

Weitgespannte Flächentragwerke



S. Greiner

Membrantragwerke aus dünnem Blech

Werner-Verlag · Düsseldorf

Membrantragwerke aus dünnem Blech

Thin Sheet Metal Membrane Structures

Dr.-Ing. Switbert Greiner

Aus den Arbeiten des Instituts für Massivbau
Prof. Dr.-Ing. Jörg Schlaich

1. Auflage 1983

Werner-Verlag · Düsseldorf

1. Auflage 1983

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Greiner, Switbert:

Membrantragwerke aus dünnem Blech = Thin sheet metal membrane structures / Switbert Greiner. –

1. Aufl. – Düsseldorf : Werner, 1983.

(Weitgespannte Flächentragwerke ; 64 : Aus d. Arbeiten d. Inst. für Massivbau)

ISBN 3-8041-1755-4

NE: GT

ISBN 3-8041-1755-4

Diese Schrift (mit Ausnahme des Anhanges) wurde unter gleichem Titel dem Promotionsprüfungsausschuß der Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart am 2. April 1982 als Doktorarbeit zur Erlangung des Grades Doktor-Ingenieur vorgelegt. Die mündliche Prüfung fand am 6. Dezember 1982 statt.

Hauptberichter: Professor Dr.-Ing. J. Schlaich

Mitberichter: Professor Dr.-Ing. Frei Otto



© Werner-Verlag GmbH · Düsseldorf · 1983

Printed in Germany

Alle Rechte, auch das der Übersetzung, vorbehalten.

Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es auch nicht gestattet, dieses Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Wege (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

Zahlenangaben ohne Gewähr

Offsetdruck: Weiß & Zimmer AG, Mönchengladbach

Archiv-Nr. 251 – 6.83

Bestell-Nr.: 17554

Vorwort

Für Membranbauten verwendet man heute als Membranwerkstoff meist textile Materialien mit oder auch ohne Kunststoffbeschichtung. Diese haben den Vorteil, daß sie sich bei der Konfektionierung und Montage leicht hantieren lassen, daß sie durch Nähen und Schweißen einfach gefügt werden können und daß sie im fertigen Zustand lichtdurchlässig sind. Dem steht entgegen, daß textile Membranen meist eine recht kurze Lebensdauer haben.

Eine andere Möglichkeit zum Herstellen von membranartigen Flächentragwerken ist durch die Seilnetzbauweise gegeben. Sie hat den Vorteil, daß die tragende Funktion dauerhaften Stahlseilen zugewiesen werden kann, aber den Nachteil, daß der Raumabschluß mit zusätzlichem nichttragendem Material bewerkstelligt werden muß. Für Seilnetze mit freien Flächenformen kommen aus herstellungstechnischen Gründen fast nur zweischarige Netze in Frage. Sie haben ein ungünstiges, d. h. nicht der Membranschale entsprechendes, Tragverhalten. Dreischarige Netze dagegen, die diese Forderung erfüllen, lassen nur sehr regelmäßige Flächen zu.

Daher kommt es, daß man immer wieder versuchte, dünnes Metallblech als Membranwerkstoff zu verwenden, der dauerhaft ist und gleichzeitig die tragende und raumabschließende Funktion übernimmt. Dabei tauchen aber ganz neue Fragen auf, weshalb die Membranbauweise unter Verwendung von dünnem Blech bisher auf ganz wenige Ausführungen beschränkt blieb. Dies sind vor allem die beiden fertigungstechnischen Fragen: Herstellen von doppelt gekrümmten Flächen aus ebenen Blechen und Fügen dieser Bleche unter Baustellenbedingungen.

Ich bin sicher, daß der Leser der vorliegenden Arbeit schnell erkennt, daß mit ihr diese Frage weitgehend beantwortet wurde und daß mit ihr ein wichtiger Schritt hin zur praktischen Verwirklichung dieser Bauweise getan wurde. Sie enthält einen in dieser Vollständigkeit wohl einmaligen geschichtlichen Überblick, behandelt die wichtigsten Werkstofffragen einschließlich der Verbindungen dünner Bleche, liefert nachvollziehbare rechnerische Ansätze und beschäftigt sich vor allem mit dem Problem der Formgebung mit Hilfe des „formgebenden Lastfalls“. Sein Grundgedanke besteht darin, die Membran zunächst aus verschweißten Blechbändern eben herzustellen, sie mit ihrer Randkonstruktion zu verbinden und sie dann durch eine gezielte Folge von mechanisch oder pneumatisch/hydraulisch aufgebrachten Lasten über plastische Verformungen in die gewünschte zweiseitig positiv oder negativ gekrümmte Form zu bringen. Danach wird die formgebende Belastung auf das Niveau abgesenkt, das ausreicht, um das Membrantragwerk unter den äußeren Beanspruchungen zu stabilisieren.

Der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft an der Universität Stuttgart 1970 eingerichtete Sonderforschungsbereich 64 „Weitgespannte Flächentragwerke“ bot die ideale Voraussetzung, Themen dieser Art in breiter Form zu ergründen. Ich bedanke mich bei der DFG und ihren Gutachtern für ihr Interesse und ihr Wohlwollen und bei Herrn Dipl.-Ing. Gabriel als dem Leiter der SFB-Gruppe „Konstruktiver Ingenieurbau“ am Institut für Massivbau.

Anregungen, Kritik und Berichte über eigene Erfahrungen mit Membrantragwerken von Lesern und Benutzern dieses Berichtes sind sehr willkommen.

Jörg Schlaich

Sonderforschungsbereich 64

Der Sonderforschungsbereich 64 (SFB 64) „Weitgespannte Flächentragwerke“ ist eine Einrichtung an der Universität Stuttgart und wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert. Am SFB 64 sind Institute der Fachrichtungen Architektur, Bauingenieurwesen, Geodäsie und Luft- und Raumfahrttechnik beteiligt. Seit 1970 werden in detaillierten Grundlagenuntersuchungen Probleme behandelt, die bei Planung, Ausführung und Nutzung von weitgespannten Flächentragwerken auftreten.

Der SFB 64 gliedert sich in die Projektbereiche

- A „Statik und Dynamik“:
Analytische, numerische und Modell-Statik und -Dynamik
(Argyris, Bornscheuer, Brinkmann, Müller)
- B „Entwurf“:
Architektonische und konstruktive Grundlagen, experimentelle Formfindung und Darstellung, Archiv und Begriffsbestimmung
(Burkhardt, Otto)
- D „Grundlagen der Gestaltung“:
Analyse und Bewertung von Konstruktionen aufgrund von Gestaltung und Nutzung
(Joedicke)
- E „Konstruktiver Ingenieurbau“:
Konstruktive Entwicklung von weitgespannten Flächentragwerken mit Materialforschung und Detailausbildung sowie den dazugehörigen Untersuchungen des Tragverhaltens
(Gabriel, Schlaich)
- F „Geodäsie“:
Nahbildphotogrammetrie, numerische Formfindung und Zuschnittsberechnung mit Methoden der Ausgleichsrechnung, Abbildungen, geodätische Messungen an Modellen und Bauwerken
(Linkwitz, Preuss)
- K „Materialforschung“:
Entwicklung von Prüfverfahren, Materialforschung an Seilen, Verankerungen, Folien und Geweben
(Rehm, Blum)

Der SFB 64 berichtet in einer Mitteilungsreihe aus allen Projektbereichen (Verzeichnis siehe letzte Seite). Herausgeber ist der Sprecher des SFB 64, Prof. Dr.-Ing. G. Brinkmann.

Redaktion und Vertrieb der im Selbstverlag erschienenen Mitteilungen:
Geschäftsstelle des SFB 64, 7000 Stuttgart 80, Pfaffenwaldring 4g, Tel. 07 11 / 685-27 08.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand an der Universität Stuttgart während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter im Sonderforschungsbereich 64 „Weitgespannte Flächentragwerke“. Sie stellt alle wesentlichen Arbeitsschritte und Ergebnisse des Forschungsprojektes „Metall-Membrantragwerke“ zusammenfassend dar.

Herrn Professor Dr.-Ing. J. Schlaich, dem Leiter des Projektbereiches „Konstruktiver Ingenieurbau“ im Sonderforschungsbereich 64, danke ich ganz besonders für die Anregung und Betreuung der Arbeit.

Herrn Professor Dr.-Ing. F. Otto danke ich für sein Interesse an der Arbeit und für die Übernahme des Korreferates.

Mein Dank gilt auch Herrn Professor G. Brinkmann, Herrn Dr. G. Werner und Herrn Dr. V. Hasek für die kritische Durchsicht des Manuskriptes.

Bei der Durchführung der Arbeit haben zahlreiche Personen und Institutionen mitgeholfen. Das Institut für Modellstatik gab umfassende Hilfestellung bei der Durchführung von Modellversuchen. Experimentelle Arbeiten an dem Prototyp eines Metall-Membrantragwerkes wurden am Otto-Graf-Institut durchgeführt. Das Institut für Umformtechnik gab Ratschläge und Hinweise auf dem Gebiet der Umformtechnik. Die Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt, Fellbach, unterstützte Schweißversuche, und die Fachhochschule für Druck ermöglichte mir das Setzen der Arbeit.

Ich danke allen beteiligten Personen für ihre Beiträge.

Stuttgart, im Mai 1982

Switbert Greiner

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen	3
1. Einleitung	5
1.1 Thema und Ausgangssituation	5
1.2 Darlegung der Ziele	5
2. Die zugbeanspruchte Membranschale aus dünnem Blech	7
2.1 Zu den Grundlagen der Membranbauweise	7
2.1.1 Allgemeines	7
2.1.2 Die biegeweiche, zugfeste Haut als tragendes Bauteil	7
2.1.3 Über metallische und nichtmetallische Membranbaustoffe	8
2.2 Die Entwicklung der Metall-Membranbauweise	9
2.3 Probleme bei der Verwendung von Blech	36
2.4 Methoden zur Realisierung der Membranfläche	36
2.4.1 Herstellen abwickelbarer Flächen	36
2.4.2 Zusammensetzen aus Zuschnittselementen	41
2.4.3 Blechstreifen als einachsig tragende Teile (Streifenmethoden)	41
2.4.4 Ein kanadisches Patent	41
2.4.5 Methode des formgebenden Lastfalles	41
3. Das durch eine formgebende Belastung aufgespannte Metall-Membrantragwerk	43
3.1 Der formgebende Lastfall	43
3.1.1 Grundgedanke und Vorgehensweise	43
3.1.2 Für den formgebenden Lastfall geeignete Bleche	43
3.1.3 Variationsbreite der Methode des formgebenden Lastfalles	45
3.2 Experimentelle Untersuchungen mit Folienmodellen	46
3.2.1 Prinzipmodelle	46
3.2.2 Modelltechnik zur Metall-Membranbauweise	55
3.2.2.1 Die Membran aus Metallfolie	55
3.2.2.2 Zur Ermittlung der Koordinaten von Flächenpunkten	55
3.2.2.3 Bestimmung der plastischen Dehnungen	55
3.2.3 Modellversuche zur Analyse des formgebenden Lastfalles	57
3.2.3.1 Die kugelkalottenförmige Membran	57
3.2.3.2 Stempelversuche	60
3.2.3.3 Sattelfläche mit Zugrändern	66
3.3 Zur rechnerischen Erfassung des formgebenden Lastfalles	70
3.3.1 Ziele und Problematik	70
3.3.2 Grundlegendes über das Stoffverhalten im plastischen Bereich	70
3.3.2.1 Voraussetzungen	70
3.3.2.2 Einachsiger Zugversuch und Fließkurve	71
3.3.2.3 Plastische Formänderungen unter zweiachsiger Zugbeanspruchung	71
3.3.2.4 Vergleichsspannung und Vergleichsformänderung im Verfestigungsbereich	73
3.3.2.5 Berücksichtigung der Anisotropie	75
3.3.2.6 Grenzformänderungen und plastische Instabilität	77

3.3.3 Rechenmodell für die Formgebung rotationssymmetrischer Metallmembranen	79
3.3.3.1 Statisches System und formgebende Belastung	79
3.3.3.2 Rechenverfahren	79
3.3.3.3 Ergebnisse	82
3.3.3.4 Überlegungen zur Geometrie des Meridians	86
3.3.4 Ergebnisse nach dem Differenzenverfahren und der Methode der finiten Elemente	87
4. Zusammenfassung – Summary	95
5. Literaturverzeichnis	97
6. Anhang – Blech als Membranbaustoff	107
6.1 Das Halbzeug Blech	107
6.1.1 Allgemeines	107
6.1.2 Zur Werkstoffstruktur	107
6.1.3 Überblick über wichtige Sorten	113
6.1.3.1 Bleche und Bänder aus Stahl	113
6.1.3.2 Bleche und Bänder aus Aluminium	113
6.1.4 Oberflächenveredlung	116
6.2 Blechumformung	116
6.2.1 Verfahren zum Zugumformen von Blech	116
6.2.2 Geometrie der Umformung am Blechelement	116
6.2.3 Zu den Vorgängen bei der Kaltumformung von Blech	119
6.2.4 Einfluß der Anisotropie auf das Umformverhalten	119
6.2.5 Beurteilung der Umformeignung	119
6.3 Über Blechprüfverfahren	124
6.3.1 Blechdicke und Mikrogeometrie der Blechoberfläche	124
6.3.2 Festigkeitseigenschaften und Umformeignung	124

Abkürzungen und Formelzeichen

A	Querschnittsfläche
a, b	Längen
A, B, C, D	Konstante
D	Plastizitätsmodul
E	Tensor der Formänderungen
\dot{E}'	Deviator der Formänderungsgeschwindigkeiten
E''	Kugeltensor der Formänderungen
F	Kraft
F, G, H	Parameter der plastischen Orthotropie
g, f	Funktionen
k_f	Fließspannung
l	Länge
n_1, n_2	bezogene Hauptnormalkräfte
P	Einzellast
p	Flächenlast
R	Anisotropieparameter
R_1, R_2	Hauptnormalkrümmungsradien
r	Radialkoordinate
S	Spannungstensor
S'	Spannungsdeviator
s	Blechdicke
t	Zeit
α	Winkel
ε	Dehnung, bezogen auf ursprüngliche Länge
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	Hauptdehnungen
λ	Faktor
v	Querkontraktionszahl
σ	Spannung
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Koordinatenspannungen
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Hauptspannungen
σ_v	Vergleichsspannung
φ	logarithmische Dehnung, Umformgrad
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$	Hauptdehnungen

1. Einleitung

1.1 Thema und Ausgangssituation

Membrantragwerke sind vor allem als Zelte seit Menschengedenken im Gebrauch. Verwendet man statt der herkömmlichen textilen Haut dünne Bleche, so entsteht eine eigenständige Tragwerksart. Derartige, ausschließlich auf *Zug* beanspruchte Membrankonstruktionen aus Blech geringer Dicke (0,3mm bis etwa 3mm) sind Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Sie verbinden die Leichtigkeit und Formenvielfalt der Membranbauweise mit den guten Werkstoffeigenschaften der Metalle.

Das Forschungsprojekt „Metall-Membrantragwerke“ innerhalb des Sonderforschungsbereiches 64, Weitgespannte Flächentragwerke, welches das Entstehen dieser Arbeit ermöglichte, wurde von Professor J. Schlaich etabliert und entwickelte sich aus der intensiven Beschäftigung mit der Seilnetzbauweise [1],[2],[3]. Die Vorstellung, daß bei flächenhafter Verteilung der im Seilnetz vorhandenen Stahlmasse eine Haut entsteht, der die tragende *und* die raumabschließende Funktion zugewiesen werden kann, ist in Anbetracht des Aufwandes, der beim Seilnetz für die Eindeckung erforderlich ist, besonders verlockend.

Schon seit mindestens 130 Jahren taucht die Anregung zu einer Metall-Membranbauweise immer wieder auf. Beginnend mit wenigen Einzelbauten in großen zeitlichen Abständen ist die Zahl der verwirklichten Membrankonstruktionen aus dünnem Blech erst in jüngster Vergangenheit merklich gestiegen (siehe Abschnitt 2.2). Dennoch kann nicht behauptet werden, daß sich das Metall-Membrantragwerk bereits durchgesetzt hat.

1.2 Darlegung der Ziele

Das Hauptziel dieser Arbeit besteht darin, einen neuerlichen Anstoß zur Weiterentwicklung der Metall-Membranbauweise zu geben. Dem Stand der Technik auf diesem so wenig entwickelten Gebiet entsprechend, wurden relativ breit gefächerte Teilziele angestrebt. Es wurde als sinnvoll und notwendig erachtet, mehr die grundlegenden Aspekte zu behandeln, als zu früh an einem Punkt in die Tiefe zu gehen. Dabei steht das Tragwerk als Teil des Bauwerks im Vordergrund.

Eine ausführliche Bestandsaufnahme als erstes Teilziel bot sich an, da das Metall-Membrantragwerk bisher nicht zusammenfassend dargestellt wurde. Erstmals werden die in den verschiedensten Publikationen verstreuten Informationen zusammengetragen und in Form einer Bilddokumentation wiedergegeben. Auf dieser Grundlage werden die Problematik der Metall-Membranbauweise und die bisherigen Lösungsversuche erläutert.

Die Hauptprobleme, die einer größeren Verbreitung der Metall-Membrantragwerke im Weg standen, sind in den Schwierigkeiten des Zusammenbaus und der Formgebung zu sehen. Somit ergaben sich Teilziele mit hauptsächlich fertigungstechnischem Inhalt. Es mußte ein Weg gefunden werden, die Idee von der *sehr dünnen, gekrümmten und gespannten Blechhaut* unter Berücksichtigung der besonderen Stoffeigenschaften des Blechbandes zu realisieren.

Der vorgeschlagene Weg zur Lösung der Formgebungsprobleme, die Methode des „formgebenden Lastfalles“, nutzt die plastische Verformbarkeit der Metalle. Erste Ansätze für ein derartiges Vorgehen waren für den Fall der flachen Kugelkalotte schon früher veröffentlicht worden [46],[52],[60]. Sie beinhalten aber noch nicht das große Spektrum anderer Membranformen, das mit der Vorgehensweise nach der Methode des formgebenden Lastfalles angestrebt wird. Es war ein wichtiges Anliegen, den Nachweis der Durchführbarkeit dieser Baumethode zu führen und den in ihr steckenden Entwurfsspielraum zu verdeutlichen.

Um ein tieferes Verständnis der Mechanik des formgebenden Lastfalles zu erlangen, wurden experimentelle und theoretische Untersuchungen durchgeführt. Sie werden in der Absicht beschrieben, dieser speziellen Problematik einen breiten Zugang zu öffnen.

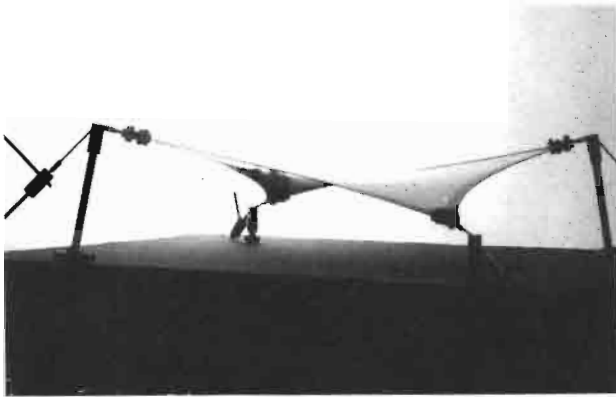


Bild 1
Modell eines Membrantragwerkes aus dünner Aluminiumfolie. Die Membran wird durch Randkräfte gespannt.

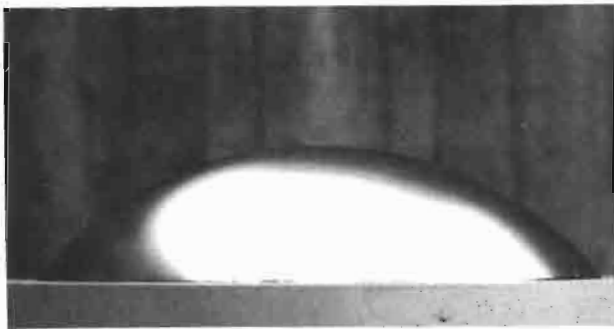


Bild 2
Modell eines Membrantragwerkes aus dünner Stahlfolie. Die Membran wird durch einen inneren Überdruck gespannt.

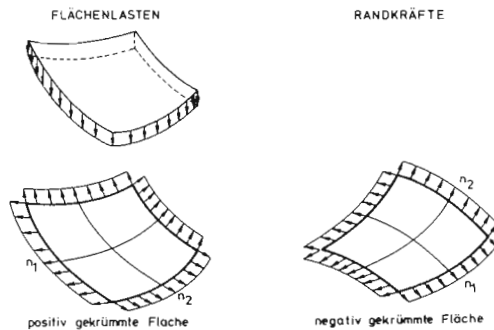


Bild 3
Die zwei prinzipiellen Möglichkeiten den systembestimmenden Spannungszustand zu erzeugen. Es entstehen entweder einsinnig oder gegensinnig gekrümmte Flächen (siehe auch Bilder 1-2).

ANORGANISCHE STOFFE		ORGANISCHE STOFFE	
Metalle	Nichtmetalle	Natürliche Stoffe	Kunststoffe
Stahl Aluminium	Glas Asbest Kohlenstoff	Baumwolle Leinen Wolle Seide Hanf Kokosfasern	Polyester Polyamid Aramid Polyäthylen Polytetrafluoräthylen Polyvinylchlorid Synth. Kautschuk Viscose Polyacryl Polypropylen

Bild 4
Stoffe zur Herstellung technischer Membranen.

2. Die zugbeanspruchte Membranschale aus dünnem Blech

Bleche sind mit ihren charakteristischen Proportionen (kleine Dicke, große Länge und Breite) prädestiniert für die Herstellung flächenhafter Gebilde. In allen Bereichen der Technik wird Blech für Verkleidungen und für Bauteile mit tragender Funktion verwendet. Die hohe Festigkeit des metallischen Werkstoffes ermöglicht äußerst dünnwandige Konstruktionen.

Vielfach werden druck- und biegebeanspruchte Bauelemente aus dünnem Blech hergestellt. Beispiele hierfür sind ebene Dächer, Geschoßdecken und Wände [27],[28] sowie Hyparschalen [30],[31] aus Profilblechen, Sandwich-Flächentragwerke [29] und die französischen Blechschalen aus den 30er Jahren [45],[64],[101].

Bei druckbeanspruchten Flächentragwerken muß die erforderliche Beulstabilität durch Aussteifen der Bleche herbeigeführt werden. Durch Krümmen zu Schalen, Anbringen von Rippen oder Sicken, durch Profilieren der Fläche oder durch Anwenden des Sandwichprinzips wird mit erheblichem Aufwand versucht, die Beulsteifigkeit zu erhöhen.

Ausschließlich auf Zug beanspruchte Flächentragwerke (Bilder 1-2) zeichnen sich dadurch aus, das derartige Probleme nicht auftreten. Die zugbeanspruchte metallische Haut kann „hauchdünn“ ausgebildet werden. Diese anders nicht zu erreichende Leichtigkeit verleiht dem Metall-Membrantragwerk eine gewisse technische Eleganz. Dabei darf allerdings nicht unbeachtet bleiben, daß der Zug in der Fläche durch Druck an anderer Stelle erkaufte werden muß.

2.1 Zu den Grundlagen der Membranbauweise

2.1.1 Allgemeines

Der Grundgedanke der Membranbauweise, der einem natürlichen Bauprinzip entstammt, besteht darin, eine Haut als Raumabschluß und zum Lastabtragen zugleich zu verwenden. Erst in der jüngsten Vergangenheit hat sich die Zahl der verfügbaren Membranbaustoffe und auch das Spektrum der Anwendungen erheblich vergrößert. Um diesen allgemeinen Hintergrund, auf dem u. a. die Metall-Membranbauweise entstehen konnte, aufzuzeigen, mögen die folgenden Literaturangaben genügen:

Einen Überblick über die Vielfalt der Nutzungen und Formen von Membrankonstruktionen vermitteln [4],[5],[16],[17],[23],[24]. Der Stand der Technik ist in Kongreß- und Tagungsberichten dokumentiert [6],[8],[9],[10],[11]. Vornehmlich mit pneumatischen Konstruktionen befassen sich [7],[12],[13],[14],[15],[16],[18],[19],[20]. Die Literatursammlung [21],[22] enthält einige hundert Quellen zum Thema „Membran“.

2.1.2 Die biegeweiche, zugfeste Haut als tragendes Bauteil

Die Membran ist eine zugbeanspruchbare, biegeweiche Haut. Da sie keine nennenswerten Druckspannungen aufnehmen kann, weicht sie selbst kleinsten Druckbeanspruchungen durch Faltenbildung aus. Abweichend vom Sprachgebrauch der Schalentheorie, in der auch die druckbeanspruchte, biegemomentenfreie Schale als Membran bezeichnet wird, ist in dieser Arbeit stets die gewissermaßen „echte Membran“ gemeint, die über die Querschnittsdicke ausschließlich konstante Zugspannungen überträgt.

Analog zum Seil kann die Membran als Tragelement nur dann genutzt werden, wenn ihre Fähigkeit, Zugkräfte zu übertragen, aktiviert wird. Im spannungslosen Zustand nimmt sie keine bestimmte Form ein. Will man sie als verformungsarmes Tragelement verwenden, so muß man ihr einen dauernd wirkenden Zugspannungszustand einprägen. Durch diesen erhält sie eine definierte Form und Steifigkeit.

Dieser Zugspannungszustand ist untrennbar mit der Membrangeometrie verknüpft. Er kann sich nur dann aufbauen, wenn die Membranfläche entsprechend der den Spannkräften zugeordneten Gleichgewichtsfigur geformt ist. Er ist aus der tragwerksbezogenen Sicht die maßgebliche formbestimmende Einflußgröße und wird deshalb „systembestimmender Spannungszustand“ genannt.

Der systembestimmende Spannungszustand kann durch Randkräfte allein, durch Flächenlasten und durch eine Kombination beider Möglichkeiten in die Membran eingetragen werden (Bild 3). Er hat die Aufgabe, Membrandruckspannungen aus der Wirkung der Gebrauchslasten zu kompensieren. Wenn die Höhe der systembestimmenden Zugspannungen derart festgelegt ist, daß beide Hauptspannungen unter Gebrauchslasten stets größer als Null bleiben, so ist die Entstehung von Falten vermieden. Falls zusätzlich durch entsprechende Randausbildung dehnungslose Verformungen ausgeschlossen werden, wird aus der weichen Membran ein außerordentlich steifes Tragelement.

Wird der systembestimmende Spannungszustand durch Verspannen der Membran gegen andere Bauteile (Ränder, zusätzliche Unterstützungen, Abspannungen) erzeugt, so daß im unbelasteten und eigengewichtslos gedachten Zustand Spannungen in der Membran und den Bauteilen sind, so spricht man auch von vorgespannten Membranen [1],[23]. Die Bezeichnung „mechanisch gespannte Membran“, die häufig verwendet wird, ist wenig glücklich gewählt. Die vorgespannten Membranen gehören zur Gruppe der durch Randkräfte und innere Umlenkkräfte gespannten Membranen (Bild 3). Sie sind - abgesehen vom Grenzfall der ebenen Membran - stets gegensinnig gekrümmt.

Die systembestimmenden Spannungen können auch durch eine Druckdifferenz Δp beliebiger Medien beiderseits der Membran oder durch flächig wirkende Gewichtskräfte in die Membran eingebracht werden. Weit verbreitet sind die Lufthallen, deren Formstabilität durch einen geringen inneren Überdruck gewährleistet wird. Hier sind Luft und Membran gegeneinander verspannt.

Die Lufthallen werden pneumatisch gespannte Membrantragwerke genannt, während man die mit Auflasten versehene Membran auch als „ballastgespannt“ bezeichnet. Die durch Flächenlasten gespannten Membranen sind - abgesehen von Bereichen wie etwa die Ecken des Beispiels in Bild 109 oder die innere Ringfläche beim Torus - gleichsinnig gekrümmt.

2.1.3 Über metallische und nichtmetallische Membranbaustoffe

Neben einer möglichst hohen Zugfestigkeit und Formbeständigkeit wird von der Membran erwartet, daß sie unempfindlich auf lokale Verbiegungen und Einrisse reagiert, eine hohe chemische Beständigkeit aufweist und daß ihre Nähte die Festigkeit möglichst wenig beeinträchtigen. Weitere Anforderungen beziehen sich u. a. auf den Preis, das Flächengewicht, die Durchlässigkeit für Luft, Licht, Wärme und Schall, das Brandverhalten, die Beständigkeit gegenüber Witterungseinflüssen, das Verhalten bei Verschmutzung und die Handhabung.

Von all den gewünschten Eigenschaften ist die Zugfestigkeit von primärer Bedeutung. Grundstoffe zur Herstellung von Halbzeugen für technische Membranen werden sowohl aus organischen als auch aus anorganischen Stoffen gewonnen, da in beiden Gruppen zugfeste Substanzen vorkommen (Bild 4). Die Eigenschaften der verschiedenen Membranbaustoffe werden durch den inneren Aufbau der Grundwerkstoffe (deren Molekularstruktur und Gefüge) und durch den konstruktiven Aufbau des Membranelementes (z.B. Webart und Beschichtung) bestimmt.

Metalle unterscheiden sich von anderen Stoffen durch die ihnen eigentümliche Art der Atomverknüpfung. Die metallische Bindung ist stärker und zugleich beweglicher als andere Formen zwischenatomarer, den Stoffzusammenhang gebender Kräfte [26]. Es ergeben sich die bekannten Eigenschaften von Metallen, von denen die wichtigsten angeführt seien:

Metalle zeichnen sich aus durch

- ein Kristallgitter extremer Packungsdichte, das zu einem hohen spezifischen Gewicht führt;

- eine hohe Festigkeit, insbesondere eine hohe Zugfestigkeit;
- einen hohen Elastizitätsmodul und eine relativ große elastische Verformbarkeit;
- eine noch wesentlich höhere nichtelastische Verformbarkeit auch bei Temperaturen weit unterhalb des Schmelzpunktes. Es können ganze Pakete von Atomen unter Beibehalten des Phasenzusammenhanges umgruppiert werden. Bei der Methode des formgebenden Lastfalles wird hiervon Gebrauch gemacht;
- ihre Undurchlässigkeit für Licht, andere elektromagnetische Wellen und Gase.

Nichtmetallische, hoch auf Zug beanspruchbare Werkstoffe haben eine faserige Struktur. Eindimensionale Makromoleküle können ein „Fadengitter“ [26] bilden, das in Längsrichtung eine große Zugfestigkeit besitzt. Solche Stoffe werden zu Webfäden verarbeitet, aus denen eine Vielzahl textiler Membranbaustoffe hergestellt wird. Die zugfeste zweidimensionale Haut wird über den Umweg des Webens erreicht. Das Gewebe wird meist noch beschichtet, so daß schließlich ein kompliziert aufgebauter, in seinem Spannungs-/Dehnungsverhalten nicht gerade idealer Verbundwerkstoff vorliegt.

Die Vorzüge der beschichteten Gewebe liegen in ihrer hohen spezifischen Festigkeit und ihrer Flexibilität. Sie lassen sich gut handhaben, fügen und verpacken. Aus diesen Gründen haben textile Membranbaustoffe eine weite Verbreitung gefunden. Doch trotz aller Vorteile lassen sich einige schwerwiegende Nachteile nicht übersehen:

Die Festigkeit der Gewebe, insbesondere der beschichteten Chemiefasergewebe, wird durch mechanische Beanspruchungen, Licht und Atmosphärien drastisch vermindert. Es treten relativ hohe, in Kett- und Schußrichtung zudem unterschiedliche, Kriechverformungen auf. Gewebe reagieren empfindlich auf lokale Verletzungen (Weiterreißen); pflanzliche und tierische Mikroorganismen können Fasern, Beschichtung und deren Verbund beeinträchtigen. Folge solcher negativen Einflüsse sind ein mit der Zeit anwachsender Festigkeitsabfall und eine begrenzte Einsatzzeit.

Bleche dagegen sind - vorausgesetzt man begegnet der Korrosionsgefahr - von großer Dauerhaftigkeit. Sie zeichnen sich durch eine vergleichsweise simple Feinstruktur aus, besitzen eine große Festigkeit und erleiden unter Gebrauchslasten nur geringste Kriechverformungen. Sie sind gasundurchlässig - allerdings auch undurchlässig für Licht - und unbrennbar. Noch viel weniger als textile Membranbaustoffe lassen sich Bleche schadlos zusammenfalten. Dies kann ein schwerwiegender Nachteil sein. Außerdem sind Bleche schwer, scharfkantig und somit ausgesprochen widerspenstig in der Handhabung.

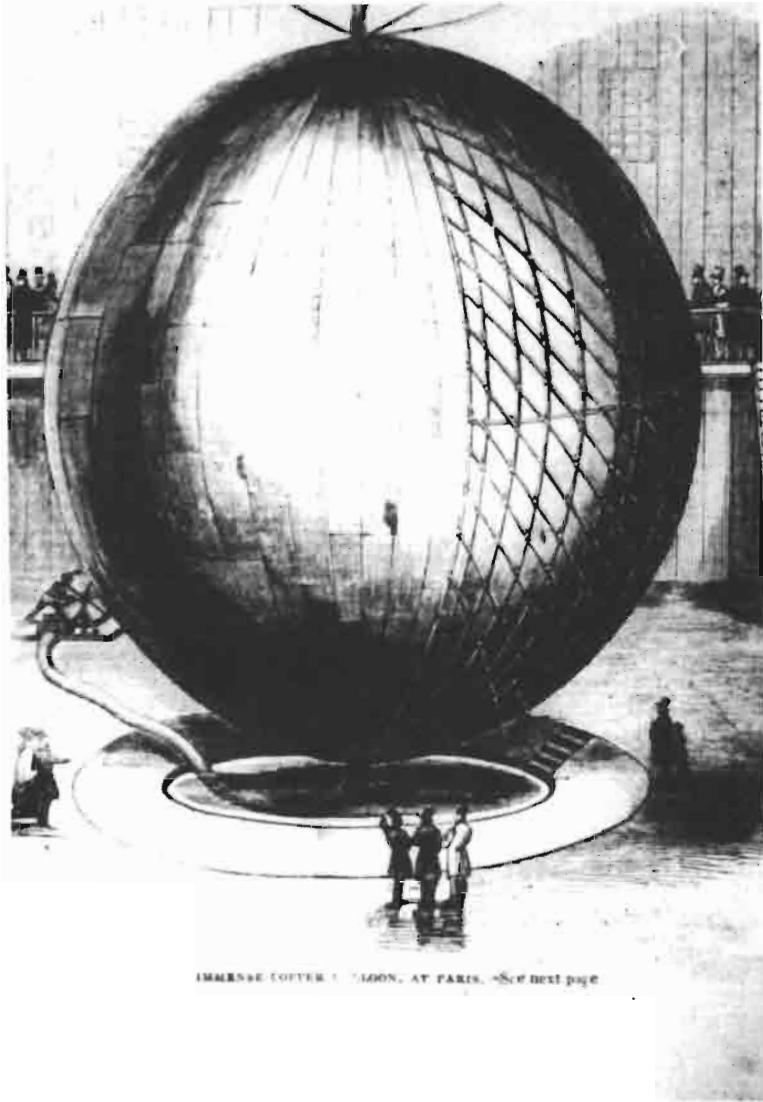
2.2 Die Entwicklung der Metall-Membranbauweise

Anhand einer Sammlung von Beispielen (Bilder 5-85) soll die Entwicklung der Metall-Membranbauweise nachgezeichnet werden. Die noch überschaubare Menge von Bauten und Projekten ermöglichte eine wahrscheinlich vollständige Übersicht.

Die ersten Dächer aus dünnen Blechen waren Zeltimitationen (Bild 6, [34]). Sie entstanden schon im 18. Jahrhundert. Weitere Versuche, dünne Bleche für Membrankonstruktionen zu verwenden, wurden beim Bau von Gasballonen unternommen (Bild 5). Die im frühen 19. Jahrhundert zur Verfügung stehenden Membranbaustoffe, Gewebe und Papier, waren nicht gasdicht und ermöglichten deshalb nur kurze Aufstiege. Bereits 1760 wurde die Idee des Metallballons geäußert und 1784 erstmals realisiert [41].

Auch im Bereich des Bauwesens entstand noch im vorigen Jahrhundert (1896) ein interessantes Einzelbeispiel für ein Metall-Membrantragwerk. Der mittlere Teil des einzigartigen Hängedaches (Bilder 7-9) bestand aus einer nach unten gewölbten Blechschale. Weitere Anwendungen für Hängedächer erfolgten bis zum Ende des zweiten Weltkrieges nur vereinzelt (Bilder 13-20). Seit den 60er Jahren ist eine beschleunigte Entwicklung zu verzeichnen, wie anhand der Bilder 29-85 zu sehen ist. Auf dem Gebiet der Metallmembranen wird vor allem auch außerhalb Deutschlands intensiv gearbeitet. In der UdSSR hat man die Vorteile der Metall-Membranbauweise sehr frühzeitig erkannt und relativ viele Hallendächer und Behälter aus dünnem Blech realisiert.

Der Gedanke, die zweisinnig gekrümmte Membranfläche aus Blech mit Hilfe plastischer Verformungen zu erzeugen, wurde erstmals 1942 veröffentlicht (Bilder 24-27). Der Aufsatz [46] enthält in der Anwendung auf kalottenförmige, pneumatisch gespannte Metallmembranen wesentliche Gedanken der Methode des formgebenden Lastfalles. In [50] wird ein ähnlicher Vorschlag zum Bau von Hängedächern gemacht (Bild 28), der in der Form eines größeren Modelltragwerkes (Bild 29) 1967 in Rußland verwirklicht wurde. Mit den Versuchen, die auf den Bildern 30-33 dargestellt sind, wurde sogar eine Kombination von dehnungslosen Verformungen mit Dehnungsverformungen angestrebt. Bedauerlicherweise sind diese ersten Ansätze nicht weiterverfolgt worden, denn das Nutzen der plastischen Verformbarkeit des metallischen Membranbaustoffes bringt erhebliche Vorteile mit sich (siehe Kapitel 3).



IMMENSE COPPER BALLOON, AT PARIS. —SCHEFFEL'S

Bild 5

Ballon aus Kupferblech von 0,125mm Dicke, der 1844 in Paris ausgestellt wurde (siehe Kopie des zeitgenössischen Zeitungsausschnittes) [41].

IMMENSE COPPER BALLOON.

The curiosity of the scientific world in Paris has just been raised to the boiling point by the construction of a vast balloon of copper, which is so far completed as to be exhibited to the public. The constructor of this huge work is M. Marey-Monge; and should his anticipations be realised as to the practicability of employing this balloon for purely scientific purposes—as an electrical and magnetic phenomena—M. Arago will introduce it to the French Institute.

This balloon is completely composed of sheets of copper, the 200th part of an inch in thickness. The idea of the construction of a metal balloon originated with Lans in 1760; and subsequently, in 1784, another metal balloon was constructed by Gnyton de Morveau. In the present balloon, the sheets of copper, united by bands, like the ribs of a melon, have been soldered by de Richemont's *autogenous* process. They occupy an extent of about 1500 yards. The balloon itself is about ten yards in diameter, and weighs 800 pounds, and will contain 100 pounds of hydrogen gas.

It is stated in the Parisian journals, that M. Dupuis Delcourt, the celebrated French aeronaut, will shortly make an ascent in this balloon. The main object proposed by its constructor, M. Marey-Monge, is the power of directing balloons by a system which he has developed in a memoir submitted to the French Academy. One of the advantages gained by the substitution of copper for silk, or other fibrous material, is that the metal will prevent the escape of gas, so that the aeronaut may remain a long time in the air, and thus be enabled to study the constant atmospheric currents. It is likewise proposed to employ this balloon in deciding whether it is possible to prevent *hail*, which is due to the electricity of the clouds. Thus, as the balloon may be kept suspended a long time in the atmosphere, if it were connected with the earth by a metal wire, it would thus conduct the electricity from the clouds, and thereby prevent the formation of hail, so destructive to agriculture. This idea of rendering a balloon a *paragrêle* is ingenious enough, and we shall be happy to witness its execution. Nevertheless, we have yet to learn the advantage of metal over varnished silk, which has been brought to great perfection in this country, by our veteran aeronaut, Mr. Green, in the construction of his balloons. Altogether, we fear this Copper Balloon will prove another "Aerial Machine,"—a very negative merit.

Bild 6

Zeltdach über einer Parkbank, 1826,[34].

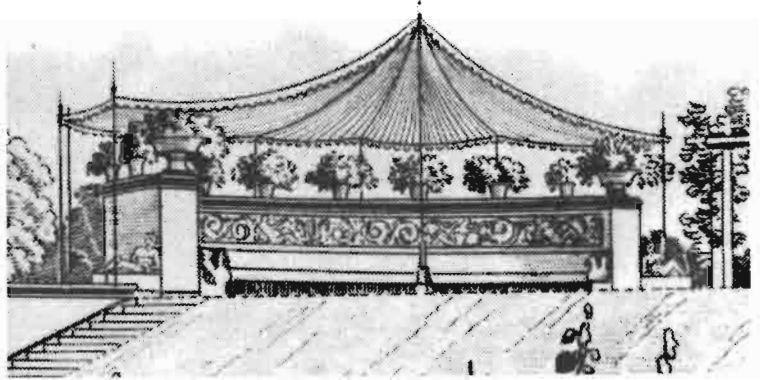


Bild 7

Ausstellungsgebäude aus dem Jahr 1896. Das Hängedach ist als Seilnetz ausgebildet. Die innere kalottenförmige hängende Membran von 25m Durchmesser ist aus dünnem Blech [53],[57].



Bild 8

Die Halle im Bauzustand [57].

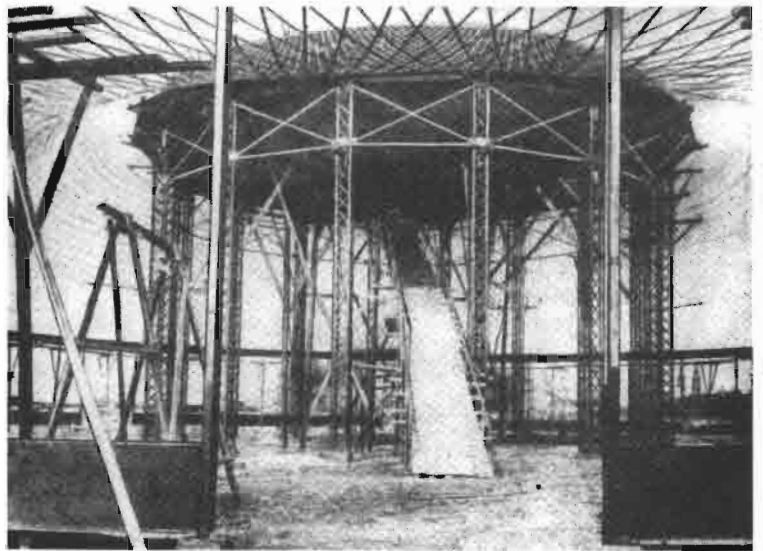


Bild 9

Innenaufnahme [53].

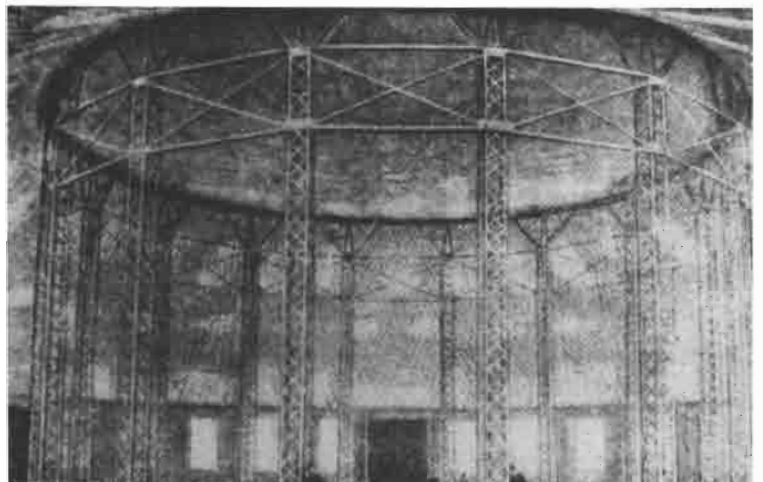




Bild 10

Zeppelin (Blimp) aus Aluminiumblech von 0,24mm Dicke. Die Bleche wurden durch Nieten verbunden, die Fugen abgedichtet. Die Länge des Luftschiffes betrug 45,5m, der maximale Durchmesser 16m. Baujahr 1929 [42],[43].

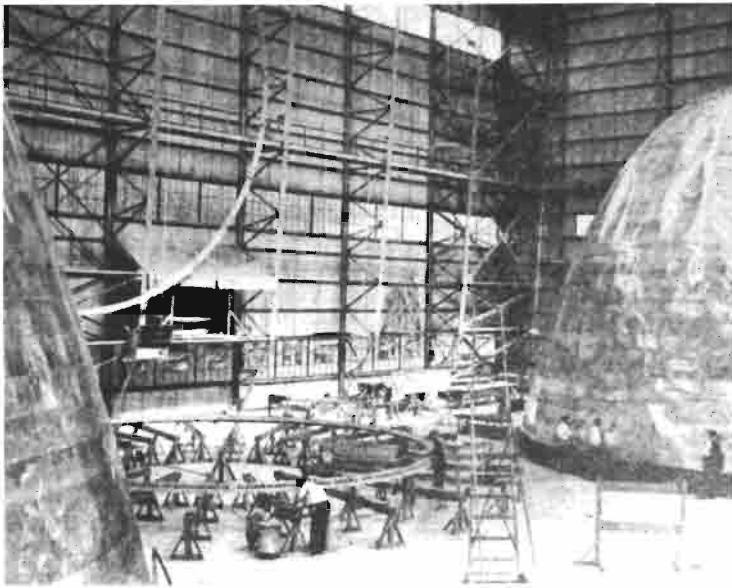


Bild 11

Heck und Bug wurden getrennt zusammengebaut. Dazu wurden diese Teile wie Glocken aufgehängt und jeweils nach Anfügen eines Blechstreifens angehoben [42].

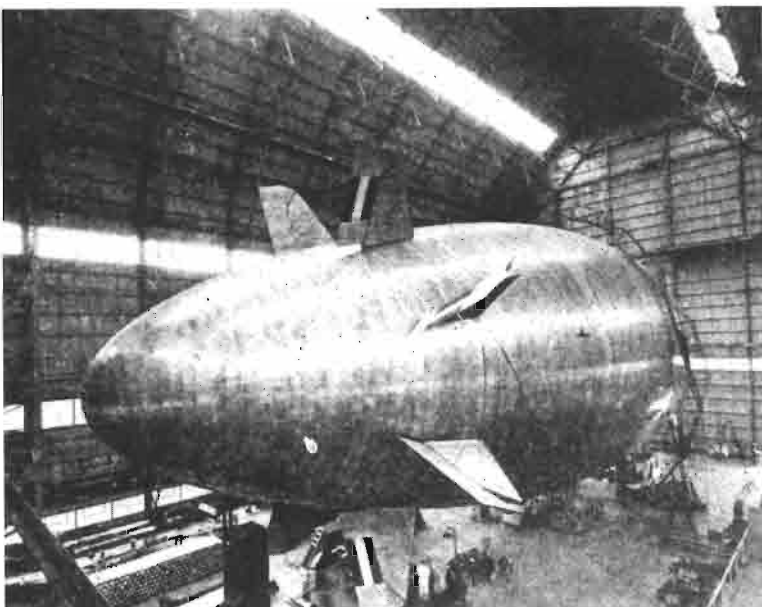


Bild 12

Heckansicht des nahezu fertig montierten Luftschiffes [42].

Bild 13

Getreidelager- und Transportanlage im Staate New York von 82,5m Länge aus Stahlblech von 2,77mm Dicke, 1933, [50].



Bild 14

Die Blechbahnen sind 1,22m breit und 42,7m lang.

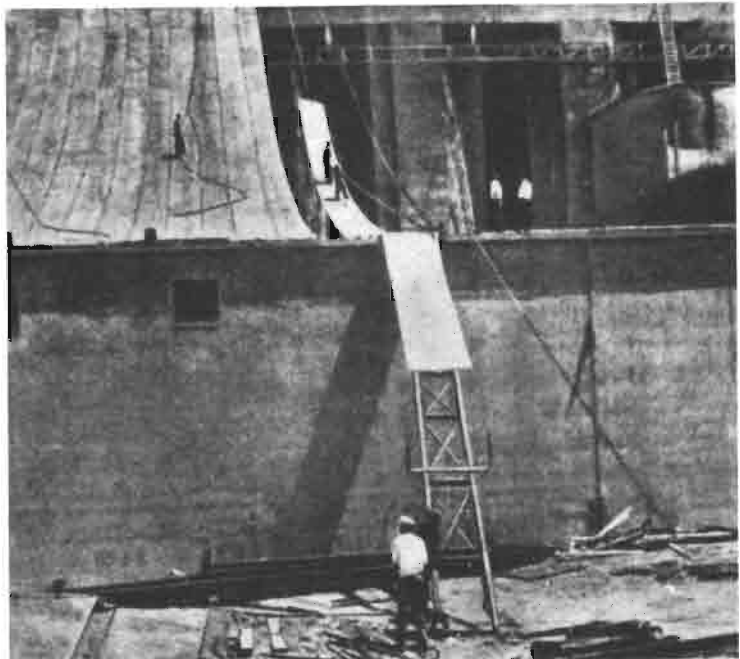


Bild 15

Durch Punktschweißen werden die Ränder der Blechbahnen geheftet und anschließend kontinuierlich verschweißt. Jede Dachfläche besitzt drei Dehnfugen. Es ist unklar, wie die Dachfläche gegen Windsog stabilisiert wurde.



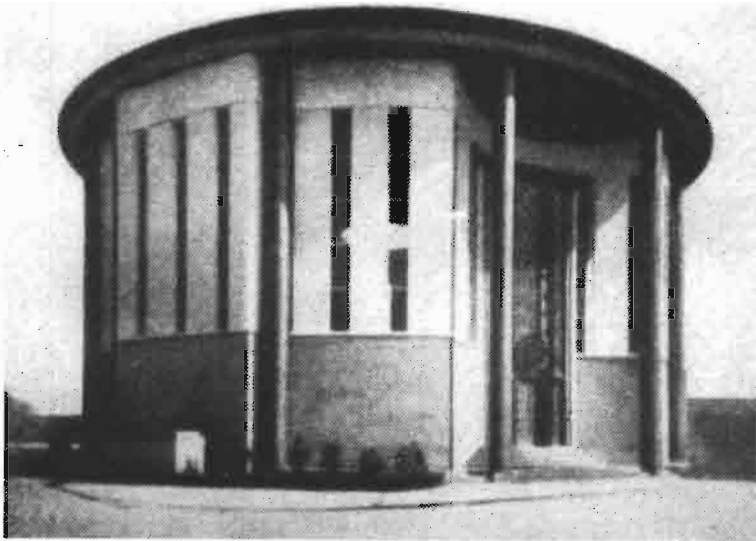


Bild 16
Pavillon in Zagreb mit flacher, kegelförmiger Metallmembran, 1932, [52].

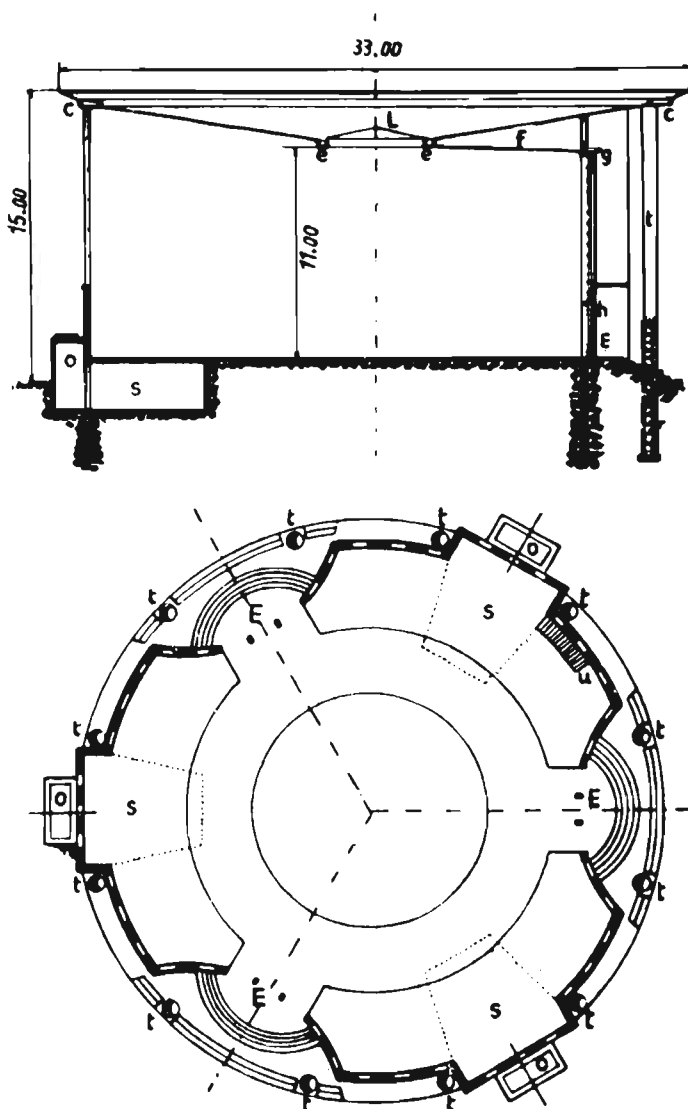


Bild 17
Schnitt und Grundriß des Bauwerks. Die Membran hatte einen Durchmesser von 30m bei einer Blechdicke von 2,0mm [52].

Bild 18
Montage des Randträgers [52].

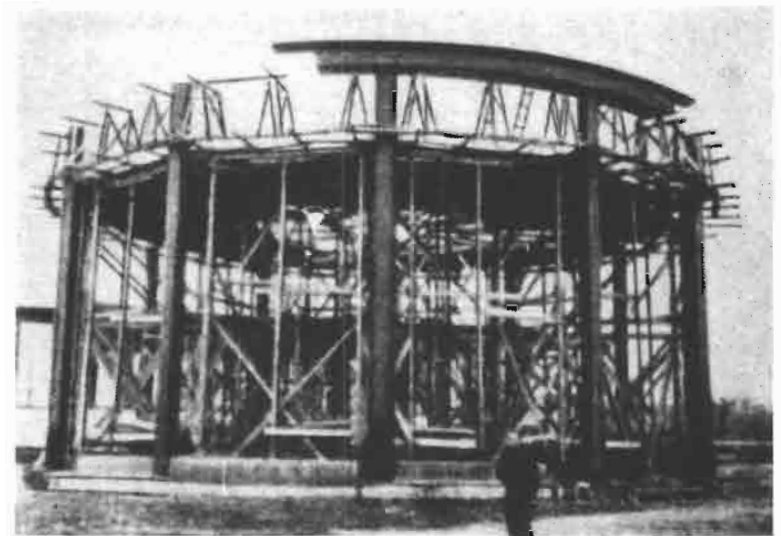


Bild 19
Die Bleche wurden auf einem hölzernen Lehrgerüst miteinander verschweißt. Das Bild zeigt den Einbau der Laternenkonstruktion [52].

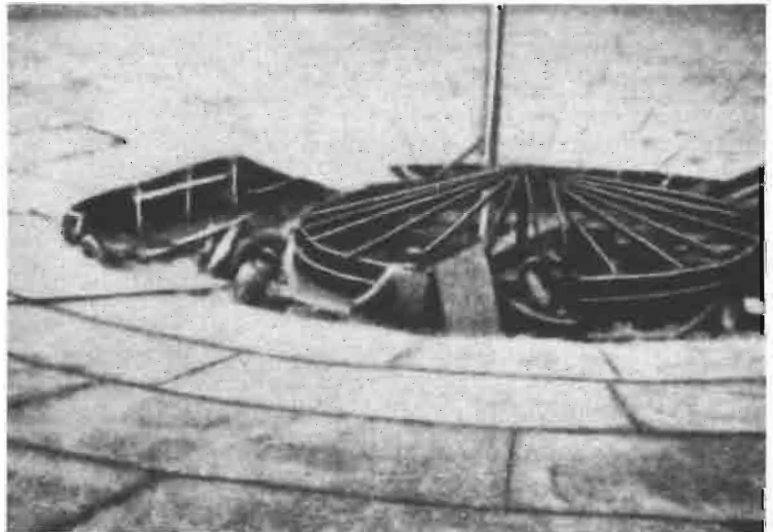


Bild 20
Innenansicht der Ausstellungshalle. In der Bildecke oben rechts ist die Rinne zur Ableitung des Regenwassers zu sehen [52].





Bild 21

Getreidespeicher in Dickinson, North Dakota, USA, aus Blech. Baujahr unbekannt. Foto: Institut für Leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart.



Bild 22

Getreidespeicher des gleichen Typs. Baujahr unbekannt, [54].

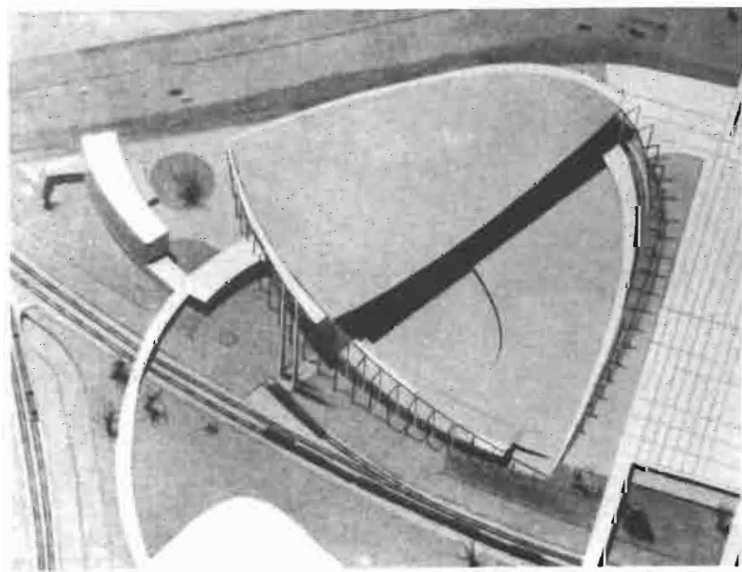


Bild 23

Entwurf einer Ausstellungshalle, 180m mal 200m, mit einem Hängedach aus Blech [49],[52].

Bild 24

Dieser Entwurf einer Flugzeugmontagehalle von 365m Durchmesser aus dem Jahr 1942 verdient besondere Aufmerksamkeit, da hier erstmals das Prinzip des formgebenden Lastfalles vorgeschlagen wurde. Die Halle sollte durch einen inneren Überdruck aus der zunächst ebenen Vorform bei 1% plastischer Dehnung in die Kalottenform gebracht werden [46]. Die sorgfältige Ausarbeitung des Entwurfs wurde mit theoretischen Untersuchungen untermauert (siehe [47],[48]).

