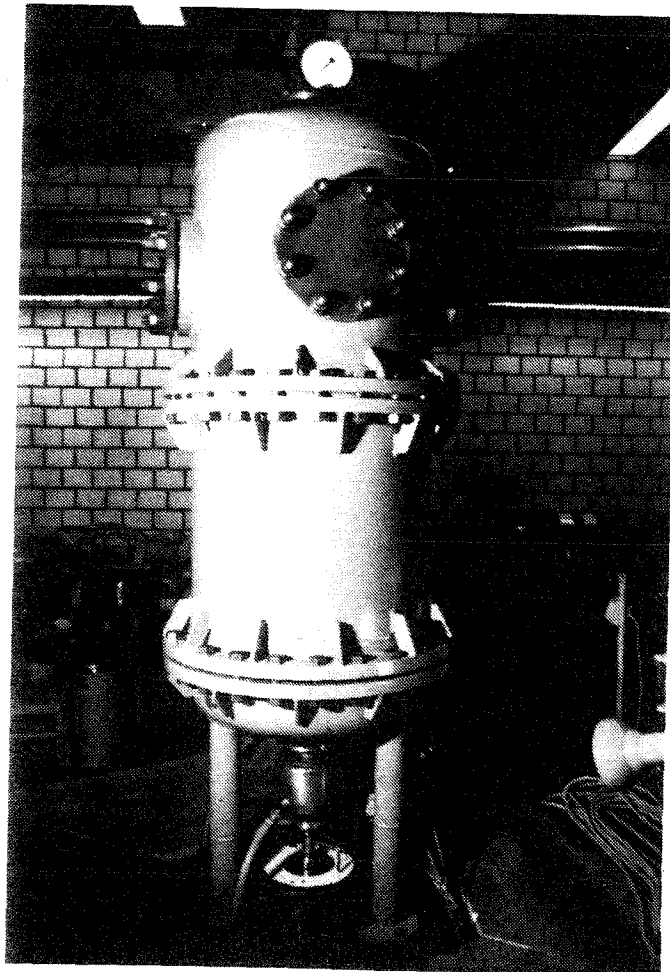


Anlage 14



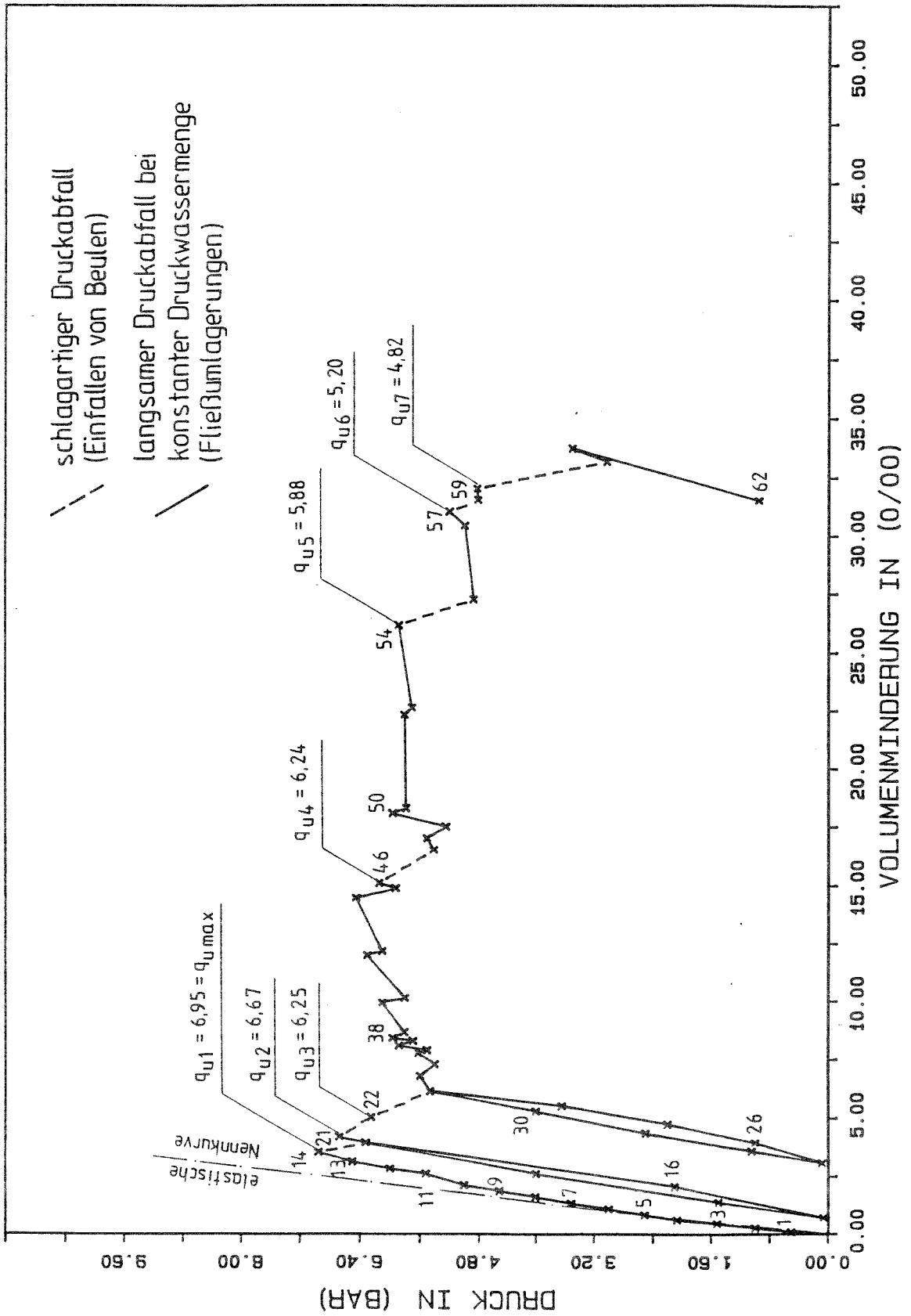


Unterteil des
Prüfbehälters
mit eingebautem
Versuchskörper
(einschließlich
oberer Deckelplatte)



