

Zusammengesetzte Rotationsschalen
im Stahlbau, Behälterbau und
Anlagenbau aus der Sicht der
Stabilitätsbemessung

T 2665

T 2665

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

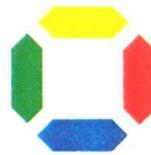
Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

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 100230-23

**ZUSAMMENGESetzte ROTATIONSSCHALEN
IM STAHLBAU, BEHÄLTERBAU
UND ANLAGENBAU
AUS DER SICHT DER
STABILITÄTsbEMESSUNG**

Schlußbericht
zum DIBt-Forschungsvorhaben
IV 1-5-720/93

Inhalt:

- 1 Einleitung
- 2 Pilotversuch
- 3 Programm für ein größeres Forschungsvorhaben
- 4 Zusammenfassung und Ausblick

Essen, 30.01.1995

Dieser Bericht hat 9 Seiten und 3 Blatt Anlagen

1 Einleitung

Für randgelagerte, einzelne Kreiszylinder- oder Kegelschalen (im weiteren auch "Elementarschalen" genannt) gibt es mit DIN 18800 Teil 4 [1] und den ECCS-Recommendations "Buckling of Steel Shells" [2] moderne Regelwerke, um den Beulsicherheitsnachweis sicher und wirtschaftlich zu führen. Es werden aber insbesondere im Behälter- und Anlagenbau eine Vielzahl schalenartiger Stahlkonstruktionen gebaut, die aus einzelnen kreiszylindrischen und konischen Schalenabschnitten zusammengesetzt sind. Bild 1 zeigt ein einfaches Beispiel.

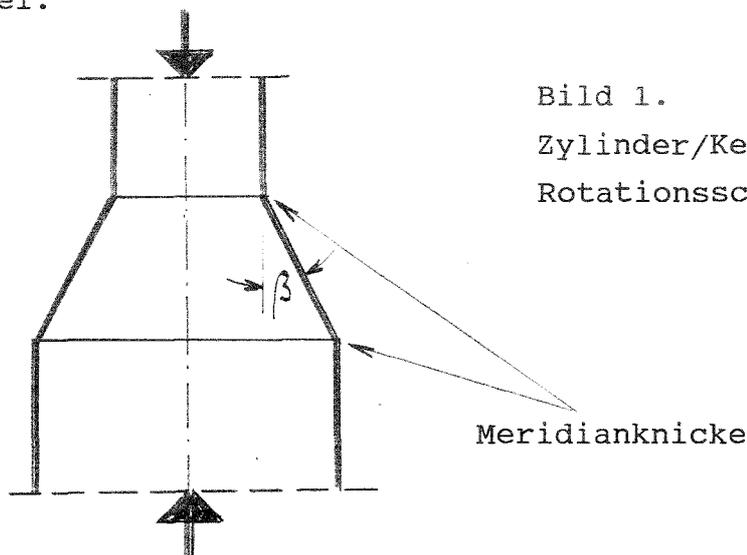


Bild 1.
Zylinder/Kegel/Zylinder-
Rotationsschale unter Axialdruck

Für derartige zusammengesetzte Rotationsschalen weist man in Ermangelung detaillierter Kenntnisse in der Regel die Beulsicherheit durch ingenieurmäßige, auf der sicheren Seite liegende Abschätzungen nach. Die beiden häufigsten Vorgehensweisen für eine solche Abschätzung sind:

(a) Es werden an den Meridianknicken zwischen kreiszylindrischen und konischen Schalenabschnitten Ringsteifen angeordnet, die ausreichend steif sind, um näherungsweise die radiale Unverschieblichkeit der Schalenwandung auf diesen Breitenkreisen zu gewährleisten. Die Schalenabschnitte werden dann wie voneinander unabhängige, randgelagerte Elementarschalen nach den genannten Regelwerken nachgewiesen.

(b) Mit einem leistungsfähigen Rechenprogramm (z.B. auf FE-Basis) wird für die komplette zusammengesetzte Schalenkonfiguration (ohne Ringsteifen) unter Annahme perfekter Schalengeometrie der ideale

Beulwiderstand berechnet, entweder als lineare Verzweigungslast oder - in der Regel erforderlich - mit elastisch nichtlinear berechnetem Vorbeulzustand als Verzweigungs- oder Durchschlagslast. Dieser ideale Beulwiderstand wird dann mit Hilfe von Imperfektions-Abminderungsfaktoren reduziert, um mit dem so erhaltenen "realen Beulwiderstand" den Beulsicherheitsnachweis führen zu können.