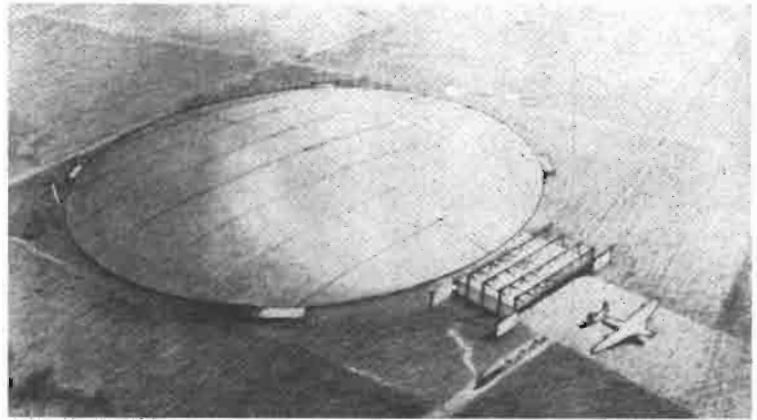


Bild 25

Zeichnung einer Innenansicht der pneumatisch gespannten Halle.

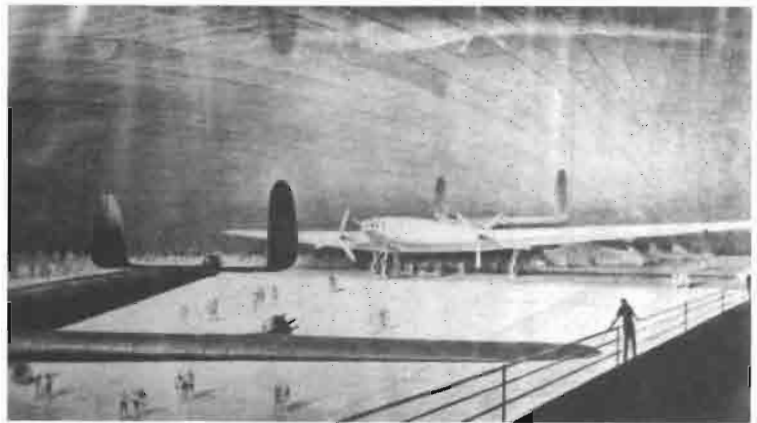


Bild 26

Grundriß [46].

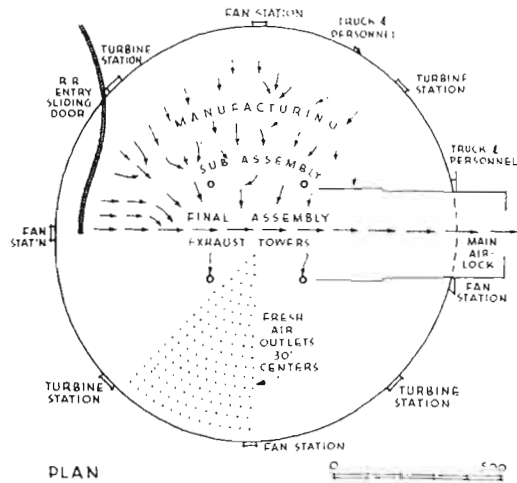


Bild 27

Detail des Druckrings mit Verankerung der Blechmembran [46].

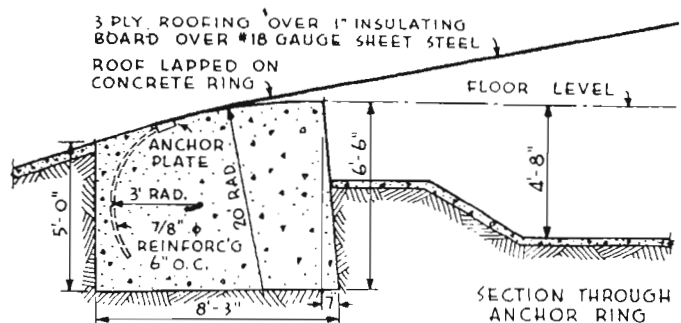


Bild 28

Prinzipskizze zum Herstellen „ausgebeulter Membranen“, 1954 veröffentlicht in [52].

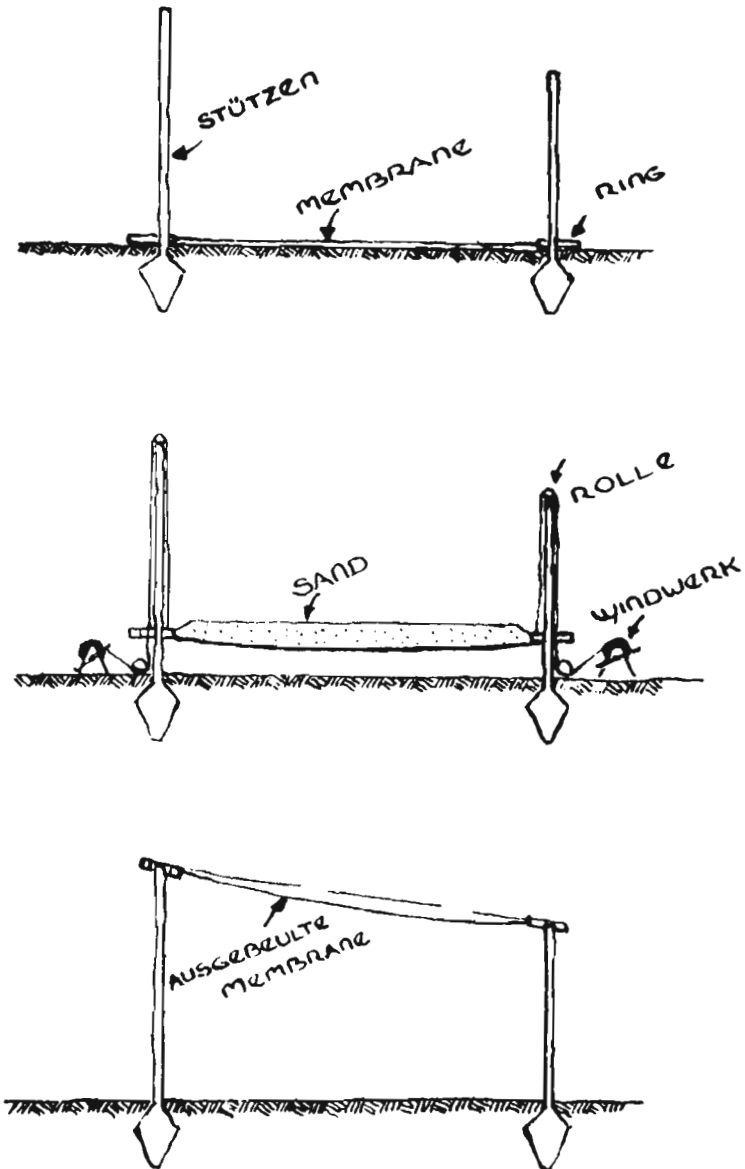


Bild 29

Versuchsdach von 23m Durchmesser, das nach der in Bild 28 vorgeschlagenen Methode im Jahr 1967 in Moskau gebaut wurde [60]. Die Blechmembran hat eine Dicke von 0,7mm. Nach Entfernen der formgebenden Lasten wurde das Dach mit einer 5cm dicken Ortbetonschicht gegen das Durchstülpen bei Windsog versehen. Siehe auch [71],[85].



Bild 30

Vorschlag zur Herstellung von Behältern. Zwei ebene Bleche werden an polygonalen Rändern miteinander verbunden (Bild 31). Mit Aufbringen eines Innendruckes entsteht durch die Kombination von Dehnungsverformungen mit dehnungslosen Verformungen die skizzierte Gestalt, 1967, [58].

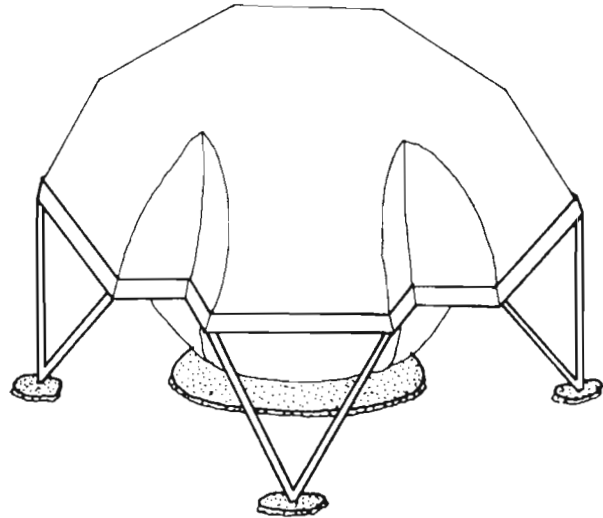


Bild 31

Modell für Formgebungsstudien aus Bleiblech [58].

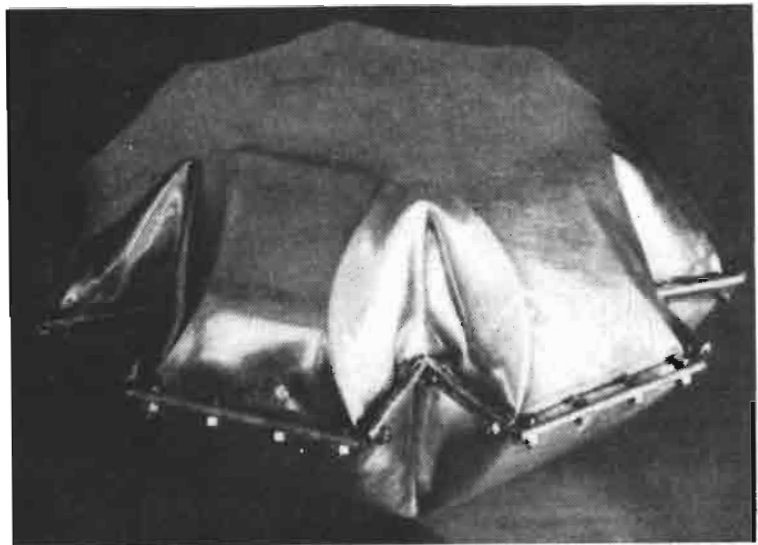


Bild 32

Dieser doppelwandige Versuchskörper (längliches Kissen) von 4m Länge aus Stahlblech von 1,6mm Dicke wurde durch Belastung mit Wasserdruck in die Form des Modells (Bild 33) gebracht, 1972, [59].

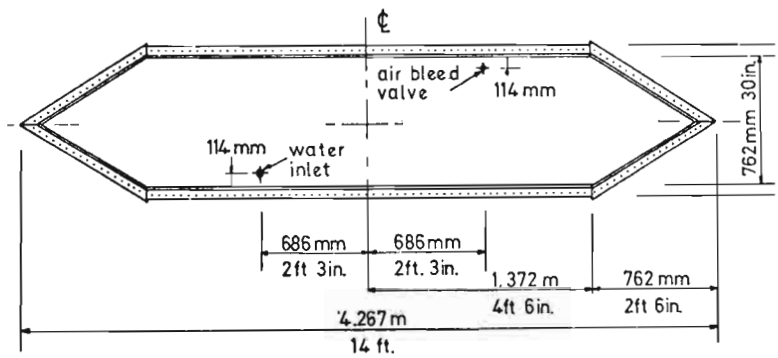


Bild 33

Versuchskörper aus Bleiblech von 0,3mm Dicke [59].

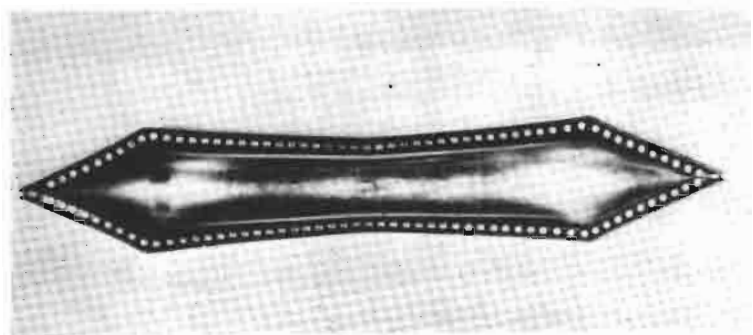




Bild 34

Rundhalle mit kegelförmigem Hängedach (50m Durchmesser) aus 4mm dickem Blech aus dem Jahr 1963. Die Membranschale wird durch einen im Zentrum konzentrierten Ballast von 200kN vorgespannt. Zur Herstellung der Beulsicherheit bei nicht rotationssymmetrischen Lasten wurde das Stahlblech mit einem orthogonalen Steifen-system versehen [55],[56]. Dächer dieser Art wurden wiederholt gebaut (Bilder 37-40).

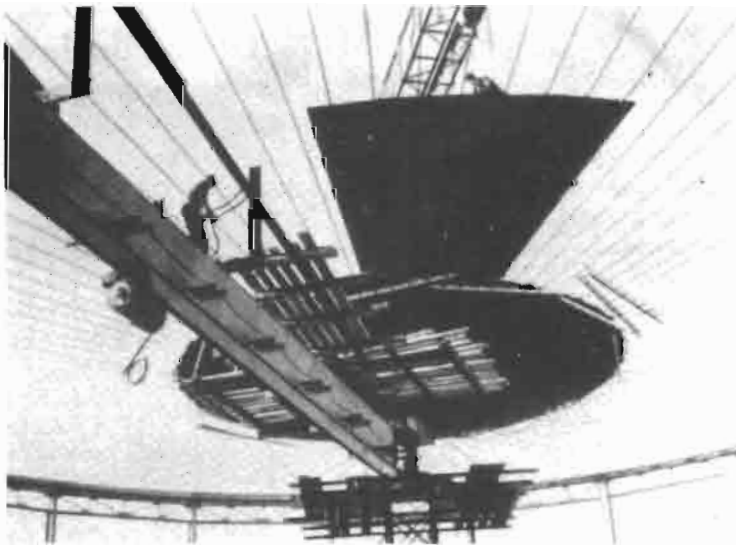


Bild 35

Die Montage der Dachsegmente wurde auf einem radialen Seilnetz durchgeführt [55].



Bild 36

Innenansicht der Fabrikhalle von Bild 34 [56].

Bild 37

Die Basketballhalle der Olympischen Spiele 1972 ist ebenfalls von einer 4mm dicken kegelförmigen Stahlmembran überdacht [65].



Bild 38

Schnitt mit Abmessungen [65].

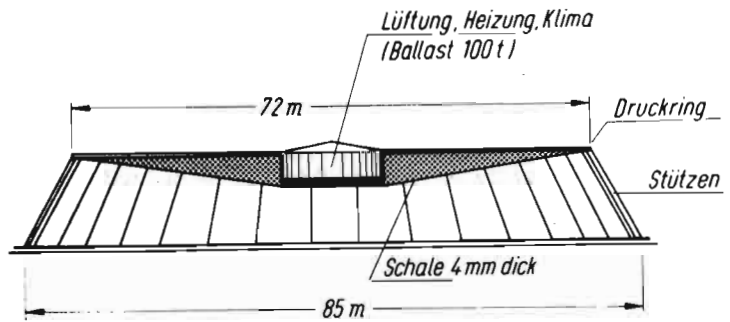


Bild 39

Das bisher größte Hängekegeldach hat einen Durchmesser von 112m. Die Blechdicke beträgt, abgesehen vom verstärkten Randbereich, 4mm. Wien 1978, [86].



Bild 40

Hallenquerschnitte und Grundriß [86].

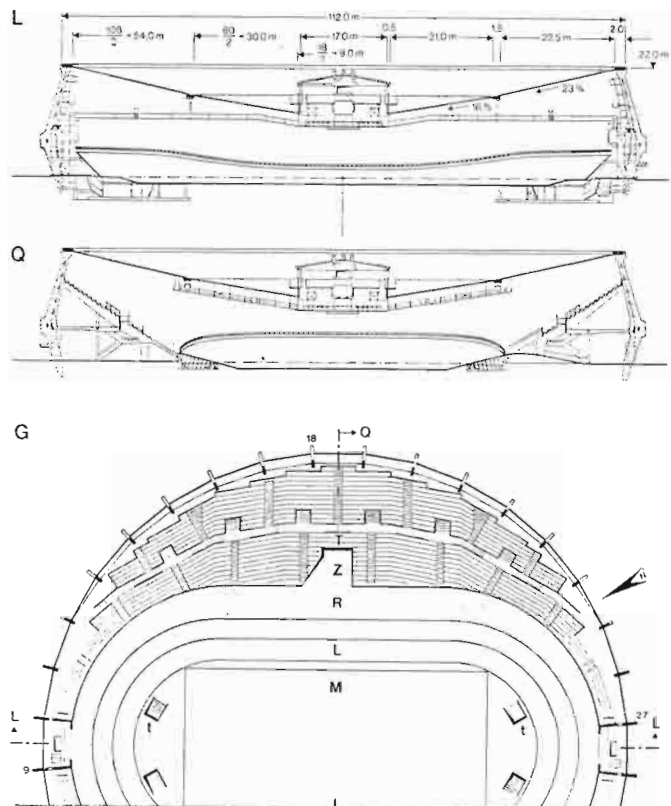




Bild 41

Modell eines Membrankissens von 4,88m Durchmesser. Die Membran besteht aus Streifen nichtrostenden Stahls von 0,05mm Dicke, die zusammengeklebt wurden [61]. Es werden große Dächer aus dem gleichen Werkstoff vorgeschlagen, 1971, [61],[62], [63].



Bild 42

Auf einfachste Weise können Dachflächen, die allerdings einer zusätzlichen Abdichtung bedürfen, aus Blechstreifen durch Flechten hergestellt werden. Hier werden Aluminiumbänder von 1mm Dicke für Hängedächer von etwa 30m Durchmesser verarbeitet, 1973, [67],[83],[84].



Bild 43

Fertigungsvorrichtung für zylindrische Schalen aus Feinblechband. In einem kontinuierlichen Verfahren werden die Kanten des Bandes durch einen Doppelfalz miteinander verbunden. Der Blechzylinder wächst gewissermaßen aus der Vorrichtung heraus. Auf diese Weise werden Behälter aller Art gebaut. Die größten Gärfuttersilos haben einen Durchmesser von 20m und eine Höhe von 24m. (Patentiertes Verfahren der Firma Lipp, D 7091 Tannhausen).

Bild 44

In der Sowjetunion werden Stahlbehälter bis zu 60m Durchmesser nach dem Rollverfahren hergestellt, 1976, [75],[93],[97]. Die verwendeten Bleche von 6mm bis 17mm Dicke können kaum als dünnwandig bezeichnet werden. Dennoch werden diese Bilder wiedergegeben, da sie sehr anschaulich den Umgang mit großen, vorgefertigten Blechelementen verdeutlichen.

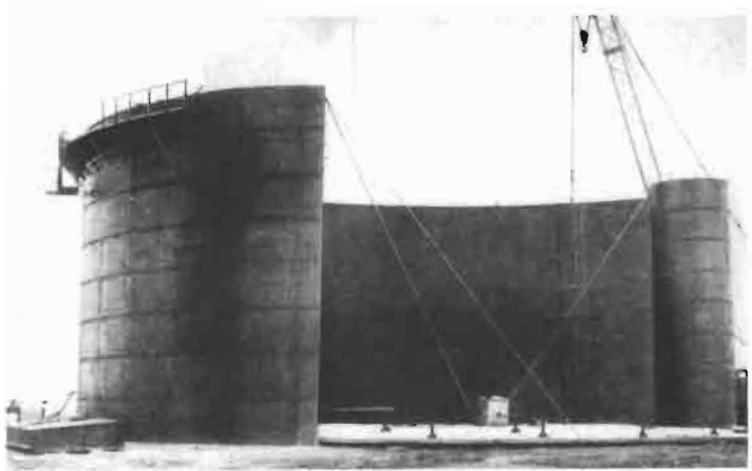


Bild 45

Montage der Behälterwandungen [97].



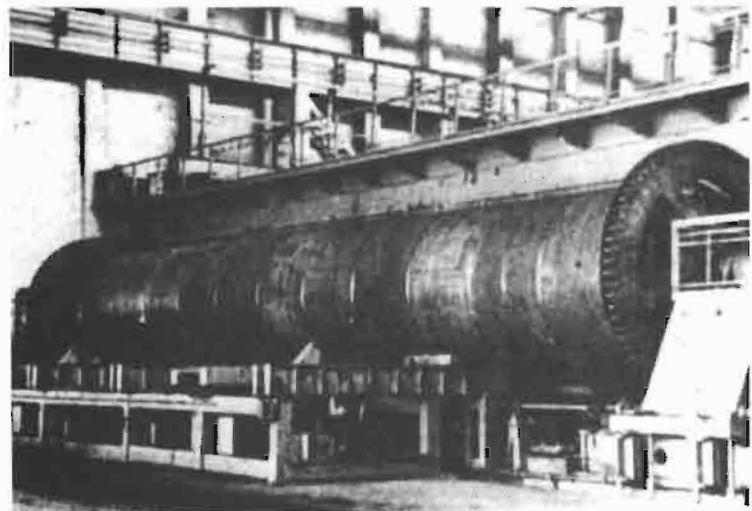
Bild 46

Entrollen des Bodenbleches [97].



Bild 47

Aufwickeln eines Teilstückes der Behälterwand in der Fabrik [75].



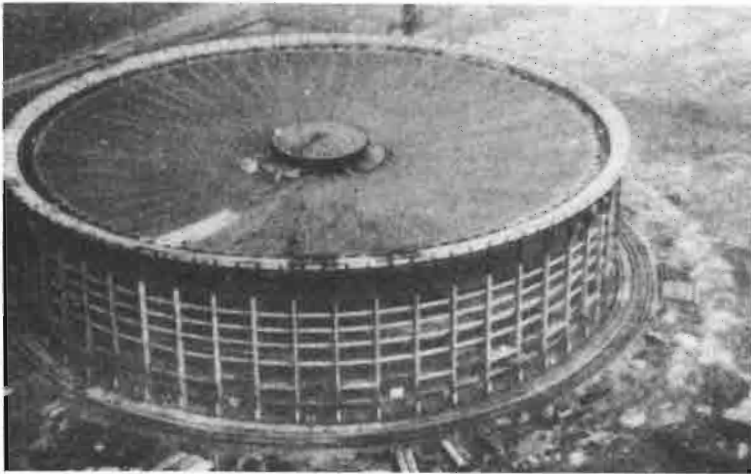


Bild 48

Mehrzweck-Sporthalle in Leningrad von 160m Durchmesser. Die Blechmembran von 6mm Dicke wird durch radiale Seilbinder stabilisiert, 1977, [82],[83].

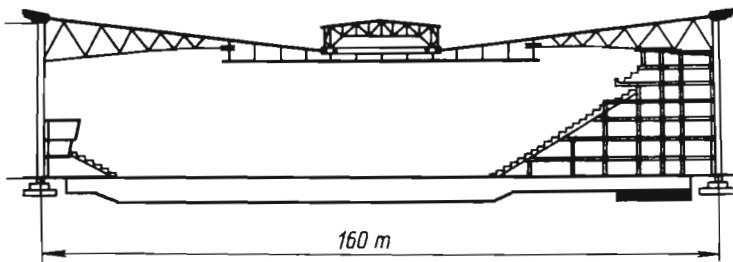


Bild 49

Schnitt [83].

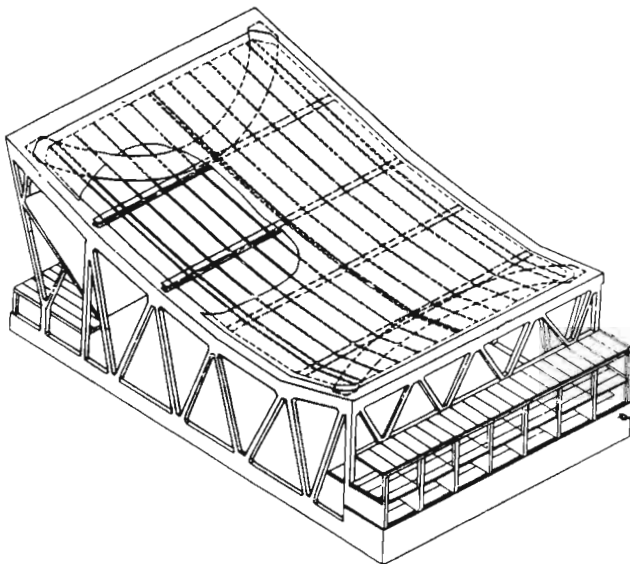


Bild 50

Sportpalast von Frunse, UdSSR, mit den Grundrißabmessungen 42m mal 61m. Das Gebäude befindet sich in einer erdbebengefährdeten Zone. Die Blechmembran ist aus nichtrostendem Stahl von 2,0mm Dicke. Sie wird durch eine Kombination aus Vorspannung und angehängtem Ballast gespannt. Bogenförmig angeordnete Blechbänder leiten die Membranzugkräfte in die Ecken des die Blechhaut berandenden Rahmens, 1976, [74],[83].



Bild 51

Montage der Blechmembran [74].

Bild 52

Modellfoto des überdachten Stadions in Moskau mit elliptischem Grundriß vom 224m mal 183m, welches anlässlich der Olympischen Spiele 1980 gebaut wurde. Die Blechmembran von 5mm Dicke hängt um 12,5m durch. Sie wird durch ringförmige und radiale Rippen ausgesteift, 1979, [83],[89],[90].

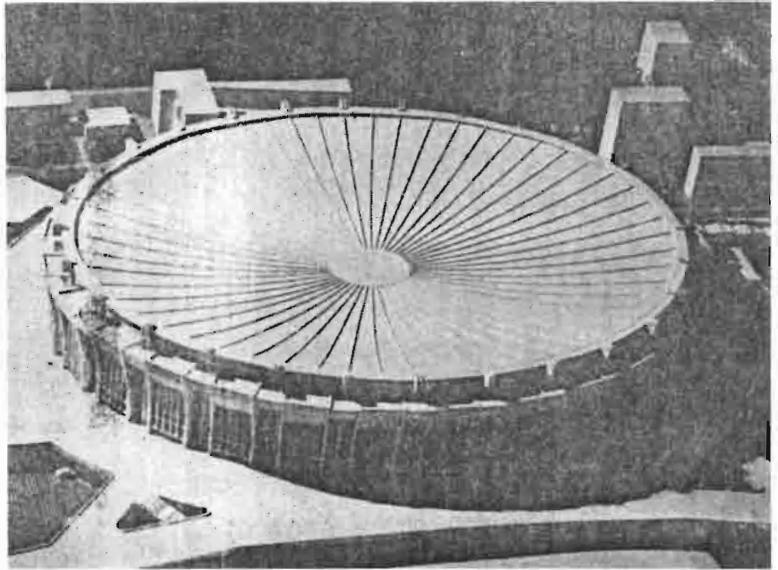
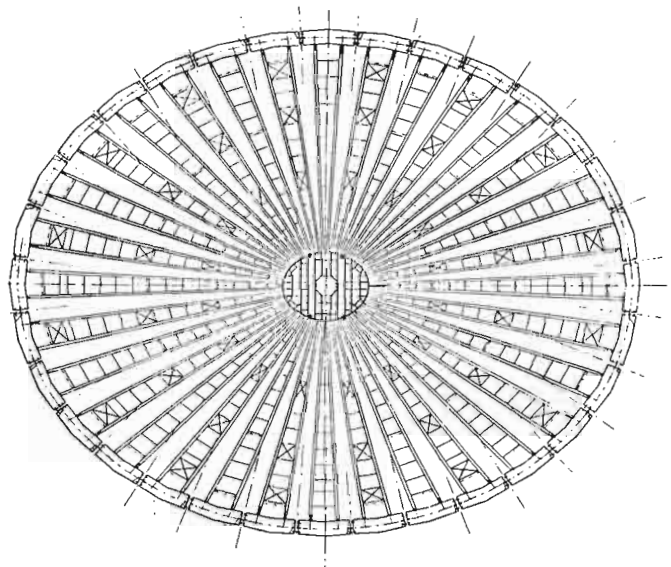
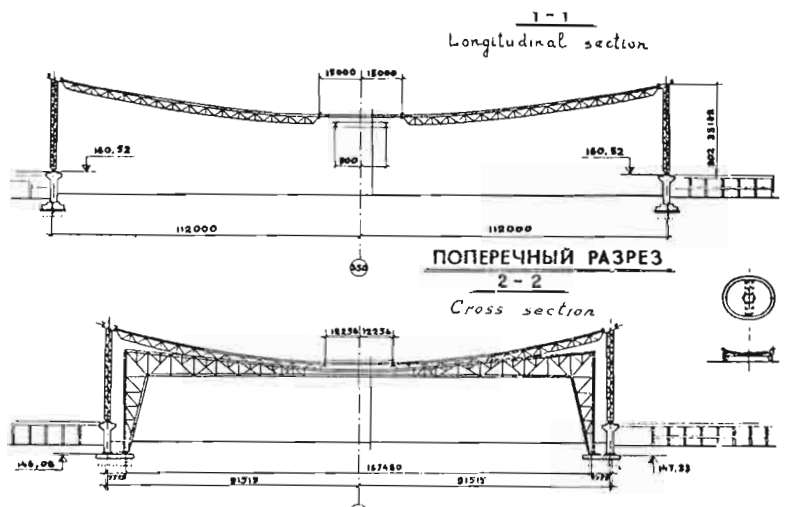


Bild 53

Schnitte und Grundriß [90]. (Der innere Fachwerkrahmen im Schnitt 2-2 ist nicht Bestandteil des Hängedaches.)



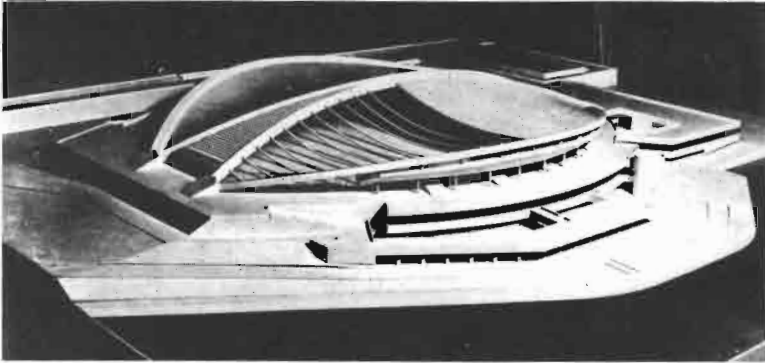


Bild 54

Modellfoto der überdachten Radrennbahn in Krylatskoje, Olympiade 1980, mit den Grundrißabmessungen von 168m mal 158m. Doppelt gekrümmte Blechmembranen aus Stahl von 4mm Dicke sind zwischen Randbögen eingehängt [89],[90].

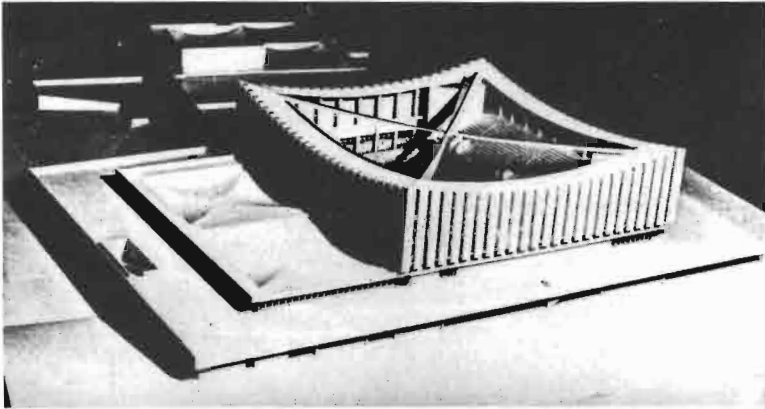


Bild 55

Modellfoto der Sporthalle in Izmailovo, Olympiade 1980. Haupt- und Nebengebäude sind mit Membranen aus nichtrostendem Stahl von 2mm Dicke überdacht. Zwei diagonal verlaufende Stahlbänder stützen die Blechmembran zusätzlich [89], [90].

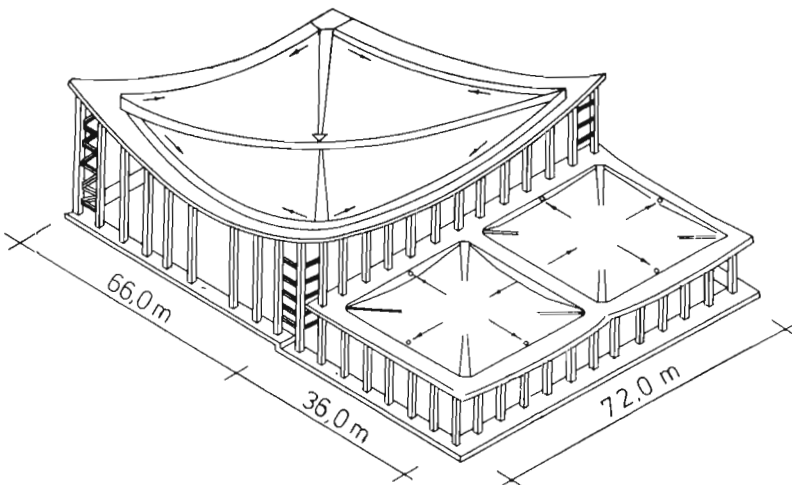


Bild 56

Grundrißabmessungen und Tragelemente [90].

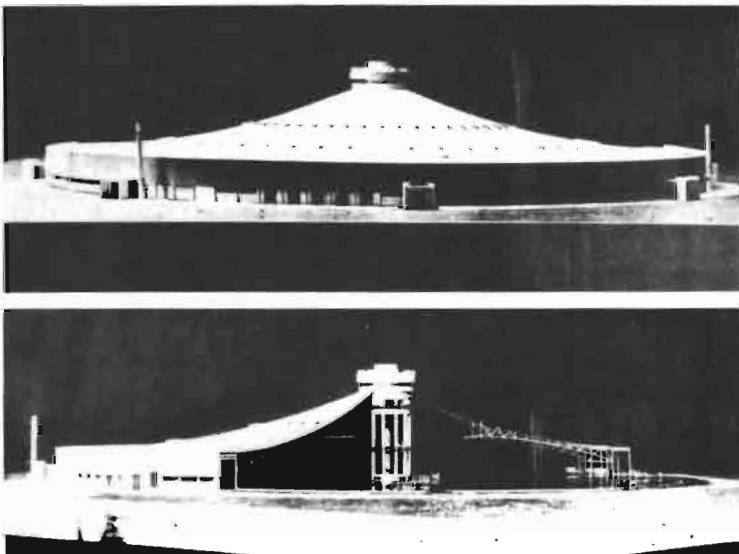


Bild 57

Modellfoto des Parkhauses für Lastkraftwagen in Ustj-Ilimsk, UdSSR. Das Gebäude hat einen Durchmesser von 200m und ist von einer Stahlmembran überdacht, die zu 90% der Fläche 6mm dick ist. Zum Innenrand hin nimmt die Dicke bis auf 25mm zu. Die 52 Sektoren des Daches von 12m Breite und 92m Länge wurden vorfabriziert, 1979, [91].

Bild 58

Die Membran ist in Meridianrichtung und in Umfangrichtung ausgesteift [91].

Bild 59

Montage eines tropfenförmigen Wasserbehälters von 65m Durchmesser aus 10mm dickem Stahlblech, Holland, 1976, [80].

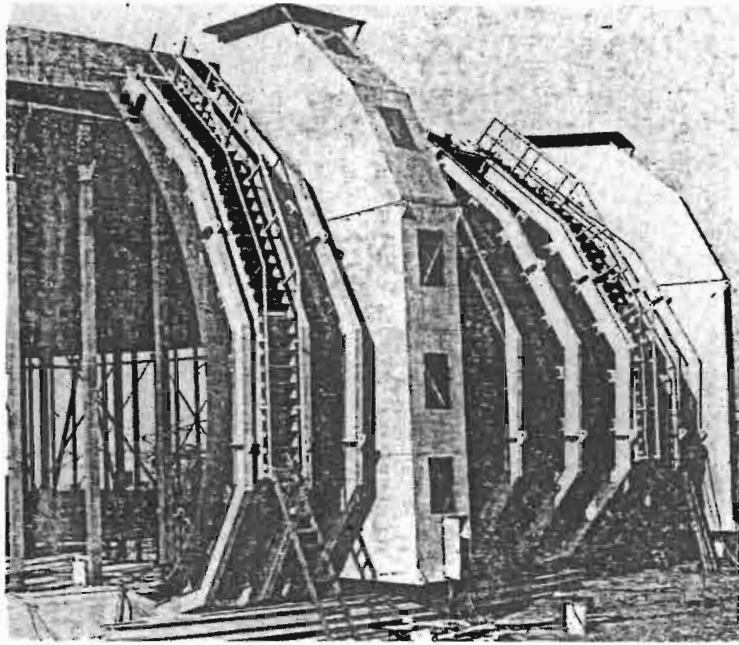


Bild 60

Entwurf eines Hängedaches mit flacher, kugelkalottenförmiger Blechmembran von 4mm Dicke, 1975, [72],[73].

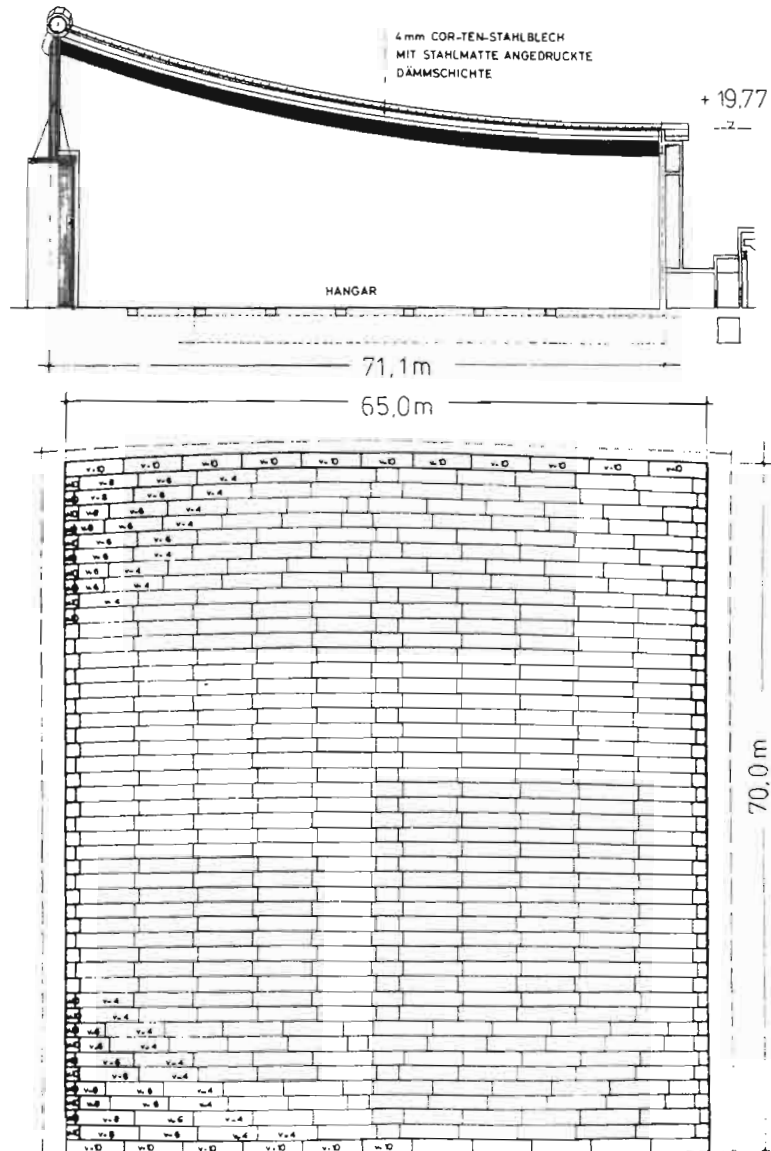




Bild 61

Seitenansicht eines im Grundriß kreisförmigen Membrankissens von 5m Durchmesser aus nichtrostendem Stahlblech von 0,3mm Dicke. Das Modelltragwerk diente zur praxisnahen Erprobung der Baumethode des formgebenden Lastfalles (Kapitel 3). Die beiden zunächst quasi ebenen Blechmembranen wurden mit Hilfe eines inneren Überdruckes in die Kalottenform gebracht. Dabei traten plastische Dehnungen von etwa 3% auf. Stuttgart 1976. [76],[77],[78].

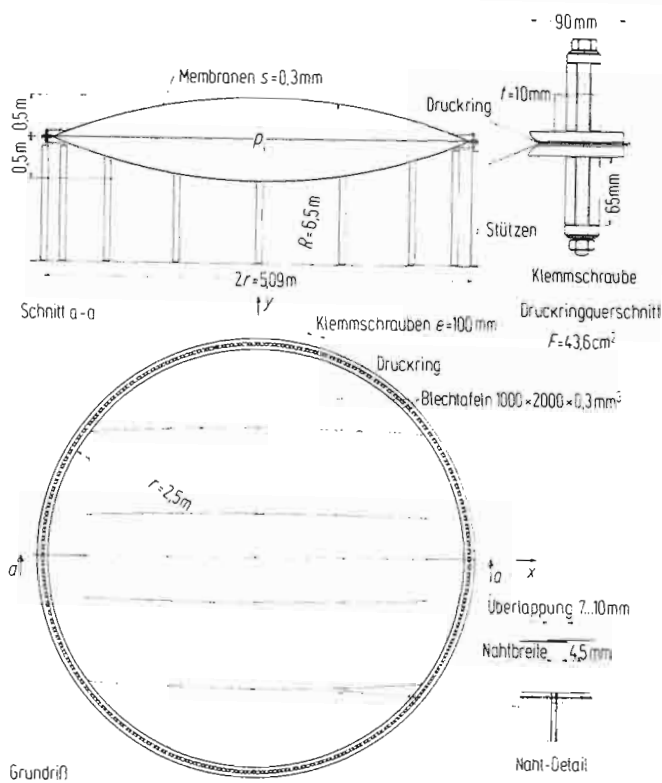


Bild 62

Schnitt und Grundriß [78].



Bild 63

Draufsicht auf das Modelltragwerk. Die Formgebung und das Verhalten unter Gebrauchslasten wurden mit Hilfe zahlreicher Messungen untersucht [77],[78].

Bild 64

Draufsicht auf die obere Membran im Ausgangszustand. Deutlich sind die Schweißschumpfungen und Falten in der Membran zu erkennen [77],[78].

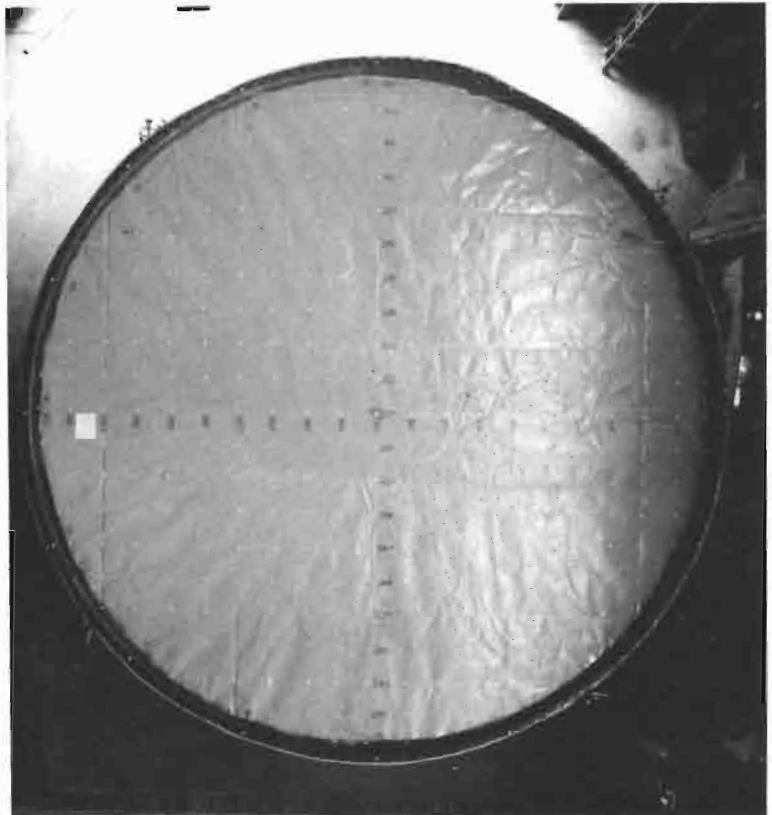
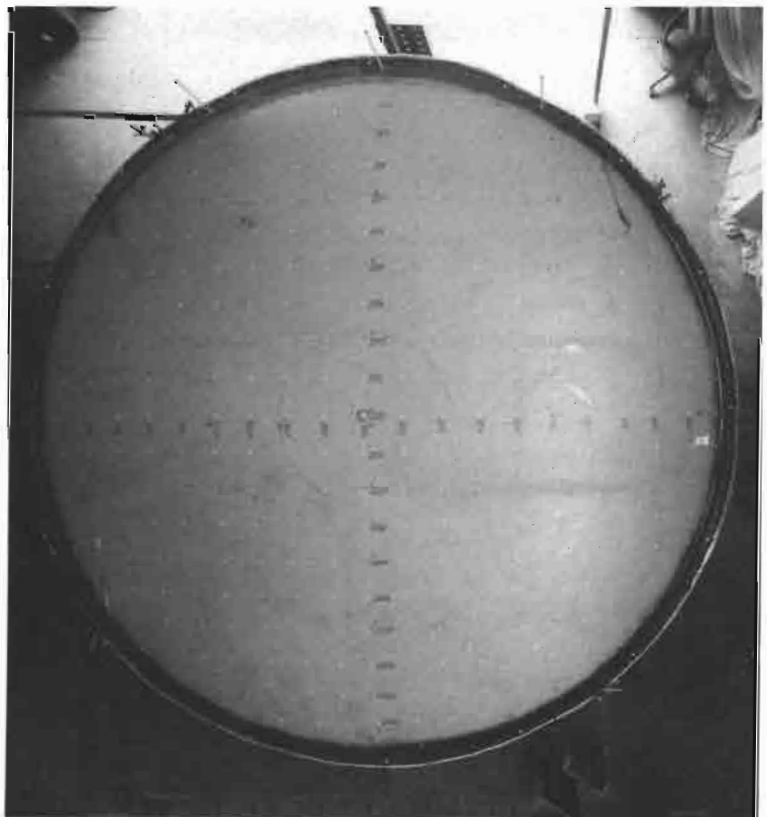


Bild 65

Draufsicht auf die obere Membran nach Abschluß der Formgebung. Beide Membranen wurden um 0,5m (entsprechend einem Kugelradius von 6,5m) ausgebeult. Die Oberflächen der Kugelkalotten sind völlig glatt [77],[78].



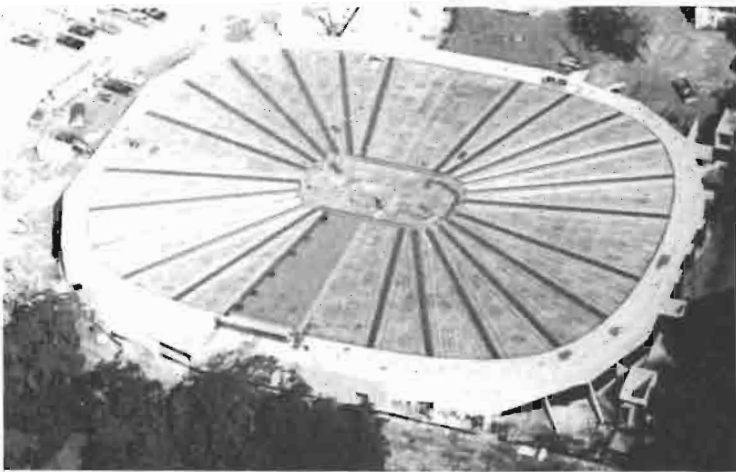


Bild 66

Sporthalle der Dalhousie-Universität in Halifax, Kanada, mit einer Länge von 91m und einer Breite von 73m (Bauzustand). Das Dach besteht aus einer nach oben gewölbten Membran aus nichtrostendem Stahl von 1,6mm Dicke, die durch einen inneren Überdruck gespannt ist, 1979, [87],[88],[96].



Bild 67

Die Blechmembran wurde auf einem ebenen Lehrgerüst zusammengesetzt. Wulstförmige Ausgleichstreifen ermöglichen ein Aufwölben in die Kalottenform (siehe auch Bild 99) [87].



Bild 68

Vorgefertigte Segmente werden ausgelegt und mit den Ausgleichstreifen verschweißt [87].

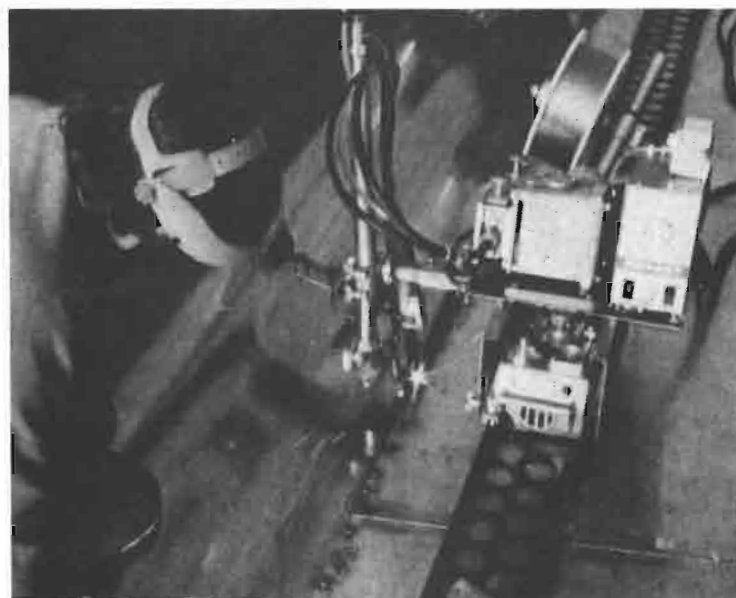


Bild 69

Halbautomat, der die bereits geheftete Längsnaht zwischen Ausgleichstreifen und Dachsegment gasdicht zusammenschweißt [87].

Bild 70

Dach aus Blechstreifen von etwa 1mm Dicke und 55m Länge. In Längsrichtung werden die Elemente auf Biegung beansprucht. Creutzwald, Frankreich [92].



Bild 71

Montage einer Dacheinheit des Daches in Bild 70 von 55m Länge und 4m Breite [92].

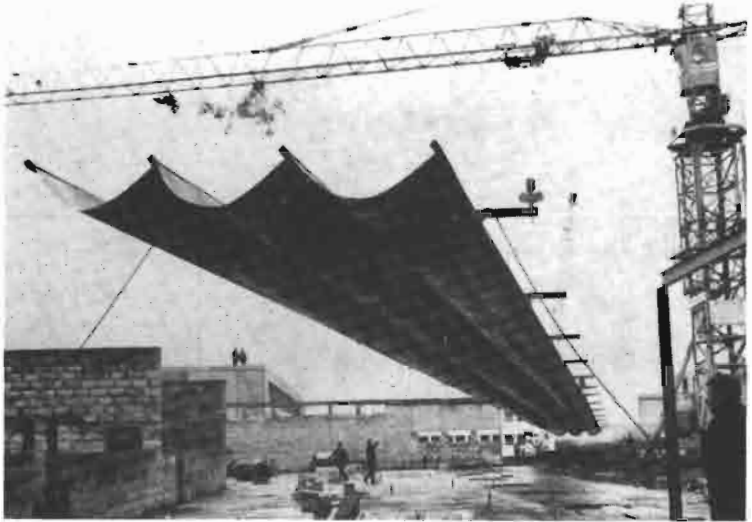


Bild 72

Montage eines ähnlichen Daches in Flins, Frankreich, [92].

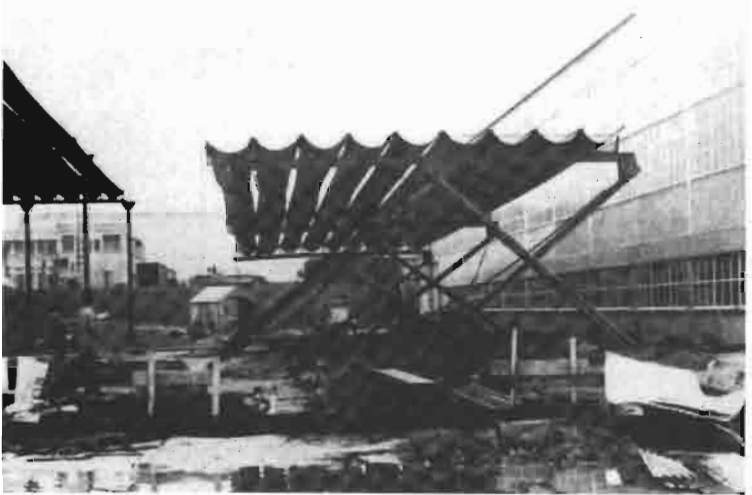


Bild 73

Weitere Variante der Montage. Es können Streifen bis zu 100m Länge nach diesem Verfahren eingebaut werden. Crépy-en-Valois, Frankreich, [92].





Bild 74

Rotationssymmetrisches, pneumatisch gespanntes Dach mit einem Durchmesser von 20m aus Blechstreifen von 0,3mm Dicke aus nichtrostendem Stahl. Die Blechsegmente sind nur in Meridianrichtung gespannt. In Ringrichtung sind sie lediglich zur Aufrechterhaltung des inneren Überdruckes nach Bild 76 verbunden, Japan 1979, [94],[95], [100].

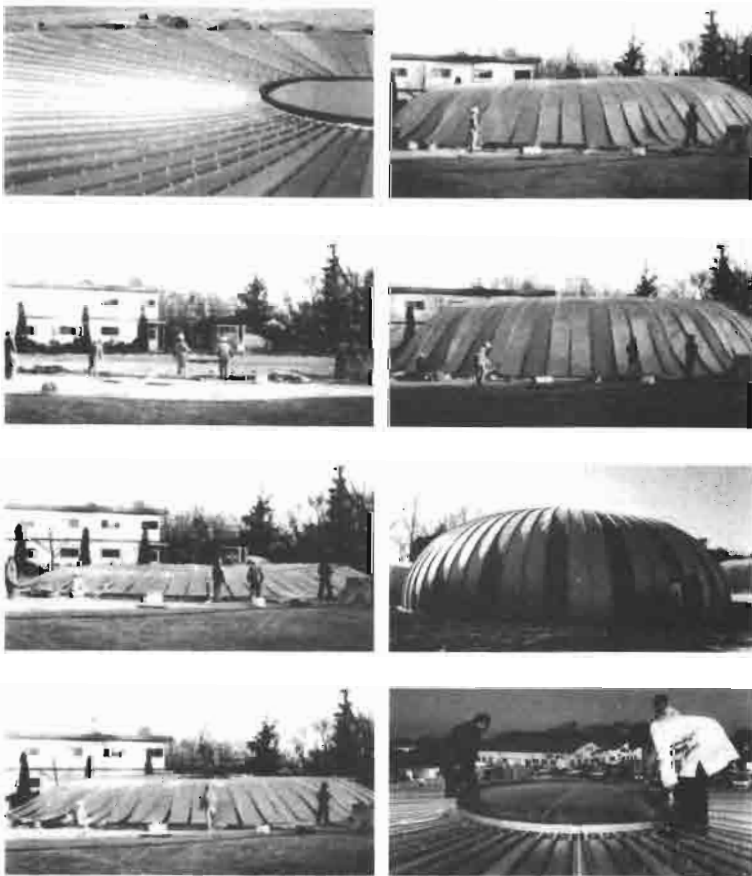


Bild 75

Verschiedene Stadien der Montage. Die Blechhülle wird durch Aufpumpen eines untergeschobenen, luftdichten Sackes angehoben [94],[95].

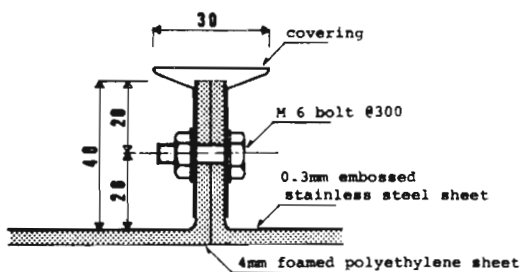


Bild 76

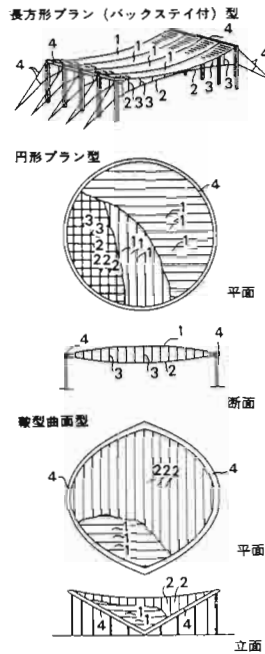
Detail der Verbindungsstruktur der Blechsegmente [95].

Bild 77

Japanischer Vorschlag, Hängedächer und Lufthallen aus Blechstreifen aufzubauen, die vorwiegend in Längsrichtung beansprucht werden. (Linke Seite: 1,2: Blechstreifen bzw. Seile; 3: Verbindungselemente; 4: Randkonstruktion. Rechte Seite: 1: Blechstreifen; 2: Luft mit Überdruck; 3: Randkonstruktion), 1979, [95].

バンド方式サスペンション構造の応用可能例

1: 金属膜バンド, 2: 緊張材, 3: 中間材, 4: 境界構造



バンド方式空気膜構造(2重膜)の応用可能例

1: 金属膜バンド, 2: 空気圧(正または負), 3: 境界構造

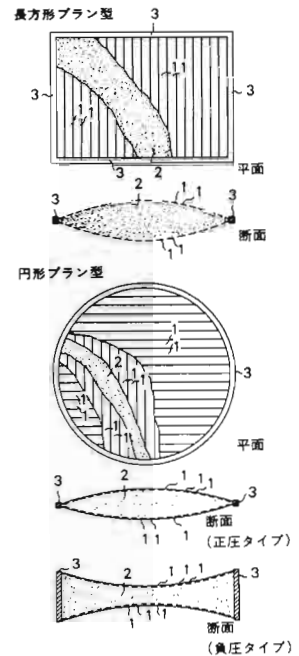


Bild 78

Prototyp eines Daches von 18m mal 18m aus Blechstreifen, das dem hyperbolischen Paraboloid ähnelt. Die Blechstreifen von 0,3mm Dicke sind an den Längskanten mit einer beweglichen Übergangskonstruktion verbunden. Sie werden durch eine Schar hängender Bänder von 1,2mm Dicke und 200mm Breite gespannt, 1981, [100].



1 Developed on the Ground



2 During Erection



3 During Erection



4 Completion

Bild 79

Im Grundriß kreisförmiges Membrankissen, von 4m Durchmesser, dessen kalottenförmige Begrenzungsfläche aus zwei orthogonalen Scharen von Blechstreifen besteht. Es wurde Blech aus nichtrostendem Stahl von 0,06mm Dicke verwendet 1981, [100].



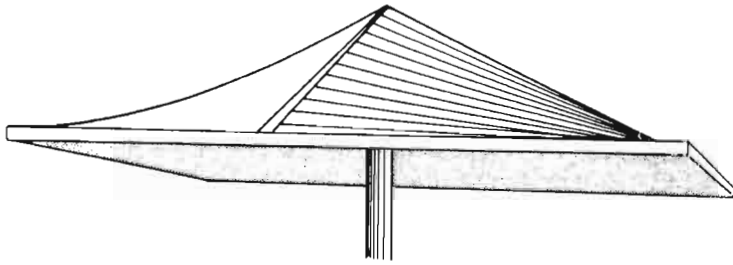


Bild 80

Hypardach aus Blechstreifen aus dem Jahr 1953. Die Membran wird auf Zug und auf Druck beansprucht [51],[52].