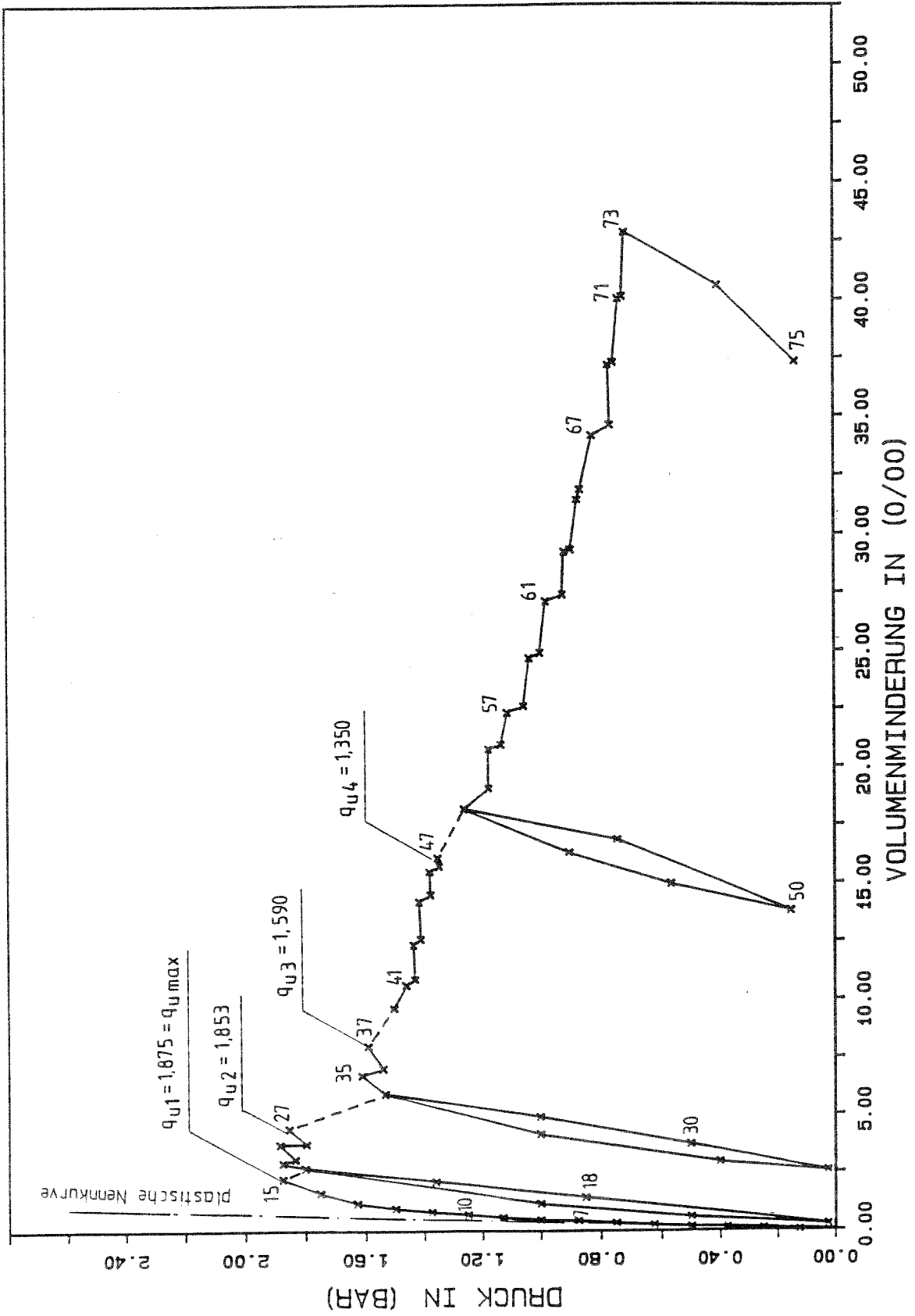
Prüfbehälter

DRUCK - VOLUMEN - KURVE RVK 8



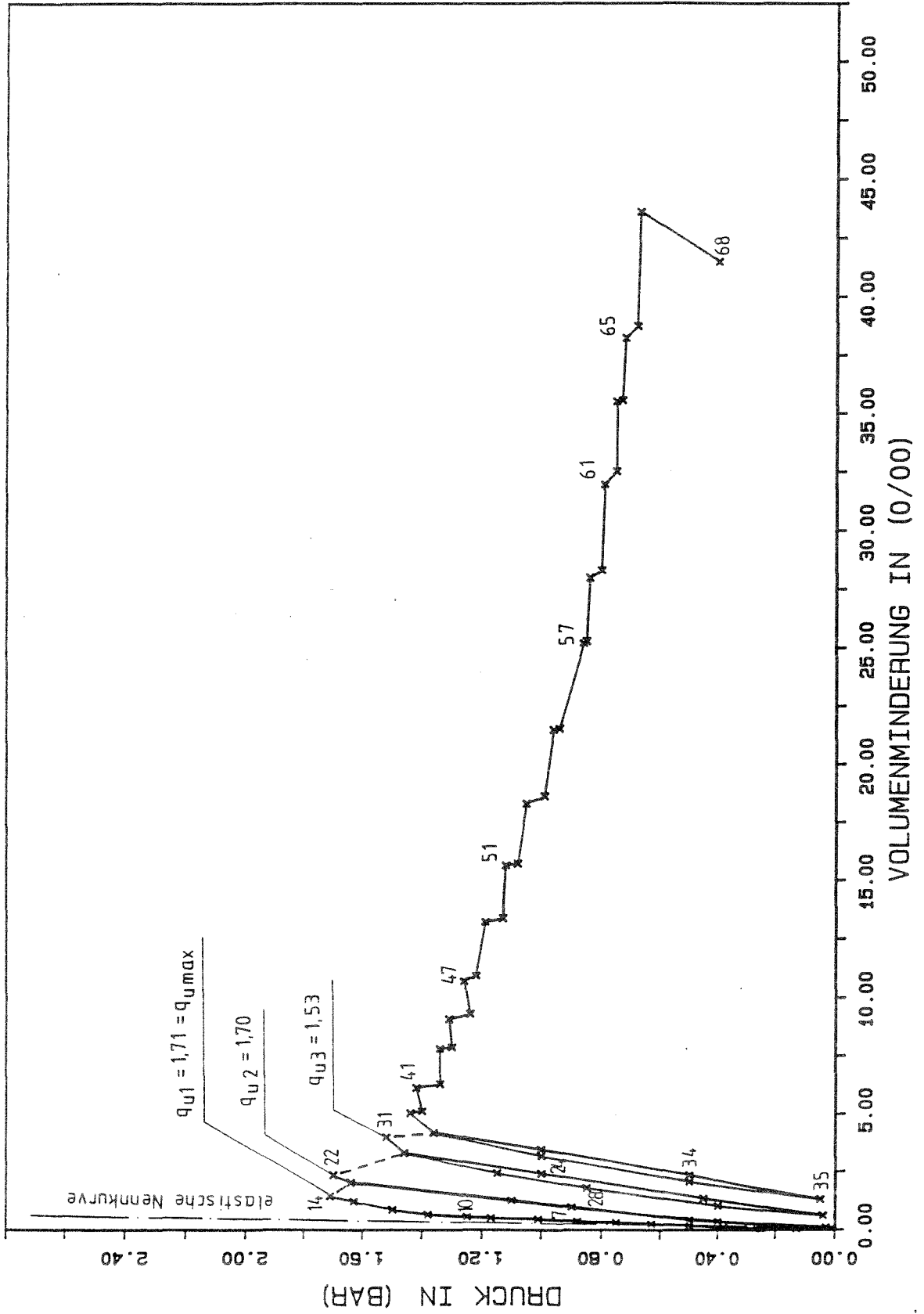
Druck-Volumen-Kurve RVK 8

DRUCK - VOLUMEN - KURVE RVK 9



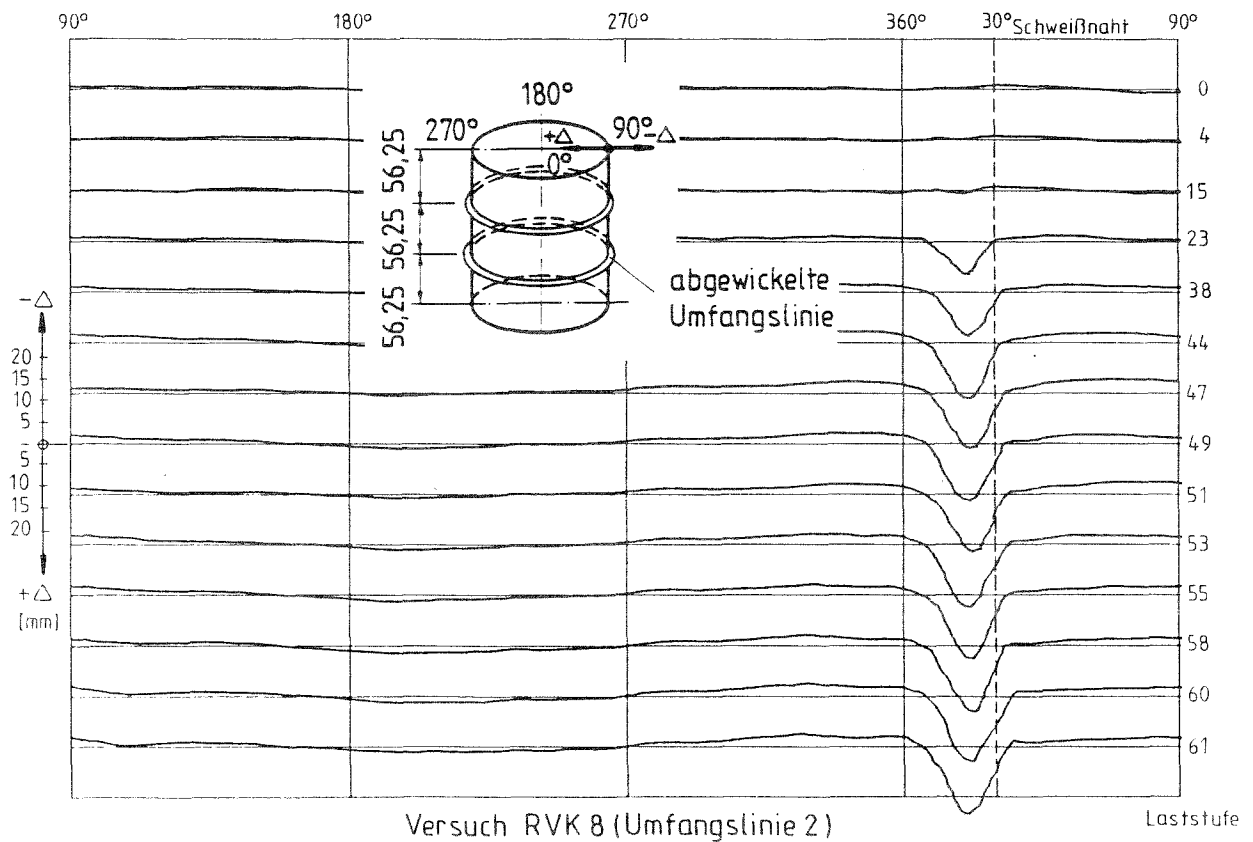
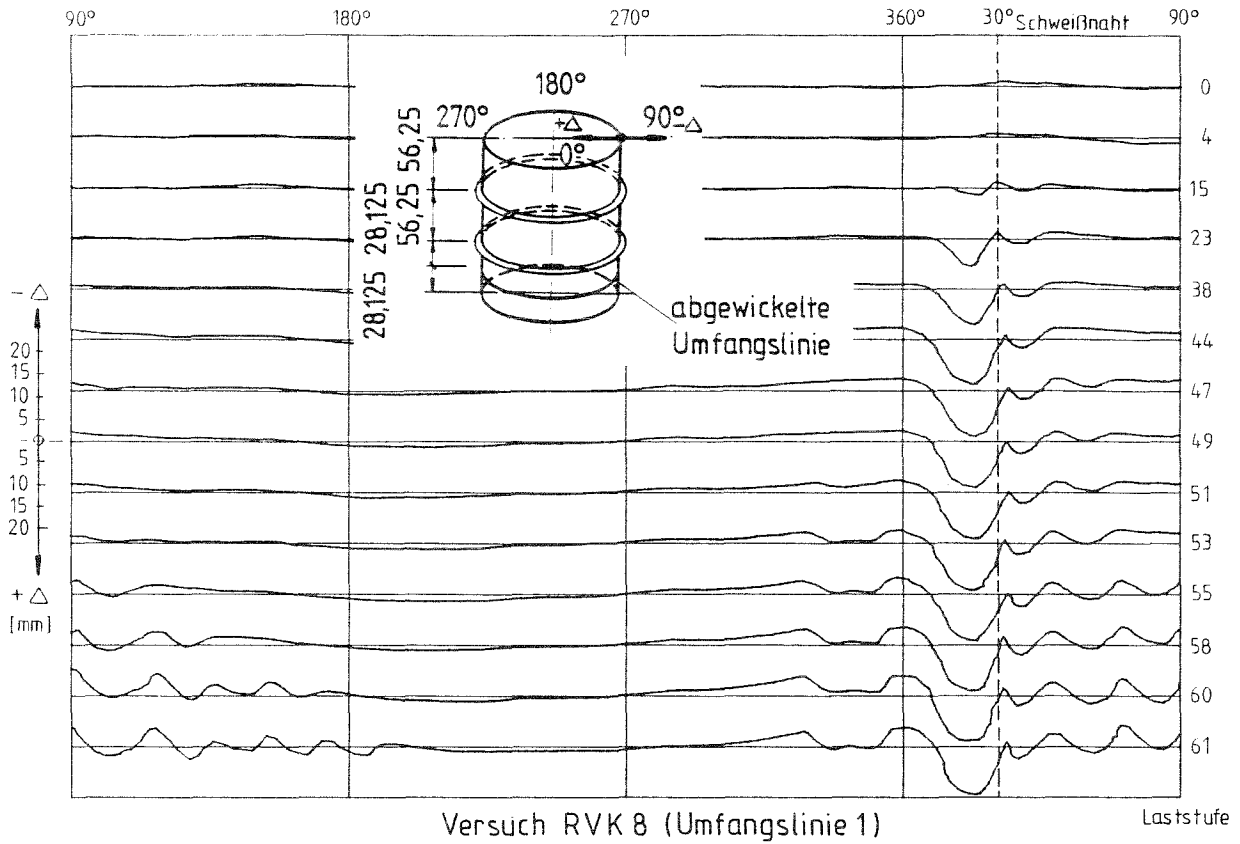
Druck-Volumen-Kurve RVK 9