Es liegt nahe, als Abminderungsfaktoren bei der Vorgehensweise (b) die für die Elementarschalen in den obengenannten Regelwerken genormten α - bzw. α -Faktoren zu verwenden. Das ist aber unter Umständen überkonservativ (und deshalb unwirtschaftlich), weil sich einerseits in vielen Fällen (u.a. auch für das in Bild 1 gezeigte Beispiel) bereits der ideale Beulwiderstand der perfekten zusammengesetzten Rotationsschale theoretisch viel kleiner ergibt als der ideale Elementarbeulwiderstand der randgelagert gedachten Einzelschalen, andererseits dieser ideale Beulwiderstand aber in der baupraktisch realen, d.h. imperfektionsbehafteten, zusammengesetzten Schale nur noch wenig weiter abfällt. Die nochmalige Reduktion des bereits "heruntergerechneten" idealen Beulwiderstandes mit Hilfe eines an Elementarschalen kalibrierten Imperfektionsfaktors würde also auf einen unzutreffend niedrigen realen Beulwiderstand führen.

Würde man - als Konsequenz aus der vorgennanten Überlegung - allerdings auf den Gedanken kommen, auf eine Imperfektionsabminderung des nichtlinear berechneten idealen Beulwiderstandes ganz zu verzichten, so wäre das wahrscheinlich zu günstig und müßte aus Sicherheitsgründen abgelehnt werden. Auf diese Problemstellung wurde auch von anderer Seite bereits hingewiesen [3].

Hier besteht offenbar ein erheblicher Forschungsbedarf, um für zusammengesetzte Rotationsschalen zu einem ähnlich ausgereiften Konzept für den baupraktischen Beulsicherheitsnachweis zu gelangen, wie es für Elementarschalen in den genannten Regelwerken heute vorliegt. Derzeit läuft an der Universität Essen im Rahmen eines größeren EU-geförderten Gemeinschafts-Forschungspakets (mit fünf anderen europäischen Hochschulen zusammen) ein in diese Richtung zielendes Forschungsvorhaben. Aufgabe des im vorliegen-

den Bericht beschriebenen Kleinvorhabens war es, das Programm für das Hauptvorhaben zu definieren.

2 Pilotversuch

1993 wurde ein Pilotversuch an einem Versuchskörper durchgeführt, der dem in Bild 1 gezeigten Beispiel entsprach. Seine Abmessungen gehen aus Anlage 1 hervor. Er war aus 1 mm-Stahlblech durch Walzen und WIG-Schweißen (ohne Schweißzusatzwerkstoff) hergestellt worden. Als besonders problematisch bei dem dünnen Blechmaterial hatten sich dabei die Ringschweißnähte an den Meridianknicken herausgestellt. Nach einigen Fehlversuchen war es schließlich gelungen, mit Hilfe aufwendig gefertigter Kupfermatrizen, die aus drei Kreissegmenten bestehen und von innen gegen den zu schweißenden Meridianknick verspannt werden, befriedigende Schweißnahtqualitäten zu erzielen. Das entwickelte Schweißverfahren hat sich inzwischen bei Versuchskörpern aus noch dünnerem Blech (0,5 mm) bewährt, die für das Hauptvorhaben unabdingbar sind (siehe Abschnitt 3).

Einzelheiten über Werkstoff- und Imperfektionseigenschaften des Pilotversuchskörpers und über die Versuchsdurchführung werden im Abschlußbericht des Hauptvorhabens enthalten sein (für 1996 vorgesehen). Über den Pilotversuch wurde bereits kurz beim EURO-MECH-Colloquium 317 über "Buckling Strength of Imperfection-Sensitive Shells" in Liverpool vom 21. ÷ 23.03.94 berichtet [4].