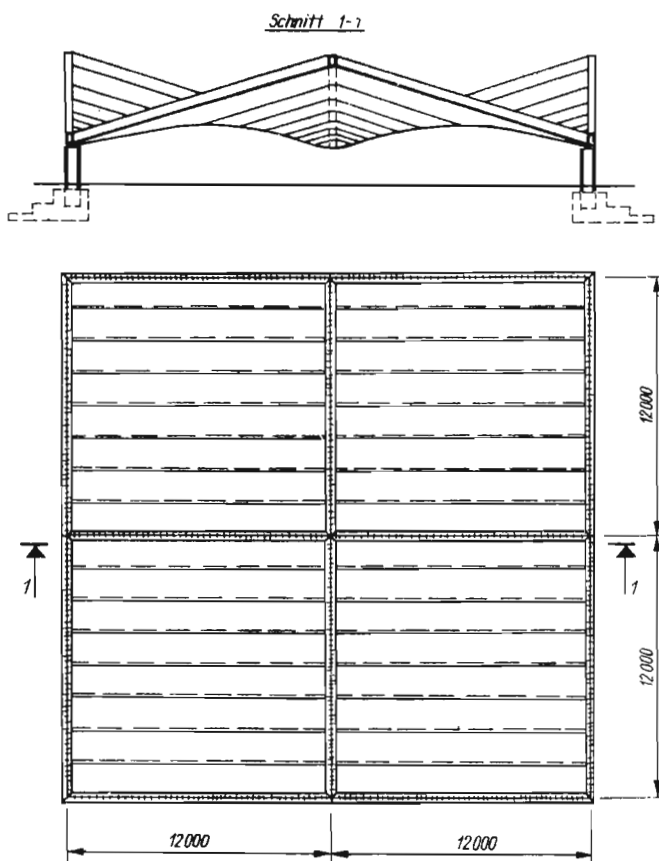


Bild 81

Hypardach von 24m mal 24m aus Blechstreifen einer Aluminium-Magnesium-Legierung. Die 1mm dicken Blechstreifen wurden untereinander und mit den Randträgern durch hochfeste Schrauben verbunden, Minsk, UdSSR, 1980, [98].

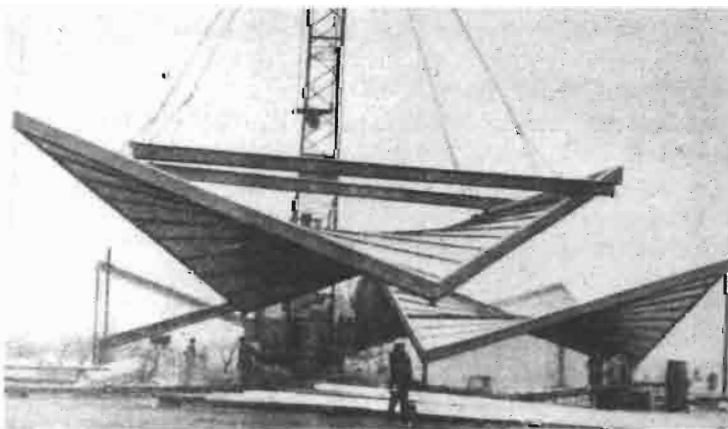


Bild 82

Die vorgefertigten Teilstücke mit einer Masse von etwa 3t werden montiert [98].

Bild 83

Projekt eines Membrankühlturmes aus Blech (unveröffentlichtes Projekt), Schlaich + Partner, Ingenieurbüro, Stgt., 1980.

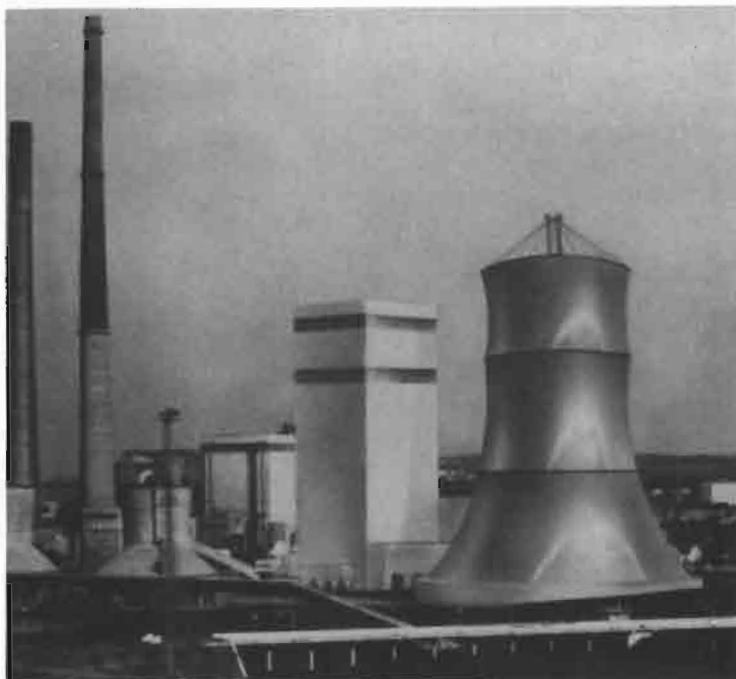


Bild 84

Prototyp eines Metallmembran-Hohlspiegels zur Konzentration des Sonnenlichtes mit einem Durchmesser von 5m. Die sphärische, konkave Spiegelfläche wird entsprechend dem Membrankissen (Bilder 61-65), jedoch mit innerem Unterdruck erzeugt und stabilisiert, 1980, [99],[106].

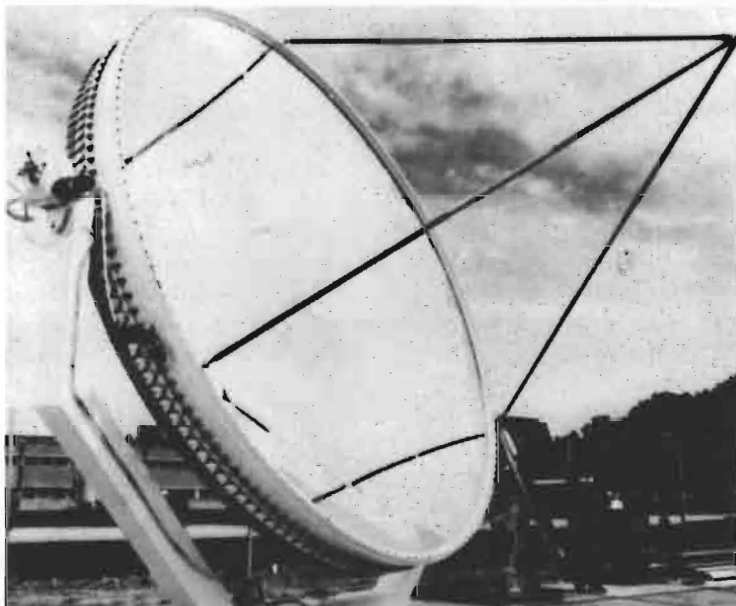


Bild 85

Metallmembran-Hohlspiegel von 4m Durchmesser und 9,5m Brennweite, 1981, [106].



2.3 Probleme bei der Verwendung von Blech

Es ist anzunehmen, daß die Metallmembrantragwerke längst eine größere Verbreitung gefunden hätten, wenn der Baustoff Blech nicht besondere fertigungstechnische Schwierigkeiten mit sich brächte. Die Hauptprobleme, die beim Herstellen eines zugbeanspruchten Flächentragwerkes aus Blech gelöst werden müssen, seien nachfolgend aufgeführt:

– *Die Handhabung großflächiger Blechteile ist sehr schwierig.*

Bleche haben scharfkantige Ränder und ein relativ hohes Gewicht. Außerdem neigen Bleche zum Knittern, sobald man unsachgemäß versucht, sie zu transportieren oder aufzuwickeln. Kleine, oft nur lokale Verwerfungen verursachen beim Hantieren sehr leicht weitere Falten und bleibende Knicke (Bild 86). Das Blechstück steift sich mehr und mehr aus. Die ursprünglich im ebenen Zustand vorhandene Biegebarkeit geht verloren.

– *Die Membran muß auf der Baustelle zusammengesetzt werden.*

Es können lediglich aus dem etwa 1,5m breiten Blechband zusammengesetzte Teilstreifen vorgefertigt werden. Die Breite dieser zu Rollen aufgewickelten Teilstreifen wird von den Transportbedingungen bestimmt (Bilder 45-47, 51, 68).

– *Es mangelt noch an geeigneten Fügetechniken für hochbelastbare Nähte.*

Das Schweißen von dünnen Blechen ist nicht ganz einfach. Im Prinzip ist es zwar machbar, doch das Herstellen sehr langer Nähte unter den Bedingungen der Baustelle gehört noch nicht zum Stand der Technik. Entwicklungsarbeiten hierzu an der Universität Stuttgart haben bereits zu ersten brauchbaren Ergebnissen geführt (Bilder 87-88, [33]).

– *Membranflächen sind in der Regel zweisinnig gekrümmt ($k_{Gauß} < 0$).*

Blechbänder lassen sich durch Biegen und damit auf einfache Weise nur einsinnig krümmen ($k_{Gauß} = 0$, Bilder 93-95). Ihnen fehlt nicht nur die Geschmeidigkeit herkömmlicher Membranbaustoffe, sondern auch die Anpassungsfähigkeit an beliebige Flächenformen, wie sie für zweischarige Netze und in geringerem Maße für Gewebe charakteristisch ist. Ihre hohe Schub- und Dehnsteifigkeit erfordert relativ kleine Zuschnittselemente, wenn man die Fläche durch Teilstücke approximieren will.

– *Die Anforderungen an Maßgenauigkeiten der Membrangeometrie sind sehr hoch.*

Geringste Fehler in der realisierten Membranfläche sind gleichbedeutend mit großen Kraftfehlern. Die Herstellung der Blechhaut auf einem Lehrgerüst, wie dies in [32] vorgeschlagen wird (Bild 89), scheint kaum praktikabel. Für das Lehrgerüst müßte ein sehr hoher Aufwand betrieben werden. Die Schweißschumpfungen entlang der Nähte (Bild 87) sind nicht zu vermeiden und führen zu großen Imperfektionen.

2.4 Methoden zur Realisierung der Membranfläche

Aufgrund der Aussagen des vorigen Abschnittes ist es offensichtlich, daß die traditionellen Fertigungsmethoden des textilen Bauens nicht auf die Herstellung von Metall-Membrantragwerken übertragen werden können. Man wird stets gezwungen sein, die Probleme der Formgebung und Montage mit einfachen, konkurrenzfähigen Methoden zu lösen. Ein sehr hoher Aufwand für Vorrichtungen - wie er beispielsweise für Metall-Membrankonstruktionen in der Raumfahrt betrieben wird - ist im Bereich der Bautechnik wohl nur selten zu rechtfertigen. Teile der Atlas-Rakete von 21 m Länge wurden als Metallmembran von nur 0,1 mm Dicke mit Hilfe komplizierter Vorrichtungen gefertigt (Bild 90, [61]). Die Vorrichtung zum Schweißen des Space Shuttle („cigarette-roller“) ist in Bildern 91 und 92 wiedergegeben.

2.4.1 Herstellen abwickelbarer Flächen

Der naheliegendste Grundgedanke zur Herstellung von Flächentragwerken aus Blech besteht darin, abwickelbare Flächen, sogenannte Torsen, zu verwirklichen. Torsen sind natürliche Grundformen für Blechgebilde. Sie lassen sich durch reines Biegen (dehnungslose Verformungen) gewinnen (Bilder 93-94). Damit ist von vornherein ein großer Teil der fertigungstechnischen Probleme ausgeschlossen.

Abwickelbare Flächen können mit großer Genauigkeit hergestellt werden. Sie lassen sich lückenlos von Blechbändern konstanter Breite überdecken. Es entsteht nahezu kein Verschnitt. Nähte können mit simplen Vorrichtungen produziert werden, da sie stets linear sein können. Größere Flächenteile können leicht vorfabriziert und als Rollen transportiert werden. Lehrgerüste und andere Montagehilfen zum Aufbau der Fläche sind dank der Schar geradliniger Erzeugender, die in jeder Torse enthalten ist, denkbar einfach zu gestalten (siehe z.B. Bild 35).

Röhrenartige Grundkörper können durch Bewickeln mit einem Band konstanter Breite hergestellt werden. Derartige gewickelte Flächen sind entweder Kreiszyylinder oder durch reines Biegen daraus hervorgegangene Flächen (Bild 95).

Als Metall-Membrantragwerke wurden Zylinder und Kegel ausgeführt (Bilder 13-15, 16-20, 34-40, 50-51, 70-73). Die nutzbare Vielfalt denkbarer Torsenflächen ist weit größer. Im Behälter- und Rohrleitungsbau [35] werden Übergangsstücke als Torsen ausgeführt. Sie werden als Verbindungstorsen zweier Raumkurven definiert (Bild 93). Auch Schraubtorsen spielen in der Blechbearbeitungstechnik eine gewisse Rolle [36],[37].

Bild 86

Ausschnitt der Blechmembran des Modelltragwerkes, das auf den Bildern 61-65 dargestellt ist. Geringe Sorgfalt beim Herstellen und beim Transport ließen starke Falten, Knicke und Verwerfungen entstehen.



Bild 87

Halbautomatische Schweißmaschine zum Verbinden dünner Bleche beliebiger Länge. Der WIG-Schweißbrenner wird auf einem ferngesteuerten Wagen am Blechstoß entlanggeführt. Aufkantungen von etwa 4mm Höhe an den zu verschweißenden Blechrändern geben dem Wagen eine Führung. Die dargestellte Schweißprobe ist aus Blech von 0,3mm Dicke. Deutlich erkennt man die Schweißschumpfungen.

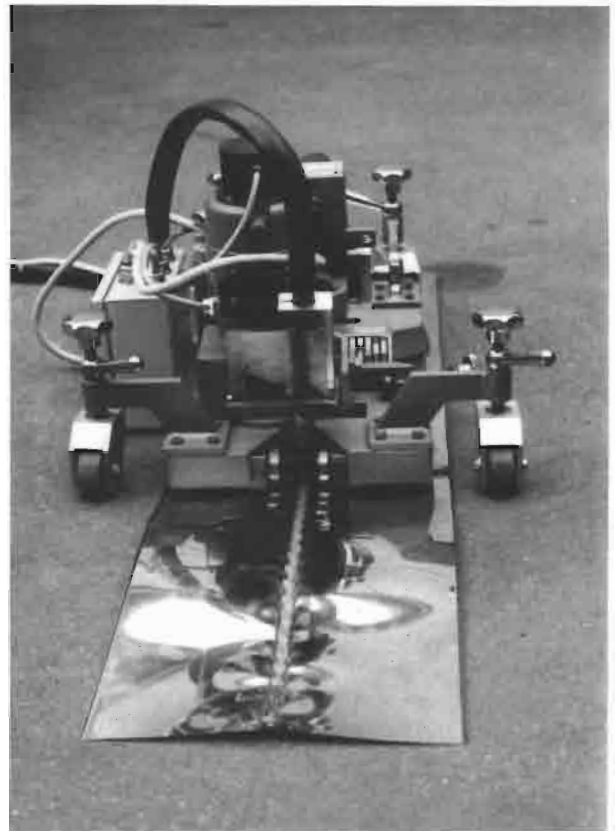
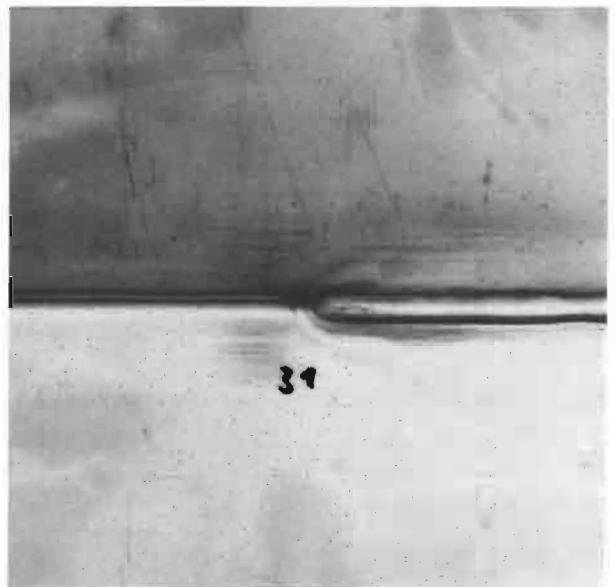


Bild 88

Detail eines Stoßes. Links sind die Aufkantungen, rechts ist die fertige Naht.



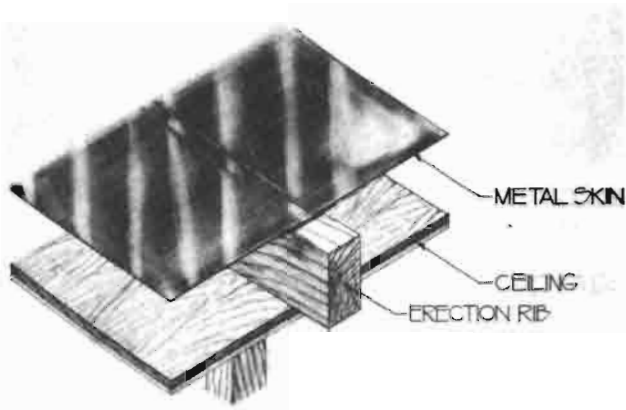


Bild 89
Vorschlag für die Montage von Metall-Membrandächern auf einem Lehrgerüst nach [32].

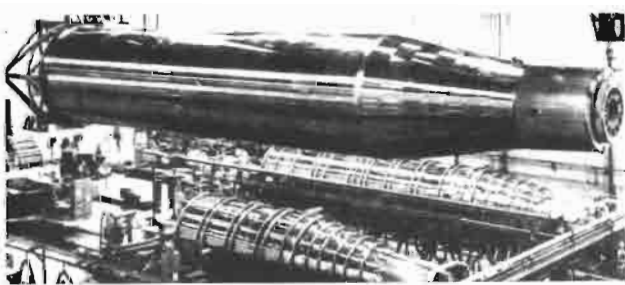


Bild 90
Teil der Atlas-Rakete von 21m Länge aus 0,1mm dicker Stahlfolie [61].

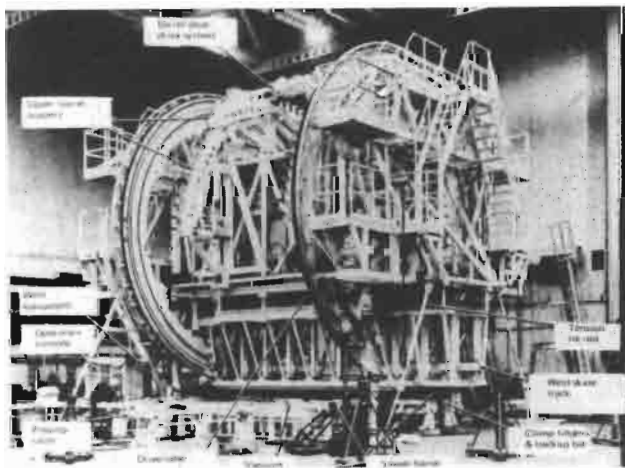


Bild 91
Aufwendige Vorrichtung zum Zusammenschweißen eines Segmentes der zylindrischen Tanks des Space Shuttle [102].

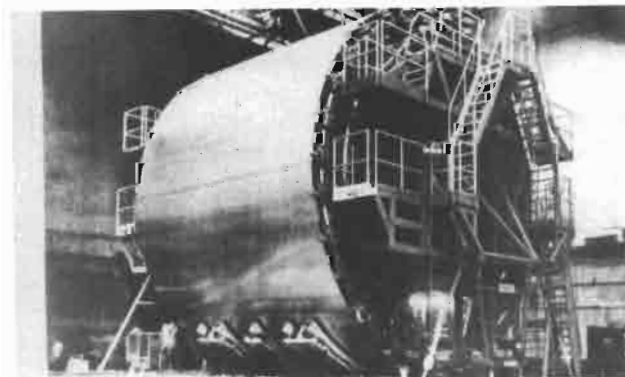


Bild 92
Acht derartiger Elemente aus Aluminium werden zu einem Tank für flüssigen Wasserstoff zusammengesetzt [102].

Bild 93

Verbindungstorse zweier zylindrischer Rohre mit Abwicklung [35].

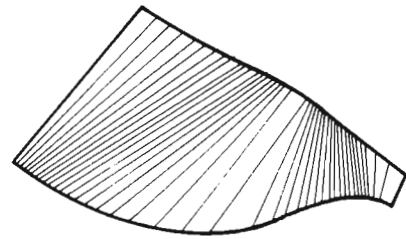
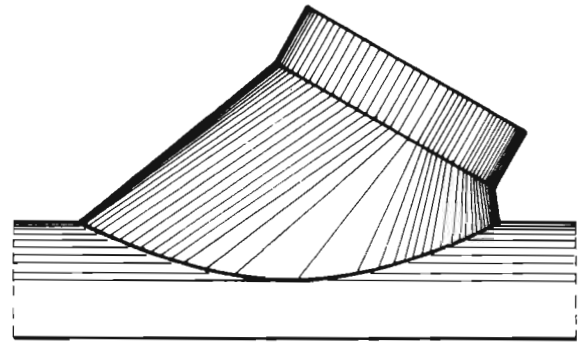


Bild 94

Durch Randkräfte können Torsen nur entlang der geraden Erzeugenden gespannt werden, während Flächenlasten in Richtung der Krümmungslinien senkrecht zu den Erzeugenden abgetragen werden.

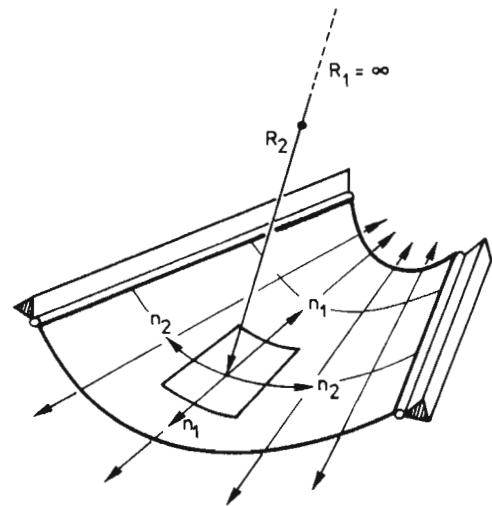
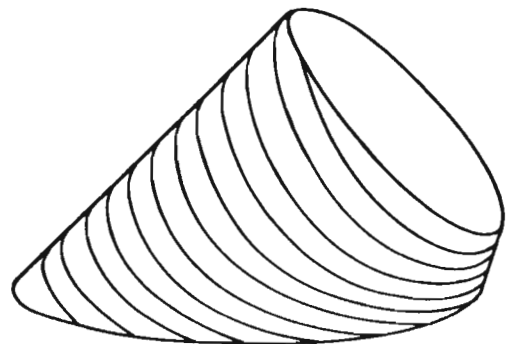


Bild 95

Röhrenartiger Körper, der durch Bewickeln mit einem Blechband konstanter Breite entstanden ist.



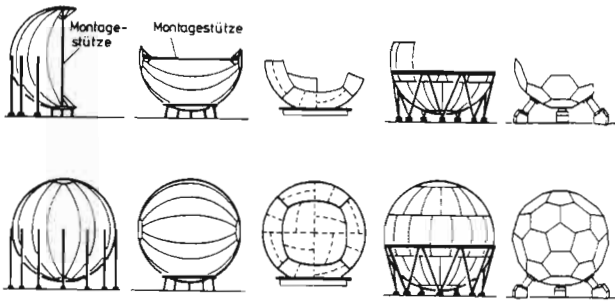


Bild 96
Übliche Vorgehensweise bei der Montage von Stahlbehältern [97].

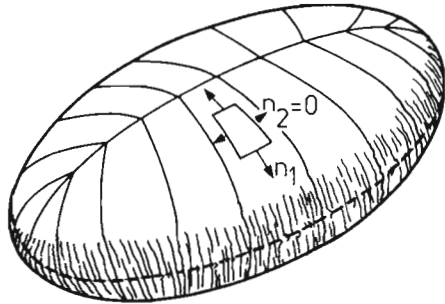


Bild 97
Pneumatisch gespannte Membran mit verschwindender Hauptschnittkraft n_2 [38].

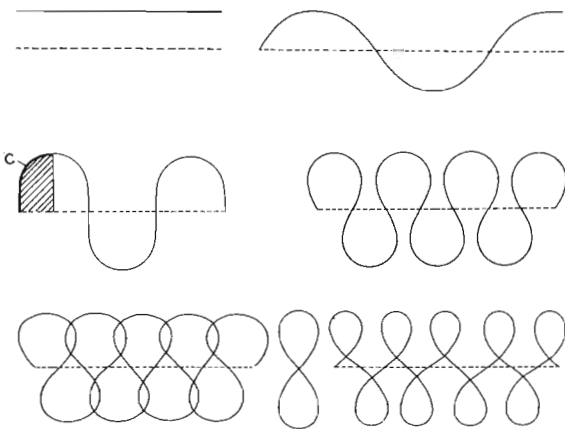


Bild 98
Schar der sogenannten Eulerschen Elastika. Wählt man die gestrichelte Gerade als Rotationsachse, so entsteht die Form der einachsig gespannten Rotationsmembranen [38].

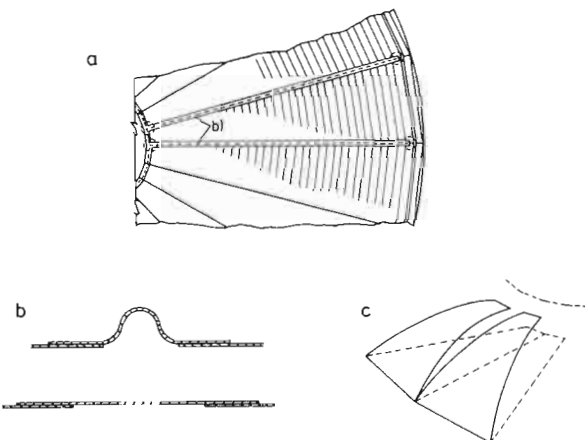


Bild 99
Prinzipskizze zur konstruktiven Grundidee des auf den Bildern 66-68 dargestellten Daches. Die Dachhaut wird aus ebenen Segmenten **a** zusammengesetzt und kann durch die besondere Gestalt der Verbindungsstreifen **b** eine gewölbte Form annehmen **c**.

2.4.2 Zusammensetzen aus Zuschnittselementen

Metall-Membranflächen können, ebenso wie es beim Textilen Bauen üblich ist, durch Aneinanderfügen von Zuschnittselementen hergestellt werden. Mit technisch befriedigender Genauigkeit kann im Prinzip jede Fläche durch Torsenstücke approximiert werden. (Schiffsrümpfe und Behälter (Bild 96) werden so gebaut. Der Aufwand für Gerüste und Montagevorrichtungen ist relativ hoch.)

Eine weitere Schwierigkeit beim Vorgehen nach dieser Methode bereiten die Schweißnähte auf der gekrümmten Fläche. Dies ist bei dünnen Blechen, deren Verschweißen in der horizontalen Ebene schon schwierig genug ist, kaum zu bewältigen. Dennoch wurde schon so vorgegangen (Bilder 15 und 19)! Durch Schweißschrumpfungen ergeben sich Abweichungen von der Idealform, die nur schwer zu beherrschen sind. So zeichnet sich zum Beispiel das Zuschnittsmuster auf dem Dach (Bild 21) durch die Schrumpfungen entlang der Nähte deutlich ab.

2.4.3 Blechstreifen als einachsig tragende Teile (Streifenmethoden)

Unter dem Stichwort „Streifenmethoden“ seien alle diejenigen Verfahren eingeordnet, die Flächen aus Blechstreifen aufbauen und dabei weitgehend bis völlig auf die zweiachsiale Tragfähigkeit verzichten. Die Naht entlang der Blechkante - sofern überhaupt eine vorhanden ist - spielt nur eine untergeordnete Rolle. Ihr wird eventuell eine dichtende Funktion zugewiesen.

Durch Verzicht auf die Entfaltung einer zweiachsialen Lastabtragung in der Blechbahn wird deren Tragfähigkeit nur zur Hälfte genutzt. Man hat allerdings nicht die Problematik der Übertragung der Membrankräfte quer zu den Streifenkanten zu lösen.

Läßt man Überlappungen oder Fugen zu, so können beliebige Flächen aus Streifen aufgebaut werden. Auch Flechtwerke sind durchaus möglich (Bild 42). In der Studienarbeit [68] werden konstruktive Entwürfe zur Herstellung von Hyparflächen aus zwei Scharen von Blechstreifen behandelt. Die Montage des Prototyps einer dem hyperbolischen Paraboloid ähnlichen Fläche aus Blechstreifen ist in Bild 78 dargestellt [100].

Sind die Längskanten der Blechstreifen nicht kraftschlüssig miteinander verbunden, so verschwindet bei einscharig aufgebauten Flächen die Hauptschnittkraft n_2 . In [38] werden solche Membranen „einseitig gespannte Häute“ genannt. Bei derartigen, pneumatisch gespannten Membranen (Bild 97) ist das Produkt aus n_1 , der Hauptschnittkraft in Spannrichtung, und der Krümmung in Richtung von n_1 konstant. Die Krümmungslinie in Spannrichtung ist eine geodätische Linie. Sichtbar werden diese Linien, wenn die gespannte Fläche Falten aufweist.

Die einachsig gespannte Rotationsmembran unter konstantem Innendruck ist in der Literatur des öfteren behandelt [23],[38],[39],[40],[94],[95]. Für sie gilt, daß sich die Hauptkrümmungsradien wie 1:2 verhalten. Die Schar möglicher

Meridianformen, die dieser Bedingung genügen, sind in Bild 98 dargestellt.

Die Kuppelform nach Bild 74 entsteht durch Rotation des Kurvenausschnittes c in Bild 98. Diese Form hat im Scheitel eine Singularität. Sie wird in [40] als „flachste pneumatisch bildbare Rotationsmembran“ bezeichnet.

Der Prototyp eines Metall-Membrantragwerkes, das als einachsig, pneumatisch gespannte Rotationsmembran ausgeführt wurde, ist in [94],[95] beschrieben (Bilder 74-75). Die dichtende Verbindung der Blehkanten durch eine Konstruktion nach Bild 76 ist erforderlich, um den inneren Überdruck aufrechterhalten zu können.

2.4.4 Ein kanadisches Patent

Eine elegante Fertigungsmethode für kalottenförmige Membrandächer aus Blech wurde in Kanada entwickelt [69]. Ausgleichsstreifen in den Fugen vorgefertigter, ebener Zuschnittelemente ermöglichen den Übergang von einer ebenen Ausgangsform in eine nach unten durchhängende oder nach oben gewölbte Membran (Bild 99). Die Ausgleichsstreifen werden in ihren Abmessungen so festgelegt und kraftschlüssig mit den Zuschnittelementen verbunden, daß die Membran in ihrer Wölbform zweiachsig beansprucht wird.

Die nach diesem Verfahren hergestellten oder geplanten Formen sind auf flache sphärische oder ellipsoidische Gebilde beschränkt. Negativ gekrümmte Flächen wurden bisher nicht in Betracht gezogen. Das verwundert, denn es dürfte auch dabei keine Probleme geben. Umgekehrt wie bei den positiv gekrümmten Flächen nimmt bei den negativ gekrümmten Flächen die Fugenbreite zwischen den Zuschnittelementen zum Rand hin zu. Es müßte also gelingen, den Rand so zu konstruieren, daß er den Dehnweg der Fuge mitmacht. Oder man dürfte die Membran und den Rand erst dann miteinander verbinden, nachdem die Membran entfaltet ist.

In Halifax, Kanada, wurde eine Sporthallenüberdachung mit 91m Spannweite nach dieser Methode gebaut (Bilder 66-69, [70],[87],[88],[96]).

2.4.5 Methode des formgebenden Lastfalles

Die oben angeführten Verfahren zum Bauen von zugbeanspruchten Membranschalen gehen durchweg davon aus, die Membranfläche aus Blechstücken aufzubauen, die der Flächenkrümmung durch reine Biegung (also frei von Längsdehnungen) angepaßt werden. Dies ist jedoch nur bei abwickelbaren Flächen ohne Fehler möglich. Bei allen zweisinnig gekrümmten Flächen sind Abweichungen von der idealen Flächenform und damit des Kraftflusses unvermeidlich.

Die Methode des formgebenden Lastfalles, die im Kapitel 3 ausführlich beschrieben wird, löst sich von dieser gravierenden Einschränkung. Statt Dehnungen der Membran zu vermeiden, werden diese gezielt herbeigeführt.

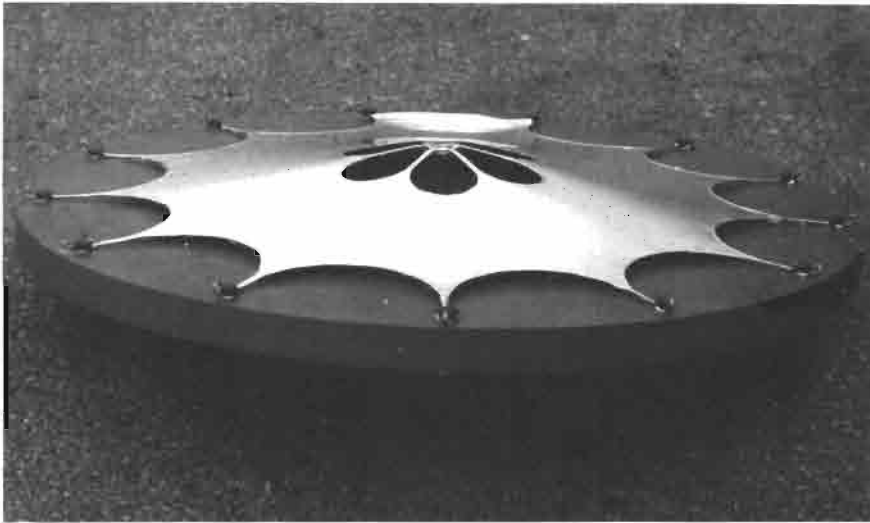


Bild 100

Modell eines Zeltes, das nach der Methode des formgebenden Lastfalles aufgespannt wurde. Durchmesser 40cm, Aluminiumfolie von 0,03mm Dicke.

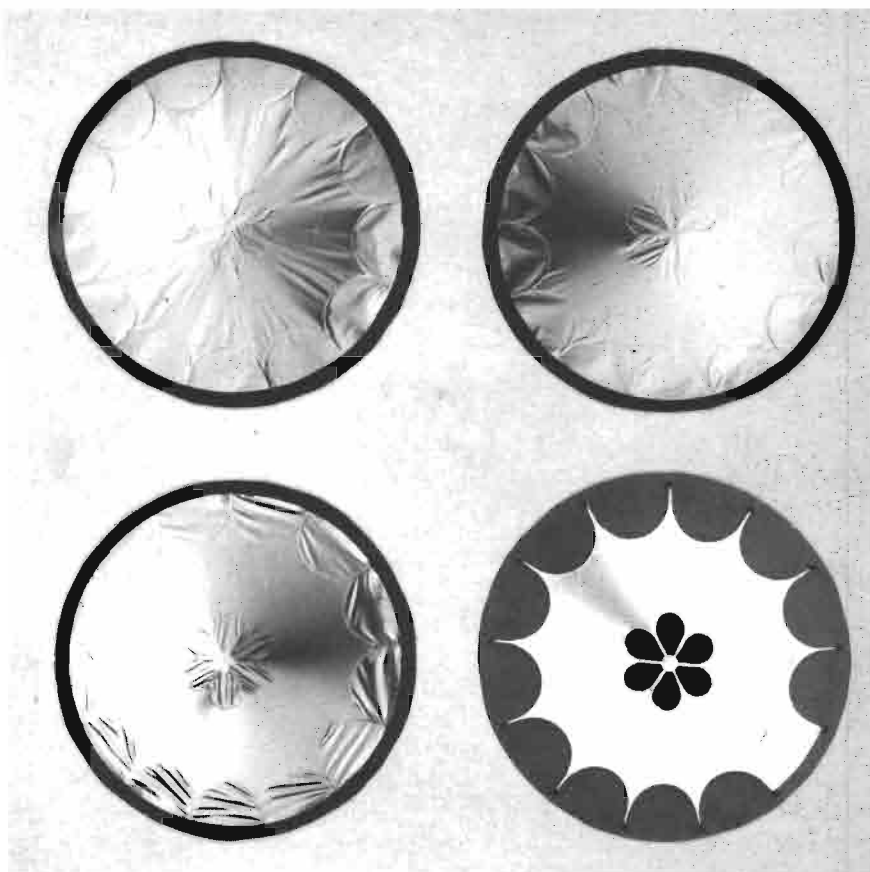


Bild 101

Stadien der Formgebung. Die Metallfolie wurde durch Anheben der zentralen Stütze und durch Ziehen an den Verankerungspunkten der Randgirlande aufgespannt.

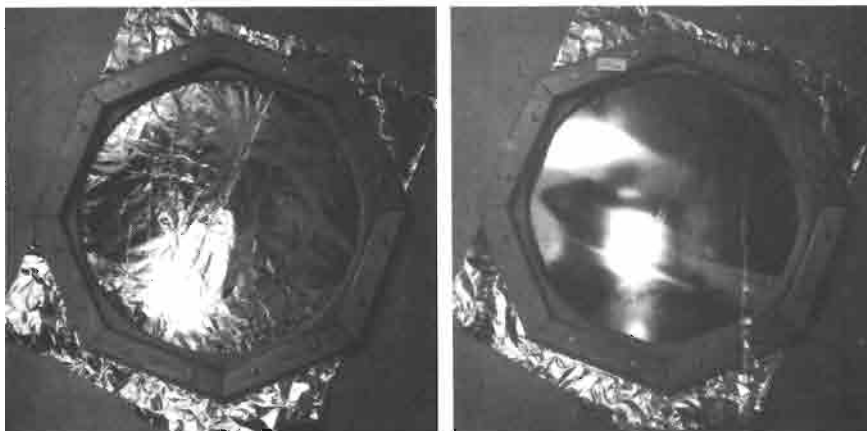


Bild 102

Eine Aluminiumfolie, die in einen Klemmring eingespannt ist, wird durch einen inneren Überdruck formgebend aufgespannt.

3. Das durch eine formgebende Belastung aufgespannte Metall-Membrantragwerk

3.1 Der formgebende Lastfall

Die Methode des formgebenden Lastfalles löst die mit dem Bauen von Metall-Membrantragwerken verbundenen fertigungstechnischen Probleme (siehe 2.3), indem sie die Stoffeigenschaften des Blechbandes mit Anforderungen des Tragwerkes in Einklang bringt. Das Tragwerk aus einer sehr dünnen, zweisinnig gekrümmten und gespannten Blechhaut wird damit bautechnisch realisierbar.

3.1.1 Grundgedanke und Vorgehensweise

Der Grundgedanke des Lösungsweges „formgebender Lastfall“ besteht darin, die Form der Membranschale unter Nutzung der Bildsamkeit des metallischen Membranbaustoffes am Gesamttragwerk zu erzeugen [76]bis[79]. Dazu wird die Membran aus Blechbändern direkt vom Bund oder aus größeren vorgefertigten Zuschnittelementen auf der Baustelle zu einer einfachen, meist ebenen Vorform zusammengesetzt. Nachdem die Membran mit ihren Randelementen verbunden ist, wird sie durch eine gezielte Folge von Belastungen, den formgebenden Lasten, in die gewünschte Form gebracht. Dabei treten in der Membran und gegebenenfalls in Zugrändern große plastische Verformungen auf. Es findet eine Flächenvergrößerung des Werkstoffelementes bei gleichzeitiger Abnahme der Dicke statt. Die Linienelemente in der Fläche werden so gedehnt, daß aus einer Fläche mit der Gaußschen Krümmung Null (der Vorform) die zweisinnig positiv oder negativ gekrümmte Membranfläche entsteht.

Nachdem die Membran ihre Sollform erreicht hat, werden die formgebenden Lasten abgemindert. Der verbleibende Beanspruchungszustand dient von nun an der Formstabilisierung des Tragwerkes. Er fungiert als systembestimmender Spannungszustand (siehe 2.1.2). Es ist möglich, sowohl durch Flächenlasten als auch durch Randlasten aufgespannte Membrantragwerke (Bilder 1-3) nach der Methode des formgebenden Lastfalles zu bauen. Stadien der Formgebung zweier Modelle sind in den Bildern 100-102 dargestellt.

Dem Bauingenieur mag diese Vorgehensweise zunächst neuartig oder fremd erscheinen, da er es nicht gewohnt ist, die plastische Verformbarkeit der Metalle zum Gestalten eines gesamten Tragwerkes zu nutzen. Bewußt eingeführt werden Umformungen nur selten wie z. B. beim Nieten oder beim Biegen von Bewehrungsstählen. Und man kalkuliert auch ein, daß örtliche Spannungsspitzen durch das plastische Formänderungsvermögen abgebaut werden. Ansonsten wird der metallische Baustoff aber fast ausschließlich als Hookescher Werkstoff betrachtet. Man kann fast behaupten, daß der plastische Bereich mit einem Tabu behaftet ist, da der Bauingenieur das Tragwerk stets mit einem Abstand gegen das Fließen bemißt.

Das Zuschnittsproblem, das bei Membrantragwerken zu den zentralen Problemen gehört, wird durch Inanspruchnahme der Bildsamkeit der Bleche auf einfache, geradezu elegante Weise gelöst. Es ist ein unschätzbare Vorteil, daß sich die auf Längenfehler äußerst sensibel reagierende Gleichgewichtsfigur der Membran unter den formgebenden Lasten von selbst einstellt. Dies geschieht zudem noch mit einer Präzision und einem ausgeglichenen Kraftfluß in der Membran, die auch bei sorgfältigster Ausführung mit einem approximierenden Zuschnitt nicht realisiert werden können.

Dieser Sachverhalt sei anhand der Bilder 64-65 beispielhaft belegt. Die in hohem Maße unperfekt ebene, ja regelrecht zerknitterte Membran des Modelltragwerkes (siehe Bild 86) von 5m Durchmesser wurde im Verlauf der Formgebung völlig glatt gezogen und äußerst gleichmäßig zu einer Kalottenform aufgewölbt. Bezogen auf eine „bestpassende Kugelfläche“ ergaben sich Abweichungen von nur 0,5% bis 1,0% des Kugelradius [78],[104].

Die Perfektion derartig hergestellter sphärischer Metall-Membranflächen führte auf die Idee, auf diese Weise Hohlspiegel zur Gewinnung solarer Energie zu bauen (Bilder 84-85), [105]. Es sind sehr große Hohlspiegel hoher optischer Güte mit relativ geringen Mitteln machbar [99],[106],[150].

Ein weiterer Vorteil der Methode des formgebenden Lastfalles ist darin zu sehen, daß die Arbeitsfläche zur Montage der Bleche sehr einfach ist. In vielen Fällen genügt eine ebene Unterlage (Bilder 24-29,61-65,84-85,100-102,106-113, 122-126). Auch bei nicht ebener, sondern abwickelbarer Vorform (Bilder 111-118) ist das erforderliche Montagegerüst wesentlich billiger herzustellen, als es ein Lehrgerüst wäre, das die beabsichtigte gekrümmte Membranform hat.

3.1.2 Für den formgebenden Lastfall geeignete Bleche

Im Bereich der Werkstoffmechanik und der Blechumformtechnik liegt ein reicher Wissensschatz über das Verhalten von Metallen und Blechen unter Zugbeanspruchungen im plastischen Bereich vor (siehe Literaturverzeichnis ab [136]). Demnach herrscht kein Mangel an metallischen Werkstoffen, die über eine ausreichende plastische Dehnbarkeit verfügen. Insbesondere eignen sich die Metalle mit kubisch-flächenzentriertem Gitter. Sie bieten besonders viele Gleitebenen bei der plastischen Verformung an.

Zur Klärung der Werkstoffeignung sind insbesondere die Erfahrungen der Blechformtechnik direkt nutzbar. Gemäß den dort geltenden Begriffen kann der formgebende Lastfall als ein Umformvorgang unter zweiachsiger Zugbelastung interpretiert werden, für den man die Bezeichnung des Streckziehens gewählt hat [103],[107].

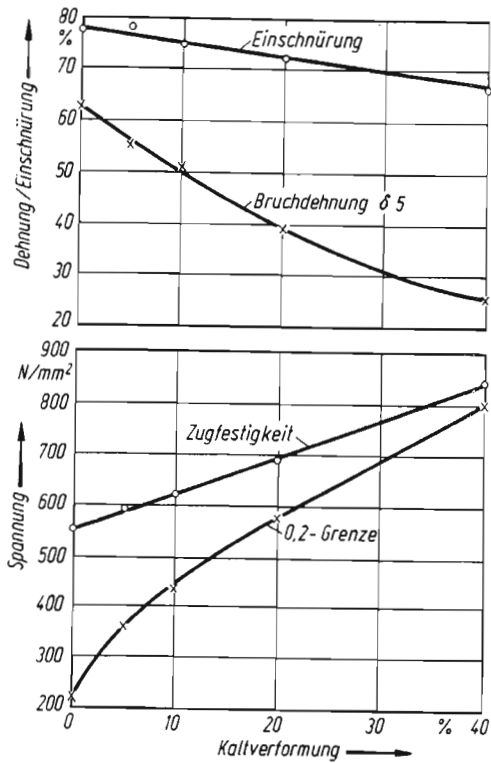


Bild 103

Mechanische Eigenschaften des austenitischen Stahles X5 Cr Ni 18 9 in Abhängigkeit von der Kaltverformung, aus [213].



Bild 104

Ursprünglich ebene, mit einer Schweißnaht (Folienstumpfstoß) versehene Probe aus austenitischem Stahlblech von 1mm Dicke, die durch eine hydraulische Belastung halbkuglig aufgewölbt wurde. Im Pol der Kalotte traten Dehnungen von 50% auf.

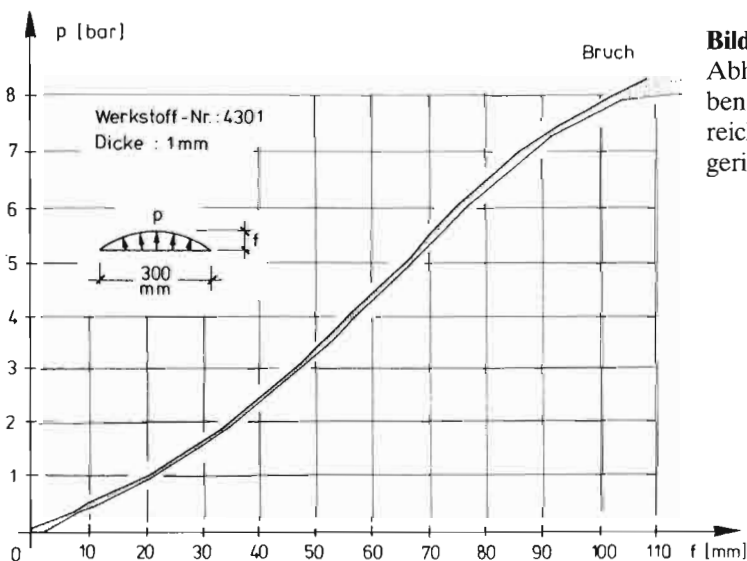


Bild 105

Abhängigkeit der Wölbhöhe f vom Innendruck p_i für Proben mit und ohne Schweißnaht. Dargestellt ist der Streubereich von je zwei Proben. Die Nähte haben einen äußerst geringen Einfluß auf den Kurvenverlauf.

Als Maß für die Streckziehbarkeit können die Gleichmaßdehnung, die Bruchdehnung und die Tiefung nach dem Erichsen-Versuch herangezogen werden. Je höher die in diesen Prüfverfahren erzielten Werte sind, desto besser ist die Streckziehbarkeit. Für das Streckziehen werden unter anderem Tiefziehblech, austenitisches Stahlblech, Aluminium, Kupfer und Kupferlegierungen verwendet. Eine besonders hohe Streckziehbarkeit weist der austenitische Stahl X5 CrNi 18 9 auf. Die Gleichmaßdehnung von austenitischem Stahlblech, welches nach dem Kaltwalzen weichgeglüht wurde, kann nach [148] 50 %-60 % betragen. Die von Aluminium ist um die Hälfte geringer.

Wichtige Werkstoffeigenschaften werden durch die Streckziehbeanspruchung verbessert: Die Zugfestigkeit und die Fließgrenze nehmen mit wachsender Kaltverformung zu. Ebenso ist ein Härteanstieg zu verzeichnen. Dagegen nimmt die Verformbarkeit (z.B. die Bruchdehnung) mit zunehmender Zugumformung ab (Bild 103). Nach [108] nimmt auch die Dauerfestigkeit durch eine Kaltumformung zu.

Beim formgebenden Aufspannen der Membran durch Streckziehen wird außer von der Duktilität in unverzichtbarer Weise auch von der Verfestigung Gebrauch gemacht. Durch einen Anstieg der Fließgrenze mit wachsendem Umformgrad ist es möglich, daß die anfänglich kleinen plastischen Bereiche wachsen und nach und nach die ganze Fläche erfassen. Dank der Verfestigung können Imperfektionen (z. B. Maßabweichungen und Schweißschumpfungen) in der Membran (siehe Beispiel in 3.1.1) vollständig beseitigt werden.

Da Bleche nur in begrenzter Breite hergestellt werden, ist eine geeignete Fügechnik unverzichtbar. Diese muß vor allem den Anforderungen des formgebenden Lastfalles gewachsen sein. Untersuchungen an geschweißten Proben aus Stahlblech haben ergeben, daß es möglich ist, Bleche ohne nennenswerte Abminderung der Streckziehbarkeit zu verbinden. In Bild 104 ist eine ursprünglich ebene, im Berstversuch kalottenförmig aufgewölbte Probe mit einem Folienstumpfstoß wiedergegeben. Sie ertrug den gleichen Innendruck bei gleicher Aufwölbung wie entsprechende Proben ohne Naht. In Bild 105 sind die Aufwölbungshöhen f in Abhängigkeit vom Innendruck für je 2 Proben mit und ohne Naht dargestellt.

Der Folienstumpfstoß eignet sich vorzugsweise für die Werkstattfertigung und läßt zudem nur Nähte von begrenzter Länge zu. Deshalb wurde das in Abschnitt 2.3, Bilder 87-88, erwähnte Schweißverfahren entwickelt. Mit ihm ist es möglich, beliebig lange Nähte ohne aufwendige Einspannvorrichtungen auf der Baustelle herzustellen.

3.1.3 Variationsbreite der Methode des formgebenden Lastfalles

Die Methode des formgebenden Lastfalles kann in sehr vielfältiger Weise variiert werden. Modifikationen sind möglich durch den gewählten Bereich der plastischen Deh-

nungen, den Werkstoff, die Art der Lasteintragung und in besonderem Maße durch das gewählte statische System in der Ausgangsform.

Kleine Dehnungen von etwa nur 1 % sind dann erwünscht, wenn es darum geht, die Ausgangsform nur wenig zu verändern. Häufig können bereits damit ein wesentlich günstigeres Tragverhalten erzielt und Imperfektionen beseitigt werden. In [109] wird für ein derartiges Vorgehen der Begriff des Fließvergütens verwendet.

Den plastischen Dehnungen ist eine Grenze vom Werkstoff her vorgegeben (siehe 3.3.2.6). Manche gut umformbare Metalle lassen Dehnungen von Linienelementen in der Blechebene von etwa 50 % zu. So kann eine ebene, am Rand eingespannte Ronde durch hydraulische Belastung zu einer halbkugeligen Fläche umgeformt werden (Bild 104). Durch eine Wärmebehandlung kann die Verfestigung rückgängig gemacht werden. Der nichtrostende austenitische Stahl X5 CrNi 18 9 wird ähnlich wie Kupfer wieder weich und bildsam, wenn er erhitzt und abgeschreckt wird ($T = 1000$ bis 1050°C , Abkühlen der dünnen Bleche an Luft.) Möglicherweise läßt sich dieser Effekt zur Steigerung der Dehnbarkeit bautechnisch nutzen.

Die Bilder 106-126 verdeutlichen den Einfluß der Belastung im Zusammenhang mit der Vorform auf die entstehende Geometrie der Membranfläche. Die Vielfalt möglicher Formen kann durch das Einfügen von Verstärkungen (linienförmig und flächig) und die Belastungsart und -abfolge in hohem Maße erweitert werden.

Die Belastungsgeschwindigkeit wirkt sich auf die Form der Membran und die Reaktionskräfte der Randkonstruktion aus (siehe 3.3.4, Bilder 183-188). Um gegebenenfalls die Kräfte im Druckring des Systems nach Bild 62 bei der Formgebung zu reduzieren, wurde eine stoßartig wirkende Flächenlast in Betracht gezogen. Um den gleichen Stich der Membran zu erzeugen, benötigt man einen Druckstoß von etwa halber Maximalintensität wie der quasi statische Lastfall. Dies führt zu entsprechend reduzierten Druckringkräften. Allerdings ist eine dynamische Formgebung mit den Mitteln der Explosivumformung [110] offenbar kontrolliert nur dann möglich, wenn die Membran dabei gegen eine feste Form gepreßt wird [111]. Auch das Phänomen der Superplastizität (bestimmte Legierungen können bis zu 1000 % gedehnt werden) kann bautechnisch wohl kaum genutzt werden, da erhöhte Temperaturen von, je nach Legierung, mehreren hundert Grad Celsius im umzuförmenden Bauteil herrschen müssen [112].

Sicherlich ist es möglich, die Methode des formgebenden Lastfalles auf andere Werkstoffe wie etwa Kunststoff-Folien und Gewebe aus Metallen und Nichtmetallen anzuwenden. Derartige Überlegungen sollen hier jedoch nicht weiterverfolgt werden.

3.2 Experimentelle Untersuchungen mit Folienmodellen

Nach [113] wird der Versuch als Werkzeug gesehen, „frei von den Fesseln sehr begrenzter theoretischer Kenntnisse der Mechanik in den Bereich der uns noch verborgenen Vielfalt physikalisch möglicher baulicher Strukturen vorzudringen“. In diesem Sinne wurde diese Arbeit entscheidend durch Modellversuche beeinflusst. Als besonders stimulierend haben sich dabei Versuche mit sogenannten Prinzipmodellen herausgestellt (siehe Abschnitt 3.2.1). Sie standen am Anfang des Forschungsprojektes „Metall-Membrantragwerke“ und haben genügend Aussage- und Überzeugungskraft besessen, um die weiteren Entwicklungsschritte zu rechtfertigen. Diese bestanden in dem Bau eines größeren Modelltragwerkes (Bilder 61-65), der Gewinnung weiterer Informationen über die Vorgänge bei der Formgebung anhand von Meßmodellen (siehe Abschnitt 3.2.3) und Prototypen erster industrieller Anwendungen (siehe Bilder 84-85).

3.2.1 Prinzipmodelle

Prinzipmodelle sollen vorwiegend qualitativ den Kern einer konstruktiven Idee oder eines Entwurfsgedankens verdeutlichen, erproben und in mehr oder weniger großem Umfang auch die Machbarkeit unter Beweis stellen. Sie werden möglichst einfach und mit geringem Aufwand hergestellt. Werkzeuge und Materialien aus einem gewöhnlichen Haushalt sind oft ausreichend.

Der Wert, den Prinzipmodelle für den entwerfenden Ingenieur besitzen können, kann gar nicht hoch genug eingeschätzt werden, denn sie gestatten einen direkten Umgang mit dem Werkstoff und dem Tragwerk. Beanspruchungen können manuell aufgebracht, die Reaktionen des Tragwerkes ohne aufwendige Hilfsmittel beobachtet werden. Auf diese Weise werden Fehlerquellen im Detail und in den grundlegenden Annahmen frühzeitig erkannt. Die Bildung von Varianten und eine erste Optimierung werden spielerisch erarbeitet. Es kann eine anders nicht zu erfahrende, geradezu sinnliche Beziehung zum Baustoff und zum Tragwerk entstehen.

In den Bildern 100-102 und 106-124 sind Prinzipmodelle von Metall-Membrantragwerken dargestellt. Bis auf die Modelle in den Bildern 117-121 wurden alle Modelle aus dünnster Aluminiumfolie (Haushaltsfolie) von 0,02 bis 0,03mm Dicke [115] und aus Stahlfolie von 0,025mm Dicke angefertigt.

Bild 106

Modell eines kalottenförmigen Hängedaches aus einer dünnen Aluminiumfolie.

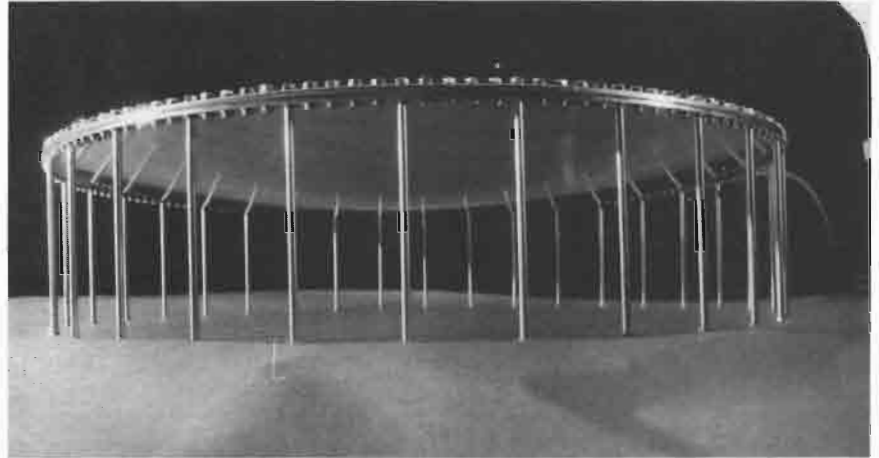


Bild 107

Die im Grundriß rechteckige, mit ausgerundeten Ecken versehene Membran wurde pneumatisch geformt. Aluminiumfolie.

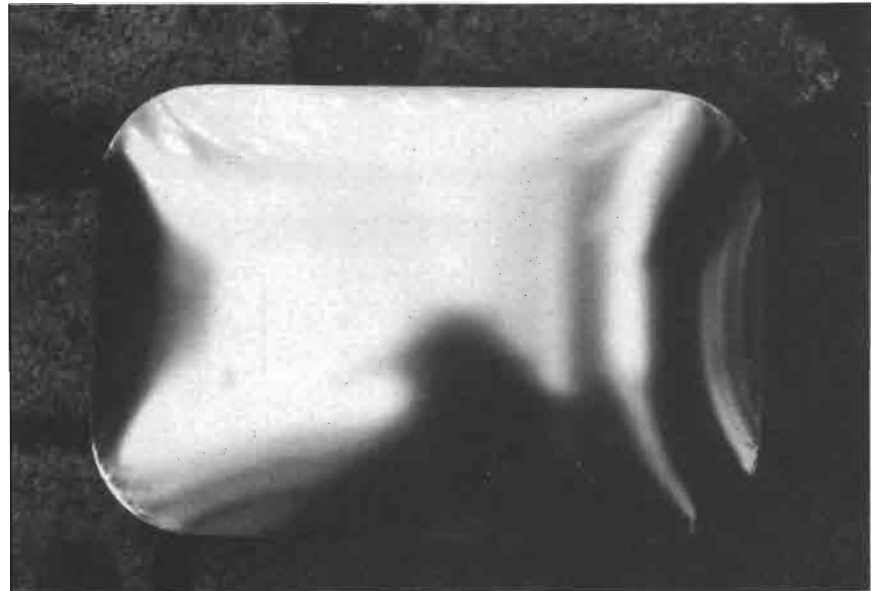


Bild 108

Seitenansicht einer pneumatisch geformten Metallmembran über quadratischem Grundriß ohne ausgerundete Ecken. Stahlfolie.