DRUCK - VOLUMEN - KURVE RVK 10



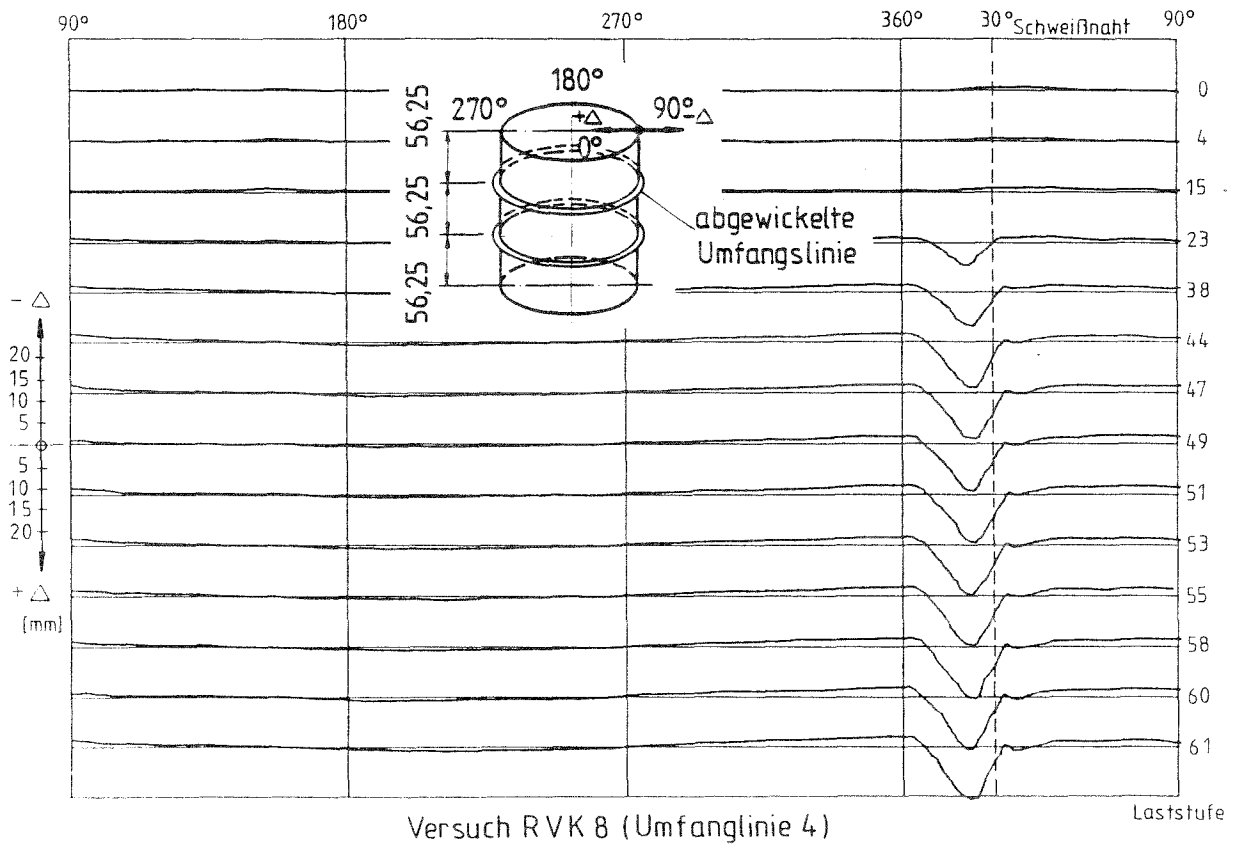
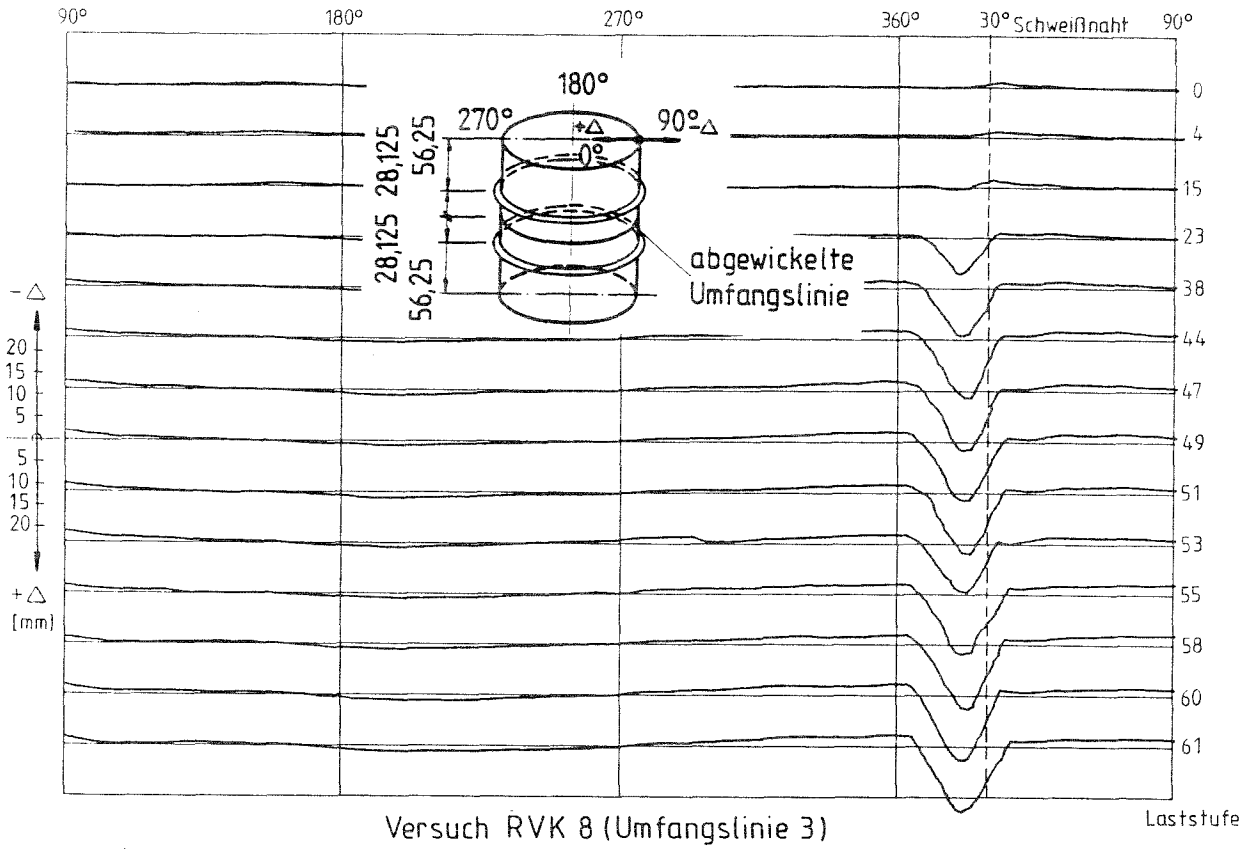
Druck-Volumen-Kurve RVK 10