Anlage 1 zeigt die im Versuch aufgenommene Axiallast-Verkürzungskurve im Vergleich mit verschiedenen rechnerischen Ergebnissen; Anlage 2 enthält Fotos des Pilotversuchskörpers nach dem Versuch. Aus dem Vergleich zwischen Versuch und Rechnung lassen sich - ohne hier auf rechnerische Einzelheiten einzugehen - folgende Erkenntnisse ablesen:

- In diesem speziellen Beispiel beträgt der nichtlinear berechnete ideale Beulwiderstand $R_{CR,nl}$ der Gesamtschale in der Tat nur 33 % des idealen Beulwiderstandes $R_{CR,c1}$ der randgelagert gedachten, klassischen Elementar-Kegelschale.
- Berechnet man den realen Beulwiderstand R_K allein aus der Elementar-Kegelschale, so liegt man weit auf der unsicheren Seite.

- Berechnet man den realen Beulwiderstand R_k aus dem nichtlinearen idealen Beulwiderstand gänzlich ohne Imperfektionsabminderung ($\alpha = 1$), so liegt man immer noch weit auf der unsicheren Seite.
- Reduziert man dagegen den nichtlinearen idealen Beulwiderstand mit dem vollen Imperfektionsfaktor der Elementarschalen ($\alpha = \alpha_0$), so erhält man einen konservativen realen Beulwiderstand R_k .
- Ein zwischen $\alpha = 1$ und $\alpha = \alpha_0$ liegender Imperfektionsfaktor (hier mit $\alpha = 0,2 + 0,8\alpha_0$) würde einen zutreffenden realen Beulwiderstand R_k liefern.
- Die "genaue", d.h. geometrisch und physikalisch nichtlineare, numerische Vergleichsrechnung unterschätzt in diesem speziellen Beispiel, obwohl an der geometrisch perfekten Struktur durchgeführt (!), die im Versuch erzielte Beultraglast. Da dies mechanisch nicht plausibel ist, werden die Ursachen für diese Diskrepanz von uns derzeit gesucht. Vermutlich liegen sie - wie in solchen Fällen häufig - in der rechnerisch zugrundegelegten idealelastisch-idealplastischen Spannungsdehnungslinie mit E und f_y aus dem genormtem Zugversuch. Zu den nicht erfaßten werkstofflichen Imperfektionen gehören der Unterschied zwischen Druck- und Zug-Spannungsdehnungslinien, die Werkstoffverfestigung und die allgemeine Inhomogenität aller Eigenschaften. Über die derzeit laufenden Untersuchungen hierzu (u.a. "Benchmark"-Testrechnungen befreundeter Institute) wird ebenfalls im Abschlußbericht des Hauptvorhabens berichtet werden. Es wird aber bereits hier die Problematik "genauer" numerischer Traglastberechnungen deutlich, da die Diskrepanz natürlich auch auf der unsicheren Seite liegen könnte.

Der Pilotversuch lieferte aus der Sicht der vorliegenden Programmdefinitionsstudie folgende Schlußfolgerungen:

- (a) Der in der Einleitung konstatierte Forschungsbedarf besteht tatsächlich.
- (b) Es ist möglich, zusammengesetzte geschweißte Schalen-Versuchskörper in der notwendigen Dünnwandigkeit herzustellen.
- (c) Die Eingangswerte für die numerischen Vergleichsrechnungen müssen sehr sorgfältig bestimmt werden.

3 Programm für ein größeres Forschungsvorhaben

Es war ursprünglich vorgesehen (vgl. Antrag zum vorliegenden Kleinvorhaben), bei ausgewählten Firmen eine Umfrage über baupraktisch vorkommende Formen zusammengesetzter Rotationsschalen durchzuführen. Auf der Grundlage der Umfrageergebnisse sollte das Untersuchungsprogramm des Hauptforschungsvorhabens entwickelt werden. Hiervon wurde jedoch nach mehreren unbefriedigenden Anläufen Abstand genommen.

Das Versuchsprogramm des jetzt laufenden Hauptvorhabens ist in Anlage 3 zusammengestellt. Ihm liegen folgende systematischen Überlegungen zu den Parametern zugrunde:

Einwirkungen

Von den drei beulrelevanten Membranschnittgrößen

- Meridiandruckkraft,
- Umfangsdruckkraft,
- Schubkraft

ist die letztere weniger wichtig, da Rohr-Torsionsmomente selten vorkommen und Rohr-Querkräfte von der Größenordnung her meist nicht bemessungsbestimmend sind. Dagegen sind beide Membrandruckkräfte wichtig und müssen - weil völlig unterschiedliches Schalenbeulverhalten hervorrufend - beide erfaßt werden. Das Untersuchungsprogramm ist deshalb dual aufgebaut und sieht für jede Schalenengeometrie die beiden Einwirkungsfälle

- zentrische Axiallast,
- allseitiger konstanter Außendruck

vor.