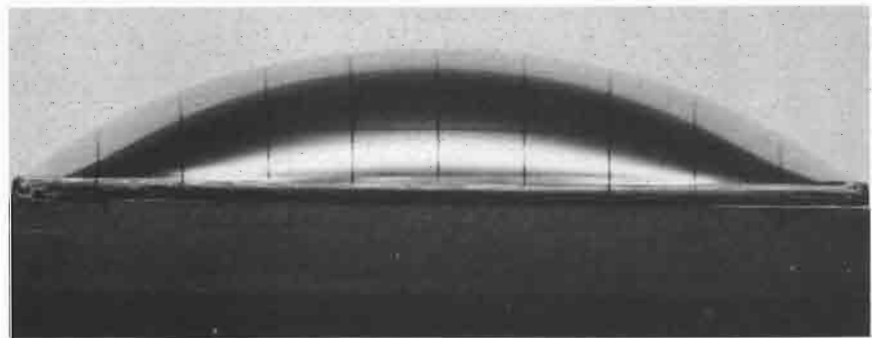


Bild 109

Seitenansicht des Modells von Bild 108. Die negativ gekrümmten Eckbereiche sind deutlich zu sehen.

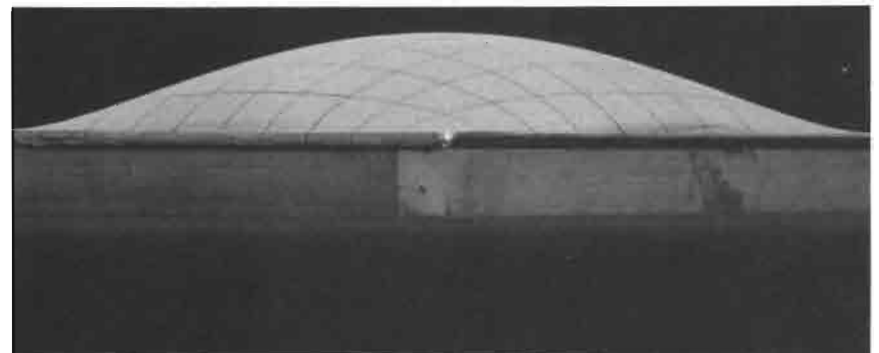




Bild 110

Modell einer pneumatisch geformten Metallmembran mit einer linienförmigen Unterstützung. Aluminiumfolie.

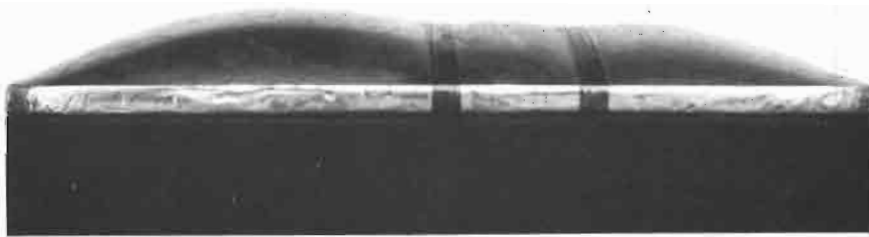


Bild 111

Modell einer pneumatisch geformten Metallmembran mit zwei linienförmigen Unterstützungen. Aluminiumfolie.

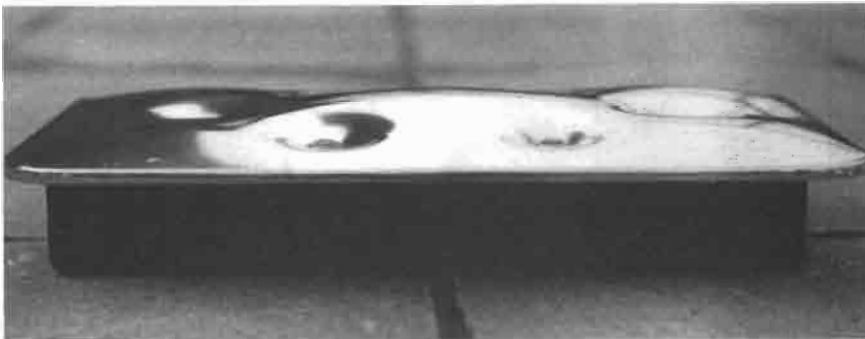


Bild 112

Modell einer pneumatisch geformten Metallmembran mit punktförmigen Unterstützungen. Aluminiumfolie.

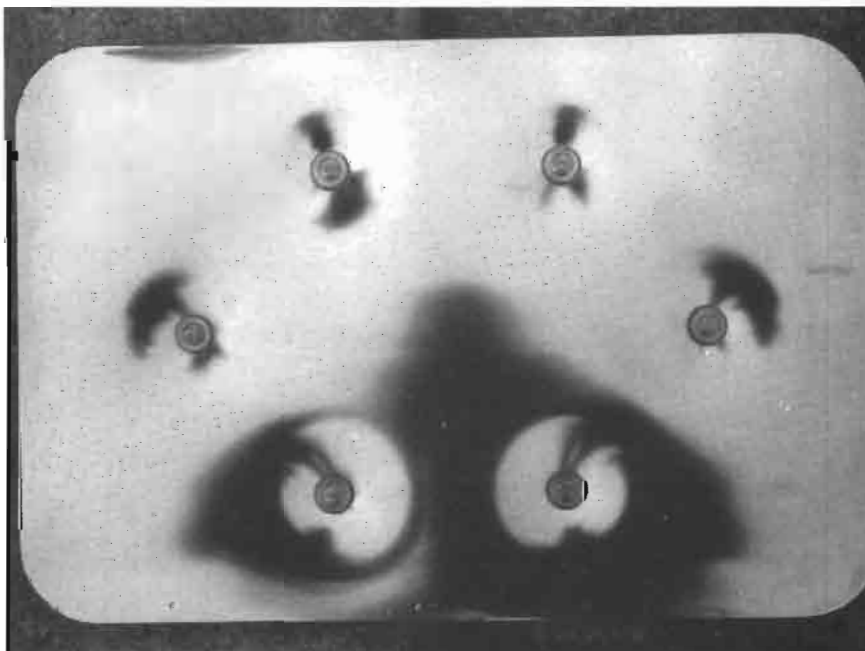


Bild 113

Draufsicht des Modells in Bild 112.

Bild 114

Membran mit keglicher Ausgangsform. Beim Aufziehen des Kegels auf die Grundplatte entstand der negativ gekrümmte Randbereich. Stahlfolie.



Bild 115

Während der pneumatischen Belastung entstand diese Zwischenform.

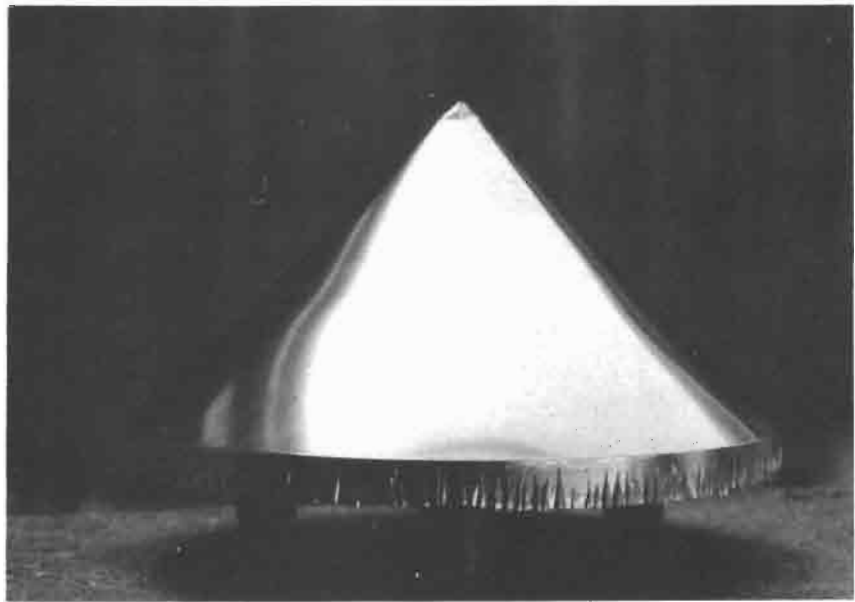
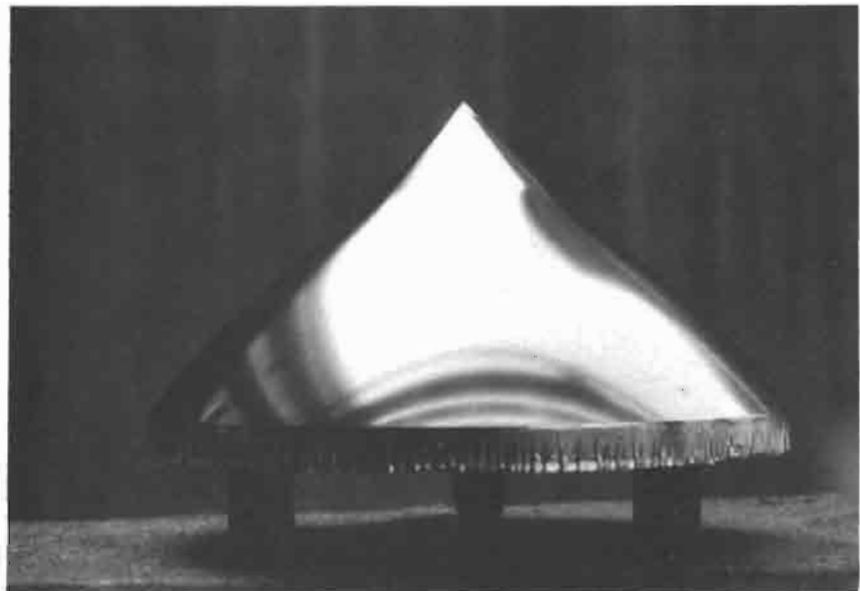


Bild 116

Endform. Man erkennt eine Annäherung an die Kugel, die noch gesteigert werden konnte, bis die Folie schließlich platzte.



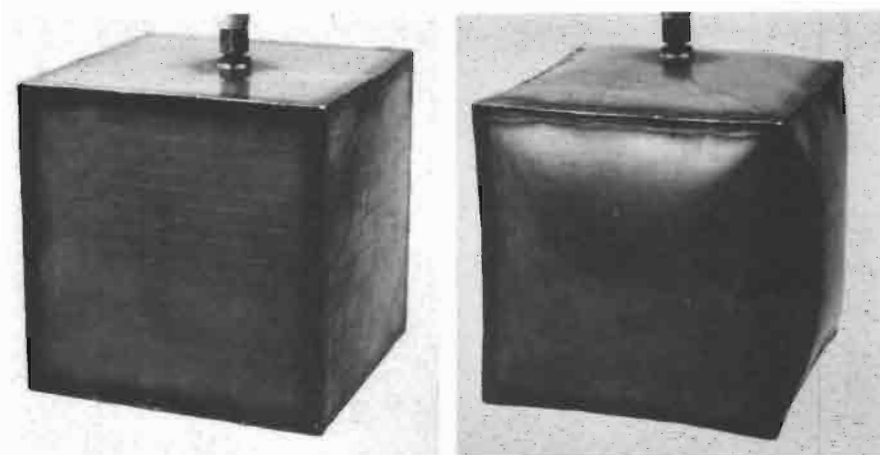


Bild 117

Stadien der Formgebung eines zunächst kubischen Hohlkörpers aus Stahlblech von 1,0mm Dicke. Der formgebende Innendruck wurde (wie in den Beispielen Bilder 118 und 119) mit Wasser aufgebracht.

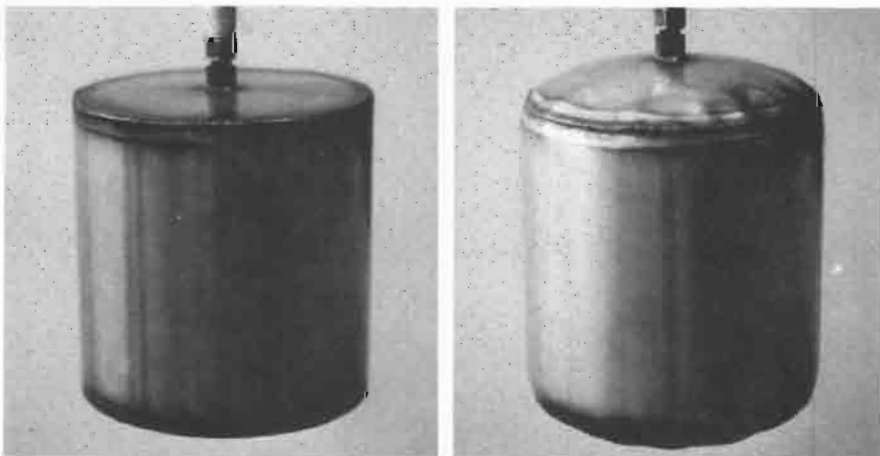
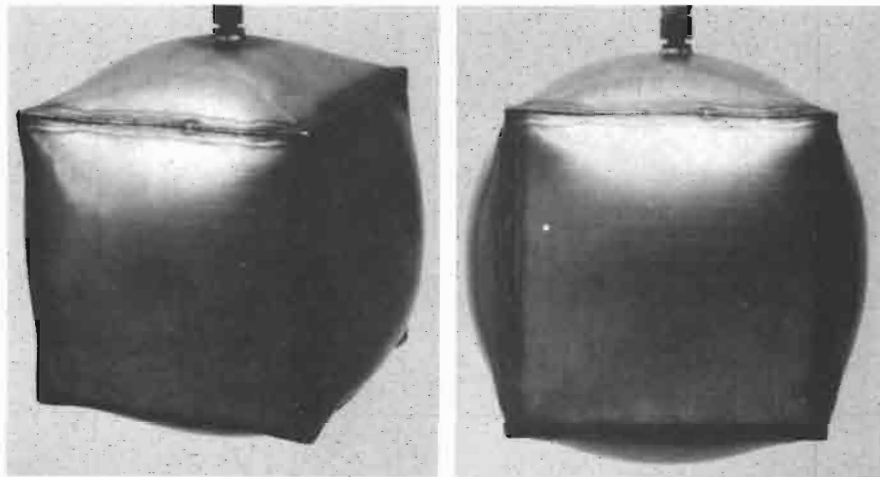


Bild 118

Stadien der Formgebung eines zunächst zylindrischen Hohlkörpers aus Stahlblech von 1,0mm Dicke.

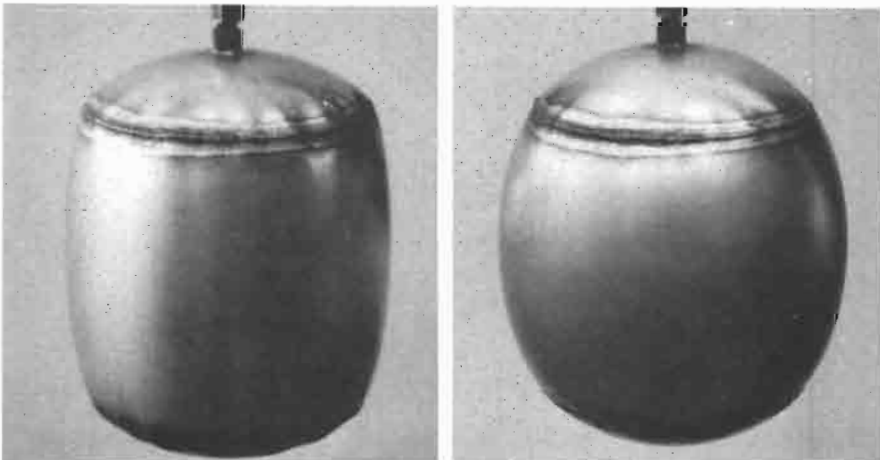


Bild 119

Pentagondodekaeder aus Stahlblech von 1,0mm Dicke.

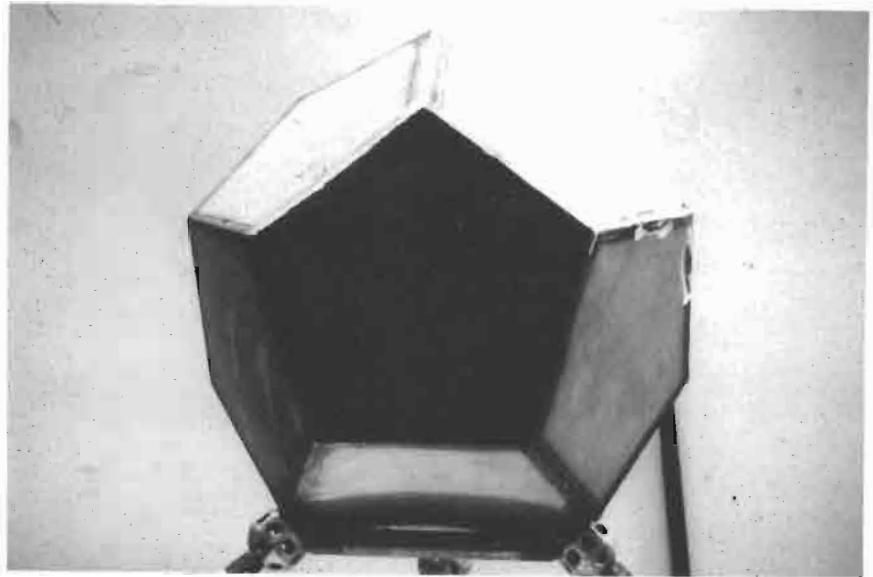


Bild 120

Umformung nach Aufbringen eines Innendruckes von 20 bar.

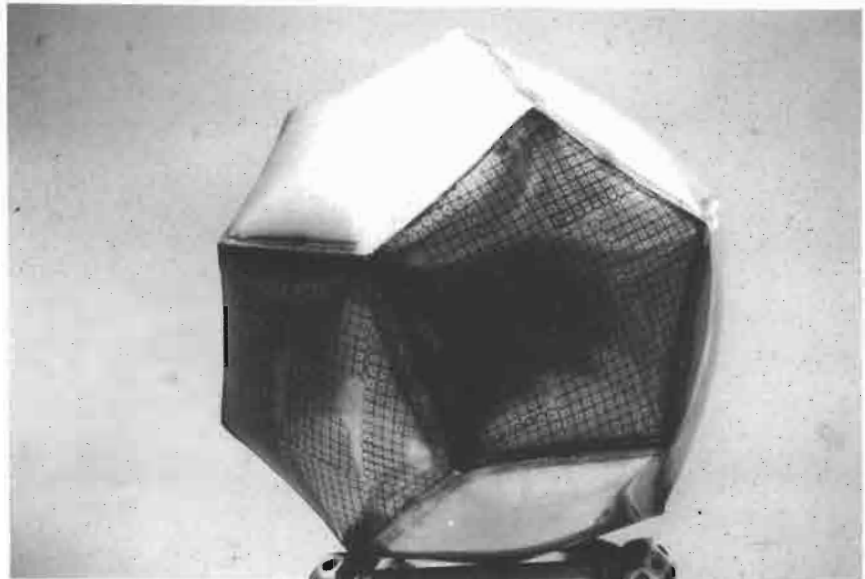


Bild 121

Umformung nach Aufbringen eines Innendruckes von 55 bar. Es entstand ein perfekt sphärischer Körper.





Bild 122

Durch Anheben der Mittelstütze wurde die ursprünglich ebene Metallfolie formgebend aufgespannt. Eine Rosette aus Draht verteilt die Stützenlast.



Bild 123

Die Membran dieses Modells wurde durch einen ausgerundeten Stempel formgebend belastet.

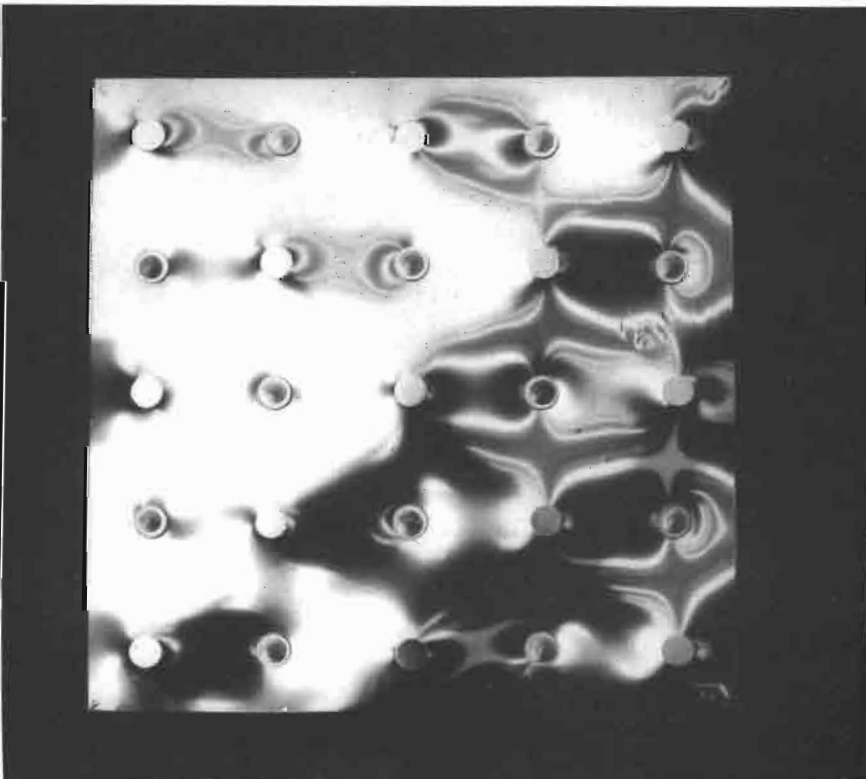


Bild 124

Buckelfläche, die durch Verschieben der Hochpunkte relativ zu den Tiefpunkten entstand.

Bild 125

Tragwerksmodell eines im Grundriß annähernd quadratischen Metallmembrandaches aus Aluminiumfolie. Die Membran wird durch zwei diagonale Druckbögen unterstützt, die ihrerseits von der Membran an einem seitlichen Ausweichen gehindert werden. Die zusammen mit der Membran zunächst in der Grundrißebene liegenden Bögen wurden durch Verschieben ihrer Lagerpunkte emporgedrückt. Bogaufleger und Membranzugränder sind gegeneinander verspannt.

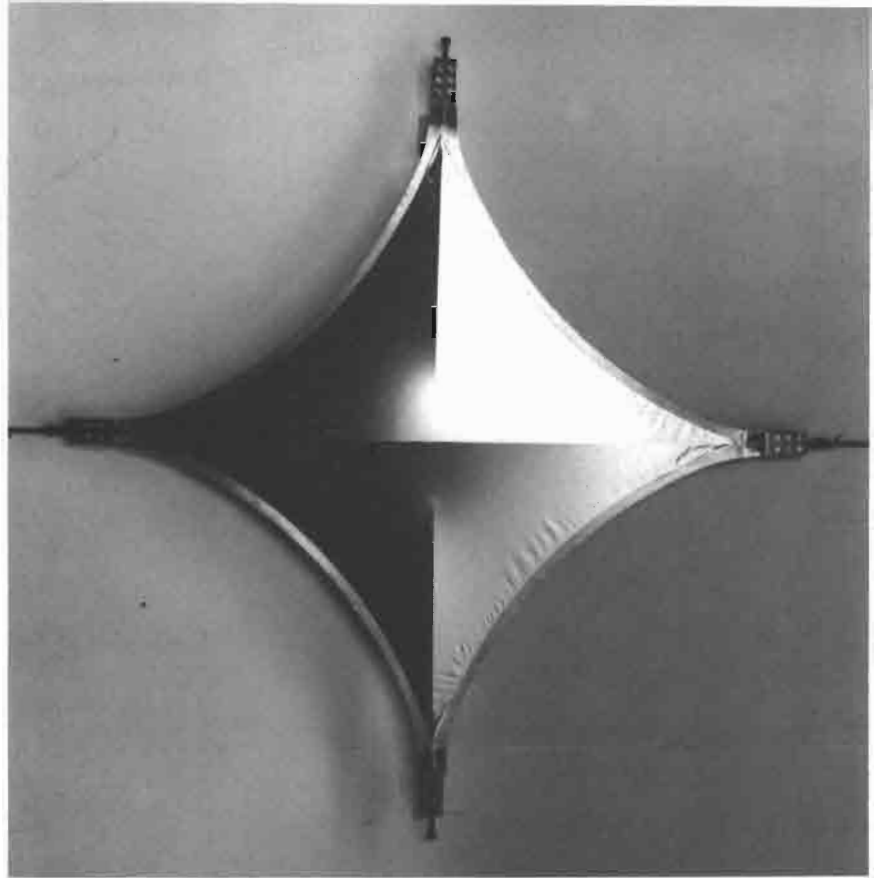


Bild 126

Durch einen Druckbogen aufgespannte Membran. Aluminiumfolie.



Bild 127

Detail einer überbeanspruchten Aluminiumfolie des Modells in Bild 1. Man erkennt den Bruch, die Narben in der Folie, die das Erreichen der Grenzformänderungen anzeigen, das Liniennetz zum Ausmessen der Dehnungen und links unten die Klebverbindung der Membran mit dem Zugrand.



Bild 128

Spannungs-/Dehnungsverhalten von Folienstreifen aus Cr-Ni-Stahl und Reinaluminium.

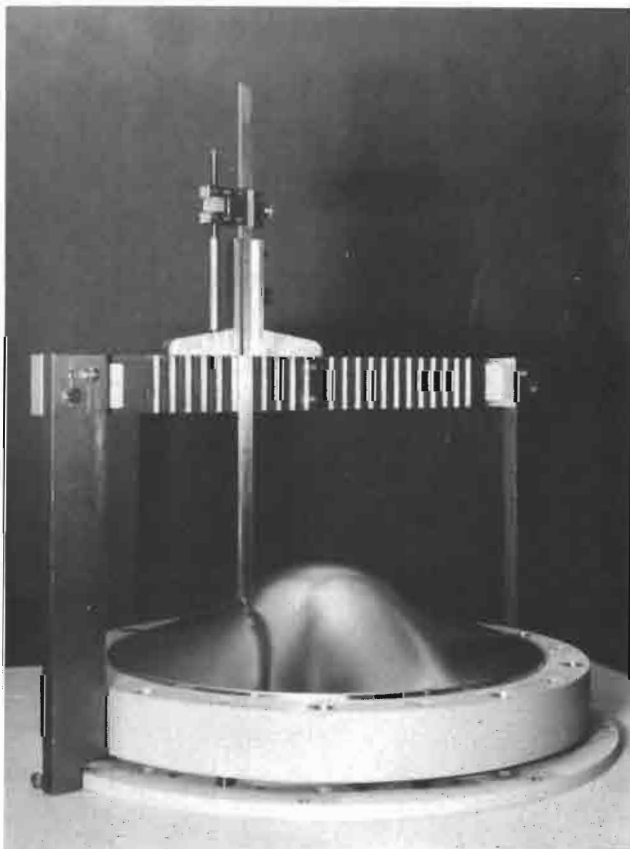
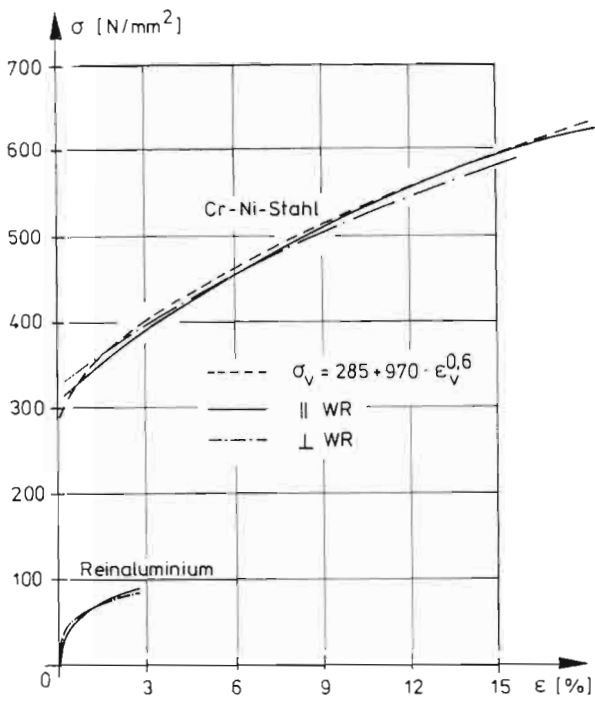


Bild 129

Meßbrücke mit Tiefenmaß zum Aufnehmen des Meridianverlaufes rotationssymmetrischer Modelle.

3.2.2 Modelltechnik zur Metall-Membranbauweise

Es ist als glücklicher Umstand anzusehen, daß eine Modellierung der Metall-Membrantragwerke im Originalwerkstoff möglich ist. Bei den textilen Membranbaustoffen ist es wesentlich schwieriger, einen Modellwerkstoff zu finden. Mit dünnsten Metallfolien können unter Wahrung der physikalischen und geometrischen Ähnlichkeit Modelle im Sinne der Modellstatik [114] gebaut werden.

Mit Meßmodellen aus Metallfolie kann das Aufspannen der Membran unter formgebenden Lasten ebenso wie das Verhalten unter Gebrauchslasten analysiert werden. Die Kosten und der Zeitaufwand für die Herstellung und Erprobung eines physikalischen Modelles sind geringer als eine numerische Analyse derartiger nichtlinearer Problemstellungen. Für den Ingenieur hat das physikalische Modell den Vorteil der unmittelbaren Anschaulichkeit. Es ermöglicht den Zugang zu Informationen für die Planung einer Hauptausführung ohne komplexe Theorien und einen entsprechend hohen mathematisch/numerischen Aufwand.

In den folgenden Abschnitten 3.2.2.1 und 3.2.2.2 werden diejenigen Elemente einer Modelltechnik der Metall-Membrantragwerke behandelt, die im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit zusammengestellt und zum Teil speziell entwickelt wurden.

3.2.2.1 Die Membran aus Metallfolie

Für Metall-Membran-Tragwerksmodelle haben sich Folien aus Aluminium und austenitischem Stahl bewährt. Aber auch Feinstbleche und Folien aus anderen duktilen Werkstoffen sind geeignet. In [58] und [59] werden Modelle aus Blei untersucht. Sie haben sich für den dort verfolgten Zweck bewährt (Bilder 31 und 33).

Aluminiumfolien werden aus Reinaluminium (99- bis 99,5-prozentige Reinheit) in Dicken von $s \geq 0,004\text{mm}$ kaltgewalzt [115]. Als Modellwerkstoff ist die Haushaltsfolie von 0,03mm gut geeignet, die in Bandform bis zu 600mm Breite im Handel ist. Aluminiumfolie ist preiswert und läßt sich gut durch Klebeverbindungen fügen. Die Streckziehbarkeit ist jedoch mit einer Grenzdehnung von etwa 6 % relativ begrenzt.

Eine hervorragende Streckziehbarkeit weisen Folien aus Cr-Ni-Stahl auf. Sie sind aus dem Werkstoff 1.4301 im Behandlungszustand blankgeglüht und abgeschreckt in Dicken $s \geq 0,025\text{mm}$ und einer Breite von 610mm erhältlich.

In Bild 128 ist das Spannungs-/Dehnungsverhalten einer Reinaluminium- und einer Stahlfolie wiedergegeben. Es ist offensichtlich, daß bei der Verwendung der Cr-Ni-Stahlfolie wesentlich stärkere Spannvorrichtungen und Stützelemente erforderlich sind. Allerdings können höhere Umformgrade erzielt werden.

Das Verbinden der Folien untereinander oder mit Randgliedern kann sehr gut durch Kleben bewerkstelligt werden.

Bewährt hat sich ein Zweikomponentenkleber auf Epoxidharz-Basis (z.B. Araldit). Es hat sich gezeigt, daß Aluminiumfolie besser für Klebungen geeignet ist als Stahlfolie, bei der die Abschälbeanspruchung sehr viel leichter zum Versagen führen kann. Es ist möglich, die Stahlfolie mit einer Mikroschweißnaht nach dem Rollennaht- oder dem Punktschweißverfahren zu fügen.

3.2.2.2 Zur Ermittlung der Koordinaten von Flächenpunkten

Sehr einfach, übersichtlich und zuverlässig ist die direkte Ermittlung von Punktkoordinaten mit einer Meßbrücke nach Bild 129. Die erzielbare Genauigkeit liegt im Bereich von $\pm 0,05\text{mm}$. Zur direkten punktweisen Aufzeichnung von Höhenlinien wurde ein Gerät gebaut, das bei Kontakt mit der Membran in der konstanten Höhe h_0 einen Punkt der Höhenlinie auf der Grundfläche markiert (Bild 130).

Zur Vermessung von Flächen ist das Schattenmoiré-Verfahren sehr gut geeignet. Seine Vorzüge liegen in dem relativ geringen Aufwand und der unmittelbaren Anschaulichkeit der Ergebnisse [116]-[124]. In den Arbeiten [124] und [125] wurde dieses Verfahren zum Vermessen von Flächenpunkten erprobt. Die Moiré-Linien entsprechen direkt Höhenlinien der Fläche (Bilder 131, 143 und 155).

Als weitere Methode sei die Nahbildfotogrammetrie genannt, die im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 64 zu einer hohen Vollkommenheit entwickelt wurde [126]. Die Fotogrammetrie hat den Vorteil, daß in einer Stereo-Momentaufnahme beliebig viele Meßpunkte in ihrer augenblicklichen Lage erfaßt werden können. Der apparative Aufwand zum Erzeugen der Bilder und zur Auswertung ist relativ hoch.

Es gibt eine Vielzahl anderer Verfahren zur Aufnahme von Punktkoordinaten (siehe u. a. [125]), auf die hier nicht eingegangen werden soll.

3.2.2.3 Bestimmung der plastischen Dehnungen

Zur Analyse relativ kleiner Dehnungen wie sie unter Gebrauchslasten auftreten, haben sich Dehnmeßstreifen durchgesetzt. Die großen plastischen Dehnungen, die beim formgebenden Lastfall auftreten, könnten mit Dehnmeßstreifen nur durch stufenweises Vorgehen ermittelt werden.

Eine in der Umformtechnik gebräuchliche Methode der Dehnungsanalyse besteht in dem Ausmessen von Punktrastern oder Liniennetzen, die auf die unverformte Folie z. B. mit Tusche) aufgetragen werden. In Bild 132 sind zwei Liniennetze dargestellt. Kreismuster haben den Vorteil, daß die Hauptdehnungen direkt sichtbar werden. Doch auch bei Quadratrastern bereitet die Ermittlung der Hauptdehnungen und ihrer Richtungen keine Schwierigkeiten, wenn man davon ausgeht, daß das Quadrat zu einem Parallelogramm umgeformt wird, dem eindeutig eine Ellipse, die den Dehnungszustand charakterisiert, zugeordnet werden kann (Bild 132). Um eine Nullmessung vermeidbar zu machen, lohnt es sich, das Liniennetz mit großer Genauigkeit zu

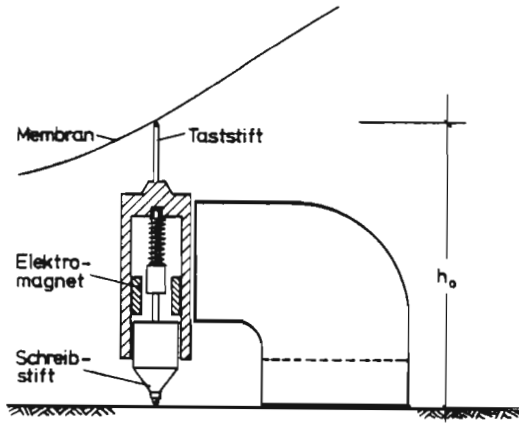


Bild 130

Gerät zur punkweisen Ermittlung von Höhenkoordinaten. Bei konstanter Höhe h_0 des Taststiftes können Höhenlinien gezeichnet werden. Der Schreibstift wird bei Kontakt des Taststiftes mit der Folie elektromagnetisch abgesenkt.

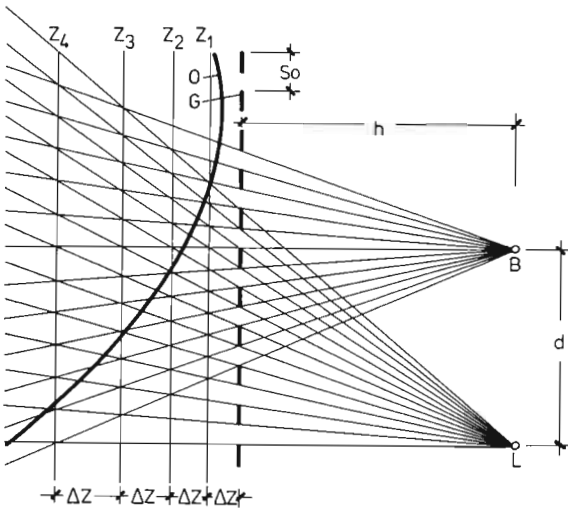


Bild 131

Prinzipskizze zum Schattenmoiré-Verfahren. Die punktförmige Lichtquelle L projiziert ein Bild des Gitters G auf das Objekt O. Der Beobachter B sieht Höhenlinien Z auf dem Objekt, die durch Interferenz der Gitterlinien mit ihrem Schattenbild entstehen [114].

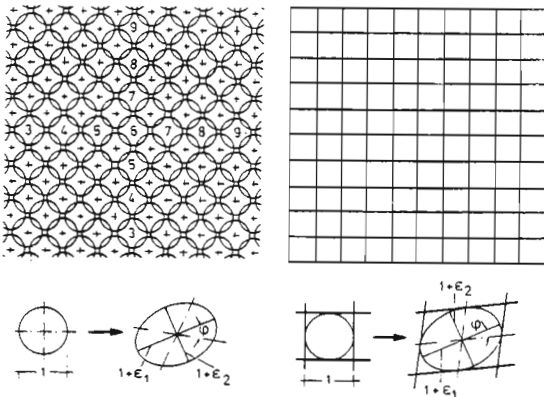


Bild 132

Linienetze zur Ermittlung der Hauptdehnungen und ihrer Richtungen.

zeichnen. Sehr gut bewältigt dies ein präziser Plotter. Das Ausmessen der Liniennetze kann mit einer Lupe oder noch bequemer mit dem Profilprojektor, der ein stark vergrößertes Abbild auf eine ebene Mattscheibe projiziert, erfolgen.

Da Liniennetze zweckmäßigerweise eine Maschenweite von etwa 5mm bis 10mm haben, ist ihr Auflösungsvermögen begrenzt. Reißlackverfahren hingegen offenbaren selbst kleinste Feinheiten der Dehnungsverteilung (Bilder 144-145). Da beim üblichen Reißlackverfahren mit einem spröden Lacküberzug gearbeitet wird, wurde nach einem Beschichtungsstoff gesucht, der sehr biegsam, gut haftend und nur äußerst geringfügig dehnbar ist. Versuche mit verschiedenen Kunstharzlacken führten nicht zum Ziel. Es konnten zwar eindrucksvolle Rissebilder erzeugt werden, doch war praktisch keine Haftung der Lackteilchen auf der umgeformten Blechoberfläche vorhanden. Außerdem gelingt es nur schwer, eine definierte Schichtdicke und damit reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten. Besser bewährt hat sich die Beschichtung mit einer schwarzen Folie der Firma Letraset.

Ebenfalls sehr übersichtlich und anschaulich, aber natürlich nur grob, kann die Dehnungsverteilung durch das Bepflastern der Membranfläche mit quadratischen Papierstücken, die im ungedehnten Zustand lückenlos aneinandergereiht sind, dargestellt werden. Beim Strecken der Membran entstehen Klaffungen oder Überlappungen zwischen den Papierelementen, deren Breite ein Maß für die Dehnungen sind. Damit die schuppenartig auf die Membranfläche aufgebrachten Papierstücke bei der Formgebung nicht gedehnt werden, befestige man sie mit einem Klebstofftropfen nur in ihrer Mitte.

Die Änderung der Membrandicke kann zusätzlich zu den Dehnungen in der Fläche ermittelt werden. Über die Bedingung der Volumenkonstanz (siehe Abschnitt 3.3.2.3) sind Dickenänderungen und Dehnungen in der Fläche bei der Umformung miteinander gekoppelt. Mit der Dickenmessung besteht so die Möglichkeit einer Kontrolle. Zur Messung von Foliendicken gibt es viele Verfahren (siehe z. B. [242]).

Das Streckziehen der verwendeten spiegelglatten Metallfolien ist mit einem Mattwerden der Oberfläche verbunden. Durch Beobachten der Abnahme des Glanzes kann man sich ein qualitatives Bild vom erreichten Umformgrad machen. Zur quantitativen Bestimmung der Dehnungen in der Membranfläche wurden Glanzmessungen in Erwägung gezogen. Der relativ hohe meßtechnische Aufwand [127], [128],[129], die Frage der Eichung und die besonderen Probleme der Glanzmessung gekrümmter Oberflächen [128] ließen es angeraten erscheinen, diese Idee nicht weiterzuverfolgen.

3.2.3 Modellversuche zur Analyse des formgebenden Lastfalles

Mit den üblichen Methoden der Modellstatik und den in Abschnitt 3.2.2 beschriebenen Techniken wurden Versuche zur Analyse des formgebenden Lastfalles anhand einfacher Modellversuche durchgeführt. Ziele der Versuche bestanden darin,

- Beziehungen zwischen den Einflußgrößen aus den Systemvorgaben und der entstehenden Form sowie den Spannungen und Dehnungen in der Membran zu gewinnen,
- und einen Datenvorrat zum Vergleich mit rechnerischen Untersuchungen zu sammeln.

3.2.3.1 Die kugelkalottenförmige Membran

Die im Grundriß kreisförmige Membran, die durch eine Gleichflächenlast zu einem kugelkalottenförmigen Gebilde umgeformt wird, ist eine häufig genutzte Grundform. Sie dient für werkstoffkundliche Untersuchungen und stellt zusammen mit einem Druckring ein günstiges statisches System dar (siehe z.B. Bilder 24-27,28-29,41,61-65,79, 84-85,104 und [46],[60],[78],[106],[160],[191],[192]).

Die in den Bildern 133-134 dargestellte Vorrichtung ermöglicht es, Metallfolien ähnlich wie in einem Stickrahmen, \varnothing 200mm, einzuspannen und dann mit einem Gas oder Flüssigkeitsdruck zu beaufschlagen. Die Bilder 135-137 zeigen Versuchsergebnisse, die mit einer dünnen Stahlfolie, $s = 0,025\text{mm}$, aus nichtrostendem Stahl der Werkstoffnummer 1.4301 durchgeführt wurden.

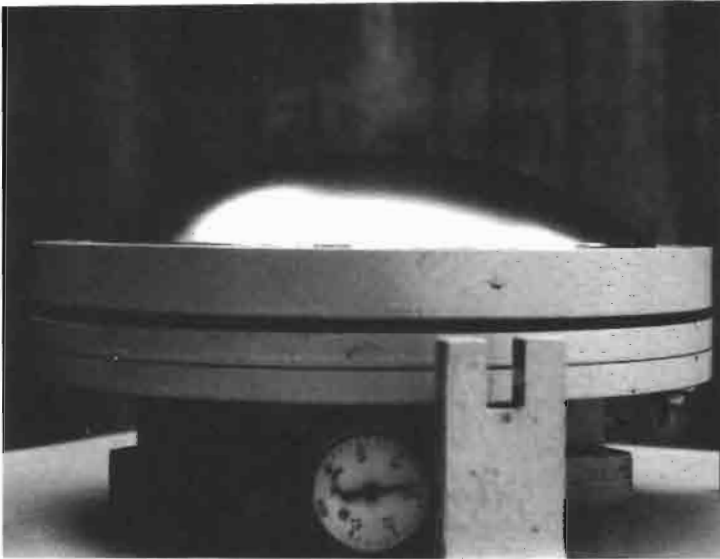


Bild 133

Versuchseinrichtung zum Erzeugen kugelkalottenförmiger Membranen aus Metallfolie.

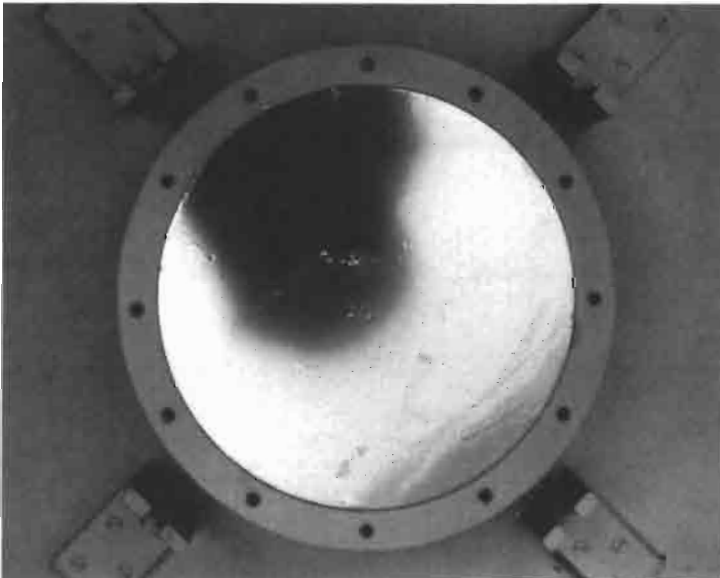


Bild 134

Die Metallfolie wird am Außenrand, Durchmesser 200mm, mit einem Klemmring fixiert.

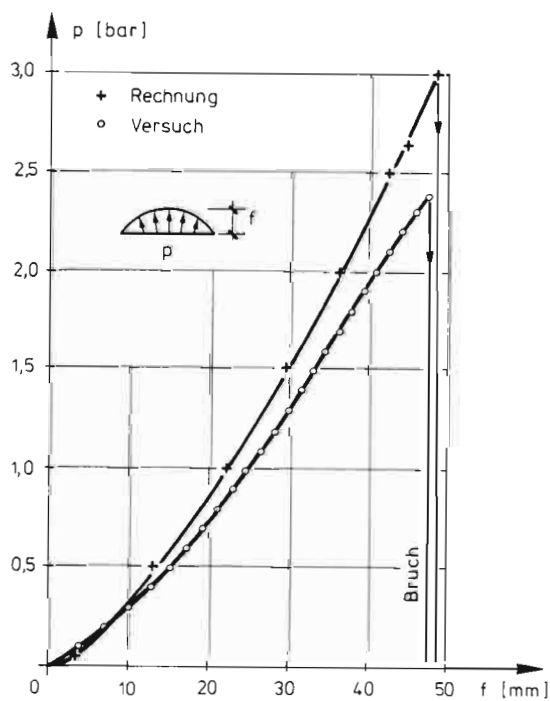


Bild 135

Abhängigkeit der Wölbhöhe f vom Innendruck p für eine Probe aus Cr-Ni-Stahlfolie von 0,025mm Dicke. Vergleich von Versuchsergebnissen und Berechnungen nach Abschnitt 3.3.3.

Bild 136

Meridianverläufe und Dehnungen für drei Formgebungsstufen des Kalottenversuches. Vergleich von Versuchsergebnissen und Berechnungen nach Abschnitt 3.3.3. ϵ_M ist die Dehnung in Meridianrichtung, ϵ_R in Ringrichtung.

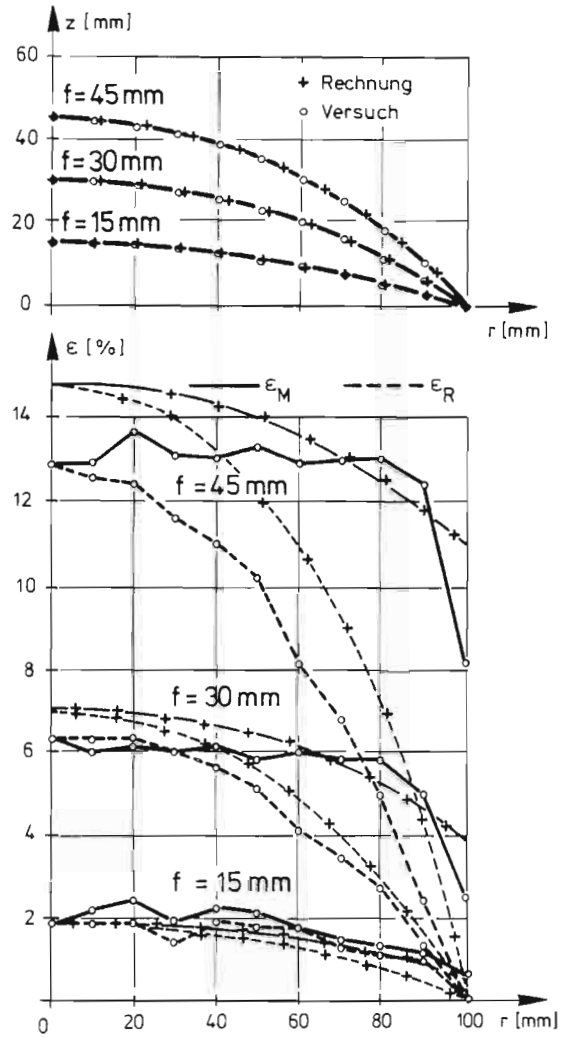
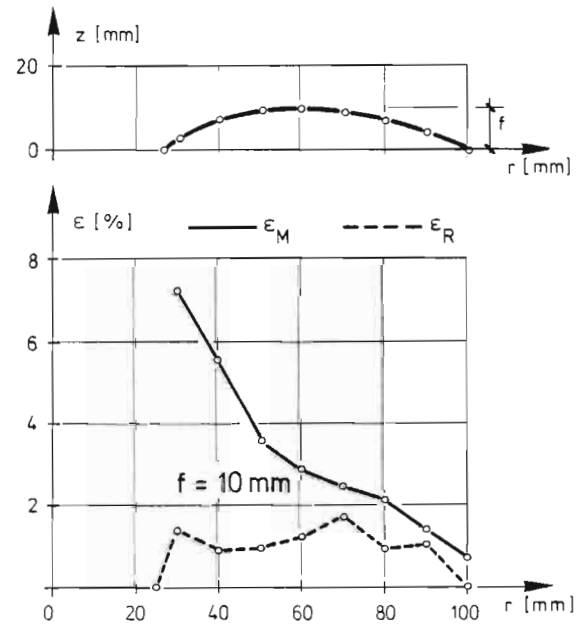


Bild 137

Meridianverlauf und Dehnungen eines kreisringförmigen Folienstreifens, (Cr-Ni-Stahl von 0,025mm Dicke), der bei $r = 25$ mm und $r = 100$ mm unverschieblich gelagert ist und durch einen Innendruck aufgewölbt wurde. Versuchsergebnisse. ϵ_M ist die Dehnung in Meridianrichtung, ϵ_R in Ringrichtung.



3.2.3.2 Stempelversuche

Besonders eingehend wurde die durch einen Stempel formgebend aufgespannte, rotationssymmetrische Metallmembran untersucht. Die Vorrichtung nach Bild 138 ermöglicht (wie bei den Kalottenversuchen) ein einfach zu wiederholendes Einbauen eines Probestückes \varnothing 240mm. Die formgebende Belastung kann über einen Stempel mit Hilfe einer Spindel in die Membran eingetragen werden. Beim Empordrücken des Stempels entstehen rotationssymmetrische Metallmembranen. Die Versuchsergebnisse dienen den Berechnungen nach Abschn. 3.3.3 zum Vergleich.

Variiert wurden die Stempelformen (Bild 140), der Membranwerkstoff und die Reibung in der Kontaktfläche zwischen Membran und Stempel. Gemessen wurden die Stempelpkraft P , der Stempelweg f , sich einstellende Meridiankoordinaten und die Membrandehnungen in Meridian- und Ringrichtung.

Das Bild 141 gibt eine Übersicht über die erforderliche Stempelpkraft P in Abhängigkeit vom Stempelweg f für die verschiedenen Stempelformen. Als Membranwerkstoff wurde bei dieser Versuchsreihe nichtrostender Stahl, 1.4301, von 0,025mm Dicke verwendet. Das σ - ϵ -Diagramm dieser Stahlfolie ist in Bild 128 aufgezeichnet. Zwischen Stempel und Membran wurde eine Folie aus Teflon zur Verminderung der Reibung eingelegt. Die Endpunkte der P - f -Kurven markieren das Versagen der Membran.

Über den Einfluß der Reibung gibt der Vergleich der Kurven **a** und **b**, Bild 141, Aufschluß. Beim Erhöhen der Reibung durch Beschichten des Stempels mit Schulfatellack, der einen Zuschlag aus feinstem Quarzpulver enthält, entsteht das P - f -Verhalten der linken Kurve. Der Bruch wird im Vergleich zu der mit Teflon geschmierten Kontaktfläche wesentlich früher erreicht.

Die sich einstellende Meridianform zeigt Bild 142. In Bild 142, oben, sind vier Stadien der Formgebung wiedergegeben. Die Wendepunkte der Meridiankurve markieren den Übergang der frei gespannten, negativ gekrümmten Membran zu dem auf dem Stempel aufliegenden Teil der Metallfolie. Der Breitenkreis, der diesen Übergang kennzeichnet, wird Kontaktkreis genannt.

Um die sich im Versuch einstellenden Meridianformen bei verschiedenen Stempeln miteinander zu vergleichen, wurden die z -Koordinaten der Kontaktkreise in einer Versuchsreihe auf 20 mm und in einer weiteren auf 40 mm eingestellt. Während die Form der Membran im Bereich innerhalb des Kontaktkreises allein von der Stempelform bestimmt wird, spannt sich die Membran im Bereich zwischen dem Außenrand und dem Kontaktkreis in Abhängigkeit von den Randbedingungen auf. Für den Klemmstempel gilt in guter Näherung, daß die Meridiankurve ein Polynom zweiter Ordnung ist (siehe 3.3.3.4).

Der Einfluß der Folienanisotropie auf die entstehende Meridianform ist äußerst gering. Bei Messungen der Meridiankoordinaten in Schnitten parallel und senkrecht zur

Walzrichtung betragen die Unterschiede der z -Koordinaten von Punkten gleicher Radialkoordinate weniger als 1/20 mm.

Höhenlinienbilder der entstehenden Membranformen wurden nach dem Schattenmoiré-Verfahren aufgenommen (Bild 143, [125]).

Über den Verlauf der Dehnungen geben die Reißlackbilder 144 und 145 eine besonders anschauliche Übersicht. Es ist zu erkennen, daß die Dehnungen im Inneren des Kontaktkreises nahezu isotrop verteilt sind, während die Ringdehnungen fortschreitend zum Außenrand hin sehr schnell gegenüber den Meridiandehnungen abnehmen. Im Übergangsbereich entsteht ein Muster ähnlich einer Backsteinmauer. Der größere Teil der Membranfläche weist verschwindend kleine Ringdehnungen auf. Imperfektionen im Bereich der Randeinspannung werden sehr deutlich durch das girlandenförmige Reißbild aufgezeigt.

Quantitativ wurden die Hauptdehnungen verschiedener Stempelversuche durch Ausmessen von Liniennetzen bestimmt (Bilder 146-149). Die Dehnungen ϵ_1 und ϵ_2 wurden gemessen, ϵ_3 kann mit Hilfe der Gleichung 12a, Abschnitt 3.3.2.3, berechnet werden. Variiert wurden die Stempelformen. Membranwerkstoff und Höhe des Kontaktkreises sind bei allen Versuchen gleich.

Die elastischen Dehnungen in der Membran sind durch den Einfluß der steigenden Fließspannung nicht gleichmäßig verteilt. Dennoch behält die Membran nach Wegnehmen der Stempelpkraft P ihre Form nahezu unverändert bei. Die Eigenspannungen, die bei der Rückfederung einen Einfluß auf die entstandene Form ausüben, sind offensichtlich sehr klein.

Das Versagen der Membran spielte sich bei allen Versuchen ähnlich ab. Stets entstand ein Bruch in der Nähe des Kontaktkreises innerhalb des frei gespannten Bereiches, der etwa in Ringrichtung verlief (Bild 143, rechts unten).

Mit den Erfahrungen der Versuche lassen sich folgende konstruktive Regeln angeben: Will man eine rotationsförmige Membranschale mit einem Stempel formgebend aufspannen, so sollte der Stempeldurchmesser möglichst groß (größer als 1/4 des Durchmessers des äußeren Randkreises) und kalottenförmig abgerundet sein. Eine gute Schmierung zwischen Stempel und Membran trägt ebenso wie eine Abrundung des Stempels zu einer gleichmäßigeren Verteilung der Dehnungen bei. Auf diese Weise kann die Membran besonders hoch gedrückt werden, ohne frühzeitig überbeansprucht zu sein.

Bild 138

Seitenansicht der Versuchseinrichtung für die Stempelversuche. Die Stempelverschiebung wird mit Hilfe einer Spindel vollzogen.



Bild 139

Durch einen kugelkalottenförmigen Stempel von 120mm Durchmesser formgebend aufgespannte Metallfolie (Cr-Ni-Stahl von 0,025mm Dicke). Die Folie wird am Außenrand, Durchmesser 240mm, mit einem Klemmring fixiert.