Anlage 19



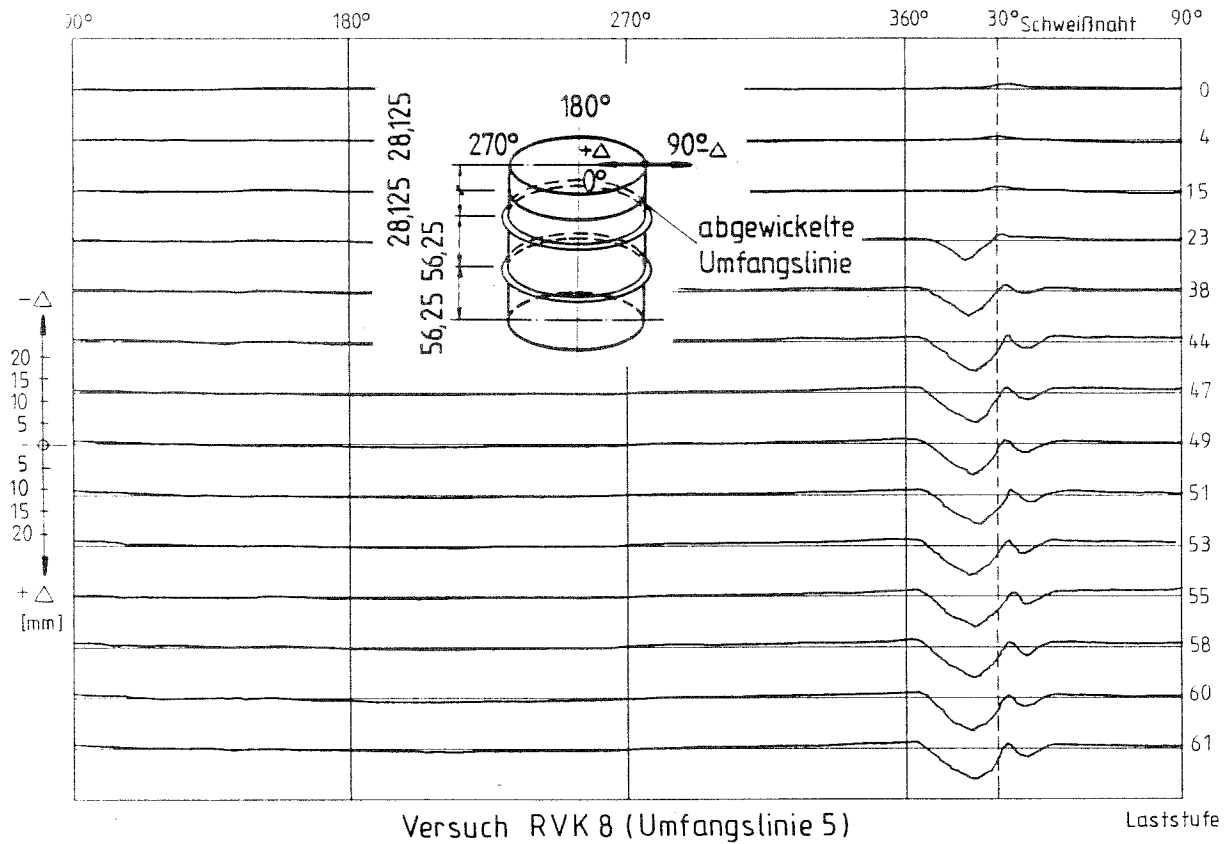
Entwicklung der radialen Beulverformungen

Anlage 20



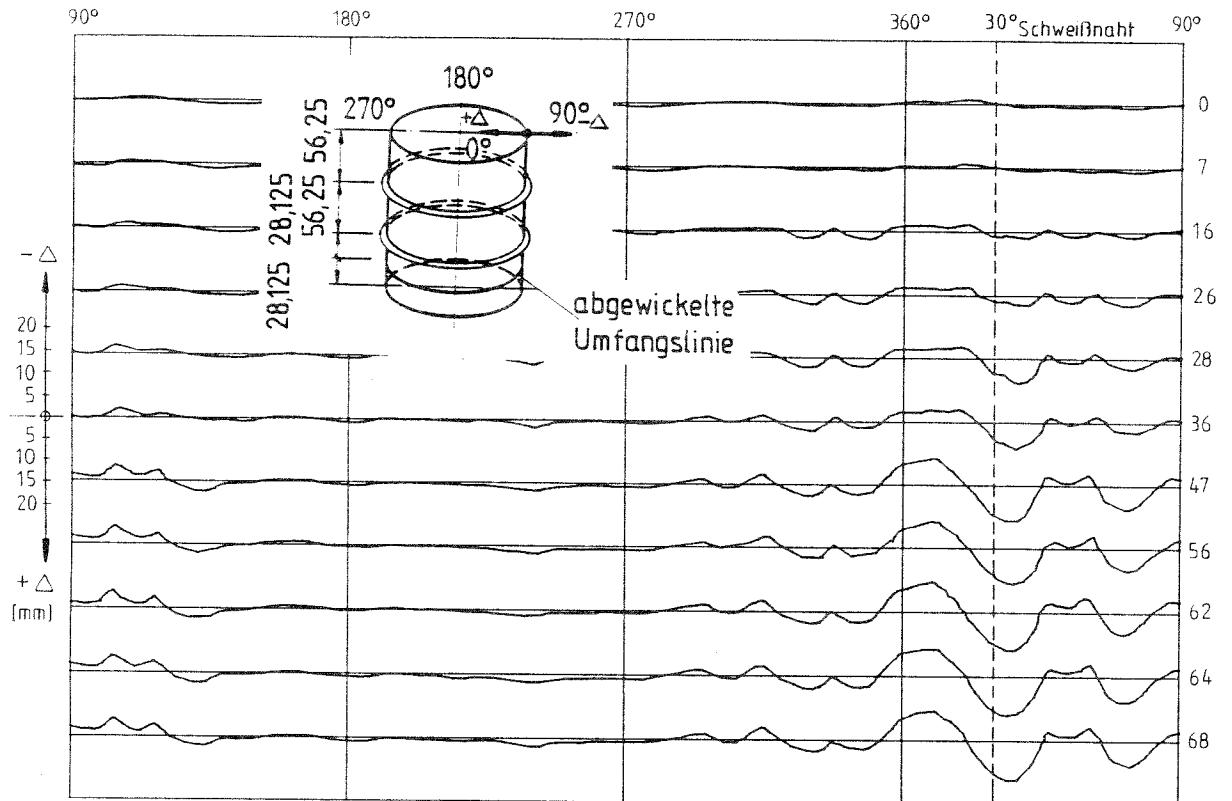
Entwicklung der radialen Beulverformungen