Meridianknicke

Bei axialbelasteten zusammengesetzten Rotationsschalen ist die beulmechanische Ursache für den starken Abfall des idealen Beulwiderstandes gegenüber den idealen Elementarbeulwiderständen der Einzelschalen das Auftreten von Störschnittgrößen im Bereich der Meridianknicke. Das sind in erster Linie Umfangsmembrankräfte und Meridianbiegemomente. Beide hängen vom Knickwinkel, d.h. vom halben Kegelöffnungswinkel β ab (Bild 1). Dieser liegt häufig in der

Größenordnung von 20° und ist selten größer als 30° . Daraus folgt der für das Versuchsprogramm gewählte

- halbe Kegelöffnungswinkel $\beta = 20^\circ$.

Die numerischen Untersuchungen sollen den gesamten Bereich von 0° bis 30° abdecken und werden also bei 20° experimentell abgestützt.

Meridiandruckkräfte verursachen an konvexen Meridianknicken Umfangszugkräfte, an konkaven Meridianknicken dagegen Umfangsdruckkräfte. Beide Formen müssen also in den Untersuchungen enthalten sein. Ferner sind die Umfangskräfte bei zwei zusammentreffenden Kegelstümpfen größer als an einem Zylinder/Kegel-Knick. Daraus folgt, daß die vier Meridianknicktypen

- Kegel/Kegel - konvex,
- Kegel/Kegel - konkav,
- Zylinder/Kegel - konvex,
- Zylinder/Kegel - konkav

erfaßt werden müssen.

Bei **außendruckbelasteten** zusammengesetzten Rotationsschalen wirken sich die Meridianknicke beulmechanisch ganz anders aus (kann hier nicht vertieft werden). Wegen der weiter oben erläuterten Dualität des Versuchsprogramms wurden aber die Versuchskörper für die Außendruckbeulversuche identisch mit denen für die Axialdruckbeulversuche ausgelegt.

Schalenformen

Die beiden Kegel/Kegel-Meridianknicktypen sind folgerichtig mit je einer Schalenform, die aus zwei Einzelschalen zusammengesetzt ist, vertreten (vgl. Anlage 3):

- KK-X (Kegel/Kegel - konvex),
- KK-V (Kegel/Kegel - konkav).

Die Zylinder/Kegel-Meridianknicktypen sind in Form von Dreifach-Kombinationen (drei zusammengesetzte Einzelschalen) realisiert worden, um für jeden der beiden Knicktypen zusätzlich auch den Einfluß der abliegenden Einzelschalen-Randbedingungen überprüfen zu können. In den vier Schalenformen (vgl. Anlage 3)

- ZKZ-XV (Zylinder/Kegel/Zylinder - konvex/konkav),
- KZK-XX (Kegel/Zylinder/Kegel - konvex/konvex),
- KZK-VX (Kegel/Zylinder/Kegel - konkav/konvex),
- KZK-VV (Kegel/Zylinder/Kegel - konkav/konkav)

kommt jeder der beiden Knicktypen insgesamt viermal vor, davon dreimal mit unterschiedlichen Randbedingungen an den abliegenden Einzelschalenrändern.

Schalenabmessungen

Jede der sechs Schalenformen ist mit einer Abmessungsvariante vertreten. Es kommen drei Einzelschalen-Randdurchmesser vor, von denen der größte mit Rücksicht auf den lichten Säulenabstand der zur Verfügung stehenden servogeregelten Prüfmaschine $d = 450$ mm be-trägt. Der mittlere Durchmesser ($d = 304$ mm) und der kleine Durch-messer ($d = 159$ mm, kommt nur einmal vor) folgen aus der Vorgabe, daß die konischen Schalenabschnitte ausreichend lang sein müssen, um eindeutig als "mittellange" Elementar-Kegelschalen eingestuft werden zu können. Genaue Systemmaße der Schalen siehe Anlage 3.