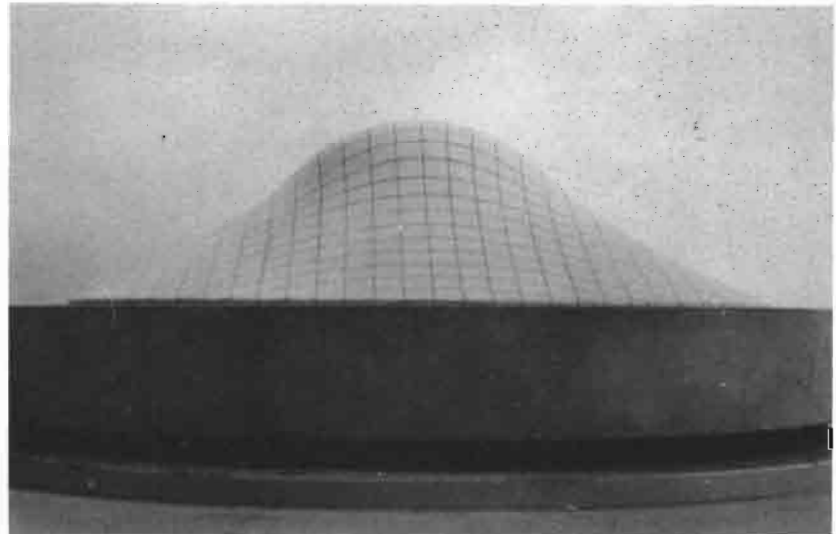
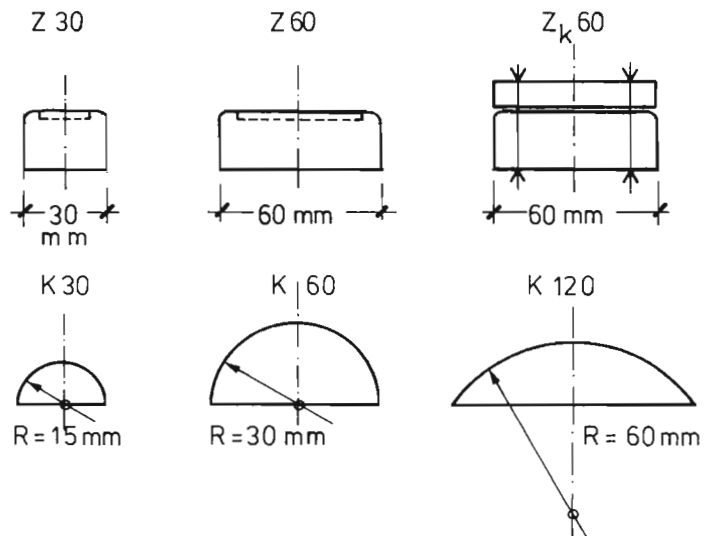


Bild 140

Schematische Darstellung der verwendeten Stempel. Z30 und Z60 sind zylindrische Stempel; beim Stempel Z_K60 konnte die Membran am Innenrand, $r = 30\text{mm}$, eingeklemmt werden; der Buchstabe K kennzeichnet kugelabschnittförmige Stempel.



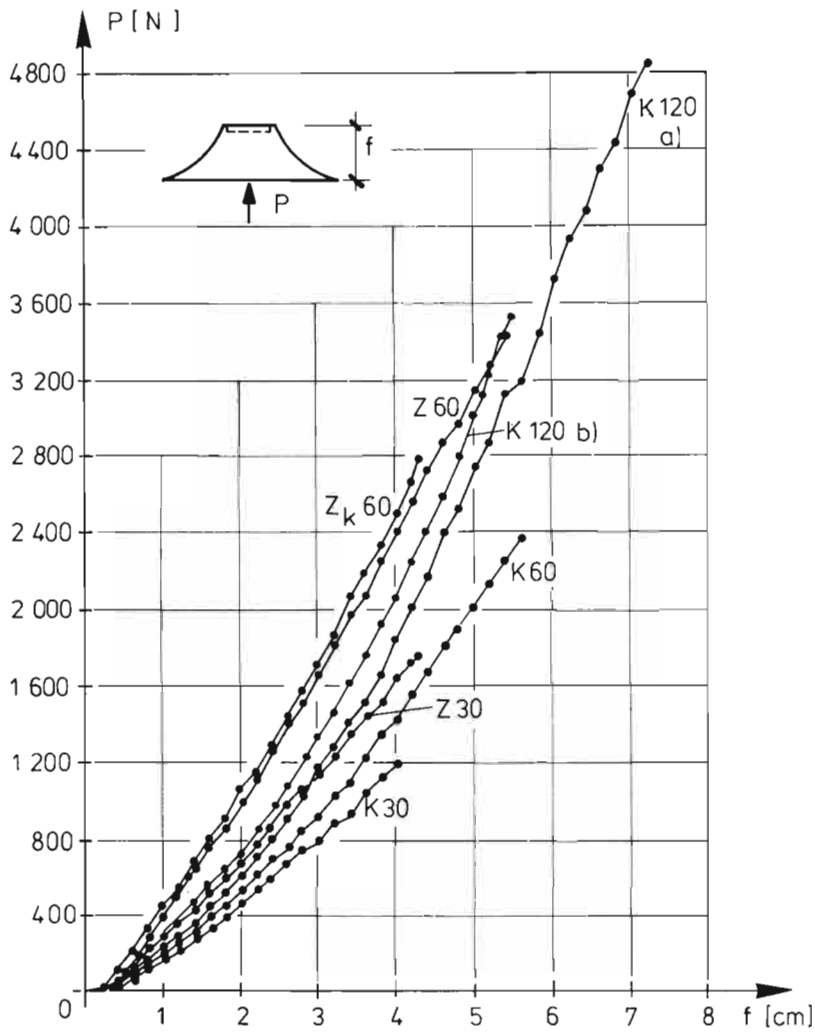


Bild 141

Abhängigkeit der Stempelkraft P von der Stempelverschiebung f für verschiedene Stempelformen (Cr-Ni-Stahl der Dicke 0,025mm). Die Kurvenendpunkte kennzeichnen den Bruch. K120 a) geringe Reibung, K120 b) hohe Reibung in Kontaktfläche.

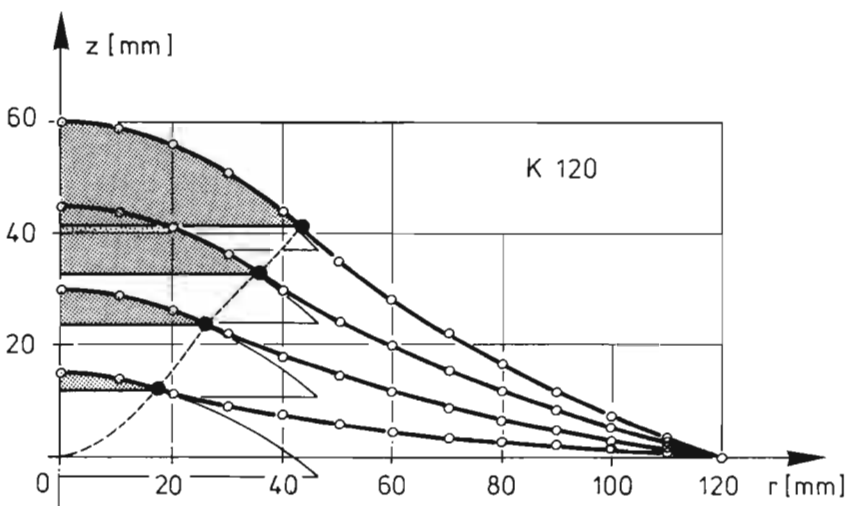


Bild 142

Meridiane verschiedener Formungsstufen (K120, Cr-Ni-Stahl-Folie von 0,025mm Dicke).

Bild 143

Moiré-Bilder verschiedener Stempelversuche. Bild oben links Z60, oben rechts K120, unten links K60, unten rechts K60 Bruchzustand.

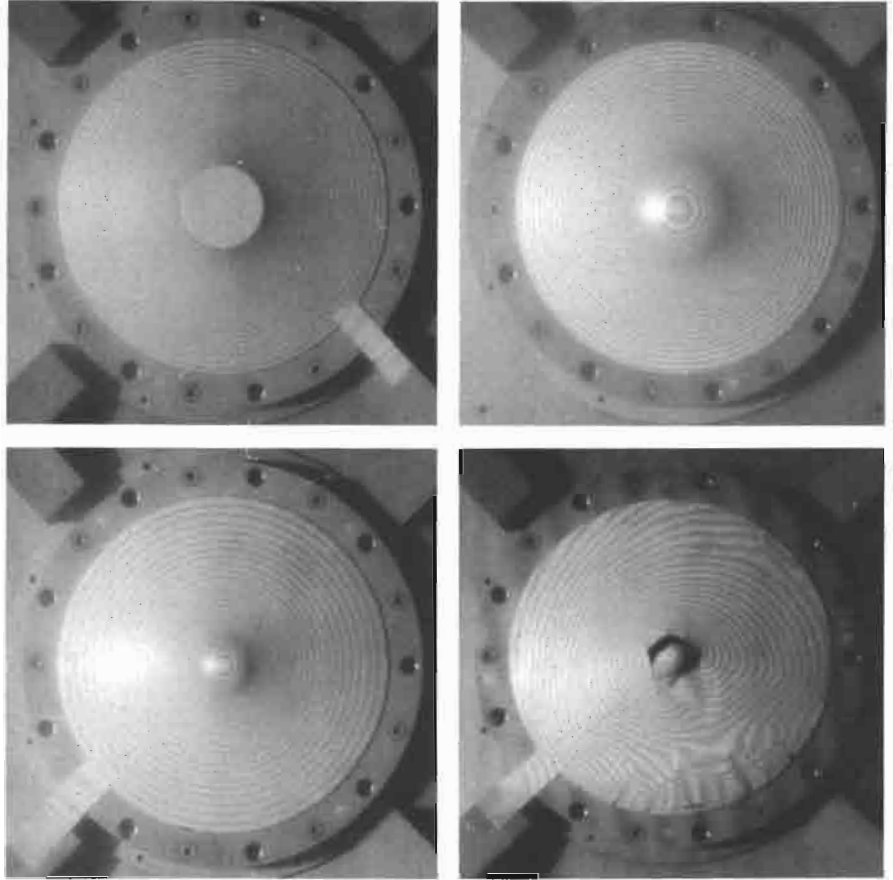


Bild 144

Die Risseverteilung einer Lack-schicht gibt detaillierten Aufschluß über die Dehnungsverteilung in der Membran (K120, Cr-Ni-Stahl von 0,025mm Dicke).

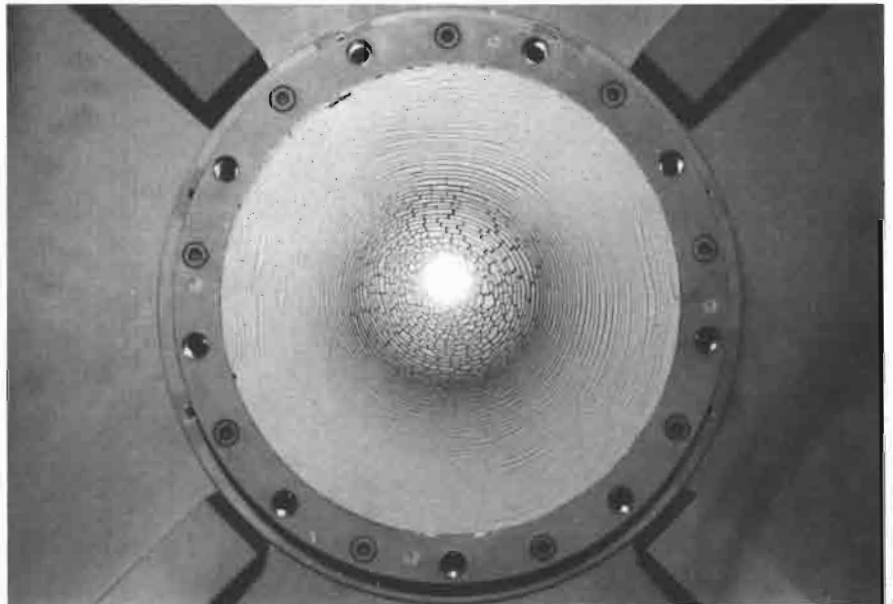
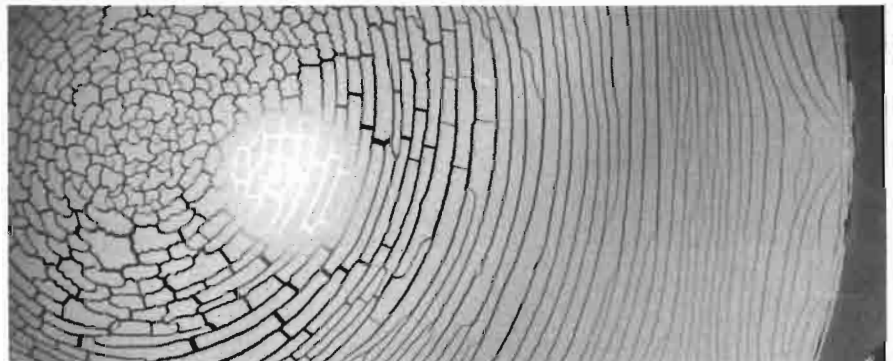


Bild 145

Ausschnitt aus Bild 144.



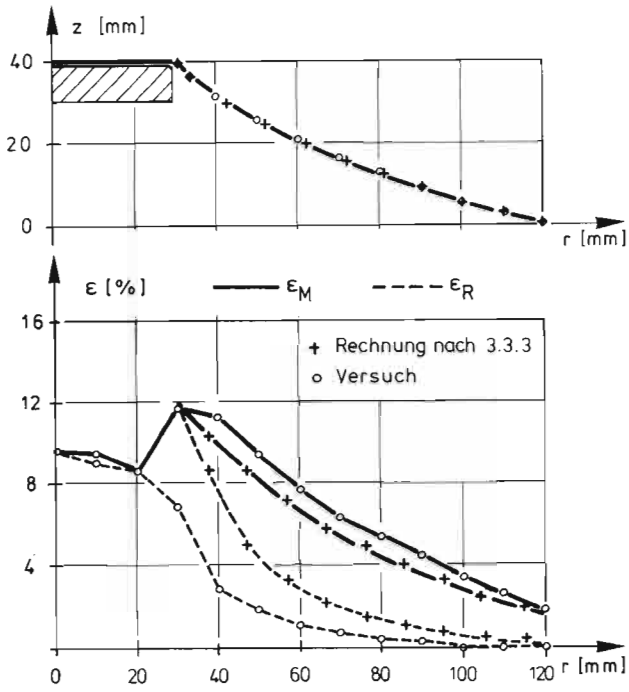


Bild 146

Meridianform und Dehnungen einer Folie im Stempelversuch mit dem Stempel Z60 und Folie aus Cr-Ni-Stahl von 0,025mm Dicke. Vergleich von Versuchsergebnissen und Berechnungen nach Abschnitt 3.3.3.

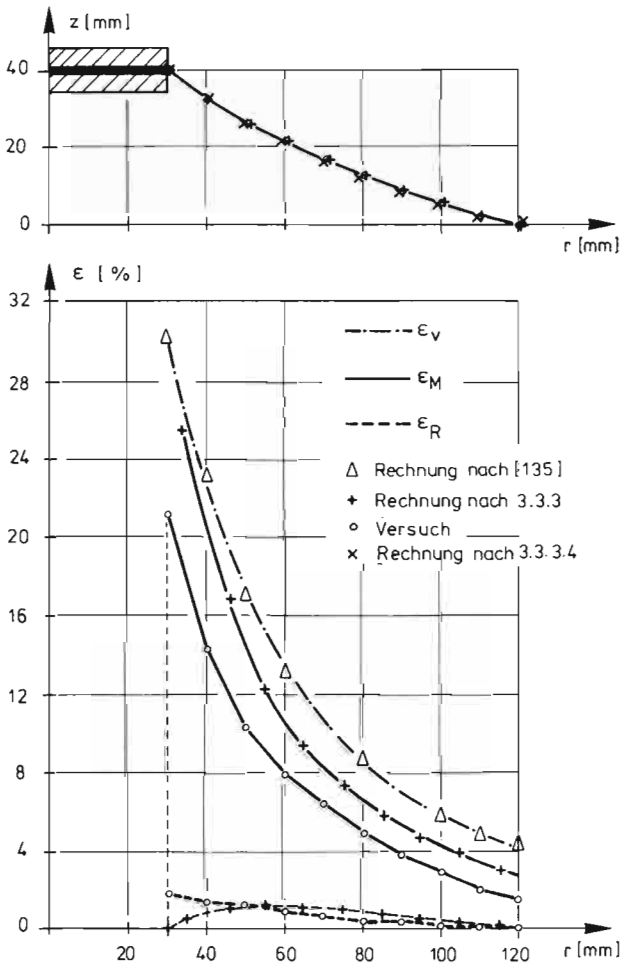


Bild 147

Meridianform und Dehnungen einer Folie im Stempelversuch mit dem Stempel Z_{k60} und Folie aus Cr-Ni-Stahl von 0,025mm Dicke. Vergleich von Versuchsergebnissen und Berechnungen nach Abschnitt 3.3.3.

Bild 148

Meridianform und Dehnungen einer Folie im Stempelversuch mit dem Stempel K120 und Folie aus Cr-Ni-Stahl von 0,025mm Dicke.

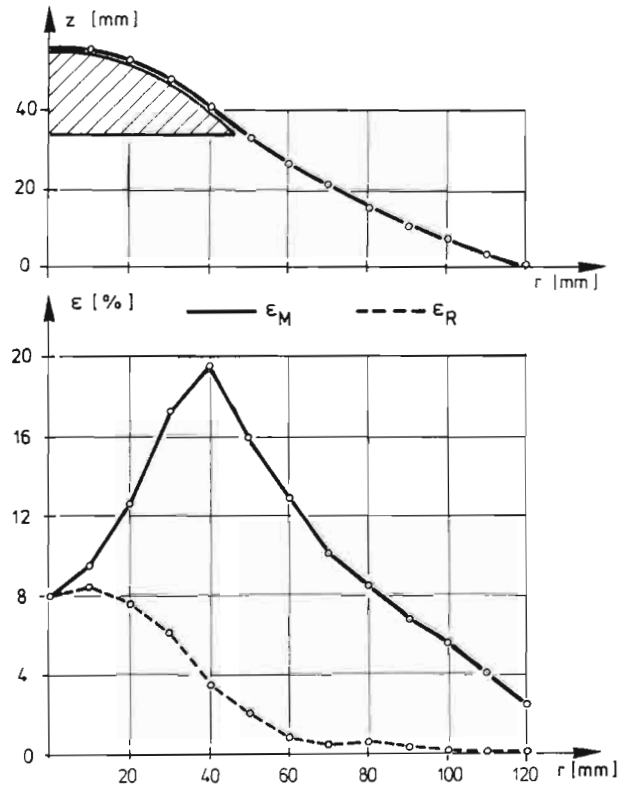
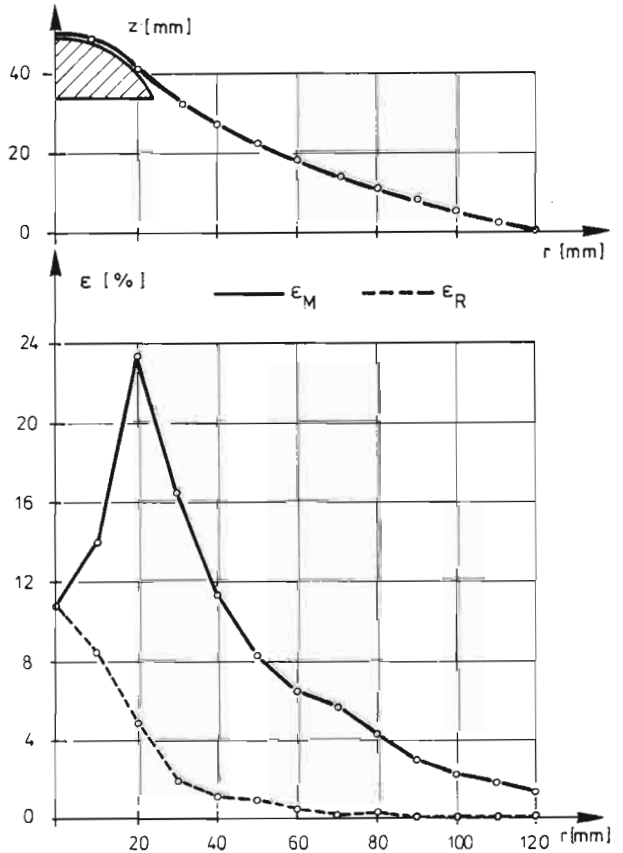


Bild 149

Meridianform und Dehnungen einer Folie im Stempelversuch mit dem Stempel K60 und Folie aus Cr-Ni-Stahl von 0,025mm Dicke.



3.2.3.3 Sattelfläche mit Zugrändern

Die Spannvorrichtung gemäß Bild 150 gestattet es, Sattelflächen mit zwei Hoch- und Tiefpunkten aus einer ebenen Membran (Bild 152) aufzuspannen. Die Membran weist Randverstärkungen auf, die sich bei der Formgebung ebenfalls plastisch verformen. Als Systemlinien für die Ränder wurden Kreisbögen von 400mm und 350mm Radius gewählt. Die Membran und die Ränder wurden aus weichem Aluminium hergestellt (Abmessungen siehe Bild 152).

Es wurde angestrebt, den „Rand gleicher Festigkeit“ zu realisieren. Bei gleichem Spannungs-/Dehnungsverhalten von Membran und Rand ergibt sich die Querschnittsfläche der Randverstärkung aus dem Produkt des Krümmungsradius der Systemlinie des Randes und der Membrandicke: $F_{\text{Rand}} = R_{\text{Rand}} \times s$. Diese Beziehung führt nur in erster Näherung auf den Rand gleicher Festigkeit, da sich der Radius R_{Rand} und die Membrandicke s während der Formgebung ändern.

Das formgebende Aufspannen erfolgt stufenweise. Zunächst wurden die Hochpunkte bei entspannter Membran nach oben verschoben, bis die Membran faltenfrei war. Dabei wuchsen die Zugkräfte P in den Ecken (Bild 153). Die Grundrißprojektionen der Eckpunkte veränderten dabei ihre Lage nur um Bruchteile von Millimetern.

Vor jedem weiteren Heben der Hochpunkte wurde die Membran entspannt. Es entstanden Zwischenformen, bei denen die vier Zwickelbereiche und ein etwa quadratischer mittlerer Bereich weitgehend eben blieben - so, als seien die Zwickel lediglich abgeknickt. Nach Erzielen eines Stiches f von etwa 2×5 cm wurde die Membran durch Heben der Hochpunkte derart gestreckt, daß die ebenen Teilbereiche durch ein Anwachsen der gekrümmten Bereiche verschwanden. Es entstanden Flächen mit negativer Krümmung. In Bild 155 ist das Schattenmoiré-Bild einer derartigen, dem hyperbolischen Paraboloid gleichenden Fläche, wiedergegeben. Weiteren Aufschluß über die Form der Flächen geben die Schnittkurven in Bild 154.

Die Ergebnisse von Dehnungsmessungen sind in den Bildern 156-157 graphisch aufbereitet. In den Zwickeln entstanden bei beiden Versuchen ($R_{\text{Rand}} = 350$ mm und $R_{\text{Rand}} = 400$ mm) negative plastische Dehnungen in Diagonalenrichtung, während die Dehnungen senkrecht zur Diagonalen in diesem Bereich ihre Maximalwerte erreichten.

Bild 150

Versuchseinrichtung zum formgebenden Aufspannen von Sattelflächen mit vier Zugrändern und je zwei Hoch- und Tiefpunkten.

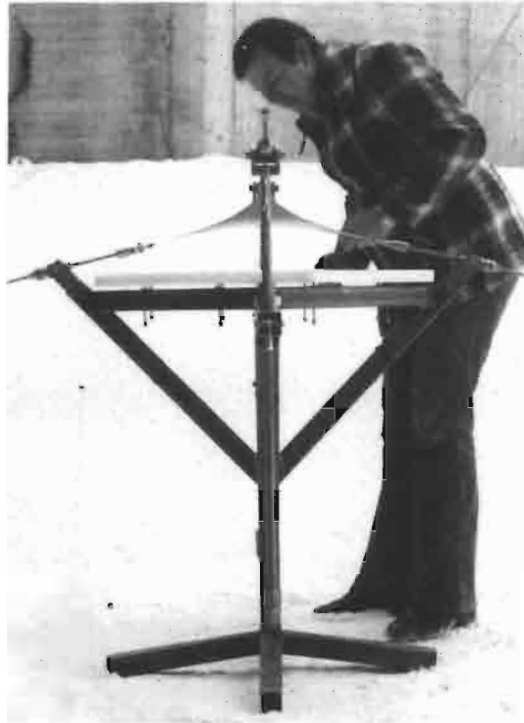


Bild 151

Die entstehende Flächenform ähnelt dem hyperbolischen Paraboloid.

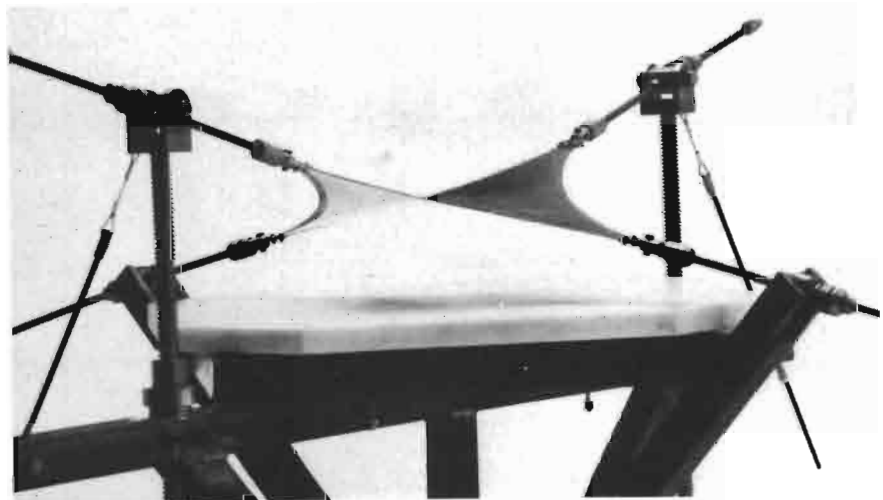
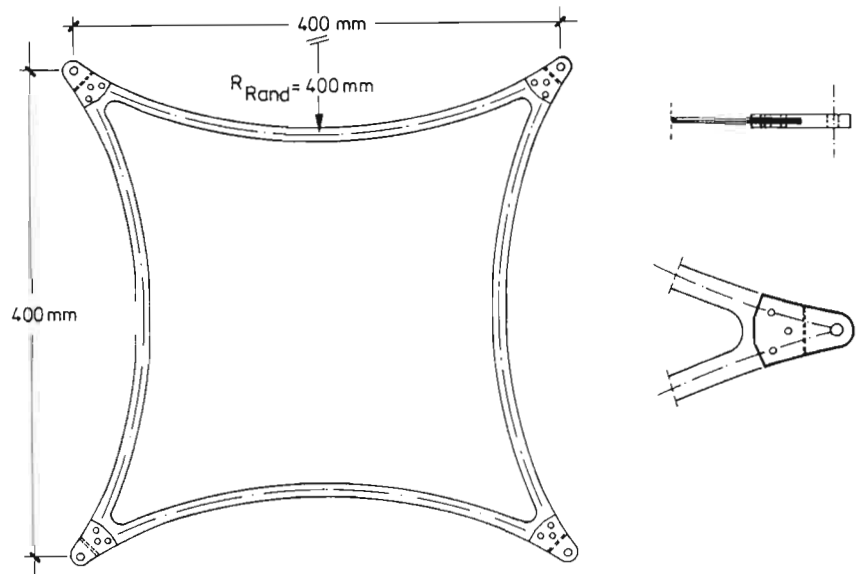


Bild 152

Hauptabmessungen einer Probe in ebenem Ausgangszustand. Der Zugrand ist beträchtlich verstärkt und wird zusammen mit der Membran plastisch gestreckt.



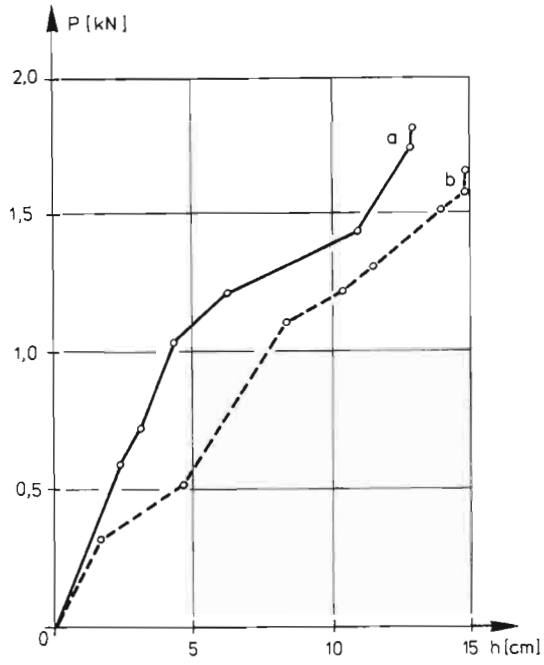


Bild 153

Spannprotokoll zweier Versuche. Über der Verschiebung der Hochpunkte relativ zu den Tiefpunkten, h , ist die Spannkraft aufgetragen. a Randkreisradius $R_{\text{Rand}} = 400\text{mm}$, b Randkreisradius $R_{\text{Rand}} = 350\text{mm}$.

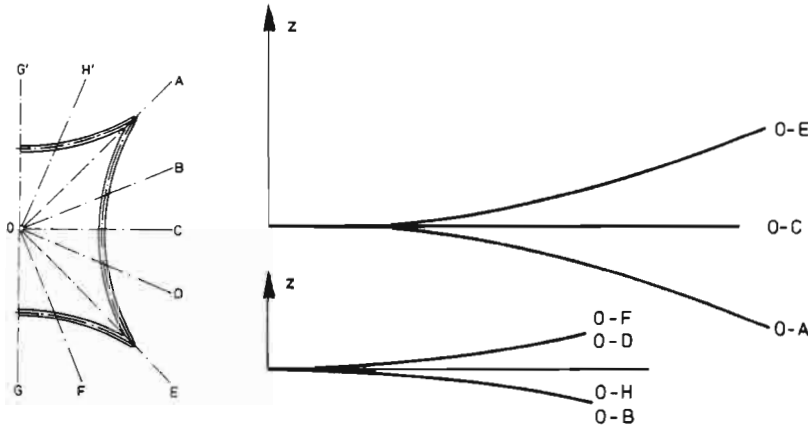


Bild 154

Schnitte zur Beschreibung der entstehenden Form.

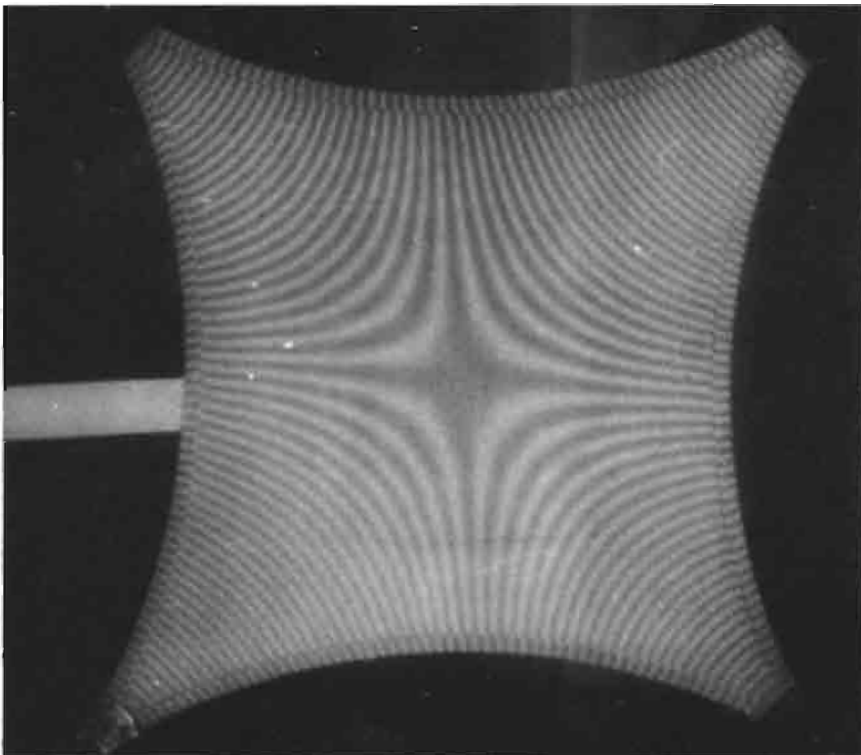


Bild 155

Moiré-Bild.

Bild 156

Übersicht über die Dehnungsverteilung des Versuches mit $R_{Rand} = 350\text{mm}$. Dargestellt ist der Ausschnitt A0E nach Bild 154. Die Dehnung bzw. Stauchung ist vertikal über den zugehörigen Linien-elementen aufgetragen. Verwendet wurde Reinaluminiumfolie von 0,03mm Dicke.

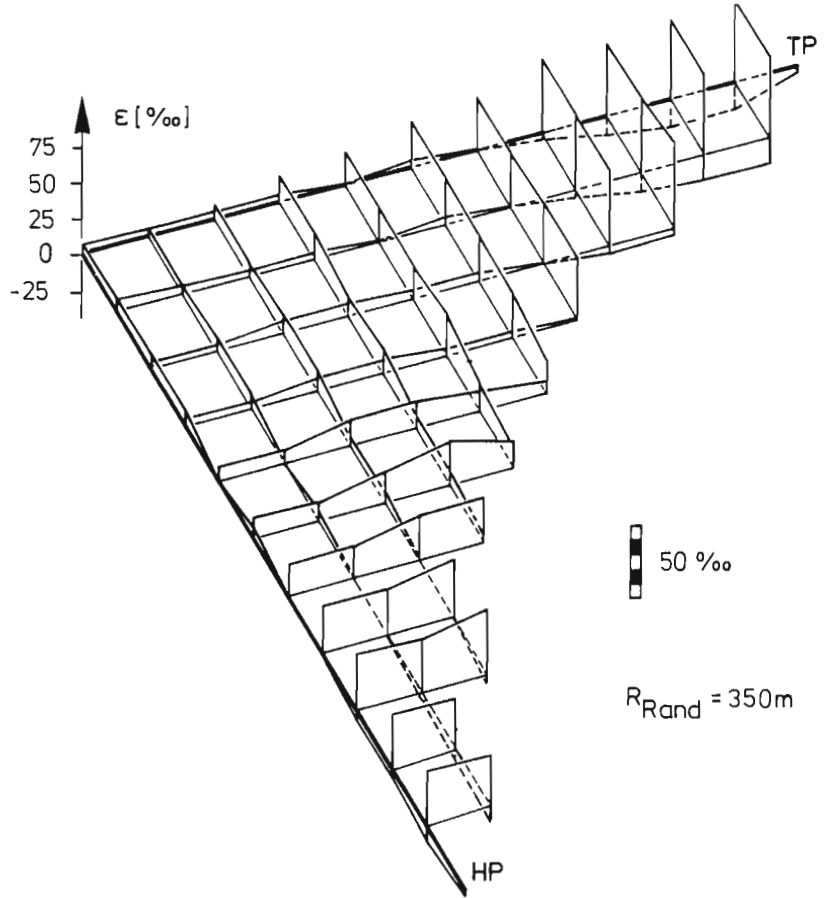
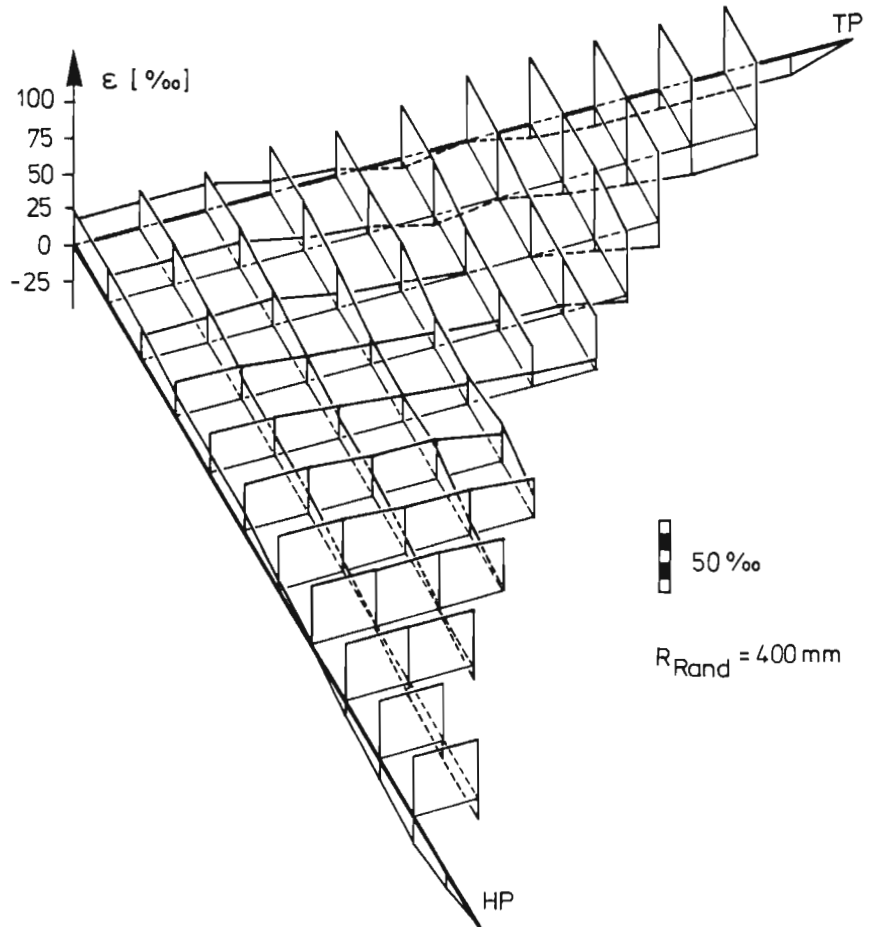


Bild 157

Übersicht über die Dehnungsverteilung des Versuches mit $R_{Rand} = 400\text{mm}$. Dargestellt ist der Ausschnitt A0E nach Bild 154. Die Dehnung bzw. Stauchung ist vertikal über den zugehörigen Linien-elementen aufgetragen. Verwendet wurde Reinaluminiumfolie von 0,03mm Dicke.



3.3 Zur rechnerischen Erfassung des formgebenden Lastfalles

3.3.1 Ziele und Problematik

Ziele einer rechnerischen Behandlung des formgebenden Lastfalles bestehen darin, die entstehende Form der Membran und die bei der Formgebung auftretenden Dehnungen und Spannungen in Abhängigkeit von den formgebenden Lasten, den Randbedingungen und den Werkstoffeigenschaften unter Berücksichtigung der Grenzen der Umformbarkeit auf theoretischem Wege zu bestimmen.

Diese Aufgabe ist im allgemeinen Fall außerordentlich schwierig. Es sind zunächst nicht nur Spannungen und Dehnungen, sondern auch die sich einstellende Membran-geometrie unbekannt. Die Grundgleichungen der Schalentheorie sind beim Auftreten sehr großer Verformungen kompliziert aufgebaut [130]. Können sich die Membranränder mitverformen, so führt die Aufgabenstellung auf nichtlineare gekoppelte Differentialgleichungen. Nach [130] wird dann das Problem in den meisten Fällen mathematisch kaum angreifbar.

Da zunächst nicht auf spezielle, der vorliegenden Aufgabenstellung angepaßte Rechenverfahren zurückgegriffen werden konnte, wurde auf der Grundlage der Erörterungen in 3.3.2 ein Näherungsverfahren für den rotationssymmetrischen Fall abgeleitet, das sich durch gute Ergebnisse (siehe 3.3.3.3) und seine Einfachheit auszeichnet. Andere Lösungsverfahren wie das Differenzenverfahren [131] und die Methode der finiten Elemente [132]-[135] bieten sich für allgemeinere Fragestellungen an (siehe 3.3.4). Die physikalische und geometrische Nichtlinearität führt allerdings zu hohen Rechenzeiten und einem hohen personellen Aufwand.

3.3.2 Grundlegendes über das Stoffverhalten im plastischen Bereich

Das Verformungsverhalten von Metallen unter mehrachsiger Beanspruchung im plastischen Bereich ist mit einer großen Fülle von in der Literatur beschriebenen Erscheinungen verbunden. (Eine Auswahl von Quellen ist im Literaturverzeichnis angegeben.) Zur rechnerischen Behandlung des formgebenden Lastfalles für bautechnische Belange gilt es, eine sinnvolle Auswahl derart zu treffen, daß die Mechanik der Formgebung unter Berücksichtigung der wesentlichsten Parameter in möglichst einfacher Weise beschrieben werden kann. Die Blickrichtung ist dabei nicht auf den Mikrobereich gewandt. Im Vordergrund steht ein dünnwandiges Werkstoffelement, dessen Eigenschaften ohne Bezug zu den Vorgängen im Kristallit phänomenologisch beschrieben werden.

3.3.2.1 Voraussetzungen

Das betrachtete Werkstoffelement wird als Membranelement im Sinne der statischen Abstraktion verwendet. Das bedeutet, daß ein ebener (Zug-) Spannungszustand herrschen soll.

Da die elastischen Verformungen etwa zwei Größenordnungen kleiner als die plastischen sind, werden sie bei den folgenden Betrachtungen vernachlässigt. Prinzipiell bereitet es keine Schwierigkeiten, sie nach dem Hookeschen Gesetz additiv zu berücksichtigen. Über Rechenergebnisse unter Einschluß der elastischen Verzerrungen berichtet [134].

Wesentliche Vereinfachungen bei der Formulierung des Stoffgesetzes sind durch Einschränkung möglicher Umformbedingungen zu erzielen. Der formgebende Lastfall wird im folgenden als einmalige, quasi statische, monoton wachsende Beanspruchung ohne Erwärmung des Metalls aufgefaßt. Durch Einführen dieser einschränkenden Bedingungen können einige Effekte, die das Verformungsverhalten unter allgemeinen Umständen beeinflussen, außer acht gelassen werden:

Die Voraussetzung quasi statischer Belastung bedeutet, daß die Laststeigerung so allmählich erfolgt, daß zum einen keine Abhängigkeit der Fließspannung von der Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ auftritt (dies gilt in hohem Maße für den Bereich $0,1 \text{ sek}^{-1} \cong \dot{\varphi} \cong 25 \text{ sek}^{-1}$ [145]) und zum anderen keine Massenkräfte zu berücksichtigen sind. Laut [135] ist eine quasi statische Belastung gegeben, wenn die Geschwindigkeit der Spannungszunahme kleiner ist als $10 \text{ N/mm}^2 \text{ sek}$. Bei der praktischen Durchführung des formgebenden Lastfalles treten stets noch wesentlich kleinere Belastungsgeschwindigkeiten auf.

Die Forderung nach monoton wachsender Beanspruchung schließt den Bauschinger-Effekt aus und kennzeichnet die Belastungsgeschichte als denkbar einfach.

Obwohl 80% bis 90% der Umformarbeit in Wärmeenergie umgesetzt werden [145], kann von einer Kaltumformung bei konstanter Temperatur ausgegangen werden, da dünnes Blech Wärme sofort an die Umgebung abgibt.

Die Postulierung konstanten Volumens bei der Umformung entspricht sehr gut der Wirklichkeit [148],[149].

Für bautechnische Anwendungen sind die Auswirkungen der Blechanisotropie auf die sich einstellende Membranform in der Regel vernachlässigbar. Falls man eine genauere Analyse wünscht oder falls der Effekt der Texturverfestigung mit berücksichtigt werden soll, können Erweiterungen des Stoffgesetzes eingeführt werden (siehe 3.3.2.5). Mitunter ist es allerdings eher angebracht, den Auswirkungen der Anisotropie mit konstruktiven und fertigungstechnischen Mitteln zu begegnen. Dies hat sich z. B. bei der Herstellung von großen Hohlspiegeln (Bilder 84-85) herausgestellt [150].

3.3.2.2 Einachsiger Zugversuch und Fließkurve

Der einachsige Zugversuch mit Probekörpern aus duktilen Metallen kann als Sonderfall einer Streckziehbeanspruchung angesehen werden, wie sie beim formgebenden Lastfall unter zweiachsigem Spannungszustand auftritt. Er dient aus diesem Grund, und weil er einfach durchzuführen ist, als Basis zur Beschreibung des Stoffverhaltens bei der Formgebung.

Zur Beschreibung des Zusammenhanges zwischen Formänderungen und Spannungen im plastischen Bereich ist es sinnvoll, die Spannung auf den jeweils vorhandenen Querschnitt und die Dehnung auf die momentane Länge zu beziehen (ausführliche Erläuterungen sind z. B. in [148] zu finden). Die Spannung bezogen auf den „wahren“ Querschnitt, die erforderlich ist, um plastische Dehnungen einzuleiten bzw. aufrechtzuhalten, wird Fließspannung k_f genannt:

$$k_f = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Die plastische Dehnung, die auf die momentane Länge des Werkstoffelementes bezogen wird, heißt Umformgrad oder logarithmische Dehnung φ :

$$\varphi = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_1}{l_0} \quad (2a)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2b)$$

Zwischen diesen Größen und den in der Festigkeitslehre üblichen Definitionen von Spannung und Dehnung gelten folgende Transformationsgleichungen:

$$k_f = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (3)$$

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) \quad (4)$$

Bei Gleichung (3) ist Volumenkonstanz vorausgesetzt. Für kleine Dehnungen gilt $\varphi \approx \varepsilon$, was leicht durch eine Reihenentwicklung der rechten Seite von Gleichung (4) gezeigt werden kann ($\ln(1 + \varepsilon) = \varepsilon - \varepsilon^2/2 + \varepsilon^3/3 - \dots$; $-1 < \varepsilon < +1$).

Die Funktion $k_f(\varphi)$ (Fließkurve) gibt für den einachsigen Spannungszustand an, wie Fließspannung und Umformgrad von einander abhängen. Vereinbarungsgemäß wird die Fließkurve $k_f(\varphi)$ als Bezug für die Vergleichsgrößen σ_v und φ_v unter mehrachsiger Beanspruchung gewählt (siehe 3.3.2.4).

$$\sigma_v = k_f \quad (5)$$

$$\varphi_v = \varphi \quad (6)$$

Grundsätzlich ist die Fließspannung k_f nicht nur vom Umformgrad φ , sondern auch von der Geschwindigkeit der Umformung $\dot{\varphi}$ und der Temperatur abhängig. Nach den

Voraussetzungen 3.3.2.1 darf k_f als allein von φ abhängig betrachtet werden.

$$k_f = f(\varphi) \quad (6a)$$

Es gibt viele Verfahren zur Aufnahme von Fließkurven (siehe z.B. [148],[152],[154]-[163]). Für Bleche eignen sich besonders der Schichtstauchversuch [156] und der hydraulische Tiefungsversuch [160]. Der hydraulische Tiefungsversuch erfaßt einen großen Bereich von φ und entspricht am meisten der Vorgehensweise des formgebenden Lastfalles. Fließkurven metallischer Werkstoffe findet man z. B. in [162],[163]. Fließkurven von Blechen sind z.B. in [152],[160],[161] veröffentlicht.

Zur analytischen Formulierung des Zusammenhanges $k_f(\varphi)$ sind eine Vielzahl von elementaren Funktionen vorgeschlagen worden (siehe z.B. [148] und [160]). Oft genügt bei der numerischen Behandlung von Problemen der Umformtechnik eine lineare Approximation nach Gleichung (7). Auch die Potenzfunktion, Gleichung (8), oder logarithmische Näherungsansätze, Gleichung (9), sind gebräuchlich. Es gelingt sogar bis zu einem gewissen Grad, die Parameter A, B, C in den Gleichungen (7) bis (9) physikalisch zu deuten [151].

$$k_f = A + B \cdot \varphi \quad (7)$$

$$k_f = A + B \cdot \varphi^C \quad (8)$$

$$k_f = A + B \cdot \ln \varphi \quad (9)$$

In Bild 158 ist eine schematische Übersicht über das Spannungs-/Dehnungsverhalten verschiedener Werkstoffe gegeben. Für den formgebenden Lastfall sind in aller Regel nur Werkstoffe mit Verfestigung, Kurven a und b, geeignet.

3.3.2.3 Plastische Formänderungen unter zweiachsiger Zugbeanspruchung

Der Zusammenhang zwischen Spannungszustand und Formänderungszustand im plastischen Bereich wird mit Hilfe eines mathematischen Modells, das eine mehr oder weniger gute Übereinstimmung mit der Wirklichkeit ergibt, beschrieben. Der älteste Ansatz zu einer solchen Fließregel, der auch heute noch allgemein akzeptiert wird, stammt von Saint-Venant aus dem Jahr 1870. In der Darstellungsweise von [141] lautet er:

$$\mathbf{S}' = 2\lambda \cdot \dot{\mathbf{E}}' \quad (10)$$

$$\mathbf{E}'' = 0 \quad (11)$$

In Gleichung (10) wird die Proportionalität des Spannungsdeviators \mathbf{S}' mit dem Deviator der Formänderungsgeschwindigkeiten $\dot{\mathbf{E}}'$ gefordert. Der Proportionalitätsfaktor 2λ ist dabei keine Konstante, sondern eine Funktion der Fließ-

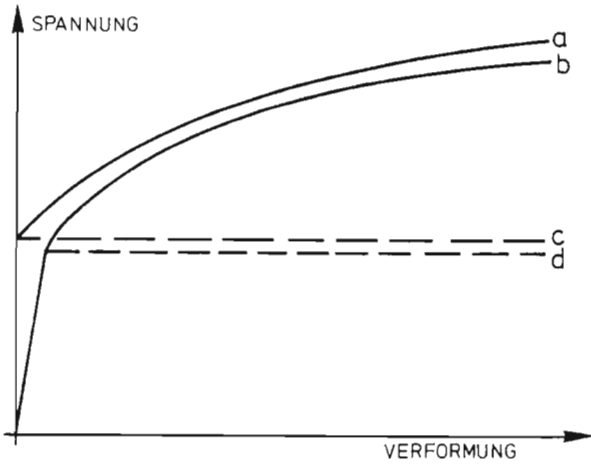


Bild 158

Schematisch dargestellte Fließkurven.
a, c starrplastische Werkstoffe mit und ohne Kaltverfestigung.
b, d elastisch/plastische Werkstoffe mit und ohne Kaltverfestigung.

PROBEKÖRPER	SPANNUNGS-ZUSTAND	VERHÄLTNISS DER	
		Hauptspannungen $\sigma_2:\sigma_1$	Hauptdehnungen $\varphi_1:\varphi_2:\varphi_3$
Zugprobe 	einachsig	0	1: -0,5: -0,5
geschlossenes Rohr unter Innendruck 	eben (Dehnungszustand auch eben)	1/2	1:0: -1
Kugelkalotte unter Innendruck 	eben, isotrop	1	0,5:0,5:1

Bild 159

Übersicht über die Verhältniswerte der Hauptdehnungen in Abhängigkeit vom Verhältnis der Hauptspannungen unter Voraussetzung proportionaler Formänderung bei drei exemplarischen Probekörpern.

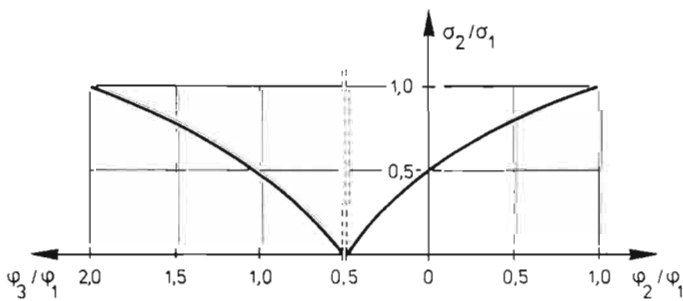


Bild 160

Graphische Darstellung der Gleichungen (17).

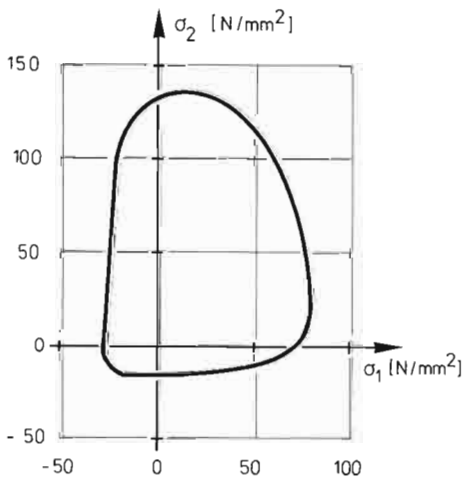


Bild 161

Fließortkurve mit beträchtlicher Abweichung von der Mises-Ellipse. Magnesiumblech [209].

spannung und der Formänderungsgeschwindigkeit. Die Gleichung (11) beschreibt die Volumenkonstanz, die ausgedrückt in den Hauptformänderungen in folgender Weise formuliert werden kann:

$$d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2 + d\varepsilon_3 = 0 \quad (12)$$

$$(1 + \varepsilon_1)(1 + \varepsilon_2)(1 + \varepsilon_3) = 0 \quad (12a)$$

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (13)$$

Die Gleichungen (10) und (11) können zu dem „differentialen Gesetz der Fließtheorie“ zusammengefaßt werden.

$$\mathbf{S}' = \left(\frac{2\lambda}{dt} \right) d\mathbf{E} \quad (14)$$

In Matrixschreibweise unter Bezug auf die Hauptachsenrichtungen lautet (14)

$$\frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3 & 0 & 0 \\ 0 & 2\sigma_2 - \sigma_3 - \sigma_1 & 0 \\ 0 & 0 & 2\sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_2 \end{pmatrix} = \frac{2\lambda}{dt} \begin{pmatrix} d\varphi_1 & 0 & 0 \\ 0 & d\varphi_2 & 0 \\ 0 & 0 & d\varphi_3 \end{pmatrix}. \quad (14a)$$

Die hieraus abgeleiteten Komponentengleichungen

$$\begin{aligned} \lambda d\dot{\varphi}_1 &= \frac{2}{3} \left(\sigma_1 - \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} \right) \\ \lambda d\dot{\varphi}_2 &= \frac{2}{3} \left(\sigma_2 - \frac{\sigma_3 + \sigma_1}{2} \right) \\ \lambda d\dot{\varphi}_3 &= \frac{2}{3} \left(\sigma_3 - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \right) \end{aligned} \quad (14b)$$

lassen sich im allgemeinen nicht durch geschlossenes Integrieren auf finite Beziehungen zurückführen. Bei konstantem Verhältnis der Spannungskomponenten können die Gleichungen (14b) jedoch integriert werden. Es ergeben sich dann die folgenden Beziehungen zwischen den Formänderungen und den Spannungen (siehe hierzu z.B. [138],[141],[144],[146]):

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{1}{D} \left(\sigma_1 - \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} \right) \\ \varphi_2 &= \frac{1}{D} \left(\sigma_2 - \frac{\sigma_3 + \sigma_1}{2} \right) \\ \varphi_3 &= \frac{1}{D} \left(\sigma_3 - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

Diese Gleichungen entsprechen formal dem Hookeschen Gesetz für $\nu = 1/2$. D wird Plastizitätsmodul genannt und kann aus der Fließkurve ermittelt werden. Für den einachsigen

gen Spannungszustand gilt

$$D = \frac{\sigma_1}{\varphi_1} \quad (16)$$

Bei mehrachsigen Spannungszuständen sind zusätzliche Hypothesen erforderlich, die einen Vergleich der Formänderungen unter beliebigen mehrachsigen Spannungszuständen mit denjenigen des einachsigen Falles (Fließkurve) ermöglichen (siehe Abschnitt 3.3.2.4).

Für den zweiachsigen Spannungszustand können die Gleichungen (15) der sogenannten Deformationstheorie [140] wegen $\sigma_3 = 0$ vereinfacht dargestellt werden.

$$\begin{aligned} \frac{\varphi_2}{\varphi_1} &= \frac{2\sigma_2 - \sigma_1}{2\sigma_1 - \sigma_2} \\ \frac{\varphi_3}{\varphi_1} &= \frac{2\sigma_1 - \sigma_2}{-\sigma_1 - \sigma_2} \end{aligned} \quad (17)$$

In etwas anderer Schreibweise:

$$\begin{aligned} \varphi_1 : \varphi_2 : \varphi_3 &= \\ \left(\sigma_1 - \frac{\sigma_2}{2} \right) : \left(\sigma_2 - \frac{\sigma_1}{2} \right) : \left(-\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \right) &= \\ \left(1 - \frac{\sigma_2/\sigma_1}{2} \right) : \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} - \frac{1}{2} \right) : \left(-\frac{1 + \sigma_2/\sigma_1}{2} \right) \end{aligned} \quad (17a)$$

Die Darstellungen (17) bzw. (17a) sind geeignet, einen anschaulichen Überblick über den Verlauf der Formänderungen in Abhängigkeit des Verhältnisses der Hauptspannungen σ_2/σ_1 mit

$$0 \leq (\sigma_2/\sigma_1) \leq 1, \quad (18)$$

das im Zusammenhang mit dem formgebenden Lastfall von Interesse ist, zu gewinnen:

Eine Dickenabnahme, $-\varphi_3$, ist nicht zu vermeiden, solange σ_2/σ_1 im Wertebereich von (18) bleibt. Die mittlere Hauptformänderung φ_2 kann bezogen auf φ_1 Werte von $-0,5$ bis $1,0$ erreichen. Für $\sigma_2/\sigma_1 = 0,5$ ist $\varphi_2 = 0$. Dieser Fall entspricht z. B. dem geschlossenen Rohr unter Innendruck, dessen Längsdehnung bis zum Bruch trotz beträchtlicher Aufweitung in Ringrichtung Null bleibt. Dieses Phänomen wurde experimentell bestätigt [140]. Auch die Erfahrungen des einachsigen Zugversuches und des Kalottenversuches lassen sich anhand der Deformationstheorie, Gleichungen (17) und (17a), nachvollziehen (Bild 159). Eine graphische Darstellung der Gleichungen (17) ist in Bild 160 wiedergegeben.

3.3.2.4 Vergleichsspannung und Vergleichsformänderung im Verfestigungsbereich

Um den Fließbeginn bei mehrachsigen Spannungszuständen auf den des einachsigen beziehen zu können, wurden verschiedene Hypothesen aufgestellt [146]. Für duktile

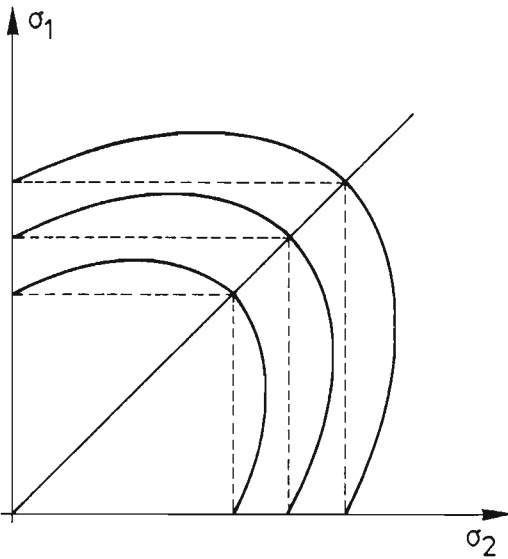


Bild 162

Graphische Darstellung der isotropen Verfestigung. Die Mises-Ellipse wird mit zunehmender Kaltverfestigung geometrisch ähnlich aufgeweitet.

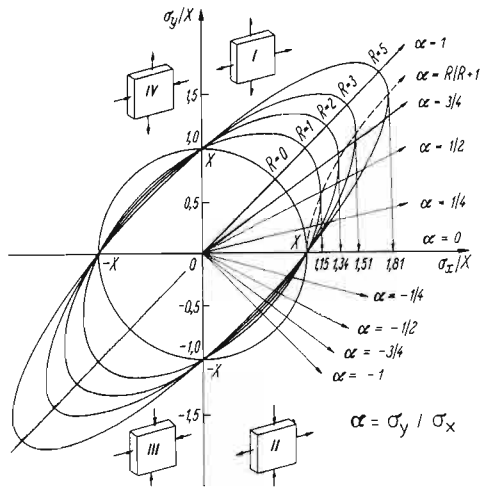


Bild 163

Fließgrenzen bei ebenem Spannungszustand in Blechen mit senkrechter Anisotropie (mit R nach Gleichung 26) [207].