Anlage 21



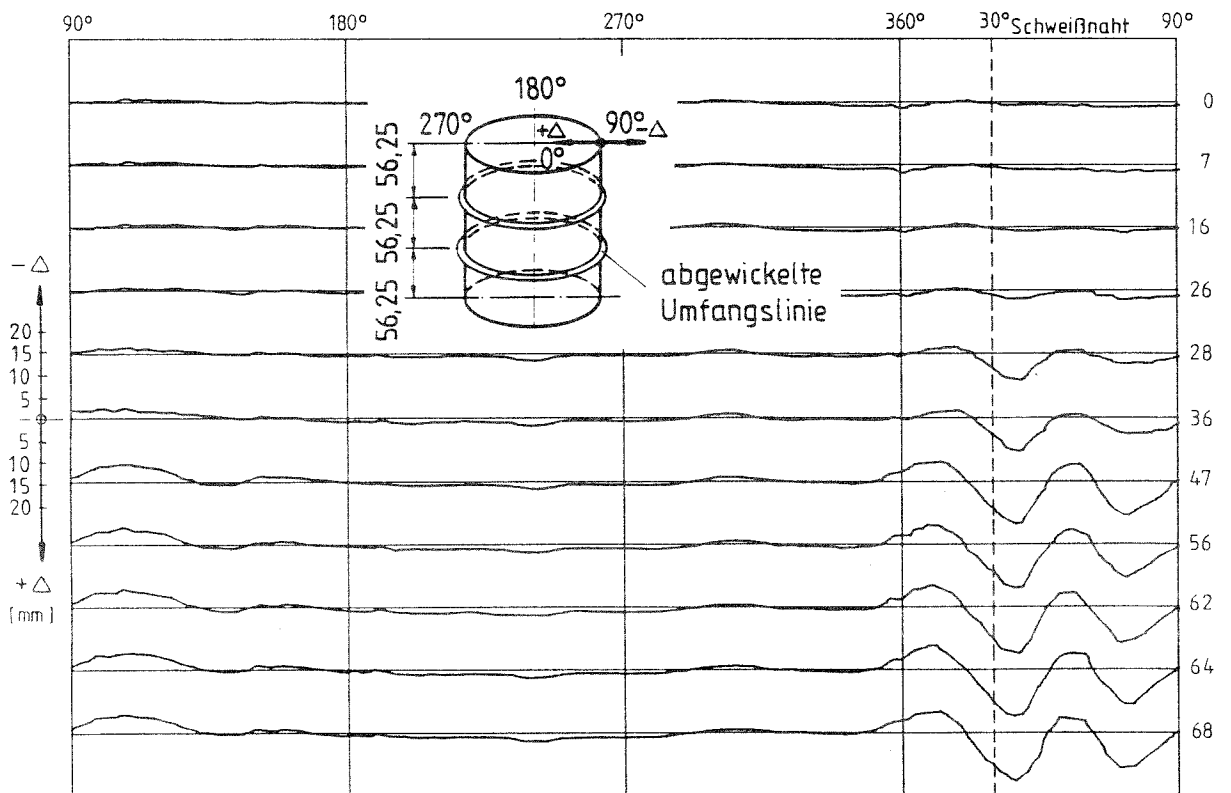
Entwicklung der radialen Beulverformungen

Anlage 22



Versuch RVK 9 (Umfangslinie 1)

Laststufe

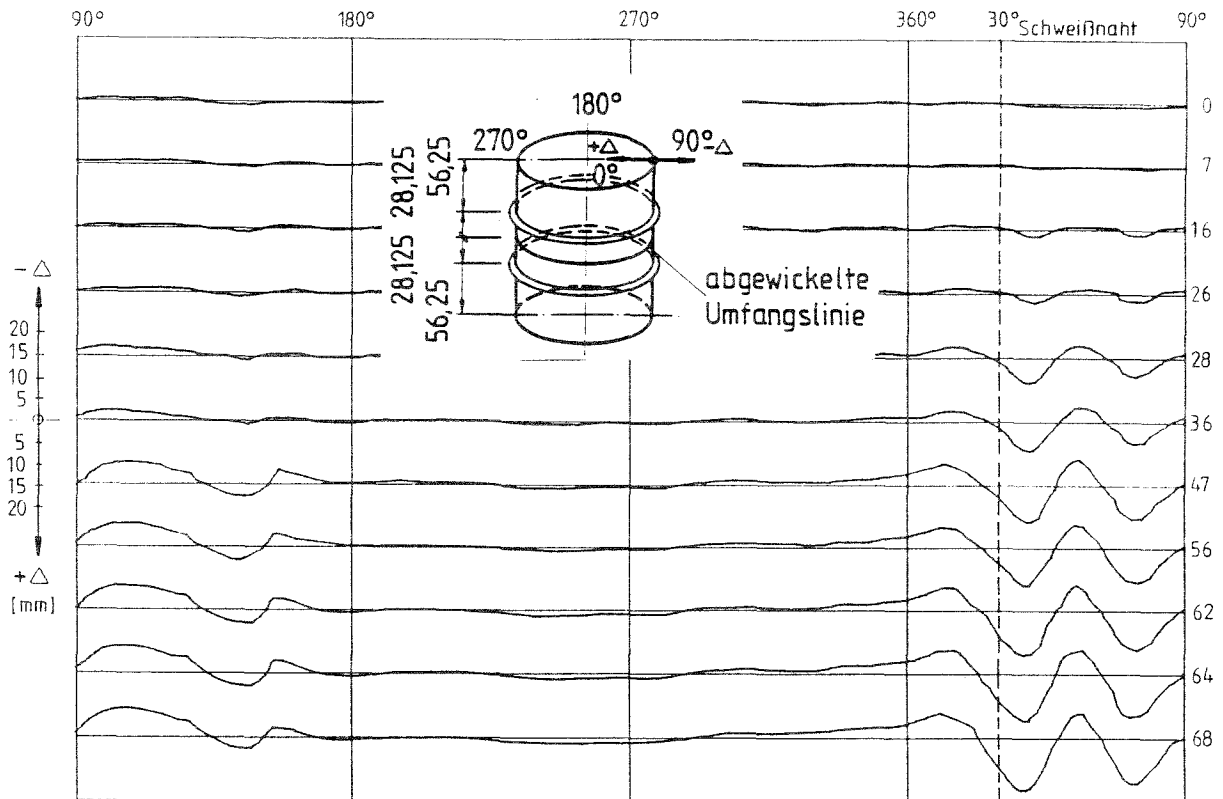


Versuch RVK 9 (Umfangslinie 2)

Laststufe

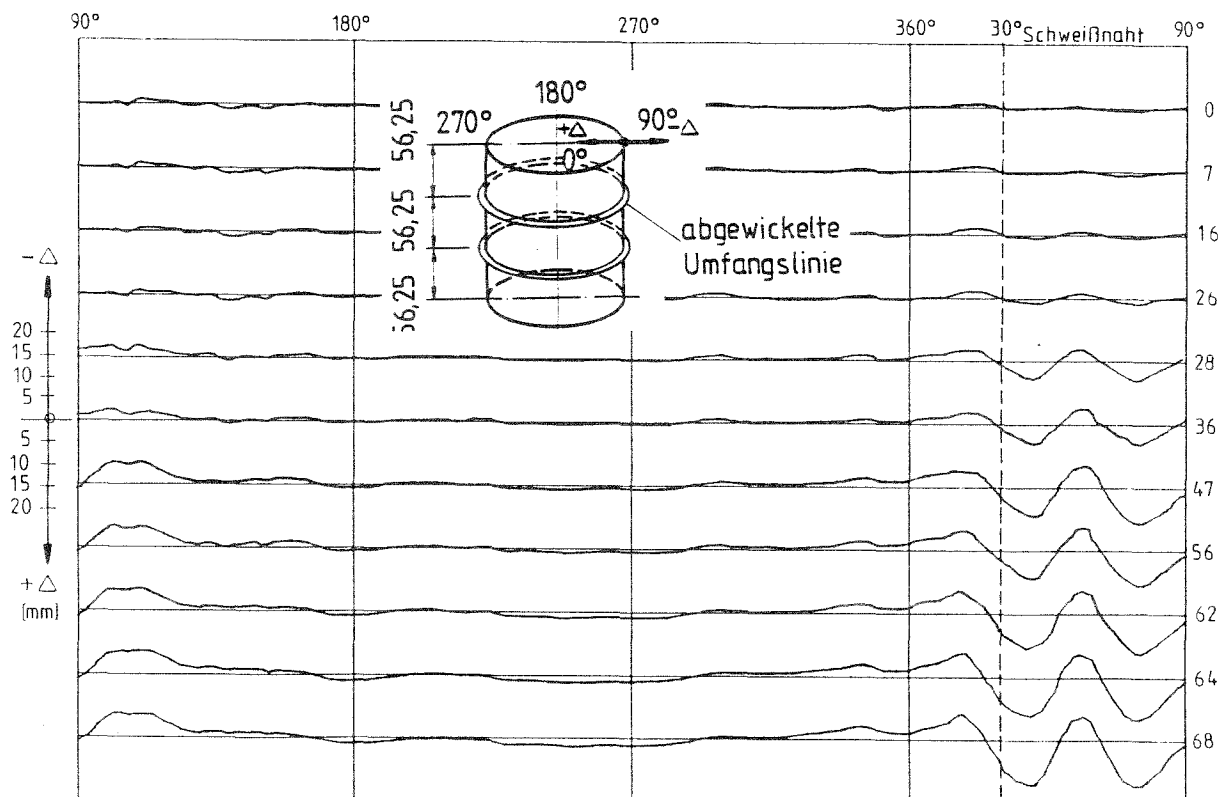
Entwicklung der radialen Beulverformungen