Schalenwanddicke

Zusammengesetzte Rotationsschalen ohne Ringsteifen an den Meri-dianknicken (wie hier betrachtet) spielen baupraktisch nur für kleine und mittlere r/t -Verhältnisse eine Rolle. Da für kleine r/t -Verhältnisse (dickwandige Rohrkonstruktionen) Beulprobleme we-niger relevant sind, erschien es sinnvoll, beim geplanten For-schungsvorhaben vor allem rohrförmige Konstruktionen mit mittel-schlanken Wandungen (Schornsteine, Maste, Rohrleitungen u.s.w.) mit r/t -Verhältnissen von ca. $100 \div 500$ im Auge zu haben. Dement-sprechend wurden die beiden brücksichtigten Wanddicken mit

- $t = 0,5$ und $1,0$ mm

so festgelegt, daß sich für den größten vorhandenen Durchmesser Radius/Wanddicken-Verhältnisse von

- $r/t = 450$ und 225

ergeben.

Versuchsprogramm

Das in Anlage 3 dargestellte Versuchsprogramm enthält insgesamt 24 Versuche, davon je zwölf unter Axiallast und unter Außendruck. Für jeden der beiden Einwirkungsfälle sind die sechs Schalenformen je einmal mit $t = 0,5$ und $t = 1,0$ mm vertreten.

Numerische Vergleichsrechnungen

Ergänzend zu den Beulversuchen sind umfangreiche numerische Vergleichsrechnungen vorgesehen, auf die hier nicht eingegangen werden kann. Ziel ist, mit einem an den Versuchen kalibrierten numerischen Berechnungsmodell Parameter-Serienrechnungen durchzuführen, um zu dem angestrebten Ingenieurkonzept für den Beulsicherheitsnachweis zusammengesetzter Rotationsschalen zu gelangen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der hier beschriebenen Studie wurde die Grundlage für eine größere Forschungsinitiative erarbeitet. Aufbauend auf baupraktischen Überlegungen und auf einem Pilotversuch, wurde ein systematisches Untersuchungsprogramm aufgestellt. Es besteht aus 24 Beulversuchen an geschweißten Stahlblechmodellen, jedes zusammengesetzt aus zwei oder drei kreiszylindrischen und konischen Schalenabschnitten, sowie zugehörigen numerischen Vergleichsrechnungen. Das Forschungsvorhaben läuft inzwischen mit finanzieller Unterstützung aus EU-Mitteln; es wird 1996 abgeschlossen sein.

Von den Ergebnissen des Forschungsvorhabens wird erwartet, daß mit ihrer Hilfe für den Beulsicherheitsnachweis zusammengesetzter Rotationsschalen ein verbessertes baupraktisches Konzept erarbeitet werden kann.

Literatur

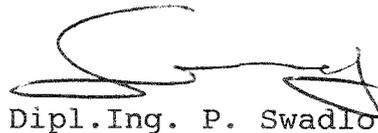
- [1] DIN 18800 Teil 4 (11/90): Stahlbauten - Stabilitätsfälle, Schalenbeulen.
Berlin: Beuth-Verlag 1990.
- [2] European Recommendations: Buckling of Steel Shells (4th edition).
Brüssel: ECCS 1988.

- [3] KNÖDEL, P.: Cylinder-Cone-Cylinder Intersections under Axial Compression.
In: Jullien (ed.): Buckling of Shell Structures on Land, in the Sea and in the Air; S. 296 - 303.
London/New York: Elsevier 1991.
- [4] SCHMIDT, H./Swadlo, P.: Buckling Strength Prediction for Axially Compressed Shells of Revolution with Broken Meridional Shapes by Means of an Imperfection Reduction Factor Approach. EUROMECH Colloquium 317, University of Liverpool, 1994.
- [5] SCHMIDT, H./KRYSIK, R.: Static Strength of Transition Cones in Tubular Members under Axial Compression and Internal Pressure. In: Grundy/Holgate/Wong (eds.): Tubular Structures VI; S. 163 - 166.
Rotterdam/Brookfield: Balkema 1994.