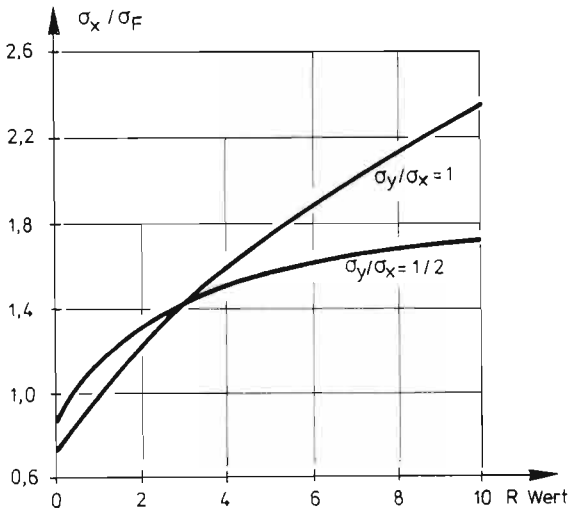


Bild 164

Abhängigkeit des Verfestigungsverhältnisses σ_x/σ_F vom R-Wert (Gleichung 26) für zwei Spannungsverhältnisse [207].

Metalle beschreibt das Mises-Kriterium den Fließbeginn in zufriedenstellender Übereinstimmung mit der Wirklichkeit. Für den ebenen Spannungszustand lautet es

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 = k^2 \quad (19)$$

In der Hauptspannungsebene stellt die Gleichung (19) eine Ellipse dar. Nicht immer stellt sich die Funktion $k = f(\sigma_1, \sigma_2)$ in dieser einfachen Weise dar. Bleche können durch ihre Anisotropie ein stark abweichendes Verhalten zeigen (Bild 161).

Die Funktion $k = f(\sigma_1, \sigma_2)$ wird Fließortkurve genannt. Spannungszustände, die durch Punkte innerhalb der stets konvexen [144] Fließortkurve liegen, entsprechen elastischer Beanspruchung, während Zustände auf der Fließortkurve den Beginn plastischer Verformung anzeigen.

Als Folge der Kaltverfestigung ändert die Fließortkurve ihren Verlauf in der Hauptspannungsebene. Sie kann sich verschieben, verdrehen und ihre Form ändern. Die einfachste Annahme über den Verlauf der Fließortkurve bei einer Verfestigung besteht darin, daß man von sich aufblähenden, konzentrischen und geometrisch ähnlichen Mises-Ellipsen ausgeht. In Bild 162 ist dieser Fall der isotropen Verfestigung dargestellt. Für die einschränkenden Bedingungen nach 3.3.2.1 soll diese Verfestigungshypothese eine gute Näherung sein [144]. Um die Vergleichsspannung σ_v zu erhalten, wird der Größe k in Gleichung (19) der jeweils erreichte Wert der Formänderungsfestigkeit k_f zugeordnet. Mit Gleichung (5) folgt dann

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2} \quad (20)$$

Das Vergleichsmaß für die Formänderung kann mit Hilfe von (20) und (15) unter Verwendung von (16) formal abgeleitet werden [144]. Es ergibt sich die Beziehung

$$\phi_v = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{(\phi_1 - \phi_2)^2 + (\phi_2 - \phi_3)^2 + (\phi_3 - \phi_1)^2}, \quad (21)$$

die unter Berücksichtigung der Volumenkonstanz, Gleichung (13), die Form

$$\phi_v = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\phi_1^2 + \phi_2^2 + \phi_1 \cdot \phi_2} \quad (22)$$

annimmt.

Die Beziehungen (20) und (22) für die Vergleichsgrößen können physikalisch gedeutet und unter energetischen Gesichtspunkten hergeleitet werden (siehe z.B. [144], [148]). Es fehlt jedoch nicht an Hinweisen, daß die angegebenen Beziehungen zwischen Formänderungen und Spannungen im Verfestigungsbereich keine physikalische Erklärung, sondern lediglich eine mögliche Beschreibung der Zusammenhänge darstellt.

3.3.2.5 Berücksichtigung der Anisotropie

Die Anisotropie der mechanischen Eigenschaften von Blechen kann durch Erweiterung des Werkstoffgesetzes rechnerisch berücksichtigt werden. Für den Fall der orthogona-

len Anisotropie können die Gleichungen der Deformationstheorie (1) unter der Bedingung, daß die Hauptachsen des Spannungszustandes mit denjenigen der Anisotropie zusammenfallen, wie folgt erweitert werden [142], [165]

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_x} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{\phi_2 \left(\frac{G}{H} + 1 \right) + \phi_1}{\phi_1 \left(\frac{F}{H} + 1 \right) + \phi_2} \quad (23)$$

$$\text{mit } \frac{G}{H} = \frac{\phi_z}{\phi_y} \quad \text{und} \quad \frac{F}{H} = \frac{\phi_z}{\phi_x} \quad (24)$$

Die Parameter F, G, H beschreiben die Orthotropie und können durch Zugversuche ermittelt werden (siehe z.B. [144] und [165]).

Das Fließkriterium lautet in Erweiterung der Miseschen Bedingung [142]

$$\sigma_v^2 = \frac{3}{2} \cdot \frac{(G + H)\sigma_1^2 - 2H\sigma_1\sigma_2 + (F + H)\sigma_2^2}{F + G + H} \quad (25)$$

Für die Vergleichsdehnung im Fall der orthogonalen Anisotropie ist ein Ausdruck z. B. in [144], S. 223, zu finden.

Eine praktisch bedeutsame Vereinfachung in der Beschreibung des anisotropen Werkstoffverhaltens wird in [166] eingeführt. Unter der Annahme eines isotropen Verhaltens in der Blechebene und lediglich eines abweichenden Verhaltens in Dickenrichtung gelingt es, mit nur einem Parameter R Wesentliches über die Blechanisotropie auszusagen. Die Definition von R lautet:

$$R = \frac{\phi_b}{\phi_s} = \frac{\ln \frac{b_0}{b}}{\ln \frac{s_0}{s}} \quad (26)$$

Die Fließspannung nach Gleichung (17) kann auf diesen Fall erweitert werden

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \left(\frac{2R}{R + 1} \right) = k^2 \quad (27)$$

Für $R = 1$ ergibt sich die Mises-Ellipse. R-Werte größer als 1 liefern Ellipsen, die nach Bild 163 konzentrisch liegen. Die Verschiebung des Fließortes nach dieser Darstellung wird Texturverfestigung genannt. Maximalwerte der Texturverfestigung treten für Spannungsverhältnisse $\sigma_2/\sigma_1 = R/R + 1$ bei $d\phi_2 = 0$ auf [147], (gestrichelte Kurve in Bild 163). Für $\sigma_2/\sigma_1 = 1$ und $\sigma_2/\sigma_1 = 1/2$ sind Verfestigungsverhältnisse σ_x/σ_F in Abhängigkeit vom R-Wert in Bild 164 dargestellt.



Bild 165

Bruchbild einer Blechprobe ($s = 1,0\text{mm}$, 1.4301) aus dem Berstversuch. Ebener Spannungszustand mit $\sigma_2/\sigma_1 = 1$.

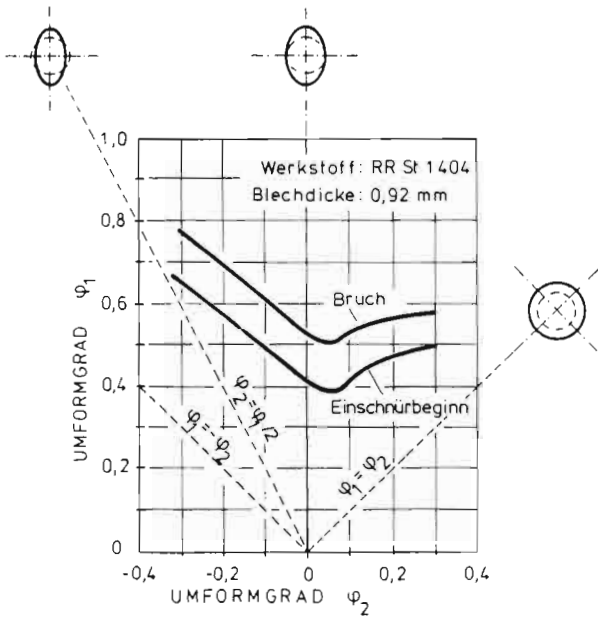


Bild 166

Grenzformänderungsschaubild nach [165].

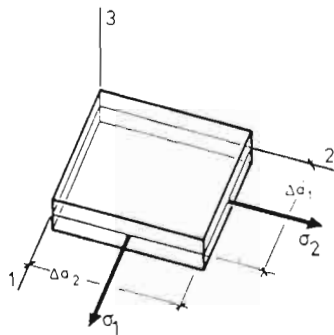


Bild 167

Membranelement mit Bezeichnungen (Herleitung der Gleichungen (28) bis (35)).

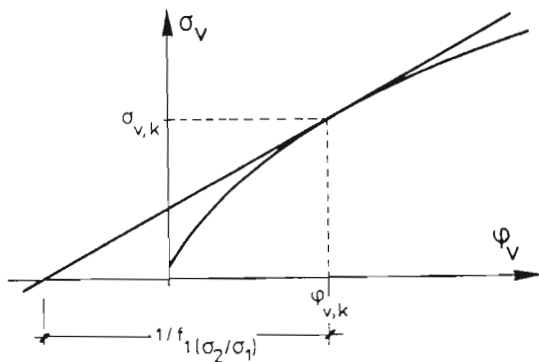


Bild 168

Graphische Darstellung der Bruchbedingung nach Gleichung (35).

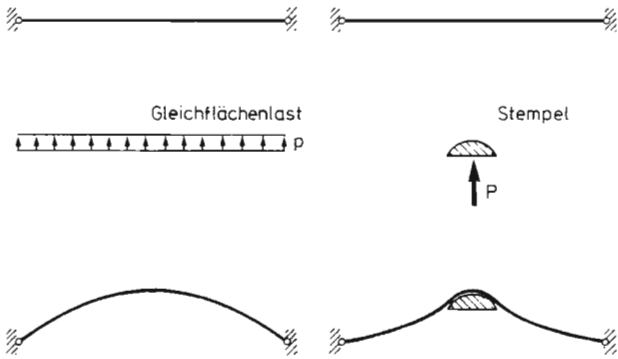


Bild 169

Statisches System und formgebende Belastung für rotationssymmetrische Metallmembranen.

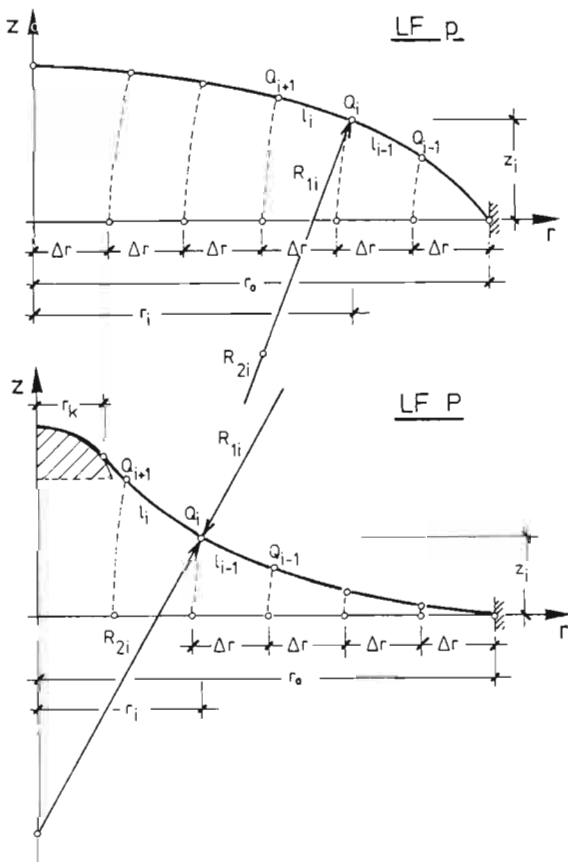


Bild 170

Skizzen zur Herleitung des Rechenverfahrens nach 3.3.3.2. Lastfall p: Kalottenversuch, Lastfall P: Stempelversuch.

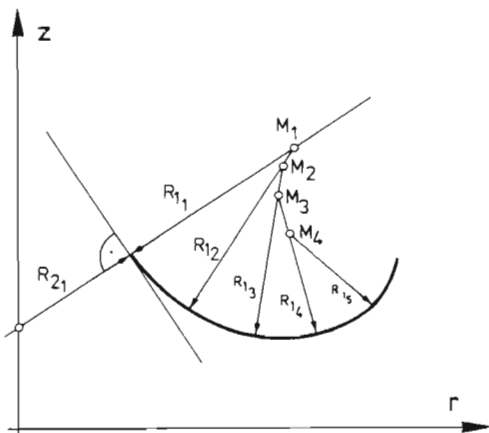


Bild 171

Annäherung des Meridians der Rotationsmembran durch eine Abfolge von Kreissegmenten. (Auf dieses Verfahren hat P.S. Laplace 1812 hingewiesen.)

3.3.2.6 Grenzformänderungen und plastische Instabilität

Das Formänderungsvermögen bei der Kaltumformung ist begrenzt. Die Größe maximaler Dehnungen bis zur Einleitung des Bruchvorganges hängt von dem Werkstoff, dem Spannungszustand und der Verformungsgeschichte ab. Die Kenntnis kritischer Dehnungen ist für die Blechumformtechnik von großer Bedeutung. Deshalb gibt es viele Veröffentlichungen über empirische und theoretische Untersuchungen zum Thema Grenzformänderungen ([169]-[192]).

Bei der zweiachsigen Zugbeanspruchung eines Membranelementes im plastischen Bereich wird die Phase des homogenen Fließens ebenso wie beim einachsigen Zugversuch durch das Auftreten einer Einschnürung beendet. Der Fließvorgang ist von nun an nicht mehr homogen. Es kommt zu einem instabilen Verhalten in dem Sinne, daß die Zunahme der Arbeit der äußeren Kräfte nicht mehr durch die Zunahme der Arbeit der inneren Kräfte kompensiert werden kann [136],[169],[173]. Ausgehend von einer schnell zunehmenden Zerrüttung des Gefüges wird eine Trennung des Querschnittes in der Einschnürzone erreicht. Bild 165 zeigt das Aussehen eines Bruches, der durch eine isotrope, zweiachsige Zugbeanspruchung ausgelöst wurde. Nach [189] ist dieser Prozeß begleitet von dem kontinuierlichen Anstieg einer gewissen Porosität des Werkstoffes, die als Maß für das Formänderungsvermögen herangezogen werden kann.

Von praktischer Bedeutung für die Beurteilung des Formänderungsvermögens bei der Zugumformung unter verschiedenen Hauptdehnungsverhältnissen φ_2/φ_1 ist das Grenzformänderungsschaubild [179], [182]. In diesem Diagramm sind empirisch ermittelte Grenzen für die kritischen Hauptdehnungen, unter denen das Versagen des Werkstoffelementes eintritt, eingetragen. Bild 166 zeigt ein Beispiel eines solchen Grenzformänderungsschaubildes. Die Grenzkurven gelten nur unter der Voraussetzung etwa proportionaler Dehnungen während der gesamten plastischen Verformung. Für andere „Formänderungsgeschichten“ sind große Abweichungen festgestellt worden [165]. Eine der wichtigsten Folgerungen aus dem Grenzformänderungsschaubild ist die Tatsache, daß zweiachsig beanspruchte Elemente wesentlich größere Dehnungen ertragen als einachsig beanspruchte.

Die Lage der Grenzkurve in dem φ_1 - φ_2 -Koordinatensystem nach Bild 166 wird durch viele Faktoren beeinflusst. Fällt die Richtung der größeren Hauptformänderung mit der Walzrichtung zusammen, so rutscht die Grenzkurve nach oben. Ebenso verhält sie sich bei zunehmendem n-Faktor (so wird vielfach der Exponent in Gleichung (8) genannt) und größerer Blechdicke [165]. Bei der Interpretation der Grenzkurve sind auch Einflüsse aus den Versuchsbedingungen wie die Reibung und die Meßlänge der Strecken zur Dehnungsmessung zu berücksichtigen.

Zur theoretischen Ermittlung der Grenzformänderungen sind verschiedene Ansätze gemacht worden (siehe [188] und [165],[173],[174],[180],[189]). Im folgenden wird ein Verfahren angegeben, das in [165] und ähnlich in [141] beschrieben ist.

Die Forderung nach stabilem Werkstoffverhalten lautet

$$dF_1 > 0. \quad (28)$$

Die Ungleichung (28) sagt aus, daß der Zuwachs der auf das Schnittufer „1“ (Bild 167) wirkenden Kraft F_1 größer als Null sein muß. Für den Fall, daß $\sigma_1 > \sigma_2$ ist (dies sei vorausgesetzt), braucht die analoge Aussage für die Richtung „2“ nicht verfolgt zu werden. Aus Gleichung (28) folgt mit

$$F_1 = \sigma_1 \cdot \Delta a_2 \cdot s \quad (29)$$

die Ungleichung

$$\frac{d\sigma_1}{\sigma_1} + \frac{d(\Delta a_2)}{\Delta a_2} + \frac{ds}{s} > 0. \quad (30)$$

Durch Einführen der logarithmischen Dehnung nach Gleichung (2) wird aus (30)

$$\frac{d\sigma_1}{\sigma_1} + d\varphi_2 + d\varphi_3 > 0. \quad (31)$$

Mit (13) wird daraus

$$\frac{d\sigma_1}{\sigma_1} > d\varphi_1. \quad (32)$$

Unter Verwendung der Ausdrücke für die Vergleichsformänderung und die Vergleichsspannung, (20) und (22), folgt aus (32) die Beziehung

$$\frac{d\sigma_1}{\varphi_v} > f_1(\sigma_2/\sigma_1) \cdot \sigma_v \quad (33)$$

mit

$$f_1 = \frac{2 - \sigma_2/\sigma_1}{2 \cdot \sqrt{1 - \sigma_2/\sigma_1 + (\sigma_2/\sigma_1)^2}}. \quad (34)$$

Der Grenzzustand, Index k, ist dadurch gekennzeichnet, daß gilt:

$$\left(\frac{d\sigma_v}{d\varphi_v}\right)_k = f_1(\sigma_2/\sigma_1) \cdot \sigma_{vk} \quad (35)$$

Nach Bild 168 kann diese Bedingung leicht für verschiedene Hauptspannungsverhältnisse σ_2/σ_1 ausgewertet werden, wenn die Fließkurve des Werkstoffes vorliegt. In [165] ist eine Auswertung der Gleichung (35) angegeben, in [252] wurde die Bedingung (35) in das Rechenmodell, Abschnitt 3.3.3, eingebaut.

3.3.3 Rechenmodell für die Formgebung rotationssymmetrischer Metallmembranen

Im folgenden Abschnitt wird ein Rechenmodell vorgestellt, das es gestattet, das Formgebungsproblem für rotationssymmetrische Geometrie und Belastung unter Berücksichtigung der physikalischen und geometrischen Nichtlinearitäten mit dem Rechenautomaten zu behandeln. Für den Fall einfacher Vorgaben entsprechend den Versuchen der Abschnitte 3.2.3.1 und 3.2.3.2 genügt ein programmierbarer Taschenrechner. (Eine wesentlich erweiterte Version für Rechner mit FORTRAN-Compiler wurde mit [252] erarbeitet.)

Es werden ein isotroper, starr-plastischer Werkstoff mit Kaltverfestigung und proportionale Formänderung vorausgesetzt. Effekte wie das Ausbreiten der plastischen Zone, Faltenbildung, Einfluß von Imperfektionen (wie z.B. den Schweißnähten) und der Werkstofftextur bleiben unberücksichtigt. Die Auswirkungen derartiger Phänomene können gegebenenfalls abgeschätzt oder durch eine verfeinerte Betrachtungsweise genauer ermittelt werden (siehe [135]).

3.3.3.1 Statisches System und formgebende Belastung

Die zunächst ebene, kreisförmige Membran konstanter Dicke sei am äußeren Rand unverschieblich gelagert und werde durch monoton wachsende Flächenlasten formgebend aufgespannt (Bild 169). Die Flächenlasten werden entweder durch einen Gas- bzw. Flüssigkeitsdruck p oder durch einen rotationssymmetrischen Stempel, der mit der Kraft P gegen die Membran gedrückt wird, realisiert. Es wird stets nur der Teil der Membran betrachtet, der seine Form durch freies Aufspannen erhält. Beim „Stempelversuch“, Lastfall P, ist dies der Bereich zwischen Außenrand und Kontaktkreis.

Der Kontaktkreis wird als innerer Rand betrachtet, bei dem die Membrandehnungen und -spannungen verschiedene, vorgeschriebene Verhältniszahlen annehmen können. Je nach Ausbildung des Stempels und der Reibfläche Stempel/Membran kann das Verhältnis der Hauptdehnungen φ_2/φ_1 zwischen Null und Eins liegen. Am Außenrand gelte $\varphi_2/\varphi_1 = 0$ (geklemmter Rand).

Während der rotationssymmetrischen Formgebung bewegen sich die Punkte der Membran nur in z- und r-Richtung. Die Membran wird in Meridian- und Ringrichtung unter Abnahme der Dicke gestreckt. Die Membranspannungen sind stets positiv. Versuche haben gezeigt (siehe 3.2.3), daß die Ringdehnungen im allgemeinen viel kleiner als die Meridiandehnungen sind.

Die Gleichgewichtsbedingungen der rotationssymmetrisch belasteten Rotationsmembran lauten:

$$n_1 = \frac{P + \pi r^2 p}{2\pi r \sin \alpha} \quad (36)$$

$$n_2 = R_2 p - \frac{R_2}{R_1} n_1 \quad (37)$$

3.3.3.2 Rechenverfahren

Dem Rechenverfahren liegen die Gleichungen (6a), (17), (20) und (22), die das Stoffverhalten beschreiben, die Gleichgewichtsbedingungen (36) und (37) und die nachfolgend dargestellten Beziehungen zur Beschreibung der Umformgeometrie zugrunde.

Der Meridian der zunächst ebenen Membran sei durch die Punkte Q_i (Bild 170) in Abschnitte gleicher Länge Δr eingeteilt. Die Punkte Q_i sollen als Markierungen gelten, die an den Meridian geheftet sind (also bei der Umformung mitwandern). Ist ihre Lage nach Aufbringen der formgebenden Lasten bekannt, so lassen sich die interessierenden Informationen über Form und Beanspruchung der Membran in diesem Zustand ermitteln. Die Punkte Q_i bewegen sich auf Bahnkurven in z-Richtung und in geringem Maße in r-Richtung.

Der Grundgedanke des Rechenmodells besteht darin, den Meridian durch eine Abfolge von Kreisbogenstücken der Länge l

$$l = \Delta r(1 + \epsilon) = \Delta r \cdot \exp \varphi_1 \quad (38)$$

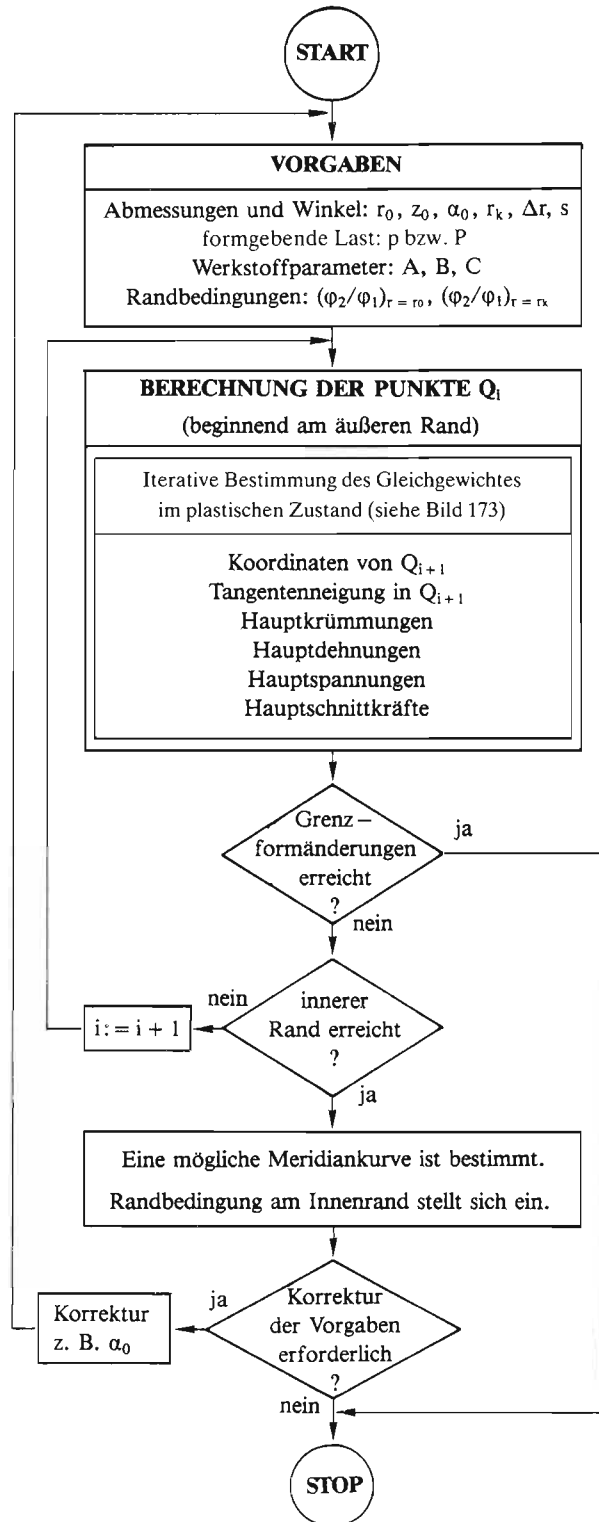
zu approximieren (Bild 171). Auf diese Weise gelingt es, alle geometrischen Abhängigkeiten mit elementaren Mitteln zu beschreiben. Die Abweichungen, die sich aus dieser Näherung ergeben, sind vernachlässigbar, wenn die Länge der Abschnitte Δr klein genug gewählt wird.

Ausgehend von einem Punkt Q_i - begonnen wird z.B. mit einem Punkt Q_0 auf dem Außenrand - können die Koordinaten des folgenden Punktes Q_{i+1} nach der Kreisgleichung (Bild 172) berechnet werden. Dabei sind bis auf den Winkel $\Delta \alpha$ alle verwendeten Größen aus dem vorhergehenden Rechenschritt bzw. aus den Vorgaben bekannt.

Dem Winkel $\Delta \alpha$ entspricht das auf die Länge l gedehnte Meridianelement mit der ursprünglichen Länge Δr . Die Lage des Punktes Q_{i+1} kann mit den Formeln von Bild 173 iterativ bestimmt werden. Der Punkt Q_{i+1} muß zwischen den Punkten S und T (Bild 172) liegen. Er wird in diesem Bereich so lange auf dem zugeordneten Kreisbogen verschoben, bis die Schnittkraft n_1 , die aus der Gleichgewichtsbedingung (36) folgt, mit der aus der Dehnung der Membran errechneten Schnittkraft n_1 übereinstimmt. Korrekturen der Lage von Q_{i+1} werden mit $\pm (1/2)^n$, ($n = 1, 2, 3, \dots$) vorgenommen. Dadurch ist gewährleistet, daß das Verfahren schnell konvergiert.

Mit fest vorgegebenen, sinnvollen Werten erhält man auf die beschriebene Weise ausgehend vom Außenrand eine mögliche Meridiankurve. Falls für den Innenrand (Kontaktkreis r_i) bestimmte Randbedingungen vorgeschrieben sind, wird die berechnete Meridiankurve diese höchstens aus purem Zufall erfüllen. Um die Lösung auch vorgeschriebenen Bedingungen am Innenrand anzugleichen, muß eine der Ausgangsgrößen (z. B. die Kraft P oder der Anfangswinkel α_0) so lange variiert werden, bis eine Meridiankurve gefunden ist, die die Randbedingungen am Innenrand ebenfalls erfüllt. In Bild 175 ist dargestellt, wie sich

Bild 174.
Flußdiagramm zum Rechenmodell nach 3.3.3.



das Verhältnis der Dehnungen φ_2/φ_1 als Funktion vom Radius für einen festen Anfangswinkel α_0 bei einer Variation von P ändert. Ein Flußdiagramm des Rechenablaufes ist in Bild 174 wiedergegeben.

theoretischen Werte von φ_2/φ_1 , Null bzw. Eins, die der Rechnung zugrunde liegen, sind bei den Versuchen nur näherungsweise realisiert. Rechnerisch ermittelte Spannungsverläufe sind in Bild 177 zusammengestellt.

3.3.3.3 Ergebnisse

Mit dem oben beschriebenen Rechenmodell wurden einige Versuche des Abschnittes 3.2.3 rechnerisch nachvollzogen. Den Rechnungen wurde die Fließkurve des verwendeten Folienwerkstoffes zugrunde gelegt. Die experimentell ermittelte Spannungs-/Dehnungskurve für den Verfestigungsbe-
reich wurde durch die Gleichung (8) approximiert:

$$\sigma_v = 285 + 970 \cdot \varphi_v^{0,6} \quad [\text{N/mm}^2]. \quad (39)$$

Diese Funktion ist in Bild 128 eingetragen.

Die Voraussetzung proportionaler Formänderung wurde anhand zweier Stempelversuche und des Kalottenversuches überprüft (Bild 178). An je drei Stellen (Kurvenparameter r) ist das Verhältnis der Hauptspannungen σ_1/σ_2 über der Auslenkung f der Membran aufgetragen. Durch den nahezu horizontalen Verlauf der Kurven und den geringen Unterschied einer Rechnung in Laststufen ΔP wird die Gültigkeit der Voraussetzung der proportionalen Formänderung in befriedigender Weise sichergestellt.

Kalottenversuche

Die rechnerisch ermittelte Abhängigkeit der Wölbhöhe f vom Innendruck p wird in Bild 135 mit der experimentell ermittelten verglichen. Die Membran des Rechenmodells verhält sich etwas steifer. Das Eintreten der plastischen Instabilität wird rechnerisch in befriedigender Weise simuliert.

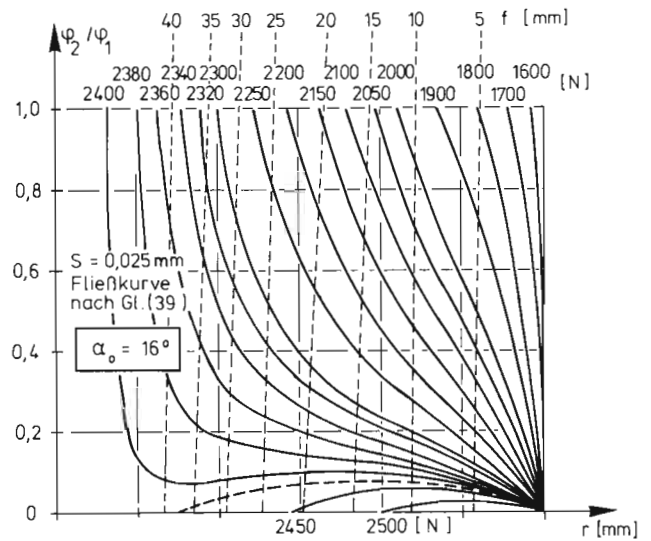
Die entstehende Meridianform wird durch die Rechnung sehr gut bestimmt (Bild 136, oben). Der Verlauf der Dehnungen zeigt geringfügige Abweichungen (Bild 136, unten). Es sei betont, daß kein Versuch unternommen wurde, die Werkstoffparameter der Gleichung (39) an die Versuchsergebnisse anzupassen.

Stempelversuche

Die Abhängigkeit der Stempelkraft vom Stempelweg wurde für den Klemmstempel ermittelt und in Bild 176 zusammen mit den Versuchsergebnissen eingetragen. Die Übereinstimmung von Rechnung (Kurve b) und Versuch (Kurve a) ist gut. Man beachte allerdings, daß eine wesentlich stärker vereinfachende Berechnung ebenfalls zu einer recht guten Annäherung an den experimentell ermittelten p-f-Verlauf führt (Kurve c). Die Kurve c wurde unter der Annahme ermittelt, daß die Membranmasse zu einem Stabzweischlag „umgeschmolzen“ sei. Ein Vergleich der Meridiane, die sich rechnerisch und experimentell ergeben, ist in den Bildern 146, oben, und 147, oben, angestellt. Rechnerisch ermittelte Dehnungen und gemessene Dehnungen sind für die gleichen Versuche wiedergegeben (146-147, unten). Die Abweichungen zwischen Rechnung und Versuch ergeben sich in erster Linie aus jeweils unterschiedlichen Randbedingungen. Die

Bild 175

Auszug aus dem Lösungsvorrat des Rechenmodells für den Stempelversuch bei festen Werten für $(\varphi_2/\varphi_1)_{r=r_0}$, r_0 , z_0 , α_0 , Δr , s und A , B , C . Aufgetragen ist für die Stelle r die Abhängigkeit zwischen dem Hauptdehnungsverhältnis φ_1/φ_2 der Stempelkraft P und der Höhe f der Membran.



176

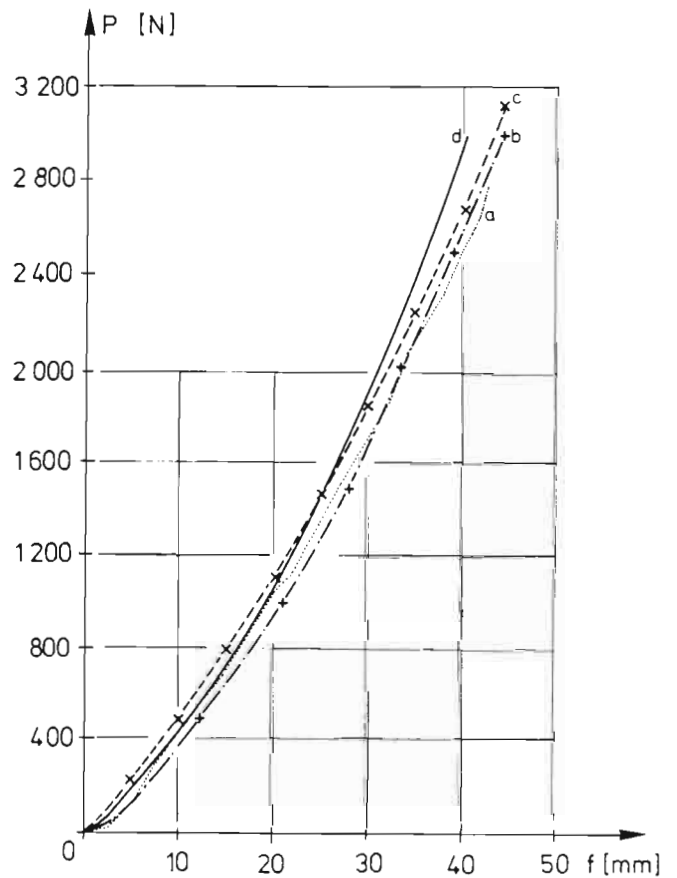
Abhängigkeit von Stempelweg f und Stempelkraft P für den Klemmstempel. Vergleich von Rechnung und Versuch.

a Versuch

b Rechnung nach 3.3.3.2

c Symmetrischer Stabzweischlag gleicher Spannweite, Masse und Fließkurve

d Rechnung nach [135], (Rechnung nach [133],[153], siehe Bild 189).



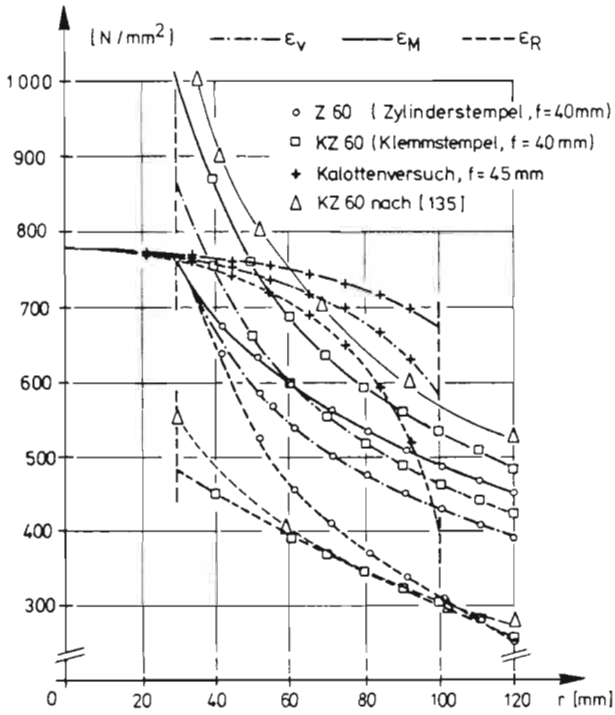


Bild 177

Nach 3.3.3.2 rechnerisch ermittelte Spannungsverläufe für den Kalottenversuch und zwei Stempelversuche [252].

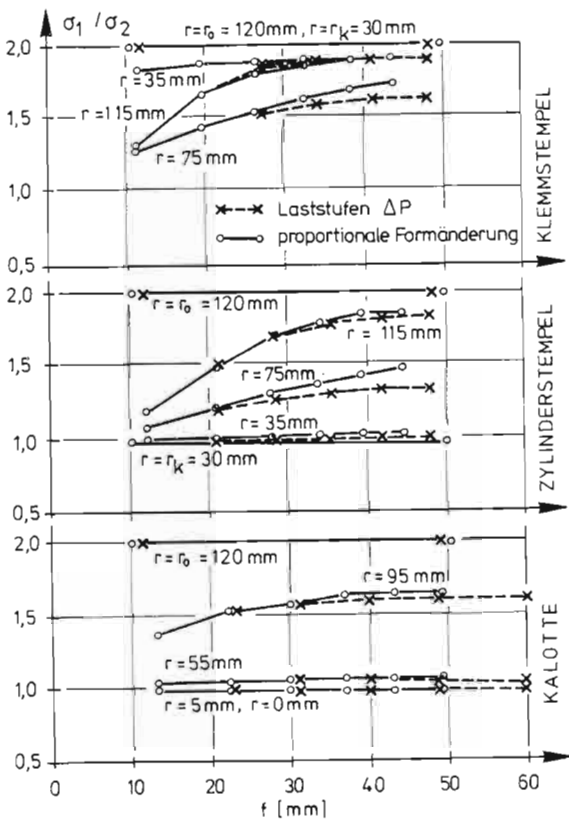


Bild 178

Überprüfung der Voraussetzung der proportionalen Formänderungen des Rechenmodells nach 3.3.3.2. Ihre Gültigkeit wird durch den nahezu horizontalen Verlauf der Kurven (σ_1/σ_2 in Abhängigkeit von f und der betrachteten Stelle auf der Membran) sowie den geringen Unterschied zu einer Rechnung in Laststufen weitgehend bestätigt [252].

Bild 179

Meridianausschnitt durch eine Rotationsmembran. Bezeichnungen.

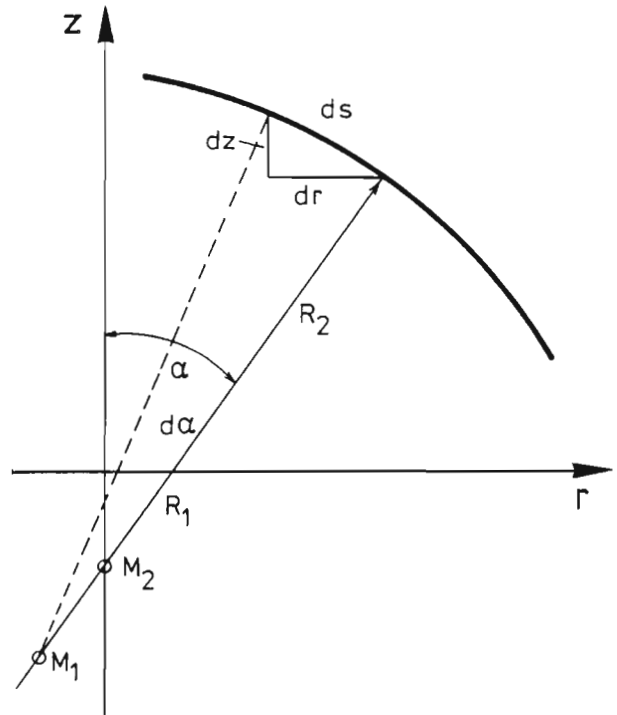


Bild 180

Ermittlung der Meridianform durch eine geschätzte Vorgabe des Verhältnisses der Hauptkrümmungsradien in Abhängigkeit von der Radialkoordinate (3.3.3.4). Vergleich mit Versuchsergebnissen (Zylinderstempel).

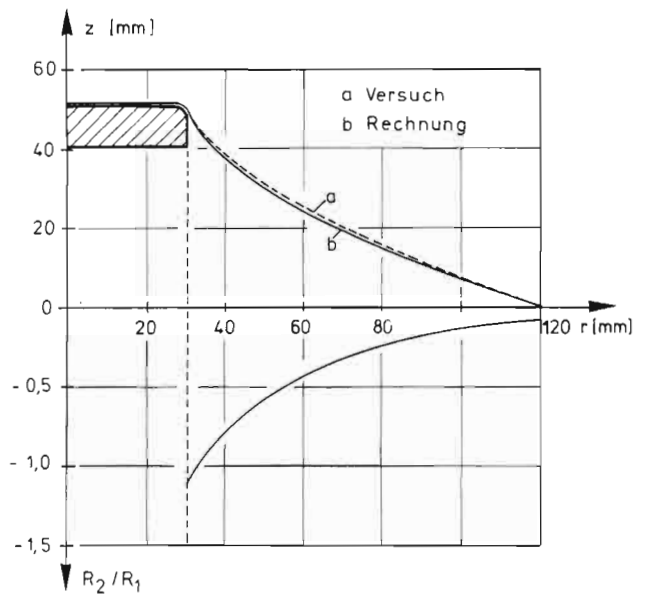
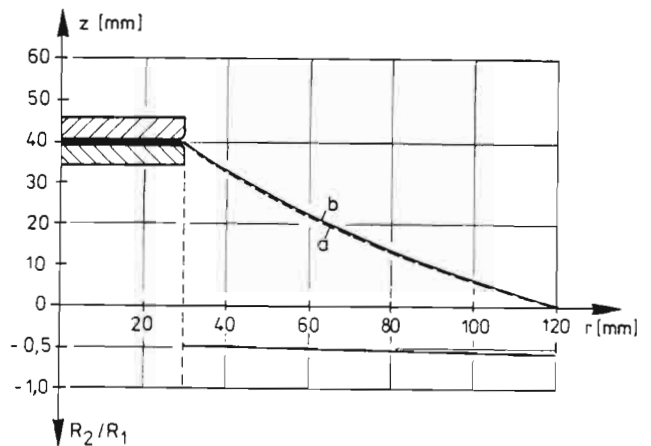


Bild 181

Ermittlung der Meridianform durch eine geschätzte Vorgabe des Verhältnisses der Hauptkrümmungsradien in Abhängigkeit von der Radialkoordinate (3.3.3.4). Vergleich mit Versuchsergebnissen. (Klemmstempel).



3.3.3.4 Überlegungen zur Geometrie des Meridians

Rotationsflächen werden vollständig durch ihre Meridiankurve bestimmt. Mit den Bezeichnungen des Bildes 179 gelten die folgenden Beziehungen:

$$ds = R_1 d\alpha \quad (40)$$

$$dz = R_1 \sin \alpha d\alpha \quad (41)$$

$$dr = R_1 \cos \alpha d\alpha \quad (42)$$

$$r = R_2 \sin \alpha \quad (43)$$

$$\text{Mit } R_1 = R_2 \cdot g(\alpha) \quad (44)$$

folgen aus (41) bis (43) die Differentialgleichungen

$$\frac{dr}{d\alpha} = g(\alpha) \operatorname{ctg} \alpha d\alpha \quad (45)$$

$$\frac{dz}{d\alpha} = r(\alpha) d\alpha \quad (46)$$

Durch Integration der Gleichungen (45) und (46) erhält man eine Parameterdarstellung des Meridians [195]:

$$r(\alpha) = C_1 \exp \int g(\alpha) \operatorname{ctg} \alpha d\alpha \quad (47)$$

$$z(\alpha) = \int r(\alpha) g(\alpha) d\alpha + C_2 \quad (48)$$

Bei Beschreibung des Meridians in expliziter Form lautet die zu (47) und (48) äquivalente Differentialgleichung

$$r \cdot r'' + \frac{R_1}{R_2} (1 + r'^2) = 0 \quad (49)$$

Zur Lösung der Gleichung (49) siehe [198].

Bei bekanntem Verhältnis der Hauptnormalkrümmungsradien $R_1/R_2 = g(\alpha)$ kann die Schar der Lösungskurven nach (47) und (48) berechnet werden. Für $g(\alpha) = \text{const}$ und einige andere Verläufe des Verhältnisses R_1/R_2 sind Lösungen in [194] und [196] angegeben.

Die bei der Anwendung der Methode des formgebenden Lastfalles entstehenden Rotationsformen können als Lösungen der Gleichungen (47) und (48) leicht ermittelt werden, wenn die Funktion $g(\alpha)$ bekannt ist. Mit den Erfahrungen der experimentellen und rechnerischen Untersuchungen (Abschnitte 3.2.3 und 3.3.3) kann $g(\alpha)$ mehr oder weniger genau angegeben werden. Über die Gleichungen (36) und (37) sind die Verhältnisse der Krümmungsradien an die Verhältnisse der Hauptnormalkräfte und jene über die Gleichungen (17) an die Hauptformänderungen gekoppelt.

Man kann nun z. B. aus dem Verhältnis der Formänderungen, das zumindest in den Randpunkten, $r = r_k$ und $r = r_0$, bekannt ist, dessen Verlauf über den Bereich $r_k \leq r \leq r_0$ schätzen und daraus den Verlauf des Verhältnisses der Krümmungen ermitteln.

Für den Klemmstempel (siehe Bild 147) kann in guter Näherung $\varphi_2/\varphi_1 = 0$ gesetzt werden. Daraus folgen $n_2/n_1 = 0,5$, $R_2/R_1 = -0,5$ bzw. $R_1/R_2 = -2$. Die Meridiankurve ist in diesem Falle eine quadratische Funktion [194],[197]:

$$r = \frac{C}{4} z^2 + \frac{CD}{2} z + \frac{CD^2}{4} + \frac{1}{C} \quad (50)$$

Mit Festlegen der Randbedingungen können die Integrationskonstanten C und D berechnet werden. Ein Vergleich der nach (50) rechnerisch ermittelten Meridiankurve mit derjenigen des Rechenmodells in Abschnitt 3.3.3.2 und experimentell gefundenen zeigt eine sehr gute Übereinstimmung (Bild 147).

Für beliebige Verläufe der Funktion $g(\alpha)$, die ein geschlossenes Integrieren der Gleichungen (47) und (48) bzw. (50) nicht zulassen, können numerische Integrationsmethoden zum Ziel führen. Zur Untersuchung einiger konkreter Fälle wurde ein anschauliches Lösungsverfahren bevorzugt. Es basiert auf dem Grundgedanken des Bildes 171. Da im Gegensatz zu dem Vorgehen in Abschnitt 3.3.3.2 Kreisbogenstücke mit fester Länge zur Approximation des Meridians verwendet werden können, gestaltet sich die Rechnung wesentlich einfacher.

In den Bildern 180 und 181 sind Meridiankurven für hyperbolische und lineare $g(\alpha)$ -Verläufe eingetragen. Man sieht, daß die sich im Versuch einstellende Meridianform gut annähern läßt.

3.3.4 Ergebnisse nach dem Differenzenverfahren und der Methode der finiten Elemente

Das Konzept des formgebenden Lastfalles wurde in erfreulicher Weise als Studienobjekt für hochentwickelte Rechenverfahren aufgegriffen [131]-[135], [153]. Aus der Vielzahl der Ergebnisse seien die folgenden herausgegriffen:

Die Formgebung einer im Grundriß quadratischen Membran (Bilder 108 und 109) durch eine Druckdifferenz Δp wird in [131] nach dem Differenzenverfahren (Bild 182) und in [135] nach der Methode der finiten Elemente (Bild 196) behandelt.

Das im Grundriß kreisförmige Membrankissen von 5m Durchmesser nach den Bildern 61-65 ist Gegenstand der Untersuchungen in [253] und [254]. In den Bildern 183-188 wird ein dynamischer Lastfall, ein Druckstoß $p(t)$, mit seinen Auswirkungen auf die Lagerreaktionen und die entstehende Form im Vergleich zu dem quasi statischen Lastfall mit gleichem Maximaldruck dargestellt. Es zeigt sich, daß der Druckring in beiden Fällen gleich großen Radialkräften ausgesetzt ist und daß die bei der dynamischen Last entstehende Form erheblich von der quasi statisch erzeugten abweicht. Der dynamisch erzielte Stich ist fast doppelt so groß. Der Verlauf der Hauptspannungen und der Vergleichsdehnung für das gleiche statische System ist in den Bildern 192 und 193 für eine Vielzahl von Laststufen abgebildet [135].

Der Stempelversuch mit dem Klemmstempel nach 3.2.3.2 wird in [135] und [153] behandelt. Der gerechnete P-f-Verlauf stimmt gut mit den Versuchswerten überein (Bild 176, Kurve d, [135] und Bild 189, [153]). Bild 189 macht deutlich, wie stark ein Rechenergebnis nach der Methode der finiten Elemente von der Wahl der Fließkurve abhängt. Die Kurvenschar mit der größten Abweichung vom experimentell ermittelten P-f-Verlauf (links im Bild) basiert auf der wenig realistischen Annahme einer konstanten Fließspannung von 1045 N/mm^2 .

Die Ausbreitung der plastischen Zone nach [153] ist in Bild 190 wiedergegeben. Sie reicht selbst bei großen Stempelwegen f nicht bis zum Außenrand r_0 . Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu den Versuchsergebnissen und zu der Darstellung der Spannungs- und Dehnungsverläufe für eine große Zahl von Laststufen nach [135] (Bilder 194-195).

Repräsentativ für die rechnerischen Untersuchungen zur Formgebung der Sattelfläche mit je zwei Hoch- und Tiefpunkten nach 3.2.3.3 stehe das Bild 191 aus [153]. Es zeigt die Ausbreitung der plastischen Zone im Verlauf der Formgebung. Entsprechend den experimentellen Erfahrungen ist die stärkste Beanspruchung im Randbereich $A' - B'$. Die entstehende Membranform entspricht im Rahmen der Zeichengenauigkeit den Ergebnissen nach Bild 154. Die Ausarbeitung [153] hat ergeben, daß sich bei verschiedener Formulierung der Spannungs-/Dehnungsbeziehungen (Hill und Lee) und unterschiedlicher Diskretisierung stets die gleiche Membranform einstellt. Dies mag ein Hinweis dafür sein, daß die Aufgabenstellung kinematisch bestimmt ist.

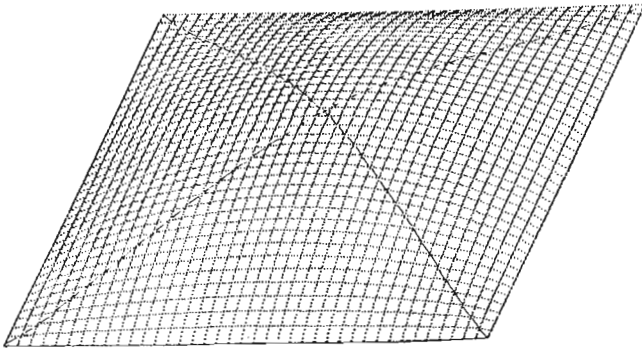
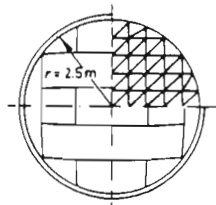
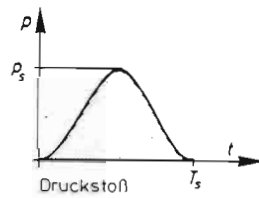
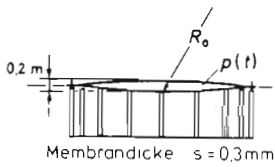


Bild 182

Ergebnis der Berechnung des formgebenden Lastfalles für eine im Grundriß quadratische Membran unter Innendruck nach [131].



Abmessungen und Diskretisierung

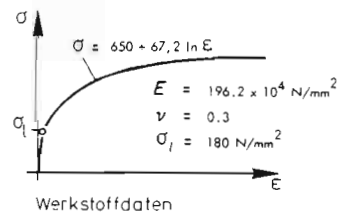


Bild 183

Rechnerische Studie zur dynamischen Formgebung des Membrankissens, Bilder 61-65, [78] nach [253], [254].

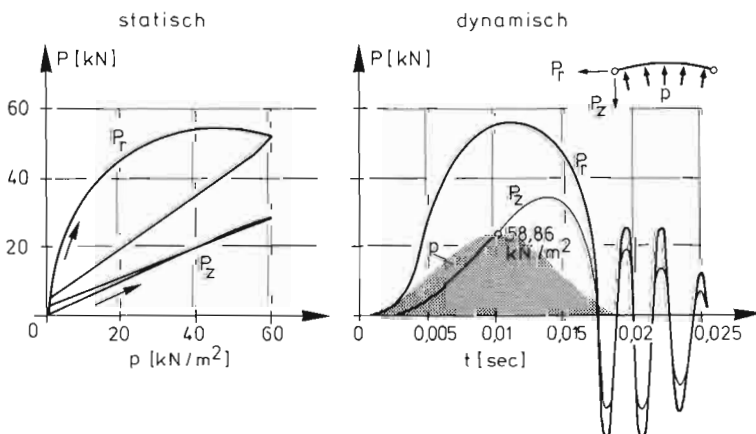


Bild 184

Lagerreaktionen bei statischer und dynamischer Formgebung [253], [254].

Bild 185

Einfluß der Werkstoffzähigkeit auf die Verschiebung w_A [253],[254].

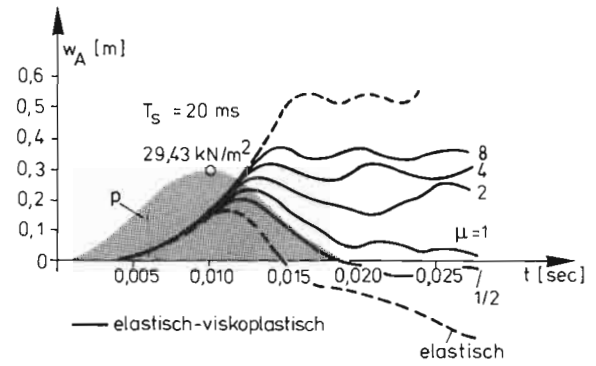


Bild 186

Verschiebung w_A dynamisch und statisch [253],[254].

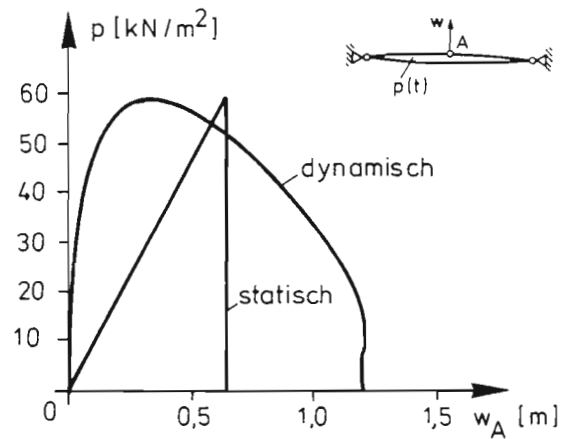


Bild 187

Statisch und dynamisch erzielte Membranformen [253],[254].

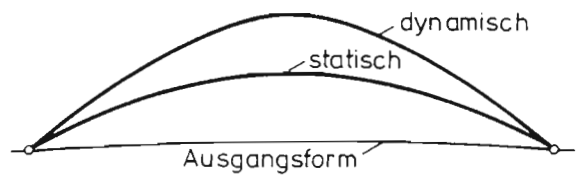
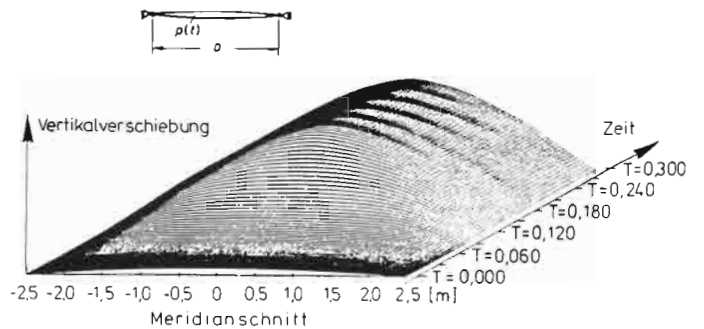


Bild 188

Veränderung der Meridianform mit der Zeit bei dynamischer Formgebung [254]



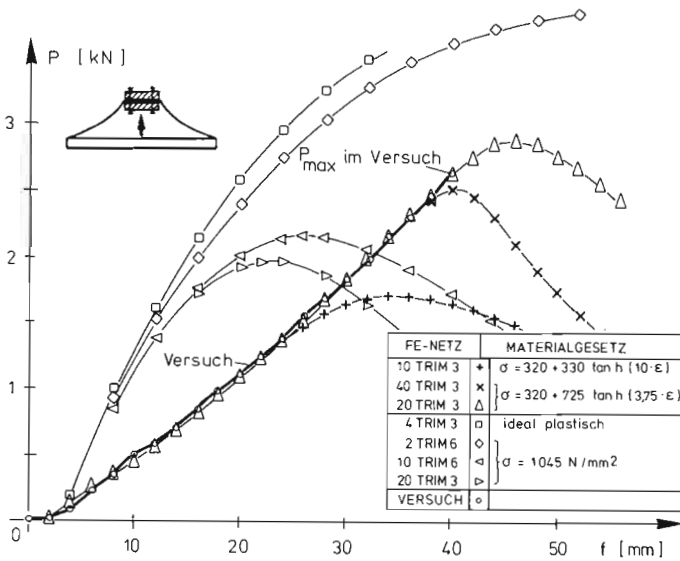


Bild 189

Abhängigkeit des Stempelweges f von der Stempelkraft P beim Klemmstempel nach FEM-Berechnungen [153]. Einfluß der Elementart, Elementanzahl und der Fließkurve.

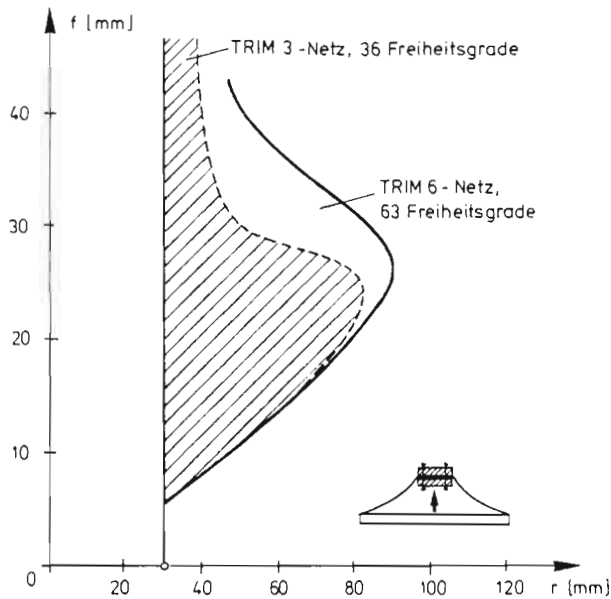


Bild 190

Ausbreitung der plastischen Zone beim Stempelversuch (Klemmstempel nach 3.3.3.2). Rechenergebnis nach [153].