Anlage 23



Versuch RVK 9 (Umfangslinie 3)

Laststufe

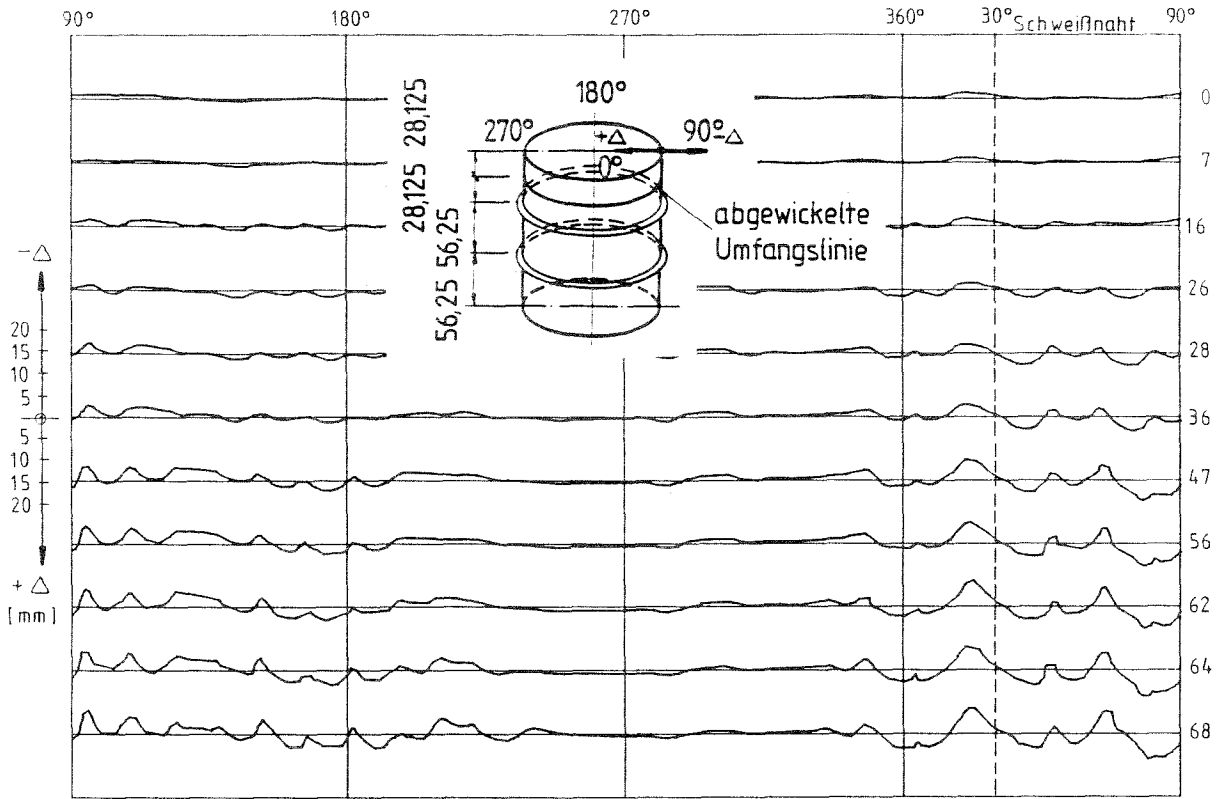


Versuch RVK 9 (Umfangslinie 4)

Laststufe

Entwicklung der radialen Beulverformungen

Anlage 24

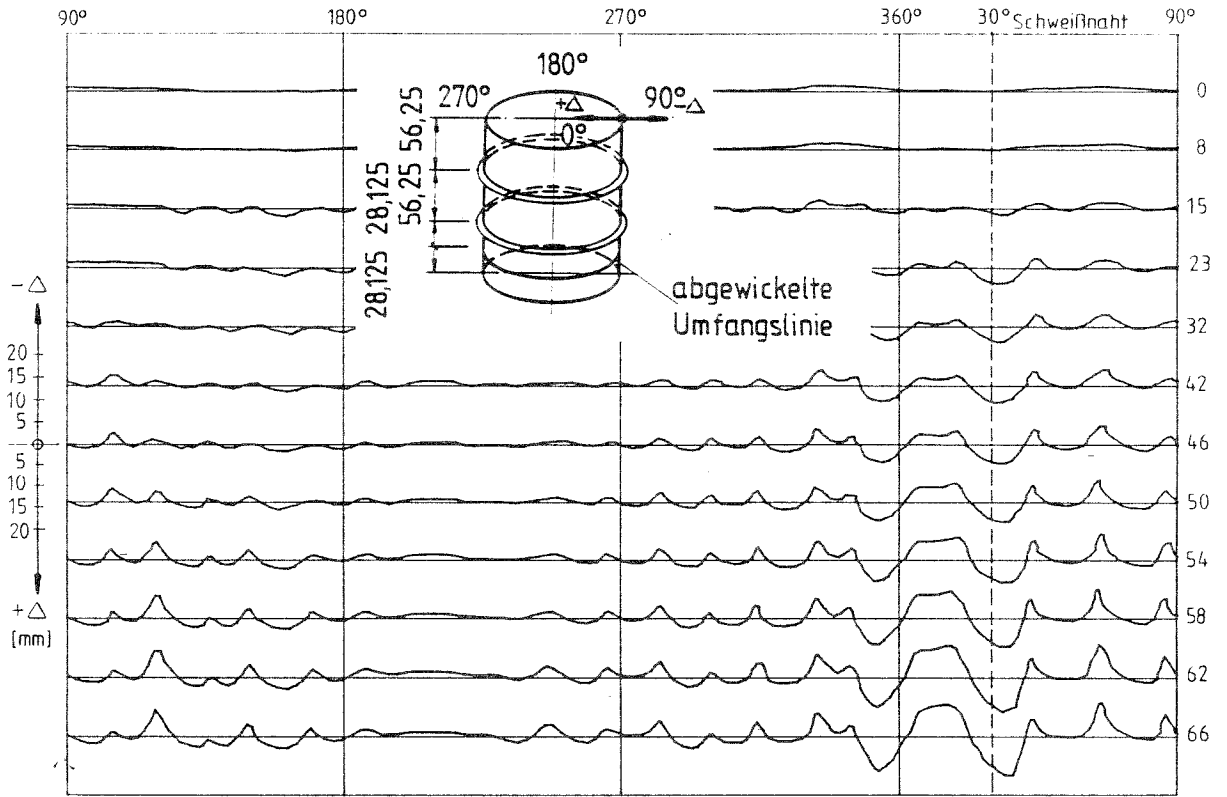


Versuch RVK 9 (Umfangslinie 5)

Laststufe

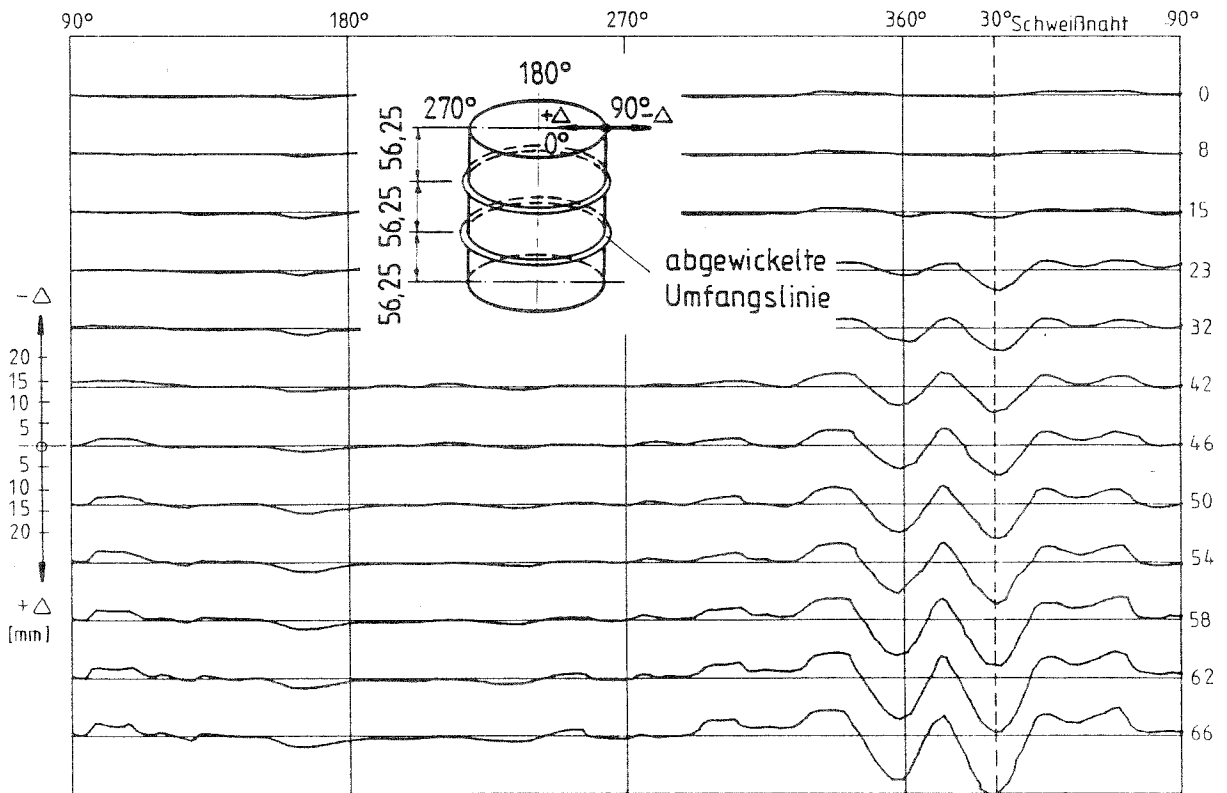
Entwicklung der radialen Beulverformungen