Bearbeiter:



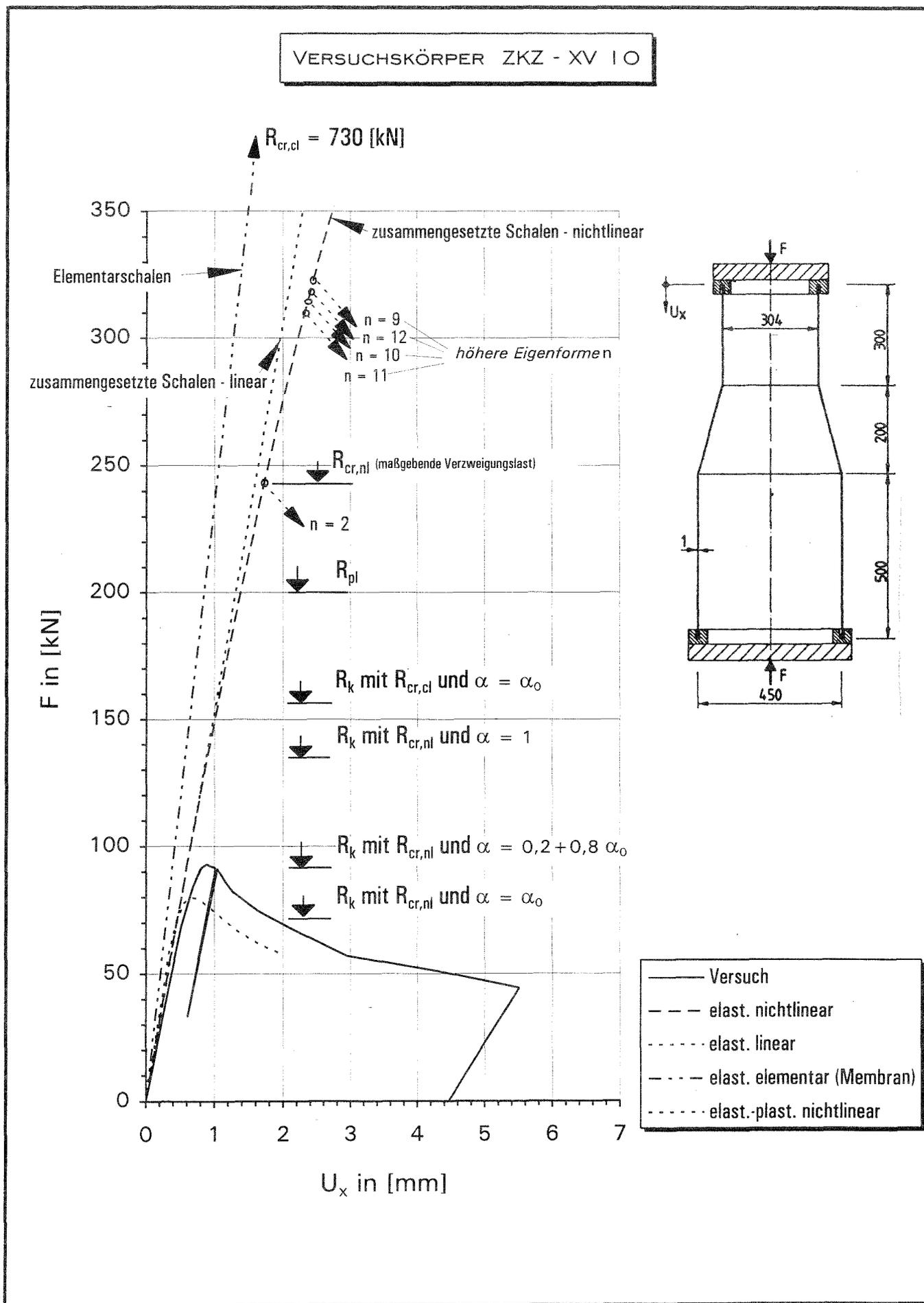
Prof.Dr.Ing. H. Schmidt