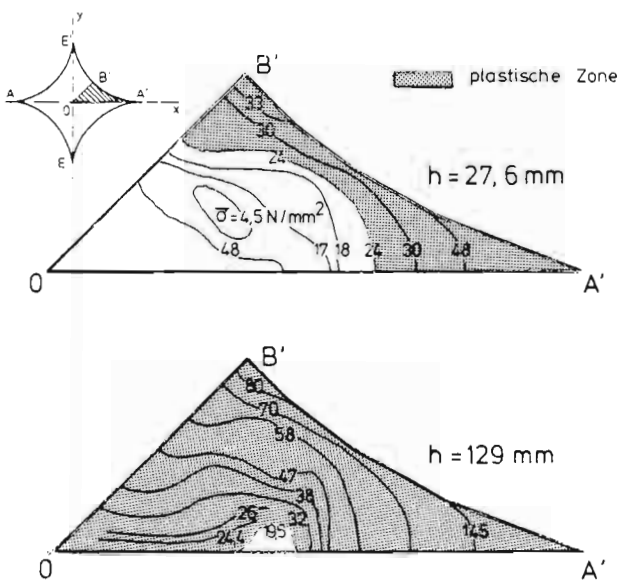


Bild 191

Ausbreitung der plastischen Zone beim formgebenden Aufspannen der Metallmembran nach 3.2.3.3. Rechenergebnis nach [153].

Bild 192

Rechnerisch ermittelter Verlauf der Membranspannungen des Modelltragwerkes, Bilder 61-65, für verschiedene Stufen der Formgebung [135].

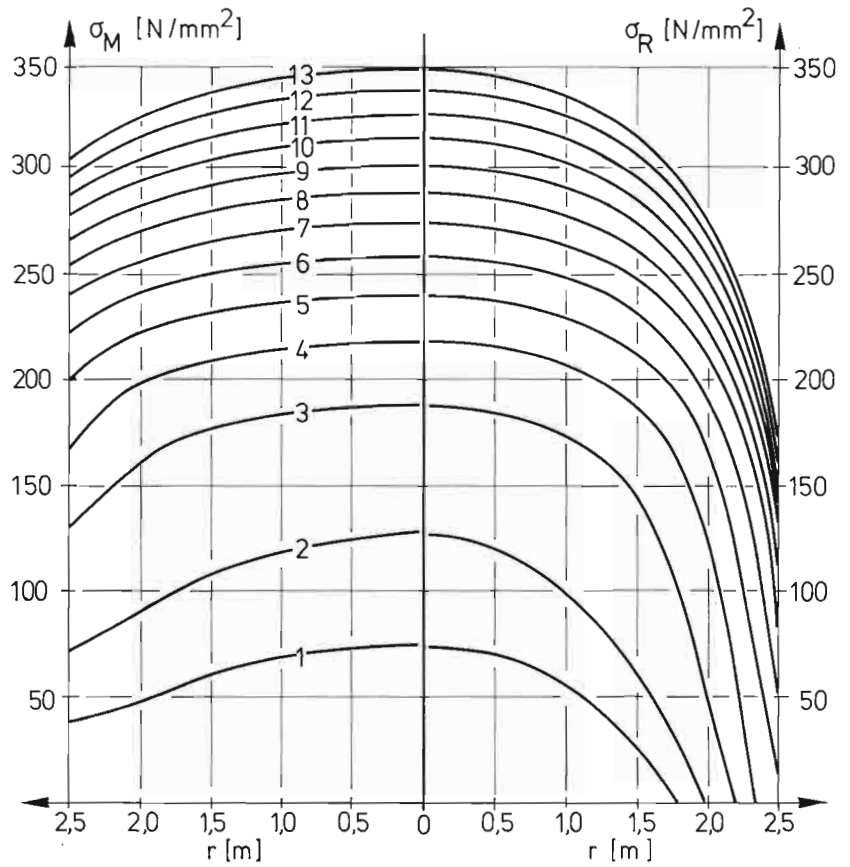
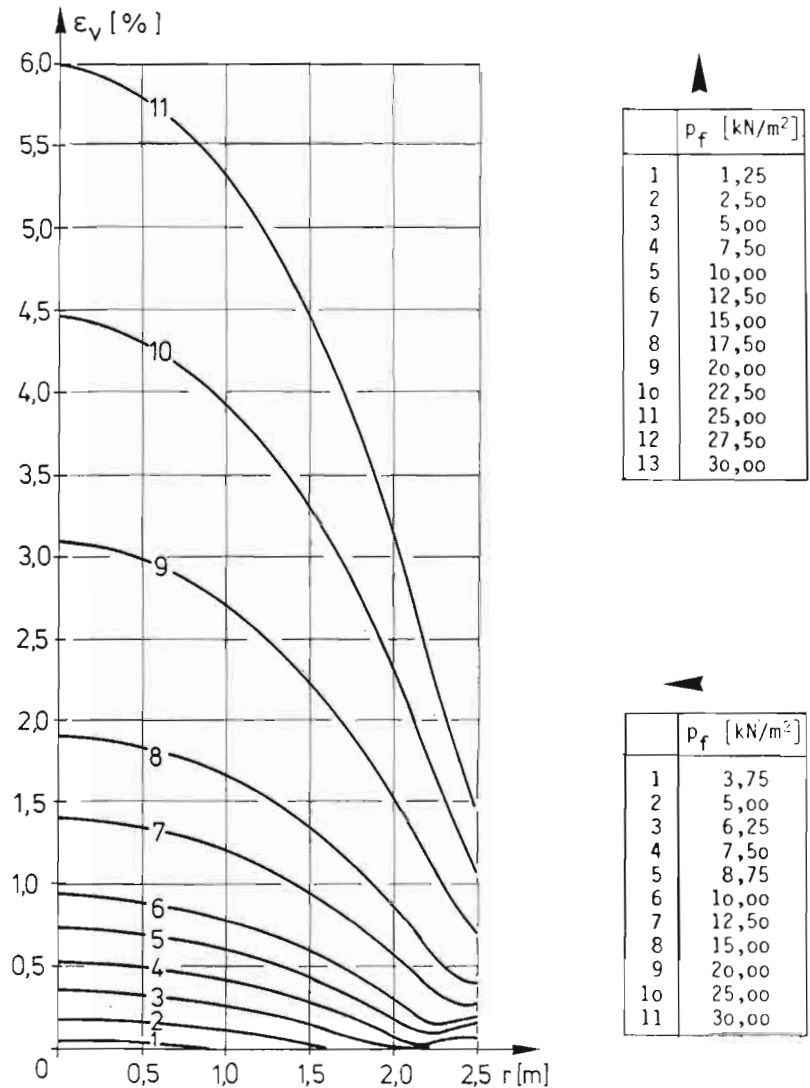


Bild 193

Rechnerisch ermittelter Verlauf der Vergleichsdehnungen des Modelltragwerkes, Bilder 61-65, für verschiedene Stufen der Formgebung [135].



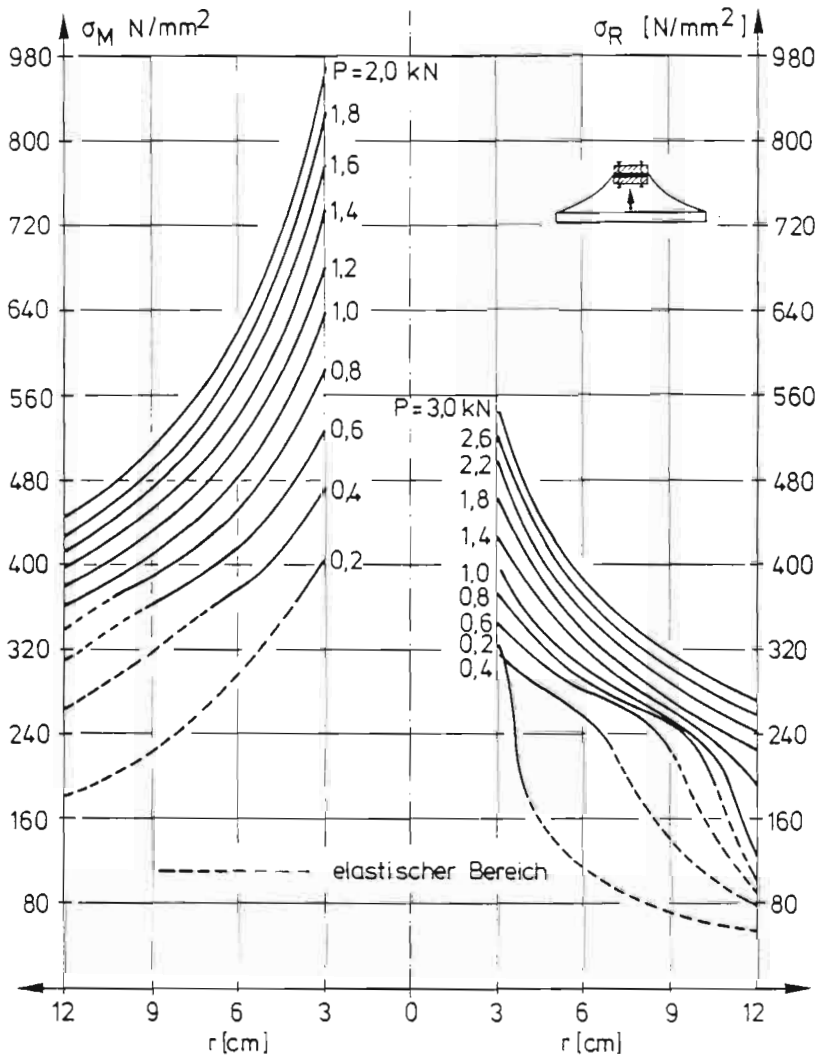


Bild 194

Rechnerisch ermittelter Verlauf der Membranspannungen beim Klemmstempelversuch nach 3.2.3.2 für verschiedene Stufen der Formgebung [135].

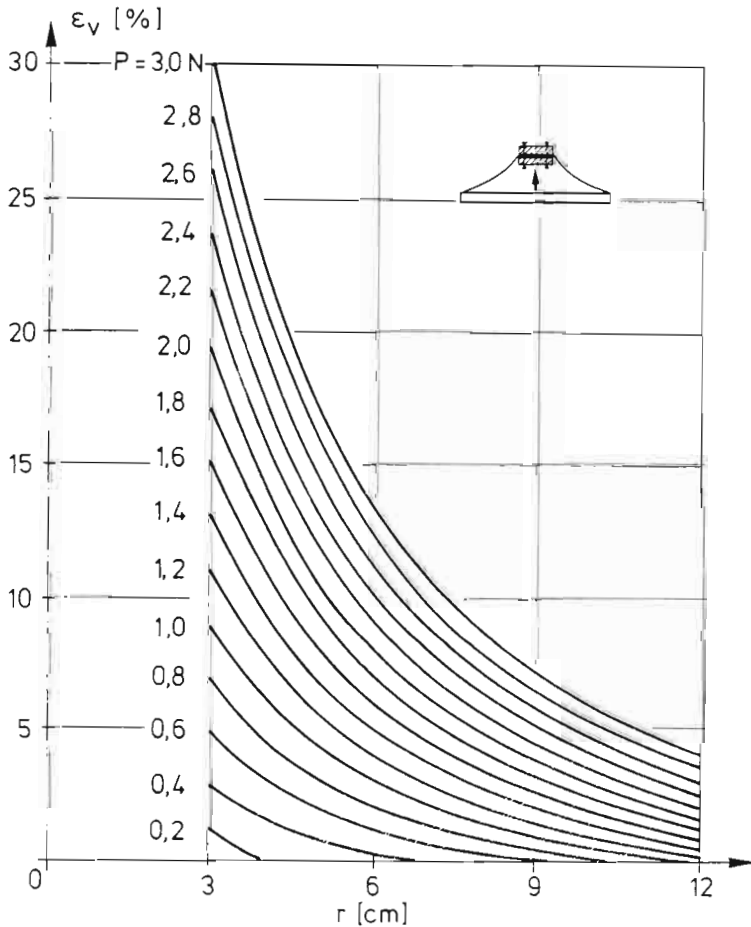


Bild 195

Rechnerisch ermittelter Verlauf der Membrandehnungen (Vergleichsdehnungen) beim Klemmstempelversuch nach 3.2.3.2 für verschiedene Stufen der Formgebung [135].

Bild 196

Stadien der Formgebung für eine ursprünglich quadratische Membran unter Innendruck. Rechenergebnis nach [135], (vergleiche Bilder 108-109). $s = 0,5\text{mm}$.

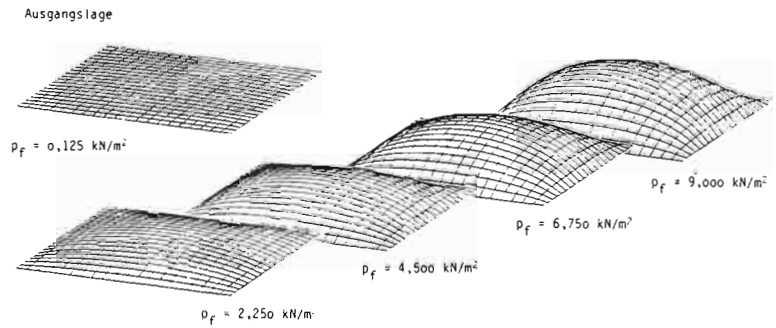


Bild 197

Stadien der Formgebung für eine ursprünglich kegelförmige Membran unter Innendruck. Rechenergebnis nach [135], (vergleiche Bilder 114-116). $s = 0,2\text{mm}$.

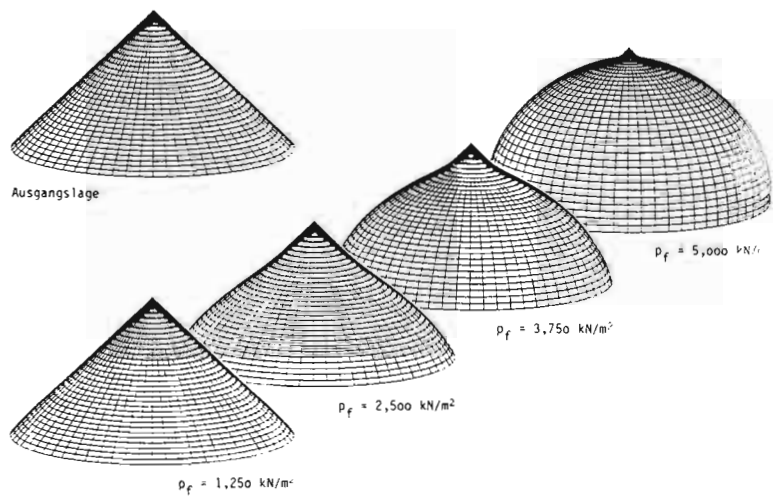
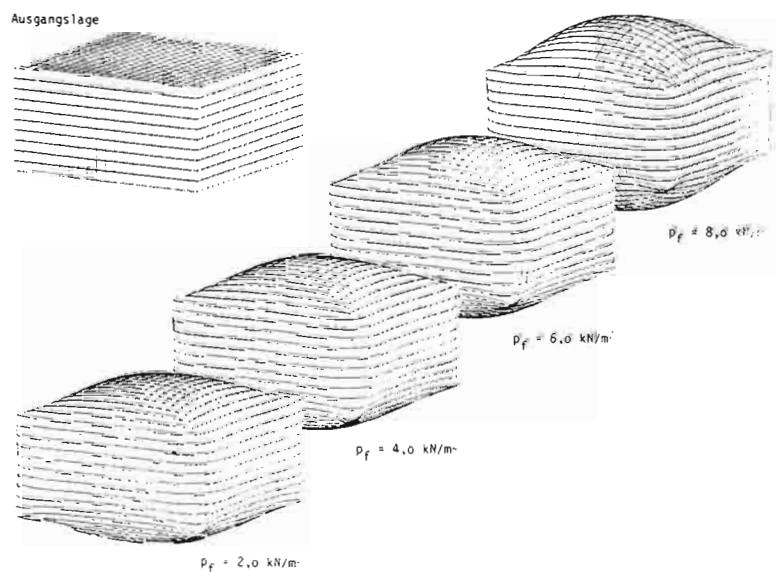


Bild 198

Stadien der Formgebung für eine ursprünglich quaderförmige Membran unter Innendruck. Rechenergebnis nach [135], (vergleiche Bilder 117). $s = 0,5\text{mm}$.



4. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden diejenigen ausschließlich auf Zug beanspruchten Membranschalen aus dünnem Blech ($s = 0,3\text{mm}$ bis etwa 3mm) behandelt, die als Abkömmlinge der Zelte und Ballone betrachtet werden können. Sie vereinigen die Vorteile der metallischen Baustoffe mit den Besonderheiten der Membranbauten.

Die vollständige Sammlung von Projekten, Versuchsbauten und Hauptausführungen zugbeanspruchter Membranschalen aus Blech zeigt einerseits, wie groß das Spektrum sinnvoller Anwendungen ist, und macht andererseits deutlich, daß das Metall-Membrantragwerk erst am Anfang seiner Entwicklung steht.

Die hauptsächlichsten Hemmnisse in der bisherigen Entwicklung bestehen in fertigungstechnischen Problemen, die die Verwendung von Blech mit sich bringt. Diese Probleme und die bekannten Herstellungsmethoden werden ausführlich erläutert. Ausgehend von der Erkenntnis, daß die gravierenden Probleme der Formgebung besonders elegant durch das Nutzen der plastischen Verformbarkeit des metallischen Membranbaustoffes gelöst werden können, wird die Baumethode des „formgebenden Lastfalles“ herausgearbeitet und propagiert.

Der Grundgedanke dieser Methode, der für den Fall der flachen Kugelkalotte bekannt war, besteht darin, die gewünschte Membranflächenform durch Umformen aus einer einfachen, meist ebenen Flächenform zu erzeugen. Er wurde hauptsächlich auf der Grundlage von Versuchen zu einem tragfähigen, erweiterten Konzept ausgebaut.

Zur Verifizierung der Idee des formgebenden Lastfalles im kleinen wurde eine Modelltechnik entwickelt, die alle erforderlichen herstellungs- und meßtechnischen Elemente für Versuche mit Metallfolien-Modellen enthält. Zahlreiche Modellstudien deuten auf eine große Vielfalt realisierbarer Tragwerksformen hin.

Eine Analyse der Vorgänge bei der Formgebung wird sowohl anhand von Meßmodellen als auch mit Hilfe vergleichender rechnerischer Untersuchungen durchgeführt. Für letztere wurde nach Klärung des theoretischen Hintergrundes ein Rechenmodell für den rotations-symmetrischen Fall abgeleitet. Dieses gestattet die iterative Ermittlung von Dehnungen, Spannungen und Meridiankoordinaten in Abhängigkeit vom Werkstoff und den formgebenden Lasten.

Ein Hauptziel der Arbeit besteht darin, dem Metall-Membrantragwerk durch eine zusammenfassende Darstellung aus seinem Schattendasein zu verhelfen. Ein anderes wird darin gesehen, durch den ausgearbeiteten Vorschlag für eine Baumethode eine bautechnisch sinnvolle Weiterentwicklung anzuregen. Dabei wurden grundlegende, vor allem im Hinblick auf die Machbarkeit wichtige Fragen geklärt. Zweifellos verbleibende Lücken weniger grundsätzlicher Art sind im Zuge zukünftiger Realisierungen zu schließen.

Summary

The present study deals with membrane shells subjected exclusively to tensile stresses and constructed of thin sheet metal (with a thickness of 0.3mm to approx. 3mm); such membranes may be regarded as descendants of tents and balloons. They combine the advantages of metallic construction materials with the special features of membrane constructions.

A complete inventory of projects, experimental constructions and major projects already implemented employing sheet metal membranes under tensile stress shows on the one hand how extensive the range of worthwhile applications is, and makes it evident on the other that the metal membrane as a loadbearing structure is still only at the beginning of its development.

The main obstacles to its development thus far have been manufacturing problems associated with the use of sheet metal. These problems are discussed in detail, as are known methods of production. Proceeding from the realization that the serious problems of shaping can be solved especially elegantly by exploiting the plastic deformability of the sheet metal, the construction method of their “shaping load case” is elaborated upon and submitted for acceptance as a standard concept.

The basic idea of this method which was known and applied in the case of the shallow spherical dome, lies in the reshaping of a simple, basically flat surface into the desired membranal shape. It was expanded to a sound and broadened concept mainly on the basis of experiments.

For verification of the idea of the shaping load case on a small scale a modeling technique was developed which contains all the necessary production and measuring elements for experiments with sheet metal models. Numerous model studies indicate that a wide variety of loadbearing forms of different shapes are feasible.

The shaping procedures are studied both on the basis of measurement models as well as with the aid of comparative computer analysis. For the latter - after clarification of the theoretical background - a model for the calculation of axially symmetric configurations was derived. This allows the iterative determination of stretching, tension, and meridional coordinates as functions both of the materials and of the shaping loads.

One main objective of the study is to help legitimize the metal membrane as a loadbearing structure by giving it a comprehensive portrayal. Another is to stimulate further development of a construction method in a manner relevant to construction engineering by elaborating the arguments for it. Some fundamental questions have been clarified in the process, especially with regard to practicability. Gaps of a less fundamental nature doubtless remain to be closed by future work.

5. Literaturverzeichnis

- [1] Leonhardt, F.; Schlaich, J.: Vorgespannte Seilnetzkonstruktionen. Das Olympiadach in München. Mitteilungen des Sonderforschungsbereiches 64, Nr. 19/1973. Siehe auch: Der Stahlbau, 42. Jg., S. 51-59, S. 80-86, S. 107-115, S. 176-185, 1973.
- [2] Schlaich, J.; Mayr, G.: Naturzugkühlturm mit vorgespanntem Membranmantel. Der Bauingenieur, 49. Jg., S. 41-51, 1974.
- [3] Schlaich, J.; Mayr, G.; Weber, P.; Jasch, E.: Der Seilnetzkühlturm Schmehausen. Der Bauingenieur, 51. Jg., S. 401-412, 1976.
- [4] IL 5: Wandelbare Dächer. Mitteilungen des Instituts für leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart, 1972.
- [5] IL 16: Zelte. Mitteilungen des Instituts für leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart, 1976.
- [6] Esquilan, N.; Saillard, Y.: Hanging Roofs. Proceedings of the IASS Colloquium on Hanging Roofs, Continuous Metallic Shell Roofs and Superficial Lattice Roofs. Paris, 9.-11. Juli, 1962. North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1963.
- [7] Proceedings of the 1st International Colloquium on Pneumatic Structures. IASS, University of Stuttgart, 11.-12. Mai, 1967.
- [8] Proceedings of the Pacific Symposium Part II on Tension Structures and Space Frames. IASS, Tokyo und Kyoto, 17.-23. Oct. 1971.
- [9] Weitgespannte Flächentragwerke. Internationales Symposium, Universität Stuttgart, Sonderforschungsbereich 64, 1976.
- [10] Bubner, E.; Baier, B.; Koenen, R.; Oelbermann, J. (Hrsg.). Minimalkonstruktionen. Syposium, Universität Essen Gesamthochschule, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln-Braunsfeld, 1977
- [11] Weitgespannte Flächentragwerke. 2. Internationales Symposium, Universität Stuttgart, Sonderforschungsbereich 64, 1979.
- [12] Dent, R.N.: Principles of Pneumatic Architecture. London, 1971.
- [13] Price, C.; Newby, F.; Swan, R.H.; Samuely, F.J.: Air Structures. A Survey. Her Majesty's Stationary Office, London, 1971.
- [14] Proceedings of the International Symposium on Pneumatic Structures, IASS, Delft 1972.
- [15] Herzog, T.: Pneumatische Konstruktionen. Stuttgart, 1976.
- [16] IL 9: Pneus in Natur und Technik. Mitteilungen des Instituts für leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart, 1976.
- [17] IL 12: Wandelbare Pneus. Mitteilungen des Instituts für leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart, 1975.
- [18] IL 15: Lufthallenhandbuch. 2. Voraufgabe. Mitteilungen des Instituts für leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart, 1976.
- [19] International Symposium on Air Supported Structures. CIB-IASS, Venedig, 13.-18. Juni 1977.
- [20] Ishii, K.; Nishikawa, K.: Modular Membrane Panel Method for Pneumatic Structures. IASS-World Congress on Shell and Spatial Structures, S. 6.269-6.283, Madrid, 1979.
- [21] Literature Survey «Pneumatic Structures». IASS, Secretary of Pneumatic Structures Working Group, Juni 1977.
- [22] Literature Survey of «Pneumatic Structures». IASS, Secretary of Pneumatic Structures Working Group, Supplement No. 1, Aug. 1977.
- [23] Otto, F.; Trostel, R.: Zugbeanspruchte Konstruktionen, Band 1. Ullstein Fachverlag, Berlin, 1962.
- [24] Otto, F.; Schleyer, F.-K.: Zugbeanspruchte Konstruktionen, Band 2, Ullstein Fachverlag, Berlin, 1966.
- [25] Fiřt, V.: Statika a Dynamika Přetlakových Membránových Konstrukcí. Prag, 1976.
- [26] Klages, F.: Aufbau und Eigenschaften der Materie im Mikro- und Makrokosmos. Sammlung Göschen, Berlin, 1979.
- [27] Eggert, H.; Kanning, W.: Feinbleche aus Stahl für Geschoßdecken. Der Bauingenieur, 54. Jg., S. 249-253, 1979.
- [28] Eggert, H.; Kanning, W.: Feinbleche aus Stahl für ebene Dächer. Der Bauingenieur, 54. Jg., S. 165-175, 1979.
- [29] Jungbluth, O.: Sandwich-Flächentragwerke im Stahlbau. Internationale Vereinigung für Brückenbau und Hochbau, achter Kongreß, Beiträge zur vorbereitenden Diskussion. New York, 9.-14. Sept. 1968.
- [30] Fruitet, L.: Thin Self-Supporting Metallic Roofs, Folded or Vaulted. IASS Symposium on Folded Plates and Prismatic Structures, Vol. 2, Session IV, Wien, Sept.-Okt. 1970.

- [31] Egger, H.; Fischer, M.; Resinger, F.: Hyparschalen aus Profilblechen. Der Stahlbau, 40. Jg., Heft 12, S. 353-361, Berlin, Dez. 1971.
- [32] Bandel, H.: Will Metal Skins Replace Cable Suspended Roofs? Internationale Vereinigung für Brückenbau und Hochbau, neunter Kongreß, S. 339-342, Amsterdam, 1972.
- [33] Gaiser, H.; Greiner S.: Unveröffentlichte Arbeitsunterlagen zum Teilprojekt „Schweißtechnik für Metallmembranen“, Gruppen A4 und E im Sonderforschungsbereich 64, Stuttgart, 1982.
- [34] Graefe, R.: Schinkels Blechzelte und ein Nachfolger in Detmold. Bauwelt, Heft 10, S. 333-336, 1982.
- [35] Lübbecke, N.; Hartmann, B.; Beyer, R.: Numerische Ermittlung und Abwicklung von Biegeflächen. Bänder Bleche Rohre, H. 1, S. 22-26, 1978.
- [36] Kienzle, O.: Erzeugung räumlicher Blechgebilde mittels Flächenbiegung. Berichte aus dem Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, Nr. 17/18, Herausgeber K. Lange, Stuttgart, 1970.
- [37] Kienzle, O.: Konstruktion, Abwicklung und Herstellung von Schraubtorsen aus Blech. Berichte aus dem Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, Nr. 17/18, Herausgeber K. Lange, Stuttgart, 1970.
- [38] Finsterwalder, S.: Mechanische Beziehungen bei der Flächen-Deformation. Jahresbericht der deutschen Mathematiker-Vereinigung, S. 45-99, 1899.
- [39] Guerra, G.: Systematic Design of Pneumatic Structures. In [7], S. 118-127.
- [40] Kawaguchi, M.: The Shallowest Possible Pneumatic Forms. IASS-Bulletin Nr. 63, S. 3-11, April 1977.
- [41] Immense Copper Balloon. The Illustrated London News, S. 193-194, London, 30. 3. 1844.
- [42] Fritsche, C.B.: The Metalclad Airship. Mechanical Engineering, Vol. 51, No. 12, S. 905-911, 1929.
- [43] Clarke, B.: The History of Airships. S. 146, London, 1961.
- [44] Dürbeck, A.: Zeltförmiges Dach aus Stahlblech. Der Stahlbau, 6. Jg., Heft 19, S. 152, Berlin, 1933.
- [45] Laffaille, B.: Anwendung von Schalen im Stahlbau. Internationale Vereinigung für Brückenbau und Hochbau, zweiter Kongreß, Vorbericht, S. 1057-1085, Berlin/München, 1.-11. Okt. 1936
- [46] Stevens, H.H.: Air-Supported Roofs for Factories. Architectural Record, S. 45-46, Dez. 1942.
- [47] Bromberg, E.; Stoker, J.J.: Non-Linear Theory of Curved Elastic Sheets. Quarterly of Applied Mathematics, Vol. III, S. 246-265, 1945.
- [48] Stoker, J.J.: Some Observations on Continuum Mechanics with Emphasis on Elasticity. Siehe Fußnote S. 272, The Thirty-Fourth J. W. Gibbs Lecture, American Mathematical Society, 1961.
- [49] Zehrfuss, B. H.; Mailly, J.de; Camelot, R.: Centre des Industries Mécaniques à Paris. l'architecture d'aujourd'hui, Okt. 1951.
- [50] Otto, F.: Das hängende Dach, ein neues Gestaltungsmittel. Bauwelt, Heft 40, S. 635-638, 1952.
- [51] Umbrella Building. Architectural Forum, Heft 1, S. 150-152, 1953.
- [52] Otto, F.: Das hängende Dach. Gestalt und Struktur. Bauwelt-Verlag, Berlin, 1954.
- [53] Ludkovsky, I.G.: On the Choice of the Optimum Types of Suspended Roofs and of Their Bearing Contours. Hanging Roofs, Proceedings IASS Coll. on Hanging Roofs, Continuous Metallic Shell Roofs and Superficial Lattice Roofs, S. 176-189, Paris, 1962.
- [54] Makowski, Z.S.: Räumliche Tragwerke aus Stahl. Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1963.
- [55] Beer, H.: Rundhalle mit Hängekegeldach. Der Stahlbau, Heft 1, S. 1-10, Berlin, Jan. 1963.
- [56] Beer, H.: Einige neue Gesichtspunkte für den Entwurf und die Berechnung von Stahlbauten. Stahlkongreß Luxemburg, S. 537-561, 28.-30. Okt. 1964.
- [57] Rabinovič, I.M.: Hängedächer. Bauverlag, Wiesbaden, 1966.
- [58] Rawlings, B.: Inflated Ductile Metal Structures. Architectural Science Review, Vol. 10, No. 2, S. 44-48, 1967.
- [59] Moore, C.J.; Rawlings, B.: Inflated Metal Structures - Some Small and Large Scale Tests. Proc. International Symposium on Pneumatic Structures, Vol. 2, S. JMR1-JMR16, Delft, 1972.
- [60] Ludkovsky, I.G.; Ivanov, M.A.; Usachev, T.A.: Thin Sheet Membranes as Hanging Roofs. In [8], S. 441-448.
- [61] Siev, A.; Kuentz, A.C.: Air Inflated, Stainless Steel Membrane Roof. In [8], S. 483-491.
- [62] Nickel Stainless Steel Membrane Structures. The International Nickel Company of Canada Limited, S. 1-23. (Firmenschrift, ohne Datum) Toronto.

- [63] Stainless Steels. Atlas Steels Company. Technical Data. S. 1-4 (Firmenschrift, ohne Datum).
- [64] Guyon, Y.; Mesnager, J.: Constuction de hangars d'aviation métalliques à toiture autoportante de 70 mètres d'ouverture. Annales de l'Institut technique du bâtiment et de travaux publics, 1. Jg. Heft 3, S. 22-23, Mai 1936.
- [65] Schröter, H.-J.: Die Olympische Basketballhalle in München mit Kegelschalenhängedach. Der Stahlbau, S. 249-250, Aug. 1972.
- [66] Vorgespannte Metallbänder aus Rollenmaterial für untergehängte Decken in Produktionsbauten. Bauplanung - Bautechnik, 27. Jg., Heft 5, VEB Verlag für das Bauwesen, S. 225, Berlin, Mai 1973.
- [67] Rabold, K.: Dach- und Wandkonstruktionen aus gerollten Aluminiumbändern in der UdSSR. Bauplanung - Bautechnik, 27. Jg., Heft 8, S. 376-379, Berlin, Aug. 1973.
- [68] Baumann, R.; Genenger, H.G.; Kozel, M.; Winter, W.: Verwendung von Blechen bei zugbeanspruchten Konstruktionen. Institut für Baukonstruktion, Universität Stuttgart, Studienarbeit SS 1973, WS 1973/74, Betreuer G. Minke.
- [69] Sinoski, D.A.: Membrane Roof Structure. Canadian Patent No. 947025, Mai 1974.
- [70] Meniskus-Steel Membrane Roof Structures. Firmenprospekt, Sinoski Engineering Limited, Okt. 1974.
- [71] Ludkovsky, I.G.; Ivanov, M.A.; Usachev, T.A.: Thin Sheet Membrane Hanging Roofs. Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (unveröffentlichtes Manuskript), Moskau, 1975.
- [72] Lipták, L.: Weitgespannte, auf Zug beanspruchte Metallschale über rechteckigem Grundriss (unveröffentlichtes Manuskript). Budapest, Juni 1975.
- [73] Lipták, L.: Weitgespannte, auf Zug beanspruchte Metallschale über rechteckigem Grundriss (unveröffentlichtes Manuskript). Budapest, Apr. 1976.
- [74] Trovimow, V.I.: Spatial Rod and Sheet Metal Coverings for Large-Span Buildings. IASS Bulletin No. 66, S. 21-28, s. a. IASS World Congress on Space Enclosures, Concordia University Montreal, Building Research Center, S. 833-839, 1976.
- [75] Popovsky, B.V.: Research and Experience in the Construction of High Capacity Rolled - Structure Steel Tanks in the USSR by Industrial Methods. IASS World Congress on Space Enclosures, S. 1029-1034, Montreal, 1976.
- [76] Greiner, S.: Zum Bau von Membrantragwerken aus dünnen Blechen. Arbeitsunterlagen zum int. Symposium «Weitgespannte Flächentragwerke», Universität Stuttgart, Sonderforschungsbereich 64, S. 7.3-1 bis 7.3-3, 1976.
- [77] Greiner, S.: Thin Sheet Membrane Structures. In [19], Annexe 1, S. 30-46.
- [78] Schlaich, J.; Greiner, S.: Vorgespannte Flächentragwerke aus Metallmembranen. Der Bauingenieur, 53. Jg., S. 77-87, 1978.
- [79] Greiner, S.; Schlaich, J.: Die Nutzung der plastischen Verformbarkeit von Metallen beim Bauen zugbeanspruchter Flächentragwerke. Vorbericht zum 2. Internationalen Symposium «Weitgespannte Flächentragwerke», S. 5.3-1 bis 5.3-10, Stuttgart, 14.-18. Mai 1979.
- [80] Neste A.J. van.: Bijzondere tankbouw. Bouwen met staal, S. 40-48, Okt. 1976.
- [81] International Conference on Lightweight Shell and Space Structures des IASS, Alma-Ata, UdSSR, 13.-16. Sept. 1977.
- [82] Eliseyev, Y.A.; Zedgnidze, G.G.; Kurbatov, O.A.; Rynus, G.E.: Investigation, Design and Erection of Cable and Membrane Roofs in Leningrad. In [81], S.68-71.
- [83] Khaidukov, G.K.; Trofimov, V.I.; Glukhovskiy, K.A.: Lightweight Space Roof Structures in the USSR. In [81], S. 155-186.
- [84] Moskalev, N.S.; Eremeev, P.G.; Mikulin, V.B.: Large Span Hanging Cable and Stressed Skin Shells. In [81], S. 262-268.
- [85] Ludkovsky, I.G.; Braslavsky, B.M.; Ivanov, M.A.; Filyakin, A.A.: Investigation of Membranes. In [81], S. 207-211.
- [86] Koss, K.; Idelberger, K.: Stahlblech-Membrandach «Hallenstadion», Wien. acier stahl steel, Heft 4, S. 130-134, Apr. 1978.
- [87] World's First Air-Supported Stainless Steel Roof Built for Canadian University. Nickel Topics. Vol. 32, No. 2, S. 7-10, 1979.
- [88] Steel Bubble Roof is Light, Low Cost and Durable. Engineering News-Record, No. 19, S. 28-29, 1979.
- [89] Trofimov, V.I.; Sulaberidze, O.G.: Structural Specificities, Design and Studies of Hanging Coverings of Main Buildings «Olympic Games - 80». IASS-World Congress on Shell and Spatial Structures, S. 6.237-6.247, Madrid, 1979.

- [90] Dyhovichny, Y.: The Large Span Roofs of the Olympic Buildings in Moscow. IASS-World Congress on Shell and Spatial Structures, S. 6.467-6.489, Madrid, 1979.
- [91] Lipnitsky, M.E.; Gorenstein, B.V.; Yeremeyev, P.G.: Membrane Suspension Roof of 210m Diameter. IASS-World Congress on Shell and Spatial Structures, S. 6.321-6.329, Madrid, 1979.
- [92] Velut, J.: Poutres précontraintes et autocontraintes à membrure indépendante. Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics, No. 368, Jan. 1979.
- [93] Popovsky, B.V.: Principles of Industrialization in Construction of Space Metal Structures. IASS-World Congress on Shell and Spatial Structures, S. 6.125-6.136, Madrid, 1979.
- [94] Kawaguchi, M.; Abe, M.; Takeyama, Y.: Metal-Membrane Tension Structures. IASS-World Congress on Shell and Spatial Structures, S. 6.365-6.379, Madrid, 1979.
- [95] Nikkei Architecture, S. 60-63, 1979.
- [96] Greiner, S.: Pneumatisch gespanntes Metall-Membran-Dach. Bauingenieur, 55. Jg., Heft 12, S. 481-482, Berlin, Dez. 1980.
- [97] Hampe, E.: Flüssigkeitsbehälter. Band 1, Grundlagen, Berlin 1980.
- [98] Krawatschenko, J.G.; Dawydow, J.J.; Shigadlo, M.W.: Dach aus Hyperboloidschalen. Bauplanung - Bautechnik, 34. Jg., Heft 5, S. 222-223, Berlin, Mai 1980.
- [99] Firmenschrift, Schlaich und Partner, Stuttgart, Solar power plants. IEA SSPS Project, 1980.
- [100] Kawaguchi, M.: Nets and Membranes in Japan. Papier zur Sitzung der IASS Working Group on Tension Structures, Stuttgart, März 1981.
- [101] Harris, A.: Tensile Prestressing of Membranes to Increase Compressive Strength. The Structural Engineer, Vol. 59 A, No.2, S. 41-43, Feb. 1981.
- [102] Werbeschrift der Firma Sciaky über das Space Shuttle der NASA, George C. Marshall Space Flight Center. Alabama, USA (ohne Datum).
- [103] DIN 8582. Fertigungsverfahren Umformen, Einordnung, Unterteilung, Alphabetische Übersicht. April 1971.
- [104] Keller, E.: Photogrammetrische Aufnahme und Auswertung einer Doppelmembran. Diplomarbeit, Betreuer S. Greiner und W.-U. Böttinger, 1977.
- [105] Offenlegungsschriften des Deutschen Patentamtes 2740813 (vom 22. 3. 1979) und 2935341 (vom 12. 6. 1980).
- [106] Untersuchungen zum Sonnen-Kollimationssystem für Euratom C.C.R. ISPRA. Projekt E.S.T.I.. Abschlußbericht, Schlaich und Partner, Mai 1981.
- [107] Lange, K.: Benennungen und Begriffsbestimmungen in der Umformtechnik. Industrie-Anzeiger, 87. Jg., Nr. 67. S. 163-168, August 1965.
- [108] Pawelski, O.; Fangmeier, R.: Mechanisches Verhalten des Werkstoffes bei der Umformung. Mechanische Umformtechnik, in [147], S. 146-194.
- [109] Drescher, G.: Fließvergütung von Böden stählerner zylindrischer Behälter. Die Technik, 21. Jg., Heft 4, S. 251-254, S. 325-330, 1966.
- [110] Prümmer, R.: Die Explosivumformung in der Fertigung. Technische Zeitschrift für praktische Metallbearbeitung, 68. Jg., Heft 12, S. 437-440, Dez. 1974.
- [111] Korrespondenz des Autors mit Herrn Prümmer.
- [112] Stowell, M.J.; Laycock, D.B.: Metalle dehnbar wie Gummi. Bild der Wissenschaft, Heft 2, S.104-115, 1979.
- [113] Hossdorf, H.: Modellstatik. Bauverlag GmbH, Wiesbaden, 1971.
- [114] Müller, R.K.: Handbuch der Modellstatik. Springer Verlag, Berlin, 1971.
- [115] Aluminium Haushaltsfolie. Bericht der Aluminium-Zentrale e. V., Nr. 15, Beratungs- und Informationsdienst der deutschen Aluminiumindustrie, Düsseldorf.
- [116] Theocaris, P.S.: Moiré Method in Plates. Proceedings of the IASS-Symposium of Non-Classical Shell Problems, 2.-5. Sept. 1963, S. 877-908, Warschau, 2.-5. Sept. 1963.
- [117] Zandman, F.; Holister, G.S.; Brcic, V.: The Influence of Grid Geometry on Moiré Fringe Properties. Journal of Strain Analysis, Vol. 1, Nr. 1, S. 1-10, 1965.
- [118] Martin, L.P.; Ju, F.D.: The Moiré Method for Measuring Large Plane Deformations. Journal of Applied Mechanics, S. 385-391, Sept. 1969.
- [119] Takasaki, H.: Moiré Topography. Applied Optics, Vol. 9, No. 6, S. 1457-1472, Juni 1970.

- [120] Allen, J.B.; Meadows, D.M.: Removal of Unwanted Patterns from Moiré Contour Maps by Grid Translation Techniques. *Applied Optics*, Vol. 10, Nr. 1, S. 210-212, Januar 1971.
- [121] Takasaki, H.: Moiré Topography. *Applied Optics*, Vol. 12, No. 4, S. 845-850, April 1973.
- [122] Yoshino, Y.; Takasaki, H.: Doubling and Visibility Enhancement of Moiré Fringes of the Summation Type. *Applied Optics*, Vol. 15, Nr. 5, S. 1124-1126, Mai 1976.
- [123] Breyer, G.; Cabaj, A.; Keck, G.; Windischbauer, G.: Moiré-Topographie zur Bestimmung der Oberflächenstruktur von Straßen. *Straßen und Tiefbau*, 32. Jg., Heft 11, S. 15-18, Wien, 1978.
- [124] Oleiko, B.J.: Minimalflächenapproximationen mittels verfestigter Flüssigkeitslamellen. Dissertation Universität Stuttgart, 1978.
- [125] Beck, W.: Höhenlinien von Membrantragwerken durch Moiré-Technik. Diplomarbeit am Institut für Modellstatik, Universität Stuttgart, 1979.
- [126] Böttinger, W.-U.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Genauigkeit der Nahbereichsfotogrammetrie. Dissertation Universität Stuttgart, 1980.
- [127] Zorll, U.: Untersuchungen über die Anwendungsbereiche von Glanzmeßsystemen. *Farbe und Lack*, 79. Jg., Nr. 3, S. 191-201, 1973.
- [128] Zorll, U.: Möglichkeiten der Glanzbestimmung bei gekrümmten und strukturierten Oberflächen. *Bänder Bleche Rohre*, Heft 1, S. 22-26, 1975.
- [129] Lohmeyer, S.: Glanzmessung. *Metalloberfläche*, 30. Jg., Heft 12, S. 573-578, 1976.
- [130] Trostel, R.: Berechnung der Membranen. In [23], S. 170-296.
- [131] Brinkmann, G.: Zur rechnerischen Formgenerierung und Tragverhaltensbeurteilung beim Entwurf von Netz-, Membran- und Schalentragwerken. Zwischenbericht. Sonderforschungsbereich 64, Institut für Mechanik, Universität Stuttgart, 1978.
- [132] Argyris, J.H.; Doltsinis, J.St.: On the Large Strain Inelastic Analysis in Natural Formulation. Part 1: Quasistatic Problems, *Comp. Meth. Appl. Mech. Enging.*, Vol. 20, S. 213-251, Nov. 1979; Part 2: Dynamic Problems, *Comp. Meth. Appl. Mech. Enging.*, Vol. 21, S. 91-128, Jan. 1980.
- [133] Argyris, J.H.; Doltsinis, J.St.; Straub, R.; Pimenta, P.M.; Symeonidis, Sp.; Wüstenberg, H.: Recent Natural Formulations in Nonlinear Mechanics. *Fenomech'81 Conference*, Stuttgart, Aug. 1981, *Conference Proceedings and Comp. Meth. Appl. Mech. Enging.*, 30/31, 1982.
- [134] Haug, E.; Powell, G.H.: Finite Element Analysis of Nonlinear Membran Structures. In [8], S. 165-175.
- [135] Oelbermann, J.: Trag- und Verformungsverhalten plastisch geformter Metall-Membrankonstruktionen. Dissertation Universität Gesamthochschule Essen, 1982.
- [136] Ludwig, P.: *Elemente der technologischen Mechanik*. Berlin, 1909.
- [137] Hencky, H.: Zur Theorie plastischer Deformationen und der hierdurch im Material hervorgerufenen Nachspannungen. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik*, Band 4, S. 323-334, 1924.
- [138] Nadai, A.: *Der bildsame Zustand der Werkstoffe*. Springer Verlag, Berlin, 1927.
- [139] Davis, H.E.; Parker, E.R.: Behaviour of Steel under Biaxial Stress as Determined by Tests on Tubes. *Journal of Applied Mechanics*, S. 201-215, September 1948.
- [140] Nadai, A.: *Theory of Flow and Fracture of Solids*. Engineering Societies Monographs, McGraw-Hill Book Company, Second Edition, New York, 1950.
- [141] Hoffmann, O.; Sachs, G.: *Introduction to the theory of Plasticity for Engineers*. McGraw-Hill Book Company, 1953.
- [142] Hill, R.: *The Mathematical Theory of Plasticity*. Oxford, 2. Ausgabe, 1956.
- [143] Johnson, W.; Mellor, P.B.: *Plasticity for Mechanical Engineers*. London, 1962.
- [144] Reckling, K.-A.: *Plastizitätstheorie und ihre Anwendung auf Festigkeitsprobleme*. Ingenieurwissenschaftliche Bibliothek. Herausgegeben von Istvan Szabó, Springer Verlag Berlin, 1967.
- [145] Lippmann, H.; Mahrenholtz, O.: *Plastomechanik der Umformung metallischer Werkstoffe*, Band 1. Springer Verlag, Berlin, 1967.
- [146] Dietmann, H.: *Spannungszustand und Festigkeitsverhalten*. 1. Teil, Statische Beanspruchung. *Technisch wissenschaftliche Berichte der staatlichen Materialprüfungsanstalt Stuttgart*, Heft 68-04, 1968.
- [147] Kienzle, O.: *Mechanische Umformtechnik*. Springer Verlag Berlin, 1968.
- [148] Lange, K.: *Lehrbuch der Umformtechnik*. Band 1: Grundlagen, Band 2: Massivumformung, Band 3: Blechumformung. Springer Verlag Berlin, 1975.
- [149] Ismar, H.; Mahrenholtz, O.: *Technische Plastomechanik*. Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, Wiesbaden, 1979.

- [150] Greiner, S.: Zur Auswirkung der Anisotropie von Blechen auf die optischen Eigenschaften von Sonnenspiegeln. Unveröffentlichtes Gutachten, Stuttgart, 1980.
- [151] Panknin, W.; Shawki, G.S.A.: Zusammenhang zwischen Fließkurve und Werkstoffkennwerten bildsamer metallischer Werkstoffe. Zeitschrift für Metallkunde, Band 52, Heft 7, S. 455-461, 1961.
- [152] Panknin, W.: Ermittlung der Fließkurven metallischer Werkstoffe. VDI-Berichte, Nr. 87, S. 12-17, 1964.
- [153] Nguyen Duc Quan : Programme für Formgebung von Membranen. Diplomarbeit am Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktion, Universität Stuttgart, Betreuer J. St. Doltsinis.
- [154] Krause, U.: Formänderungsfestigkeit der Werkstoffe beim Kaltumformen. In: Grundlagen der bildsamen Formgebung. S. 99-145. Herausgegeben vom Verein Deutscher Eisenhüttenleute. Verlag Stahleisen m.b.H., Düsseldorf, 1966.
- [155] Mäde, W.; Oswald, J.: Bedeutung der Fließkurve für dünne Bleche. Fertigungstechnik und Betrieb, 16. Jg., Heft 6, S. 345-361, Juni 1966.
- [156] Pawelski, O.: Über das Stauchen von Hohlzylindern und seine Eignung zur Bestimmung der Formänderung dünner Bleche. Archiv für das Eisenhüttenwesen, 38. Jg., Heft 6, S. 437-442, Juni 1967.
- [157] Laska, R.: Verfestigung und Verfestigungsexponent unlegierter kohlenstoffarmer Stähle. Werkstatt und Betrieb, 104. Jg., Heft 8, S. 533-540, August 1971.
- [158] Von den Steinen, A.; Schmidt, W.: Festigkeits- und Bruchverhalten von Edelstählen. Aus: Grundlagen des Festigkeits- und Bruchverhaltens, Verlag Stahleisen m.b.H., Düsseldorf, 1974.
- [159] Stüwe, H.P.: Messung und Darstellung von Fließkurven. In: Grundlagen des Festigkeits- und Bruchverhaltens, S. 33-39, Herausgeber: W. Dahl, Verlag Stahleisen m.b.H., Düsseldorf, 1974.
- [160] Gologranc, F.: Beitrag zur Ermittlung von Fließkurven im kontinuierlichen hydraulischen Tiefungsversuch. Berichte aus dem Institut für Umformtechnik Universität Stuttgart. Verlag W. Girardet, Essen, 1975.
- [161] Michel, K.H.; Mozek, H.M.; Schmidt, W.; Mülders, H.: Ermittlung des Verfestigungsverhaltens von nicht rostenden Feinblechen. Stahl und Eisen, 96. Jg., Nr. 1, S. 15-21, 1976.
- [162] VDI-Richtlinien 3200. Fließkurven metallischer Werkstoffe. Grundlagen, Okt. 1978.
- [163] VDI- Richtlinien 3202. Fließkurven korrosionsbeständiger Stähle für die Schraubenfertigung. Okt. 1965.
- [164] Reiser, J.; Mülders, H.; Plänker, E.: Theoretische und experimentelle Bestimmung von Grenzformänderungen an austenitischen Stählen. Bänder Bleche Rohre, Heft 11, S. 487-492, 1979.
- [165] Hasek, V.: Über den Formänderungs- und Spannungszustand beim Ziehen von großen unregelmäßigen Blechteilen. Berichte aus dem Institut für Umformtechnik Universität Stuttgart, Verlag W. Girardet, Essen, 1973.
- [166] Hosford, W.F.; Backofen, W.A.: Fundamental of Deformation Processing. 9th Sagamore Conference AMRA, Syracuse Univ. Press, 1964.
- [167] Pawelski, O.: Wege und Grenzen der Plastomechanik bei der Anwendung in der Umformtechnik. Opladen, 1976.
- [168] Dahl, W.; Funke, P.; Krause, U.; Lippmann, H.; Müller, H.-G.; Panknin, W.; Pawelski, O.; Troost, A.; Lange, K.; Matthaei, H.; Schneider, E.: Grundlagen der bildsamen Formgebung. Herausgeber: Verein deutscher Eisenhüttenleute, Verlag Stahleisen m.b.H., Düsseldorf, 1956.
- [169] Sachs, G.; Lubahn, J.D.: Failure of Ductile Metals in Tension. Transactions of the A.S.M.E., S. 271-285, Mai 1946.
- [170] Lankford, W.T.; Saibel, E.: Some Problems in Unstable Plastic Flow under Biaxial Tension. AIMME Technical Publication No. 2238, Metals Technology, S. 1-13, August 1947.
- [171] Brown, W.F.jr.; Sachs, G.: Strength and Failure Characteristics of Thin Circular Membranes. Transactions of the A.S.M.E., S. 241-251, April 1948.
- [172] Hill, R.: A Theory of Plastic Bulging of a Metal Diaphragm by Lateral Pressure. Phil. Mag. Ser. 7, Vol. 41, No. 322, S. 1133-1142, Nov. 1950.
- [173] Swift, H.W.: Plastic Instability under Plane Stress. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 1, S. 1-18, 1952.
- [174] Hill, R.: On Discontinuous Plastic States, with Special Reference to Localized Necking in Thin Sheets. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 1, S. 19-30, 1952.
- [175] Weil, N.A.; Newmark, N.M.: Large Plastic Deformations of Circular Membranes. Journal of Applied Mechanics, S. 533-538, Dec. 1955.
- [176] Mellor, B.: Stretch Forming Under Fluid Pressure. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. Vol. 5, S. 41-56, London, 1956.
- [177] Onat, E.T.; Haythornthwaite, R.M.: The Load-Carrying Capacity of Circular Plates at Large Deflection. Journal of Applied Mechanics, S. 49-55, März 1956.

- [178] Keeler, S.P.; Backofen, W.A.: Plastic Instability and Fracture in Sheets Stretched over Rigid Punches. *Transactions of the ASM*, Vol. 56, S. 25-48, 1963.
- [179] Keeler, S.P.: Determination of Forming Limits in Automotive Stampings. *Sheet Metal Industries*, S. 683-691, September 1965.
- [180] Marcianik, Z.; Kuczyński, K.: Limit Strains in the Processes of Stretch-Forming Sheet Metal. *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 9, S. 609-620, 1967.
- [181] Duncan, J.L.; Johnson, W.: The Ultimate Strength of Rectangular Diaphragms. *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 9, S. 681-696, 1967.
- [182] Goodwin, G.M.: Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop. *Society of Automotive Engineers*, Nr. 680093, S. 380-387, 1968.
- [183] Yousif, M.I.; Duncan, J.L.; Johnson, W.: Plastic Deformation and Failure of Thin Elliptical Diaphragms. *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 12, S. 959-972, 1970.
- [184] Venter, R.D.; Malherbe, M.C.de: Theoretical Estimate of the Keeler-Goodwin Formability Curve. *Sheet Metal Industries*, S. 656-658, September 1971.
- [185] Funke, P.; Korri, E.; Piorko, I.; Pavlidis, C.: Ein einfaches Verfahren zur Ermittlung der Grenzformänderungskurve. *DFBO-Mitteilungen*, Heft 7, S. 126-130, 1973.
- [186] Marciniak, Z.; Kuczyński, K.; Pokora, T.: Influence of the Plastic Properties of a Material on the Forming Limit Diagram for Sheet Metal in Tension. *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 15, S. 789-805, 1973.
- [187] Dinno, K.S.; Robinson, M.: Limit Analysis of Thick & Thin Circular Plates Subjected to Transverse Pressure. *IASS World Congress on Space Enclosures*, S. 393-399, Concordia University Montreal, July 1976.
- [188] Hasek, V.; Metzger, P.: Usefulness of the theories of Necking and Inhomogeneity of the Material in the Description of the Forming Limit Diagram. *Sheet Metal Industries*, S. 842-850, September 1977.
- [189] Larsen, B.: Formability of Sheet Metal. *Sheet Metal Industries*, S. 971-977, Oktober 1977.
- [190] Reissner, J.: Der Einfluß des Formänderungsweges auf die Grenzformänderungen in der Blechumformung. *Bleche Rohre Profile*, 26. Jg., S. 528-532, 1979.
- [191] Gleyzal, A.: Plastic Deformation of a Circular Diaphragm under Pressure. *Journal of Applied Mechanics*, S. 288-296, September 1948.
- [192] Fraenkel, S.J.: Experimental Studies of Biaxially Stressed Mild Steel in the Plastic Range. *Journal of Applied Mechanics*, S. 193-200, September 1948.
- [193] Neubert, M.; Sommer, A.: Rechteckige Blechhaut unter gleichmäßig verteiltem Flüssigkeitsdruck. *Luftfahrtforschung*, Band 17, Lfg. 7, S. 207-210, 1940.
- [194] Fiřt, V.: Surfaces of Characteristic Curvature. *Aplikace Matematiky*, 19 (1), S. 36-48, 1974.
- [195] Fiřt, V.: Determining the Shape of Air-Supported Structures and Their Inlet Openings. *Internationales Symposium «Weitgespannte Flächentragwerke»*, Arbeitsunterlagen 1, S. 4.5.1. bis 4.5.5., Stuttgart, 1976.
- [196] Hasek V.: Untersuchung und theoretische Beschreibung wichtiger Einflussgrößen auf das Grenzformänderungsschaubild. *Blech Rohre Profile*, Heft 5 S. 213-220, Heft 6 S. 285-291, Heft 10 S. 493-499, Heft 12 S. 619-627, 1979.
- [197] Sutter, W.: Membrantragwerke aus Feinblech zur Überdachung von Klärbecken. *Diplomarbeit am Institut für Massivbau, Universität Stuttgart*, 1981.
- [198] Kamke, E.: *Differentialgleichungen*. 6. Auflage, Leipzig, 1977.
- [199] Rostfrei am Bau. Broschüre der Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, Arbeitskreis Architektur.
- [200] Remanit. Nichtrostende Stähle. *Werkstoffblätter der Thyssen Edelstahlwerke AG*.
- [201] Nirosta. Band und Blech aus nichtrostenden Stählen. *Firmenschrift der Friedrich Krupp Hüttenwerke AG*.
- [202] Die Verarbeitung von Edelstahl Rostfrei. *Zapp-Color. Edelstahl-Service Robert Zapp, Bleichstr. 8-10, 4000 Düsseldorf 1*.
- [203] Feinblech Lieferprogramm. *Kaltgewalztes Feinblech. Friedrich Krupp Hüttenwerke AG*.
- [204] Kaltbreitband und Kaltbreitbänderzeugnisse aus nichtrostenden und hitzebeständigen Stählen. *Druckschrift 1124/25, Deutsche Edelstahlwerke AG, Februar 1972*.
- [205] Fischer, F.: *Spanlose Formgebung in Walzwerken*. S. 16-33, Berlin, 1972.
- [206] Hentsch, A.: *Texturbildung durch Kaltverformung. Grundlagen des Festigkeitsverhaltens von Metallen. Vorträge der 3. Gemeinschaftskonferenz Metall*, 19.-20. 3. 1964, Akademie-Verlag, Berlin, S. 153-170.
- [207] Grewen, J.; Wassermann, G.: *Texturen als Ursache anisotropen Verhaltens bei der Umformung*. In: [147], S. 93-145.