Anlage 25



Versuch RVK 10 (Umfangslinie 1)

Laststufe

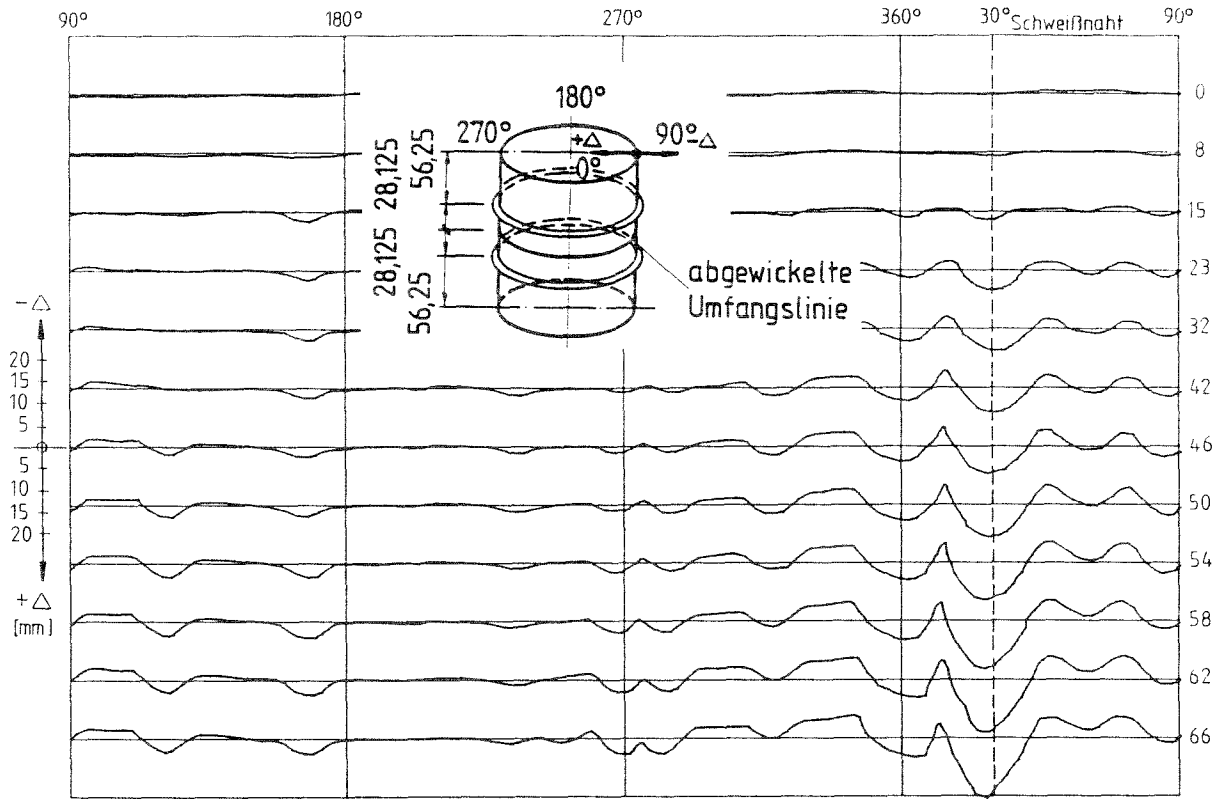


Versuch RVK 10 (Umfangslinie 2)

Laststufe

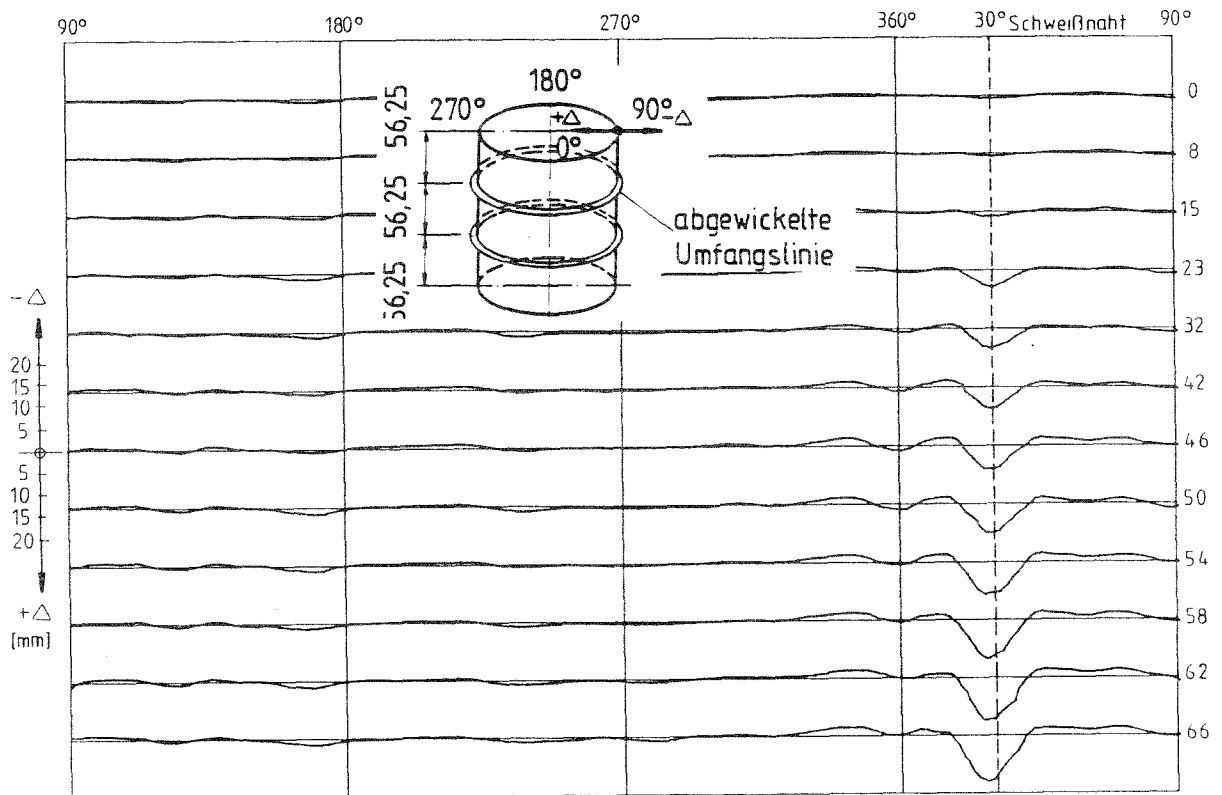
Entwicklung der radialen Beulverformungen

Anlage 26



Versuch RVK10 (Umfangslinie 3)