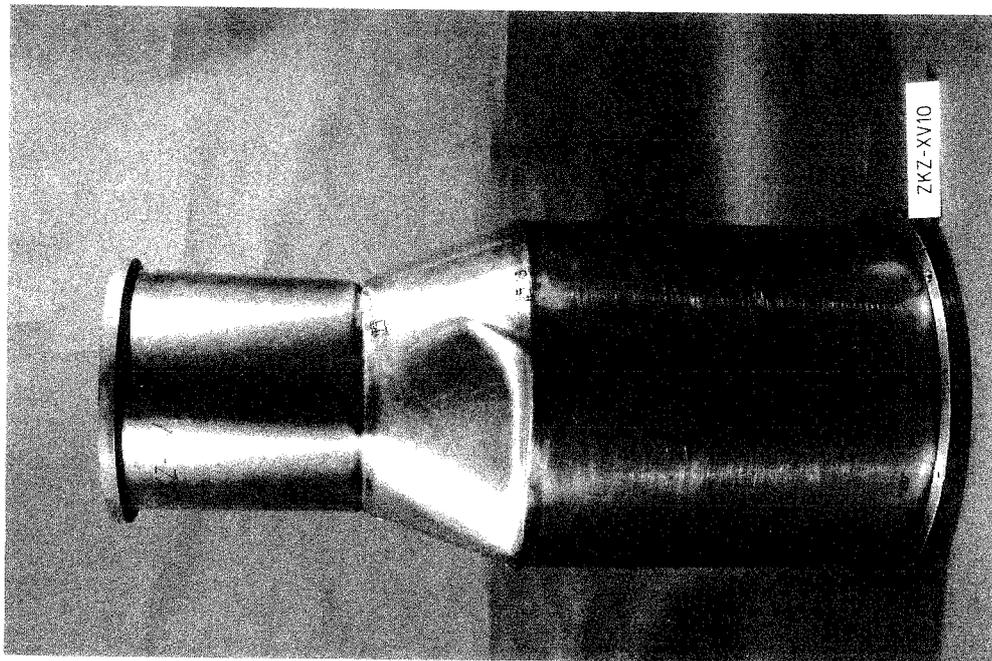
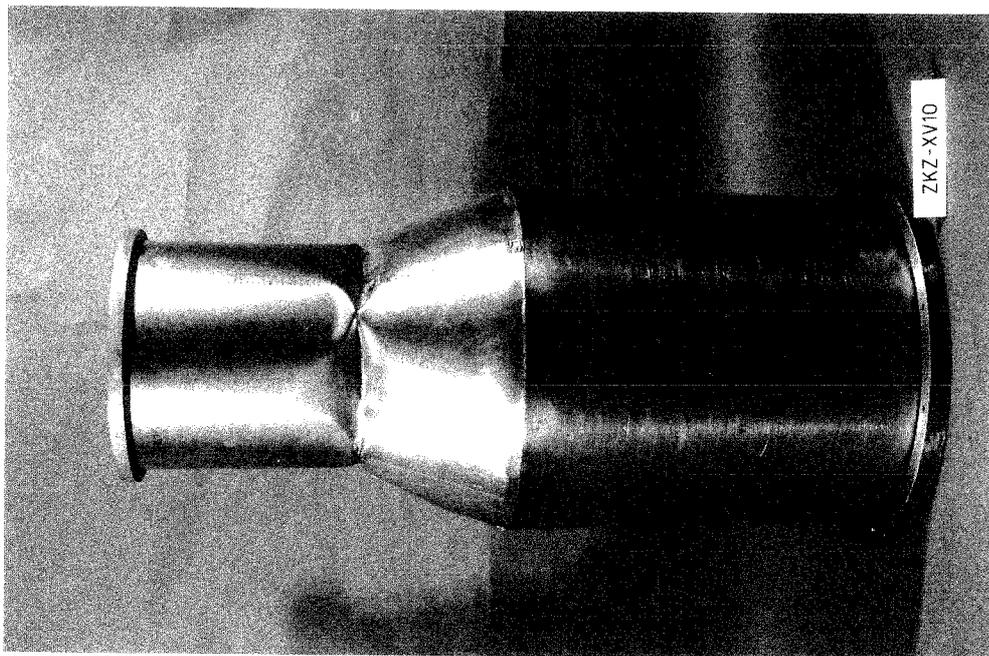
Dipl.Ing. P. Swadlo