Laststufe

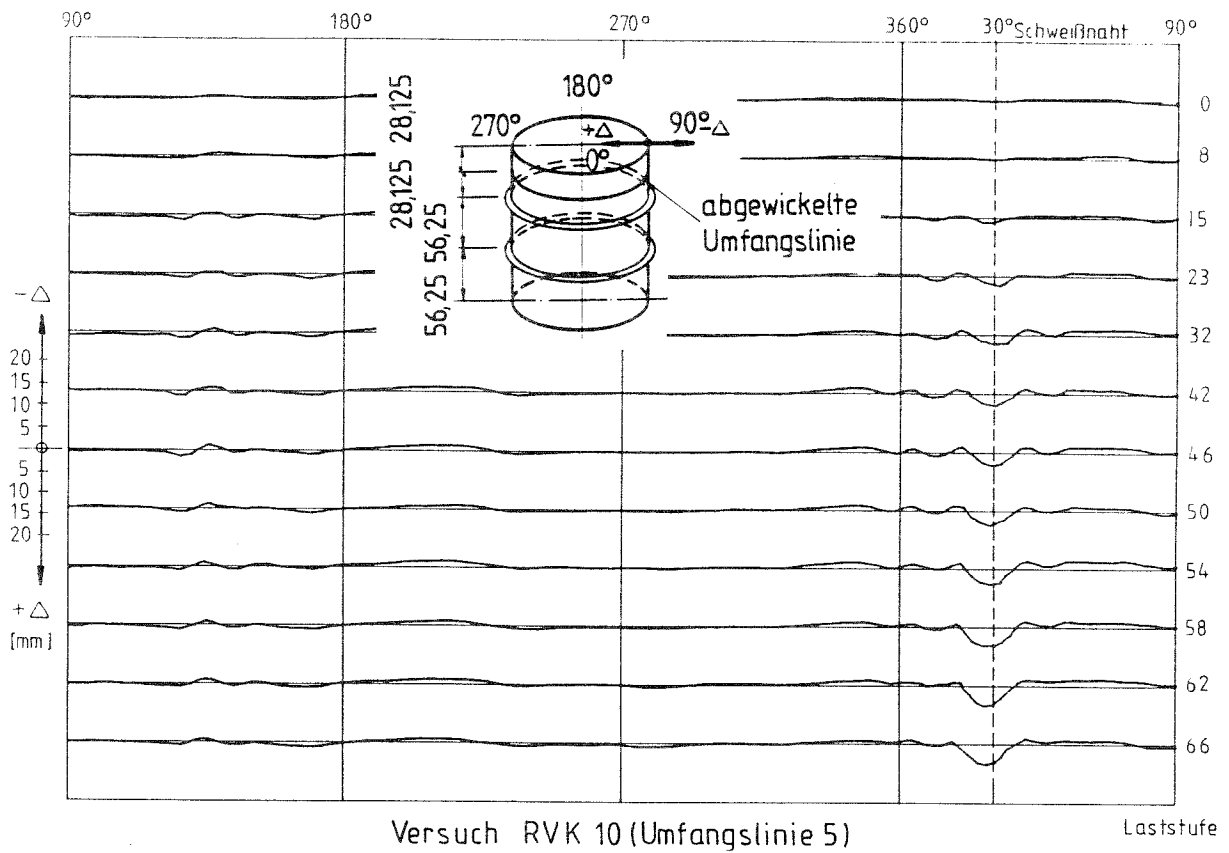


Versuch RVK10 (Umfangslinie 4)

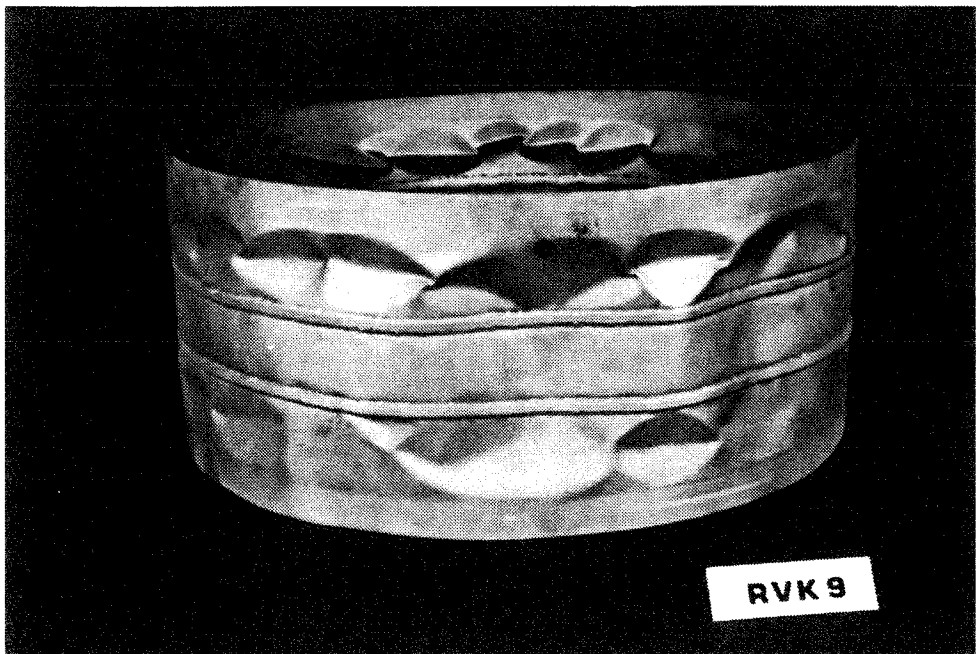
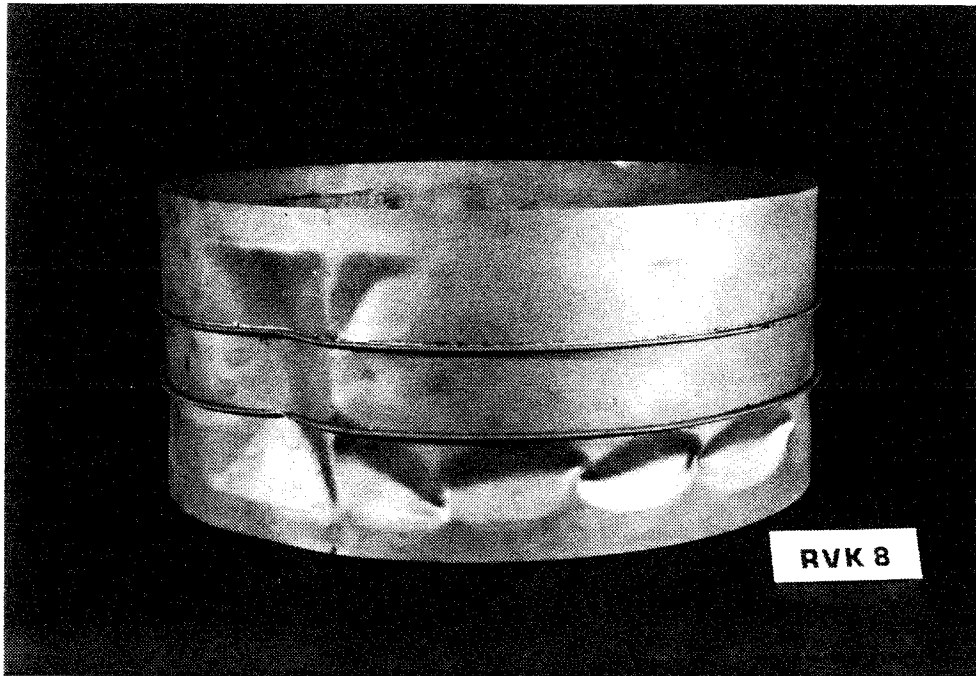
Laststufe

Entwicklung der radialen Beulverformungen

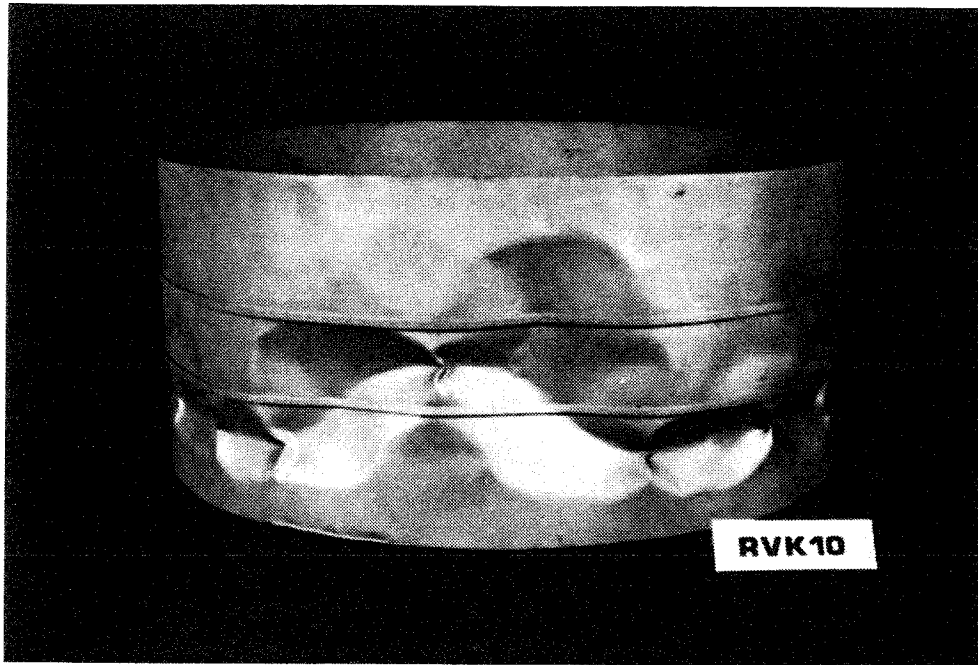
Anlage 27



Entwicklung der radialen Beulverformungen



Versuchskörper nach dem Versuch



Versuchskörper nach dem Versuch