Anlagen

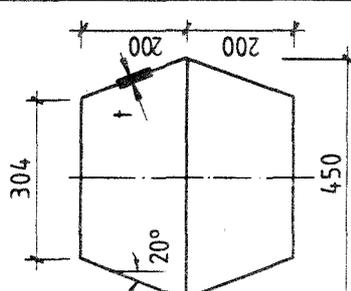
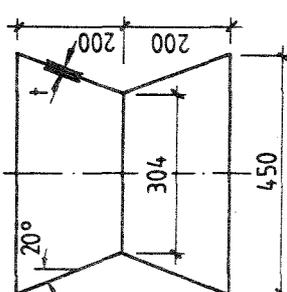
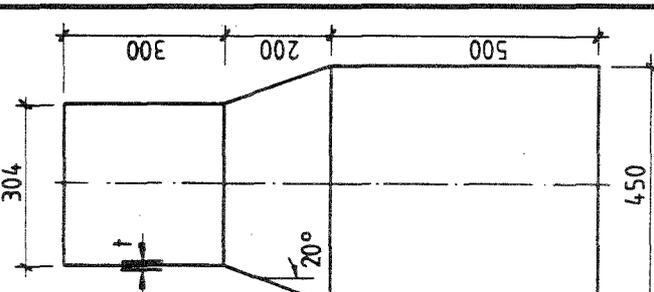
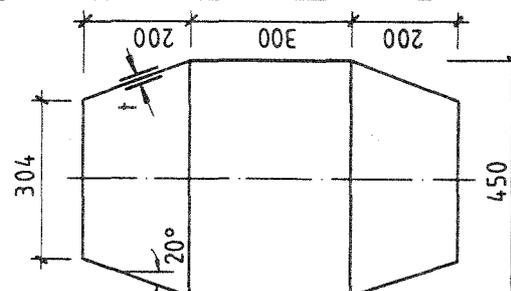
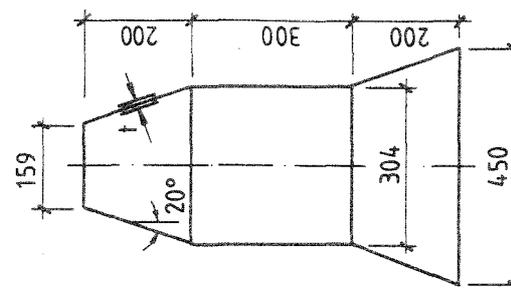
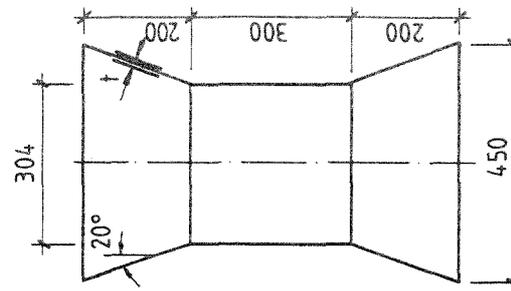
- 1 Last-Verkürzung-Kurve des Pilotversuchs ZKZ-XV 10
- 2 Fotos des Pilotversuchskörpers ZKZ-XV 10 nach dem Beul-Traglastversuch
- 3 Versuchsprogramm für Forschungsvorhaben ECSC No. 7210/SA/208-Subproject C



Last-Verkürzung-Kurve des Pilotversuchs ZKZ - XV 10



Pilotversuchskörper ZKZ - XV 10 nach dem Beul-Traglastversuch

Meridianknick Konus/Konus		Meridianknick Zylinder/Konus			
Konus-Konus konvex	Konus-Konus konkav	Zylinder-Konus-Zylinder		Konus-Zylinder-Konus	
		konvex - konkav	konvex - konvex	konkav - konvex	konkav - konkav
					
KK - X 10	KK - V 10	ZKZ - XV 10	KZK - XX 10	KZK - VX 10	KZK - VV 10
KK - X 50	KK - V 50	ZKZ - XV 50	KZK - XX 50	KZK - VX 50	KZK - VV 50
KK - X 11	KK - V 11	ZKZ - XV 11	KZK - XX 11	KZK - VX 11	KZK - VV 11
KK - X 51	KK - V 51	ZKZ - XV 51	KZK - XX 51	KZK - VX 51	KZK - VV 51
Grunddicke t in [mm]		1,0	0,5	1,0	0,5
Einwirkungsfall		Axial druck		Außen druck	