- [208] Wassermann, G.; Grewen, J.: Texturen metalischer Werkstoffe. Berlin, 1962.
- [209] Grewen, J.; Wassermann, G.: Texturen in Forschung und Praxis. Symposium in Clausthal, Okt. 1969.
- [210] Wellinger, K.; Gimmel, P.; Bodenstern, M.: Werkstoff-Tabellen der Metalle. Bezeichnung, Festigkeitswerte, Verwendung, Lieferwerke, Stuttgart 1972.
- [211] Houdremont, E.: Handbuch der Sonderstahlkunde. 3. Auflage, Berlin 1956.
- [212] Zulassungsbescheid «Nichtrostender Stahl». Zulassungsnummer I/3-1.14.5. Institut für Bautechnik, Berlin, 1974.
- [213] Schmidt, W.: Kennzeichnende mechanische Eigenschaften austenitischer 18 Cr-8 Ni Stähle im Vergleich mit denen von Massenbaustählen. Der Stahlbau, Heft 3, S. 43-41, 1973.
- [214] Die Verarbeitung von Edelstahl Rostfrei. - Ein Leitfaden für den Praktiker. Herausgegeben von der Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, 1975.
- [215] Berichte und Merkblätter der Aluminium-Zentrale e. V., Düsseldorf.
- [216] Aluminium Lehrheft Nr. 1. Herstellung, Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung. Herausgegeben von der Aluminium-Zentrale e.V.
- [217] Altenpohl, D.: Aluminium und Aluminiumlegierungen. Berlin, 1965.
- [218] Junkers, D.; Meuthen, B.: Oberflächen veredeltes Stahlblech - Eigenschaften und Verarbeitung. Vortrag anlässlich des Seminars «Neuere Entwicklungen in der Blechbearbeitung» am Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, 1978.
- [219] Sachs, G.: Principles and Methods of Sheet-Metal Fabricating. Reinhold Publishing Corporation, New York, 1951.
- [220] Panknin, W.: Bedeutung der Werkstoffeigenschaften für die Verarbeitung von Blech. Grundlagen der bildsamen Formgebung. Herausgegeben vom Verein der deutschen Eisenhüttenleute, S. 364-503, 1966.
- [221] Küppers, W.; Schulz, D.: Nichtrostende Feinbleche, ihre Verarbeitung und Oberfläche. Sonderdruck aus «Blech». Nr. 10, 1968.
- [222] Ziegler, W.: Veröffentlichungen auf dem Gebiet des Tiefziehens. Stahl und Eisen, 89. Jg., Nr. 15, S. 830-833, Juli 1969.
- [223] Küppers, W.; Schulz, D.: Verhalten nichtrostender Feinbleche bei der Kaltumformung. Sonderdruck aus «Stahl und Eisen», 90. Jg., Heft 20, 1970.
- [224] Küppers, W.; Schulz, D.: Überlegungen zum Umformen nichtrostender Feinbleche in der Praxis der Blechverarbeitung. Sonderdruck aus «Blech Rohre Profile», Nr. 9, 1970.
- [225] Küppers, W.; Schmitz, K.: Ermittlung des Grenzziehverhältnisses mit Hilfe von Ziehkraft und Abreißkraft bei nichtrostenden Feinblechen. Sonderdruck aus «Blech Rohre Profile», Nr. 9, 1971.
- [226] Keeler, S.P.: Understanding Sheet-Metal Formability. Sheet Metal Industries. Aufsatz in sechs Folgen, Mai bis Oktober 1971, S. 357-364, S. 440-449, S. 511-517, S. 589-593, S. 618, S. 687-691, S. 699, S. 739-745.
- [227] Merkblatt 272. Maschinen für die Blechumformung I. Beratungsstelle für Stahlverwendung, Düsseldorf, 3. Auflage, 1973.
- [228] Kopp, R.: Ein analytischer Beitrag zum Kugelstrahl-Umformen. Bänder Bleche Rohre, Nr. 12, S. 512-522, 1974.
- [229] Müller, R.: Umformen von Feinblech. Technische Mitteilungen Krupp, Werksberichte, Band 32, Heft 2, S. 67-74, Bochum, 1974.
- [230] Gladman, T.; Hammond, J.; Marsh, F.W.: Austenitic Stainless Steels for Cold Forming. Sheet Metal Industries, S. 219-239, Mai 1974.
- [231] Schelosky, H.: Verfahren zum Prüfen der Umform-eignung von Blechen. In [148], Band 3, S. 5-27.
- [232] Schlosser, D.: Zugumformungen. In [148], Band 3, S. 276-319.
- [233] Mülders, H.; Schmitz, K.: Auswirkungen kleiner Vorverformungen auf die mechanischen Eigenschaften eines nichtrostenden austenitischen Feinblechs. Technische Mitteilungen Krupp, Werksberichte, Band 33, Heft 2, S. 83-87, Bochum 1975.
- [234] Merkblatt 472. Maschinen für die Blechumformung II. Beratungsstelle für Stahlverwendung, 4. Auflage, Düsseldorf, 1977.
- [235] Neuere Entwicklungen in der Blechbearbeitung. Seminar vom 6.-7. Juni 1978. Forschungsinstitut Umformtechnik der Ingest e.V., Stuttgart.
- [236] Horn, W.: Neuere Entwicklung gut umformbarer und fester Aluminium-Werkstoffe für Karosserieteile. In [235].
- [237] Neuere Entwicklungen in der Blechbearbeitung. Seminar vom 10.-11. Juni 1980. Forschungsinstitut Umformtechnik der Ingest e.V., Stuttgart.
- [238] Kuntze, W.: Über innere Mechanik der Metalle. Zeitschrift für Metallkunde, 26. Jg., Heft 5, S. 106-112, Berlin, Mai 1934.

[239] Houwink, R.: Elastizität, Plastizität und Struktur der Materie. Dresden, 1957.

[240] Kochendörfer, A.; Hagedorn, K.E.: Physikalische Grundlagen der plastischen Formgebung. In [147], S. 58-92.

[241] Frank, G.: Fließfiguren bei Tiefziehblechen und ihre Beseitigung. Blech, 4.Jg., Nr. 3, S. 30, 1957.

[242] Oehler, G.: Das Blech und seine Prüfung. Springer Verlag Berlin, 1953.

[243] Oehler, G.: Schnitt-, Stanz- und Ziehwerkzeuge. Springer Verlag Berlin, 1966.

[244] Erichsen, P.F.: Prüfung der Tiefziehfähigkeit von Blech und Band. Blech, 4. Jg., Nr. 5, S. 39-41, 1957.

[245] Woo, D.M.: The Stretch-Forming Test. The Engineer, S. 876-880, November 1965.

[246] Shawki, G.S.A.: Assessing Deep-Drawing Qualities of Sheet. Part 1-3. Sheet Metal Industries, S.363-368, Mai 1965; S. 417-424, Juni 1965; S. 524-532, Juli 1965.

[247] Jenkins, R.D.; Wilson, D.V.: The Characterization of Stretch-Forming Behaviour by Measurement of Uniform Elongation in the Tensile Test. Sheet Metal Industries, S. 21-38, Januar 1971.

[248] IDDRG-Empfehlung für die Ermittlung der senkrechten Anisotropie «r». Internationale Arbeitsgemeinschaft zur Prüfung der Tiefziehbarkeit (IDDRG). 1975.

[249] Helms, R.: Einfluß der Probenabmessungen auf die Bruchdehnungswerte beim Zugversuch an Blechen und Bändern. Bänder Bleche Rohre, Nr. 6, S. 241-244, 1975.

[250] Kienzle, O.; Mietzner, K.: Mikrogeometrische Veränderungen der Oberfläche bei Kaltumformvorgängen. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 812, S. 3-47, 1960.

[251] Kienzle, O.; Mietzner, K.: Oberflächenwandlung bei verschiedenen Kalt-Umformverfahren. Atlas umgeformter metallischer Oberflächen, S. 40-45, S. 92-101, 1967.

[252] Kieser, H.-J.: Beitrag zur rechnerischen Behandlung des formgebenden Lastfalles. Diplomarbeit am Institut für Massivbau, Universität Stuttgart, 1981.

[253] Doltsinis, J.St.: Dynamische Formgebung in [11] S. 3.1-1 bis 3.1-4.

[254] Argyris, J.H.; Doltsinis, J.St.; Knudson, L.E.; Vaz, L.E.; Willam, K.J.: Numerical Solution of Transient Nonlinear Problems. Fenomech'78 Conference, Stuttgart August 1978, Conference Proceedings and Comp. Meth. Appl. Mech. Enging. 17/18, S. 341-409, 1979.

6. Anhang - Blech als Membranbaustoff*)

In diesem Kapitel werden Informationen über das Halbzeug Blech für den Bauingenieur zusammengestellt. Wegen der Fülle des zu diesem Thema gehörenden Stoffes kann keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden. Es wurde vor allem Wert darauf gelegt, diejenigen Aspekte, die für das Blech als Membranbaustoff wichtig erschienen, darzustellen.

6.1 Das Halbzeug Blech

6.1.1 Allgemeines

Aus metallischen Werkstoffen durch Walzen hergestellte Halbzeuge in der Form von Tafeln, Platten, Bändern oder Streifen werden Bleche genannt. Als Baustoff aus der Gruppe der Metalle weisen sie deren Vorzüge und Besonderheiten auf. Der hohe Stand der Herstellungsverfahren beschert uns ein qualitativ sehr hochwertiges Halbzeug, welches mit definierten Eigenschaften und geringen Maßabweichungen produziert wird.

Bleche werden nach ihrer chemischen Zusammensetzung, der Dicke, dem Walzverfahren, besonderer Behandlungsweisen, bestimmter Verarbeitungseigenschaften und dem Verwendungszweck unterschieden. Äußerst dünne Bleche mit einer Dicke von 1/1000mm (Blattgold) bis zu einigen Hundertstel mm werden Folien genannt. Bei Stahlblech unterscheidet man die Dickenbereiche nach Bild 199.

Zahlreiche Normen, Richtlinien und Merkblätter beziehen sich auf Maße, Güte und Prüfung von Blechen (Tafeln 1 und 2). Weitere Informationen über Lieferformen und Eigenschaften enthalten die Werkstoffblätter (Tafel 3) und andere Firmenschriften der Hersteller (siehe z. B. [199-204], [214]).

Bänder aus Stahl werden bis zu einer Breite von 2000mm in Erzeugungseinheiten bis zu 45t hergestellt. Diese Masse entspricht bei einer üblichen Breite von 1600mm bei 1mm Blechdicke einer Länge von 3,6km und einer Fläche von 5700m².

Für Metall-Membrantragwerke kommen Bleche im Dickenbereich der Feinbleche in Frage. Diese werden aus dickerem Warmband meist im Kaltwalzwerk hergestellt. In mehreren Fertigungsstufen (Beizen, Walzen, Glühen, Dressieren) entsteht ein Flachzeug höchster Güte hinsichtlich der Festigkeit, der Oberflächenbeschaffenheit, Bearbeitbarkeit und der Gleichmäßigkeit von Eigenschaften und Abmessungen.

Die Eigenschaften von Blechen können außerordentlich variiert werden. Durch die große Zahl der Legierungen und die Möglichkeit der Wärmebehandlung, Kaltverfestigung und Oberflächenveredlung kann der metallische Membranwerkstoff in vielfältiger Weise den Anforderungen einer bestimmten Nutzung angepaßt werden.

Wegen seiner Bedeutung im Karosserie-, Apparate- und Behälterbau liegt sehr viel Wissen über das Halbzeug Blech vor. Dies kommt natürlich der Metallmembranbauweise sehr zu Gute. In Bild 200 sind die wichtigsten Fachzeitschriften zum Thema und zum Umfeld „Blech“ aufgelistet.

6.1.2 Zur Werkstoffstruktur

Die Eigenschaften von dünnen Blechen haben ihren Ursprung in den allgemeinen Besonderheiten metallischer Stoffe (siehe Abschnitt 2.1.3), der Struktur der Kristallite und deren Gefüge. Beim Walzen entsteht eine ausgeprägte Längung des bearbeiteten Flachzeuges, die von einer entsprechenden Streckung der Körner begleitet wird. Bild 201 zeigt die typische Zeilenstruktur des Gefüges.

Die faserige Anordnung der Kristallite führt zu einer Richtungsabhängigkeit der Werkstoffeigenschaften, die geometrische oder auch mechanische Anisotropie genannt wird. Zusätzlich zu dieser Form der Anisotropie gibt es noch die sogenannte Strukturanisotropie, die ihre Ursache in der Orientierung der Richtungen der Kristallgitter der einzelnen Körner hat. Wenn die Orientierung der Kristallite von der statistisch regellosen Verteilung abweicht, entstehen sogenannte Vorzugsorientierungen oder Texturen. Bei Blechen sind sehr ausgeprägte Texturen zu beobachten.

Bild 202 zeigt in einer schematischen Skizze, wie durch Verformung eine Textur entsteht; in Bild 203 ist eine sogenannte Polfigur, die in der Metallkunde zur Kennzeichnung der Textur verwendet wird, dargestellt [148]. Die Linien in Bild 203 geben die Belegungsdichte der Kristallflächen-Normalen an. Bei statistisch regelloser Orientierung ist die Polfigur im Gegensatz zu dem Beispiel in Bild 203 gleichmäßig mit Projektionspunkten belegt.

Die Anisotropie von Blechen macht sich relativ stark in den mechanischen Eigenschaften bemerkbar. Der Elastizitätsmodul und die Zugfestigkeit schwanken beträchtlich mit der Richtung, die eine Probe relativ zur Walzrichtung einnimmt (Bild 204). Sehr einfach kann die Anisotropie dünner Bleche mit einem Einreißversuch nachgewiesen werden. Die Länge und die Form von Zipfeln, die nach Bild 205 aus einer Probe herausgerissen werden, zeigt deutlich eine Richtungsabhängigkeit. Der Einfluß der Textur auf das Verformungsverhalten im plastischen Bereich wird in Abschnitt 6.2.4 behandelt.

*) Der Anhang ist nicht Bestandteil der Dissertation.

FEINSTBLECH	$S < 0,5\text{mm}$
FEINBLECH	$0,5\text{mm} < S < 3,0\text{mm}$
MITTELBLECH	$3,0\text{mm} < S < 4,75\text{mm}$
GROBBLECH	$S > 4,75\text{mm}$

Bild 199

Einteilung von Stahlblech nach der Dicke.

Fachzeitschrift	Erscheinungsort	erscheint seit
Blech, Rohre, Profile	Coburg	1953
Bänder, Bleche, Rohre	Düsseldorf	1960
Sheet Metal Industries	London	1927
DFBO-Mitteilungen	Düsseldorf	1949-50

Bild 200

Fachzeitschriften über Blech und Blechbearbeitung.

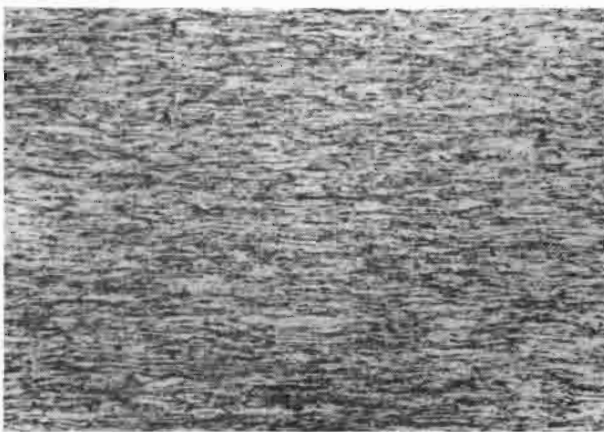
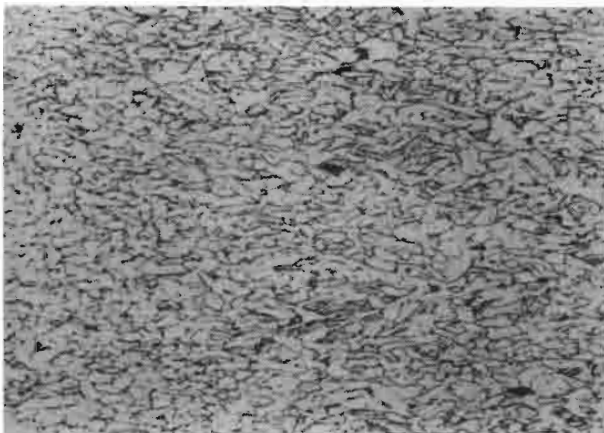


Bild 201

Kornformen in Abhängigkeit von der Kaltverformung [205]. **a** Verformung 30%. **b** Verformung 80%, deutlich ist die faserige Struktur (Textur) zu erkennen.

Bild 202

Schematische Darstellung der Entstehung einer Textur.

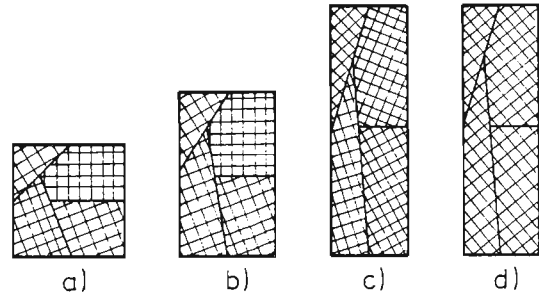
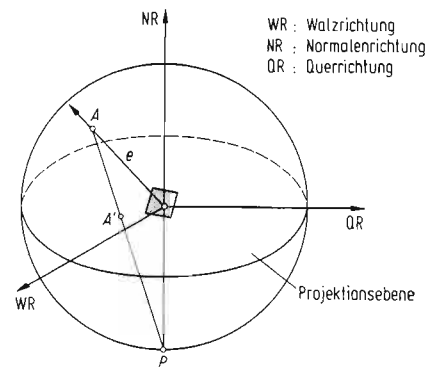
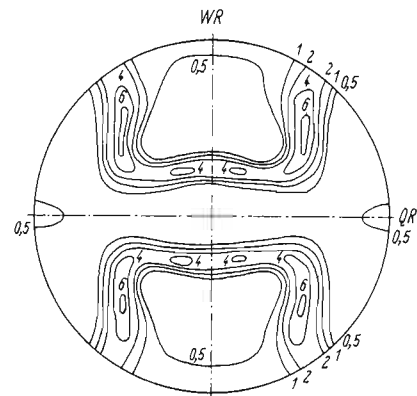


Bild 203

Darstellung der Textur.

a (100) – Polfigur der Walztextur von Aluminium ([147], S. 108). Die Linien geben die Belegungsdichte der (100) – Flächen wieder.

b Die Polfigur entsteht durch stereographische Projektion der Normalen einer Gitterebene [148].



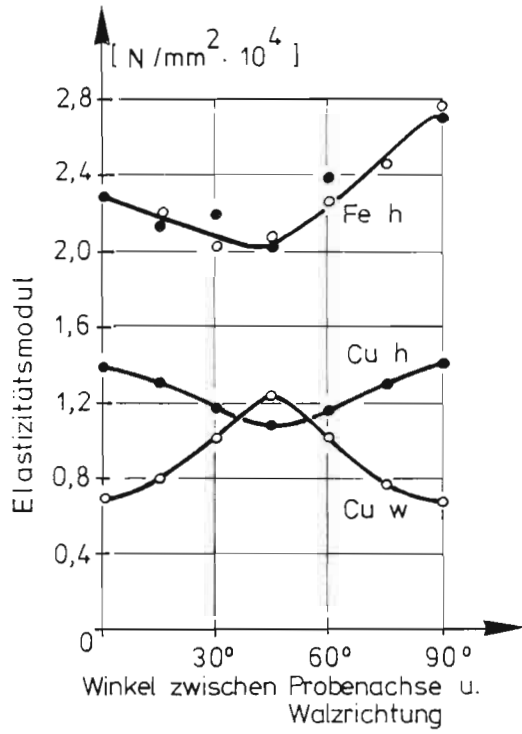


Bild 204

Richtungsabhängigkeit des Elastizitätsmoduls von gewalztem Eisen- und Kupferblech (h) und von Kupferblech mit Würfel-Rekristallisationstextur (w) [208].

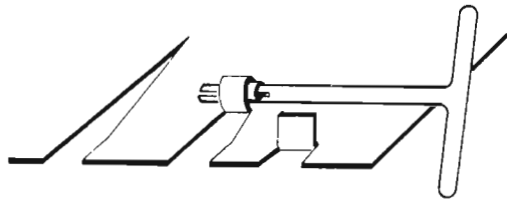
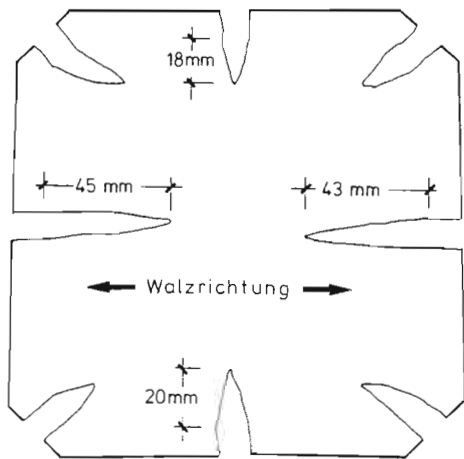


Bild 205

Nachweis der Blechanisotropie durch einen Einreißversuch [219].



Tafel 1				
Normen und Richtlinien in Bezug auf Maße, Güte und Prüfung von Blechen und Bändern aus Stahl				
Maßnorm	Gütenorm	Prüfnorm	Ausgabe	Titel
	1614 Bl.1		9.1974	Flachzeug aus Stahl, Warmgewalztes Band und Blech aus weichen unlegierten Stählen.
	1616		3.1981	Weißblech und Feinstblech in Tafeln; Sorten, Maße und zulässige Abweichungen.
	1623 E T1		9.1981	Flacherzeugnisse aus Stahl; Kaltgewalztes Band und Blech, Technische Lieferbedingungen, Weiche unlegierte Stähle zum Kaltumformen.
	1623 E T3		9.1981	Flacherzeugnisse aus Stahl; Kaltgewalztes Band und Blech, Technische Lieferbedingungen, Weiche unlegierte Stähle zum Emaillieren.
	1624		7.1977	Flachzeug aus Stahl, kaltgewalztes Band in Walzbreiten bis 650mm aus weichen unlegierten Stählen.
	17118		1.1976	Kaltprofile aus Stahl, Technische Lieferbedingungen.
	17162 T1		9.1977	Flachzeuge aus Stahl; feuerverzinktes Band und Blech aus weichen, unlegierten Stählen, Technische Lieferbedingungen.
	17100		1.1980	Allgemeine Baustähle.
	17440		12.1972	Nichtrostende Stähle.
		50101 T1	9.1979	Prüfung metallischer Werkstoffe; Tiefungsversuch an Blechen und Bändern mit einer Breite von ≥ 90 mm (nach Erichsen), Dickenbereich: 0,2mm bis 2mm.
		50101 T2	9.1979	Dickenbereich: über 2mm bis 3mm.
		50102	9.1979	Prüfung metallischer Werkstoffe; Tiefungsversuch an schmalen Bändern (nach Erichsen); Breitenbereich: 30mm bis 90mm.
		50114	8.1981	Prüfung metallischer Werkstoffe; Zugversuch ohne Feindehnungsmessung an Blechen, Bändern oder Streifen mit einer Dicke unter 3mm.
		50153	8.1979	Prüfung metallischer Werkstoffe; Hin- und Herbiegeversuch an Blechen, Bändern oder Streifen mit einer Dicke unter 3mm.
1016			11.1972	Flachzeug aus Stahl; Warmgewalztes Band, warmgewalztes Blech unter 3mm Dicke, Maße, zulässige Maß- Form- und Gewichtsabweichungen.
1541			8.1975	Flachzeug aus Stahl; Kaltgewalztes Breitband und Blech aus unlegierten Stählen; Maße, zulässige Maß- und Formabweichungen.
1542			4.1959	Stahlblech von 3 bis 4,75mm (Mittelblech); Dicken, Größen, Maß- und Gewichtsabweichungen.
1544			8.1975	Kaltgewalztes Band aus Stahl.
59232 E			7.1978	Flachzeug aus Stahl, Feuerverzinktes Breitband und Blech aus weichen unlegierten Stählen und aus allgemeinen Baustählen; Maße, zulässige Maß- und Formabweichungen.
1543			10.1981	Flacherzeugnisse aus Stahl; Warmgewalztes Blech von 3 bis 150 mm Dicke; zulässige Maß-, Gewichts- und Formabweichungen.
59381			8.1980	Flachzeug aus Stahl; Kaltgewalztes Band aus nichtrostenden und aus hitzebeständigen Stählen; Maße, zulässige Maß-, Form- und Gewichtsabweichungen.
59382			8.1975	Flachzeug aus Stahl; kaltgewalztes Breitband und Blech aus nichtrostenden Stählen; Maße, zulässige Maß- und Formabweichungen.

Tafel 2 Normen über Bleche und Bänder aus Aluminium und Aluminiumlegierungen				
Gütenorm	Maßnorm	Techn. Lieferbedingungen	Techn. Ausgabe, Jahr	Titel
1712 T1 T3			12.1976	Aluminium; Masseln
			12.1976	Aluminium; Halbzeug
1745 T1			12.1976	Bleche und Bänder aus Aluminium und Aluminiumknetlegierungen mit Dicken über 0,35mm Festigkeitseigenschaften
1788			12.1976	Bleche und Bänder aus Aluminium und Aluminiumknetlegierungen mit Dicken von 0,021 bis 0,350mm; Festigkeitseigenschaften
		1745 Bl.2	12.1968	Bleche und Bänder aus Aluminium (Reinstaluminium, Reinaluminium und Aluminiumknetlegierungen); Normalqualität, Techn. Lieferbedingungen.
		1745 Bl.3	12.1968	Bleche und Bänder aus Aluminium; Eloxalqualität, Techn. Lieferbedingungen.
		17611 V	12.1981	Anodisch oxidiertes Halbzeug aus Aluminium und Aluminiumknetlegierungen mit Schichtdicken von mindestens 10µm; Techn. Lieferbedingungen.
	1783		4.1981	Bänder und Bleche aus Aluminium und Aluminiumknetlegierungen mit Dicken über 0,35mm, kaltgewalzt; Maße.
	1784		4.1981	Bänder, Bleche und Formate aus Aluminium und Aluminiumknetlegierungen mit Dicken von 0,021 bis 0,35mm, kaltgewalzt; Maße.
	1784 Bl.3		6.1970	Bänder aus Aluminium, Folien 0,007 bis 0,02mm (7 bis 20µm), kaltgewalzt; Maße.
1725 T1			12.1976	Aluminiumlegierungen; Knetlegierungen.
1725 Bl.2			9.1973	Aluminiumlegierungen; Gußlegierungen, Sandguß, Kokillenguß, Druckguß.
1725			6.1973 Bl.3	Aluminiumlegierungen; Vorlegierungen.

Tafel 3 Stahl – Eisen – Werkstoffblätter und – Lieferbedingungen		
SEW Stahl - Eisen Werkstoffblätter	SEL Stahl - Eisen Lieferbedingungen	Titel
028-59		Warmbänder aus weichen unlegierten Stählen; Gütevorschrift
029-65		Warmbreitband aus weichen unlegierten Stählen; Gütevorschrift
030-61		Warmbreitband aus unlegierten Stählen; zulässige Maß- und Gewichtsabweichungen, Ausführung
093-75		Kaltgewalztes Feinblech und Band mit gewährleisteteter Mindeststreckgrenze zum Kaltumformen; Gütevorschrift
	096-74	Blech, Band und Breitflachstahl mit verbesserten Eigenschaften für Beanspruchungen senkrecht zur Erzeugnisoberfläche
	401-62 402-62	Bleche aus nichtrostenden Stählen Bänder aus nichtrostenden Stählen
400-60		Nichtrostende Walz- und Schmiedestähle

6.1.3 Überblick über wichtige Sorten

Aus der Vielzahl handelsüblicher Blechhalbzeuge kommen für Membrankonstruktionen im Regelfall nur Werkstoffe aus der Gruppe der Stähle und der Aluminiumlegierungen in Frage. Andere Werkstoffe sind entweder zu teuer oder zu schlecht bearbeitbar. Bei der Auswahl der im folgenden beschriebenen Werkstoffe wurde gefordert, daß sie alle oder zumindest den größten Teil der nachstehenden Eigenschaften aufweisen. Sie sollen:

- in den Dickenbereich $s \leq 3,0\text{mm}$ fallen;
- breiter als 1000mm sein;
- eine Reißlänge von mehr als 5000m haben;
- gut schweißbar sein;
- und gut kaltverformbar sein ($\epsilon_{gj} \geq 10\%$).

Einen Überblick über die wichtigsten mechanischen Eigenschaften einiger Stahl- und Aluminiumwerkstoffe gibt Tafel 4

6.1.3.1 Bleche und Bänder aus Stahl

Kaltgewalztes Band aus unlegierten Stählen

Nach der DIN 1623 werden Feinbleche aus weichen unlegierten Stählen und aus allgemeinen Baustählen unterschieden.

Die unlegierten Stähle haben einen Kohlenstoffgehalt von weniger als 0,1% und sind für die Verwendung in Stanze- reibetrieben vorgesehen. Deshalb bestehen ihre kennzeichnenden Eigenschaften in ihrer Oberflächengüte und Umformbarkeit. Zusätzliche Merkmale sind die Herstellungsart, die Festigkeit und die Glühbehandlung. Die Eignung zum Schweißen mit üblichen Verfahren wird gewährleistet.

Die Bleche und Bänder aus allgemeinen Baustählen werden vorwiegend auf Grund ihrer höheren Zugfestigkeit und Streckgrenze bevorzugt. Sie haben einen Kohlenstoffgehalt bis zu 0,7%. Die Phosphor- und Schwefelgehalte sind leicht höher, als bei den Tiefziehblechen nach DIN 1623, Teil 1. Die Umformbarkeit ist geringer und wird nicht durch den Tiefungsversuch (Bild 219), sondern durch den Kaltversuch definiert. Auch an die Oberflächengüte werden geringere Anforderungen gestellt. Die Schweißbeignung ist für die meisten Sorten gewährleistet. Zum Punkt- und Rollennahtschweißen sind jedoch nur Sorten mit einem Kohlenstoffgehalt von höchstens 0,25% und zunderfreier Oberfläche geeignet.

Eine Übersicht über diese Sorten von Stahlblech geben die Tafeln 5 und 6 nach [210].

Nichtrostende Stähle

Nichtrostende Stähle nach DIN 17440 zeichnen sich durch eine besondere Beständigkeit gegenüber chemisch angreifenden Stoffen aus. Sie haben im allgemeinen einen Chromgehalt von mindestens 12 Gewichtsprozent. Man teilt die nichtrostenden Stähle in die beiden Gruppen „ferritische und martensitische Stähle“ und „austenitische Stähle“ ein.

Die austenitischen, nichtrostenden Stähle sind außerordentlich gut kalt umformbar. Sie haben einen Chromgehalt von 18% und einen Nickelgehalt von 8% und mehr. Die DIN 17440 enthält detaillierte Angaben zu Herstellung, Eigenschaften und Prüfverfahren für 29 Sorten (davon sind 16 austenitische Stähle). In Tafel 7 sind die austenitischen Stähle mit ihrer chemischen Zusammensetzung und einigen mechanischen Eigenschaften aufgeführt. Ein Teil der nichtrostenden Stähle ist bauaufsichtlich zugelassen [212]. Weitere Angaben über nichtrostende Stähle sind u. a. in [199-204], [210],[211], [214] zu finden.

6.1.3.2 Bleche und Bänder aus Aluminium

Durch die hohe Korrosionsbeständigkeit und das niedrige spezifische Gewicht sind Aluminium und seine Legierungen gut als Baustoff für Metall-Membrantragwerke geeignet. Aus der Tafel 8, [216], geht hervor, daß abgesehen von den kupferhaltigen Legierungen alle Aluminium-Knetwerkstoffe eine sehr gute chemische Beständigkeit besitzen und zumindest als gut schweißbar eingestuft werden. Eine gute Kaltverformbarkeit ist jedoch nicht für alle Legierungen und Festigkeitsklassen gegeben. Die Zahl der als Blech oder Band erhältlichen Sorten ist sehr hoch. Bezüglich weiterer Angaben sei auf das Schrifttum verwiesen, siehe z. B. [210], [215]-[217].

Tafel 4
Überblick über mechanische Eigenschaften von Stahl und Aluminium

Werkstoff	E-Modul N/mm ²	0,2 Grenze N/mm ²	Bruchdehnung %	Zugfestigkeit N/mm ²	γ kg/dm ³	R km
Stahl unlegiert wetterfest nichtrostend	210000	220-370	18-6	370-700	7,85	4,7-8,9
	210000	240-360	25-22	370-520	7,85	4,7-6,6
	203000	190-210	37-34	500	7,9	6,3
Aluminium	70000-73500	80-380	15-30	150-460	2,65-2,8	5,5-16,5

Tafel 5
Stahlblech (Feinblech) unter 3mm aus weichen, unlegierten Stählen nach DIN 1623, Teil 1, [210]

Bezeichnungen DIN		Schmelzenanalyse %					σ _B	σ _{0,2}	δ ¹⁾	Verwendung
17006	17007	C max.	Si	Mn	P S max.	kp/mm ²	kp/mm ² max.	%		
T St 10 St 10	1.0022.1 1.0022.5	0,15	—	0,35	0,080 0,060	0,060	28-50	—	—	Teile mit guter Oberfläche Eignung zum Emallieren, Verzinken
WU St 12 U St 12	1.0330.3 1.0330.5	0,10	Spuren	0,35	0,050	0,050 ²⁾	28-42	—	24	Einfache Ziehtteile
U St 13 R St 13	1.0333.5 1.0333.6		Spuren 0,03-0,15 ³⁾		0,040	0,040	28-40	27	27	Für Tiefziehbeanspruchung; spritzlackierfähig
U St 14 RR St 14	1.0336.5 1.0338.6		Spuren bis 0,10 ⁴⁾		0,030	0,035	28-38	24	30	Bekleidungsbleche, Karosserieteile

- 1) Für eine Probe von einer Meßlänge l₀ = 80 mm und einer Breite b = 20 mm nach DIN 50114, Dez. 1965.
- 2) Dazu bei widgefrischem Sonderstahl höchstens 0,008% N.
- 3) Die untere Grenze gilt für den Fall, daß neben Si noch andere Desoxydationselemente verwendet werden.
- 4) Dazu mindestens 0,02% metallische Al, sofern nicht andere Desoxydationselemente nach Vereinbarung bei der Bestellung verwendet werden.

Tafel 6
Stahlblech (Feinblech) unter 3mm aus allgemeinen Baustählen nach DIN 1623, Teil 2, [210]

Bezeichnungen DIN		Schmelzenanalyse %					σ _B	σ _{0,2}	δ ¹⁾	Verwendung	Eignung zum Schweißen	
17006	17007	C	P max.	S	N	kp/mm ²	kp/mm ² max.	%				
TUSt 37	1.0110.1	0,20	0,08	0,05	—	—	37-45	22	18	Bleche mit vorgeschrriebener Festigkeit	Eignung zum Schmelzschweißen ist bei den Stählen WUSt 37-2, USt 37-2, RSt 37-2, USt 42-2 und RSt 42-2 (wobei die beruhigten Sorten vorzuziehen sind) und bei St 52-3 vorzuziehen. Je nach den Schweißbedingungen und Betriebsbeanspruchungen kann sie auch bei TUSt 37 vorausgesetzt werden.	
WUSt 37-2	1.0112.3		0,06									0,008
USt 37-2	1.0112.5		—									—
RSt 37-2	1.0112.6		—									—
USt 42-2	1.0132.5		0,25 ²⁾									0,06
RSt 42-2	1.0132.6	≈ 0,30	0,06	0,05	—	50-60	30	14				
St 50-2	1.0532.6	≈ 0,20	0,05			52-62 ⁴⁾	36	16				
St 52-3 ³⁾	1.0841.6	≈ 0,40	0,06			60-72	34	10				
St 60-2	1.0542.6	≈ 0,50	0,06			70-85	37	6				
St 70-2	1.0632.6	—	—			—	—	—				

- 1) Für eine Probe von einer Meßlänge l₀ = 80 mm und einer Breite b = 20 mm nach DIN 50114, Dez. 1965.
- 2) Sofern der C-Gehalt in der Schmelzenanalyse 0,22% überschreitet, darf der Stahl nur höchstens 0,20% Cr enthalten.
- 3) Der Si-Gehalt darf 0,55%, der Mn-Gehalt 1,50% nicht überschreiten.
- 4) Eine untere Grenze von 50 kp/mm² und eine obere Grenze von 64 kp/mm² werden nicht beanstandet.

Tafel 7
Austenitische, nichtrostende Stähle nach DIN 17 444, [210]

Bezeichnungen DIN		Schmelzenanalyse ¹⁾						Wärmebehandlungs- zustand	σ _{0,2}	σ _B	δ ₅ bis 15 mm ²⁾																	
17006	17007	C	Si bzw. Mn	Cr	Mo	Ni	Sonstiges				kp/mm ²	kp/mm ²	1 ⁴⁾	q														
X 12 CrNi 18 8	1.4300	≤ 0,12	Si ≤ 1,0 und Mn ≤ 2,0	17,0-19,0	—	8,0-10,0	— S 0,10-0,20	abgeschreckt	22	50-70	50	37																
X 12 CrNiS 18 8	1.4305	≤ 0,15																										
X 5 CrNi 18 9	1.4301	≤ 0,07											17,0-20,0	—	9,0-11,5	—	19	50-70	50	37								
X 2 CrNi 18 9	1.4306	≤ 0,03																										
X 10 CrNiTi 18 9	1.4541	≤ 0,10											17,0-19,0	—	9,0-11,5	Ti ≥ 5 × % C Nb ≥ 8 × % C	21	50-75	40	30								
X 10 CrNiNb 18 9	1.4550	—																										
X 5 CrNiMo 18 10	1.4401	≤ 0,07											16,5-18,5	2,0-2,5	10,5-13,5	—	abgeschreckt	21	50-70	45	34							
X 2 CrNiMo 18 10	1.4404	≤ 0,03																										
X 10 CrNiMoTi 18 10	1.4571	—																				2,0-2,5	10,5-13,5	Ti ≥ 5 × % C Nb ≥ 8 × % C	23	50-75	40	30
X 10 CrNiMoNb 18 10	1.4580	≤ 0,10																										
X 5 CrNiMo 18 12	1.4436	≤ 0,07	2,5-3,0	12,0-14,5	—	21	50-70	45	34																			
X 2 CrNiMo 18 12	1.4435	≤ 0,03																										
X 10 CrNiMoNb 18 12	1.4583	≤ 0,10								12,0-14,5	Nb ≥ 8 × % C	23										50-75	40	30				
X 10 CrNiMoNb 18 12	1.4583	—																										

- 1) Im Elektroofen erschmolzen.
- 2) Gewährleistung der mech. Eigenschaften in Abhängigkeit vom Abmessungsbereich > 15 mm siehe DIN 17440 Jan. 1967.
- 3) Durchmesser d bzw. Dicke s.
- 4) Bei Prüfung von Rohren darf δ₅ um 5% niedriger liegen.

Tafel 8
Eigenschaften, chemisches Verhalten und Verarbeitbarkeit der Aluminium – Knetwerkstoffe [216]

Werkstoff	Zustand	Chemische Beständigkeit		Formgebung				Verbindung		Oberflächenbehandlung	
		Witterung	See- wasser	Kalt- biegen	Warm- biegen	Treiben Drücken Tiefziehen	spanend	Nieten	Schwei- ßen	durch anodische Oxydation als Oberflächen- schutz	zu deko- rativen Zwecken
Al 99,99 R	F ¹⁾ 4	I	II	I	I	II	—	—	I	I	I
	F 7	I	II	I	I	I	ng	ng	I	I	I
	F 10	I	II	II	I	III	III	ng	I	I	I
AlMg 1	F 10	I	I	I	I	I	ng	III	I	I	I
	F 13	I	I	I	I	II	III	II	I	I	I
	F 16	I	I	II	I	I	II	II	I	I	I
Al 99,5	F 7	I	II	I	I	I	ng	III	I	I	I
	F 10	I	II	II	I	II	III	II	I	I	I
	F 13	I	II	III	I	III	III	II	I	I	I
AlMn	F 10	I	I	I	I	I	ng	II	I	I	II
	F 13	I	II	II	I	II	III	I	I	I	II
	F 16	I	II	III	I	ng	III	I	I	I	II
AlMg 3	F 18	I	I	I	I	II	III	I	I	I	I
	F 23	I	I	III	I	III	III	I	I	I	I
	F 26	I	I	—	I	ng	II	I	I	I	I
AlMg 5	F 24	I	I	II	II	III	II	I	I-II	I	II
	F 32	I	I	—	II	ng	I	I	I-II	I	II
AlMgSi 1	F 20	I	II	II	I	III	II	I	I-II	I	I
	F 28/32	I	II	—	I	ng	I	I	I-II	I	I
AlCuMg 2	weich	—	—	I	I	II	III	II	II	II	III
	F 44	ng	—	—	ng	ng	I	I	II	II	II
AlZnMg 3	F 52	II	II	II	I	II	III	II	I	I	II

¹⁾ F = Mindestfestigkeiten, I = sehr gut, II = gut, III = noch befriedigend, ng = nicht genügend, — = nicht angewendet
Bei ausgehärteten oder kaltverfestigten Werkstoffen tritt bei Wärmebehandlung und Schweißen lokale Entfestigung ein

Tafel 9
Schriften über oberflächenveredeltes Band aus Stahl

Schrift	Titel
Deutscher Verzinkerverband (DVV)	Charakteristische Merkmale für feuerverzinktes Feinblech in Tafeln und in Rollen
Deutscher Verzinkerverband (DVV)	Charakteristische Merkmale für elektrolytisch verzinktes Feinblech in Tafeln und in Rollen (1975).
Deutscher Verzinkerverband (DVV)	Charakteristische Merkmale für bandbeschichtetes Feinblech in Tafeln und in Rollen (1978).
Deutscher Feinblecherzeuger	Besondere Merkmale für die Verarbeitung von Rollen aus kaltgewalztem Feinblech und feuerverzinktem Feinblech(1973).
Deutsche Feinblecherzeuger	Richtlinien für die Verpackung von Feinblechen und verzinktem Feinblech in Tafeln und Rollen (1974).
Beratungsstelle für Stahlverwendung	Merkblatt: Kunststoffbeschichtetes Stahlband und -blech (1970).
Fachverband oberflächenveredeltes Kaltband (FOK)	Charakteristische Merkmale für elektrolytisch veredeltes Kaltband.

6.1.4 Oberflächenveredlung

Durch das Aufbringen einer oder mehrerer zusätzlicher Schichten aus organischen oder anorganischen Stoffen auf das Blechband können die Gebrauchseigenschaften verbessert oder einem bestimmten Verwendungszweck angepaßt werden. Durch das Beschichten entsteht ein Verbundwerkstoff, dessen besondere Eigenschaften bei der Handhabung, Formgebung und Fügung beachtet werden müssen. Über oberflächenveredeltes Band aus Stahl und gibt es die in Tafel 9 aufgezeichneten Schriften. Die Beschichtung soll funktionale und dekorative Zwecke erfüllen. Diese bestehen in:

- dem Korrosionsschutz,
- dem Reflexions- oder Absorptionsvermögen für Licht und Wärme,
- der Wärme- und Schalldämmung,
- der Farbe und dem Glanz,
- der Fähigkeit Schmutz abzuweisen
- und dem Brandschutz.

Eine Übersicht über die gebräuchlichsten Arten der Oberflächenveredlung gibt Bild 206. Die bei Stahl zur Anwendung kommenden metallischen Überzüge verbessern stets das Korrosionsverhalten. Bei niedrigen Temperaturen schmelzende Metalle werden häufig durch Schmelztauchen aufgetragen, während die Elektrolyse bei allen Veredlungsmetallen angewandt werden kann. Die üblichen Schichtdicken verschiedener metallischer Überzüge sind in Bild 207, [218], dargestellt.

6.2 Blechumformung

Mechanisches Umformen bedeutet, daß eine bestimmte geometrische Form durch Ausnutzen der plastischen Eigenschaften des Werkstoffes in eine andere gewünschte Form umgewandelt wird. Masse und Stoffzusammenhang bleiben erhalten (nach [147]). Beim formgebenden Aufspannen der Metall-Membranfläche nach der Methode des formgebenden Lastfalles (siehe 3.1) wird diese einer zweiachsigen Zugbeanspruchung ausgesetzt.

6.2.1 Verfahren zum Zugumformen von Blech

In der Blechumformtechnik stellen die Verfahren des Zugumformens eine weit aufgeächerte Gruppe von Fertigungsverfahren dar (Tafel 10). Die Formgebung durch pneumatische Lasten könnte unter die Verfahren des Weitens eingeordnet werden. Das Aufspannen von Membranflächen mit Hilfe eines Stempels paßt in etwa noch unter den Begriff des Streckziehens - wenn hier auch der größte Teil der Membranfläche nicht mit dem „Werkzeug“ in Kontakt ist. Die durch Randlasten beanspruchte, sich frei aufspannende Membranfläche ist nicht in das Schema von Tafel 10 einzuordnen. Es fehlt das zur Definition gehörende Werkzeug, das der Membran die Form einprägt. Die Art der Verformungsbeanspruchung ist bei den verschiedenen formgebenden Lasten jedoch gleich. Sie wird am besten durch das Wort Streckziehen (stretching) beschrieben.

6.2.2 Geometrie der Umformung am Blechelement

Beim Streckziehen wird das Blech so beansprucht, daß eine Oberflächenvergrößerung bei Abnahme der Dicke eintritt. Ein kreisförmiges Element mit dem Radius r wird zu einer Ellipse mit den Hauptachsen a und b umgeformt (Bild 208). Nach den Gleichungen (2), Abschnitt 3.3.3.2, treten dabei die folgenden Hauptformänderungen auf:

$$\varepsilon_1 = \frac{a-r}{r}; \quad \varepsilon_2 = \frac{b-r}{r}; \quad \varepsilon_3 = \frac{s_0-s}{s_0}$$

$$\varphi_1 = \ln \frac{a}{r}; \quad \varphi_2 = \ln \frac{b}{r}; \quad \varepsilon_3 = \ln \frac{s}{s_0}$$

Drückt man die Flächenvergrößerung

$$\frac{\Delta A}{A_0} = \frac{A_{\text{Ellipse}} - A_{\text{Kreis}}}{A_{\text{Kreis}}}$$

durch die Hauptformänderungen aus, so ergibt sich mit Gleichung (12), 3.3.3.2, daß $\Delta A/A_0$ nur von ε_3 (bzw. φ_3) abhängt.

$$\frac{\Delta A}{A_0} = (1 + \varepsilon_1)(1 + \varepsilon_2) - 1 = \frac{1}{(1 + \varepsilon_3)} - 1$$

$$\frac{\Delta A}{A_0} = -\frac{\varepsilon_3}{1 + \varepsilon_3}$$

In Bild 209 ist diese Funktion graphisch dargestellt. Bei einer allseitigen Dehnung des Bleches um $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 22\%$ nimmt die Dicke um 33% ab und die Fläche um 50% zu.

Zur Messung der Dehnungen eines unverformten Bleches werden Liniennetze auf das Blech aufgetragen (z. B. durch Drucken oder elektrochemisches Ätzen). In der Umformtechnik haben sich Kreisnetze durchgesetzt (Bild 132). Im Gegensatz zu Behauptungen in der Literatur [226] sind aber auch Quadratnetze sehr gut brauchbar.

Die Quadrate des Liniennetzes nach Bild 132 werden bei der Umformung zu Parallelogrammen, deren Seiten die konjugierten Richtungen der zugeordneten Ellipse repräsentieren. Die Hauptdehnungen und ihre Richtungen können damit eindeutig bestimmt werden (z.B Ritz'sche Hauptachsenkonstruktion).

Bild 206

Übersicht über die gebräuchlichsten Arten der Oberflächenveredelung.

OBERFLÄCHENVEREDELUNG

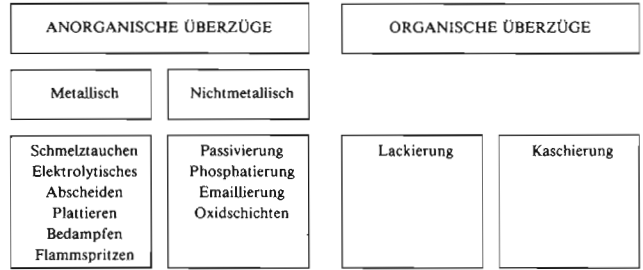


Bild 207

Übliche Schichtdicken metallischer Überzüge [218].

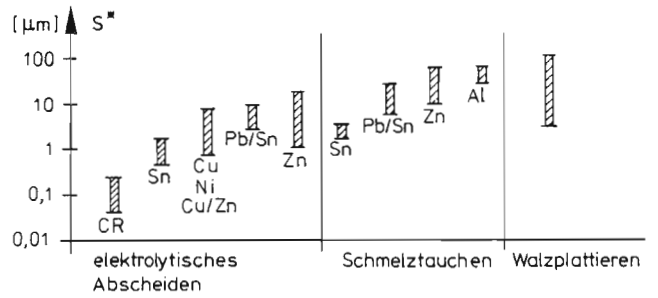


Bild 208

Beim Zugumformen eines kreisförmigen Blechelementes entsteht ein elliptisches Element von geringerer Dicke (konstantes Verhältnis der Hauptdehnungen sei vorausgesetzt).

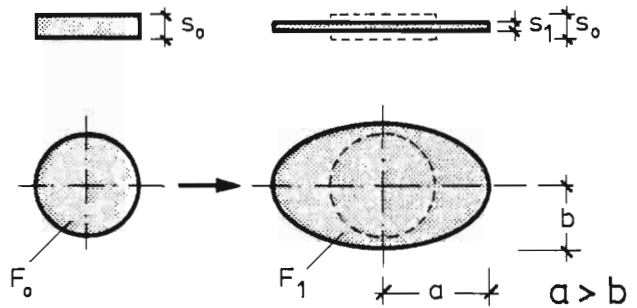
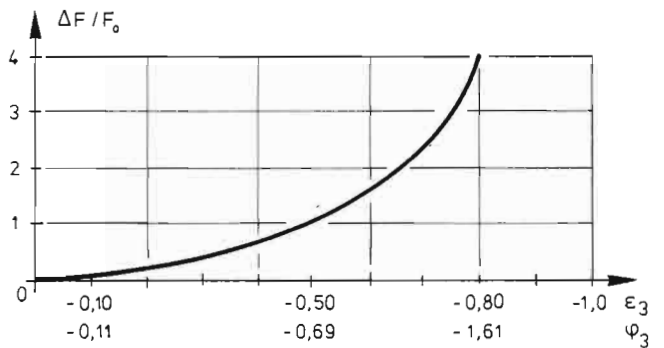
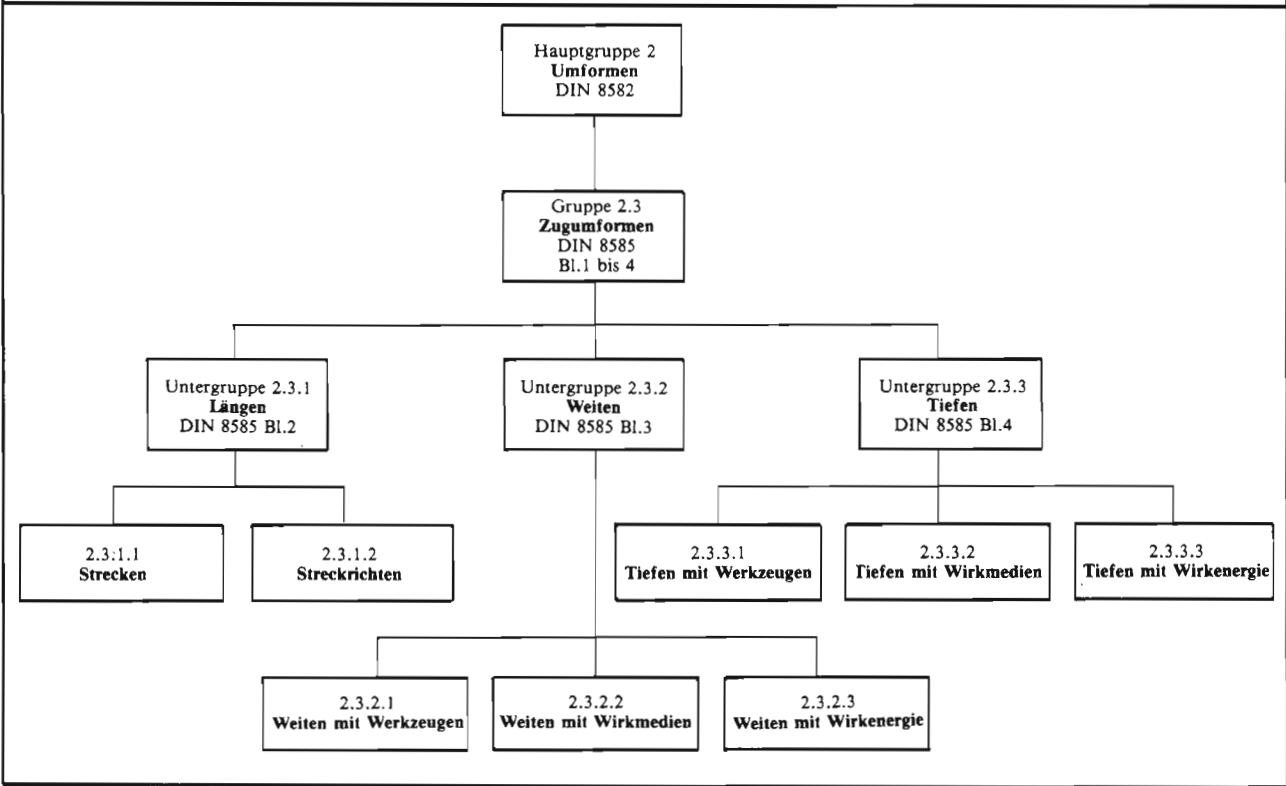


Bild 209

Zusammenhang zwischen Dickenabnahme und Flächenvergrößerung beim Zugumformen von Blech.



Tafel 10
Fertigungsverfahren der Gruppe „Zugumformen“ nach DIN 8582



6.2.3 Zu den Vorgängen bei der Kaltumformung von Blech

Bei der plastischen Verformung von Metallen werden ganze Schichten des Kristallites in bevorzugten Gleitebenen verschoben. Die Kristallstruktur bleibt dabei erhalten. An der Oberfläche plastisch verformter Metalle können sogenannte Gleitlinien als Folge einer Umformung beobachtet werden (Bild 210, [216]). Bei fortschreitender plastischer Verformung nimmt die zur weiteren Umformung erforderliche Spannung ständig zu. Die Ursache hierfür sind Hindernisse innerhalb der Kristallgitter und an den Korngrenzen, die weiteres Gleiten zunehmend blockieren.

Metalle mit kubischem Gitter sind besser umformbar als Metalle mit hexagonalem Gitter, da sie mehr Gleitebenen anbieten. Am besten umformbar sind die kubisch flächenzentrierten Raumgitter. Zu ihnen gehören γ -Eisen, austenitischer Stahl, Aluminium und Kupfer sowie weitere Nicht-eisenmetalle (siehe hierzu z. B. [148]).

Beim Zugumformen von Blech ist ein Mattwerden der Oberfläche zu beobachten. Dabei wird die körnige Struktur des Werkstoffes gut sichtbar (Bild 211, [219]). Je feinkörniger der Werkstoff ist, desto weniger rau wird die Oberfläche. Die Rauhtiefen sind näherungsweise der Dehnung proportional (Bild 212, [147]).

Die Fließspannung ist von der Korngröße D abhängig. Für kubische Metalle wurde ein linearer Zusammenhang zwischen der Fließspannung und $1/\sqrt{D}$ festgestellt [240]. Für Tiefziehbleche in der Stückgutfertigung wird ein mittlerer Korndurchmesser von 0,03 mm mit Rücksicht auf die Verformbarkeit und das Aussehen der Oberfläche empfohlen [219].

Metalle mit einer ausgeprägten Streckgrenze neigen bei der Zugumformung zu der Bildung von Lüdersbändern (Bild 213). Zu diesen Metallen gehören weiche Kohlenstoffstähle und kubisch raumzentrierte Metalle, die eine gewisse Menge interstitiell gelöster Atome aufweisen. Es genügen bei Eisen bereits 10^{-6} Gewichtsprozent, um eine ausgeprägte Streckgrenze hervorzurufen [147]. Bei hohen Anforderungen an die Oberflächenbeschaffenheit ist die Erscheinung der Fließfigurenbildung unerwünscht. Durch bestimmte Maßnahmen kann sie verhindert werden [165].

6.2.4 Einfluß der Anisotropie auf das Umformverhalten

Die Walztextur von Blechen kommt nicht nur in der Anisotropie der elastischen Eigenschaften (Abschnitt 6.1.2) zum Ausdruck, sondern sehr deutlich in der Richtungsabhängigkeit der Umformigenschaften. Vielzitiertes Beispiel hierfür ist die sogenannte Zipfelbildung beim Tiefziehen (Bild 214). In Walzrichtung weisen Bleche eine größere plastische Dehnbarkeit (Grenzformänderung) auf, während

sie sich in der Querrichtung besser abkanten lassen (Bild 215, [226]). Hydraulisch umgeformte Kalotten mit kreisförmiger Berandung weichen mit einer ellipsoidischen Form von der Rotationssymmetrie ab [160]. Die Dehnungen in Walzrichtung sind größer als quer dazu. Als Folge davon entstehen im Kuppenpol größere Krümmungen in Walzrichtung als in Querrichtung.

Nicht nur in der Blechmittelfläche, sondern auch in Dickenrichtung wird ein anisotropes Werkstoffverhalten beobachtet. Die Anisotropie in Dickenrichtung wird durch den Kennwert R nach Gleichung (26) beschrieben (siehe 3.3.2.5). Das durch den R -Wert beschriebene plastische Querkontraktionsverhalten ist abhängig von der Richtung der Probenentnahme (Bild 216, [219]).

Die Größenordnung der Verformungsunterschiede infolge der Anisotropie liegt in der Blechebene bei Feinblechen unter 3% [160]. Bild 217 macht deutlich, daß die Auswirkungen der Anisotropie auf das Verhältnis der Hauptformänderungen sehr stark vom Werkstoff abhängen. Der Stahl RRSt 1405 verhält sich bezüglich φ_1 und φ_2 fast isotrop, während der X5CrNi 18 8 eine deutlich größere Verformung in φ_1 -Richtung erfährt.

6.2.5 Beurteilung der Umformeignung

Die Eignung des Blechwerkstoffes für die Zugumformung läßt sich an Hand der im Zugversuch ermittelten Gleichmaß- und Bruchdehnung beurteilen. Ebenso werden die Erichsen-Tiefung (siehe 6.3) und der n -Faktor herangezogen. Hohe Zahlenwerte dieser Kenngrößen lassen auf eine gute Streckziehbarkeit schließen [232].

Die Gleichmaßdehnung ist ein Maß für die Höhe der Dehnungsbeanspruchung, die der Werkstoff ertragen kann, ohne daß lokale Einschnürungen auftreten. Als sogenannter n -Faktor entspricht sie dem Steigungsmaß der Fließkurve in logarithmischer Darstellung und kennzeichnet damit die Fähigkeit zur Kaltverfestigung.

In Tafel 218 sind Zahlenwerte zur Beurteilung der Umformbarkeit durch Zugkräfte für einige wichtige Werkstoffe zusammengetragen.

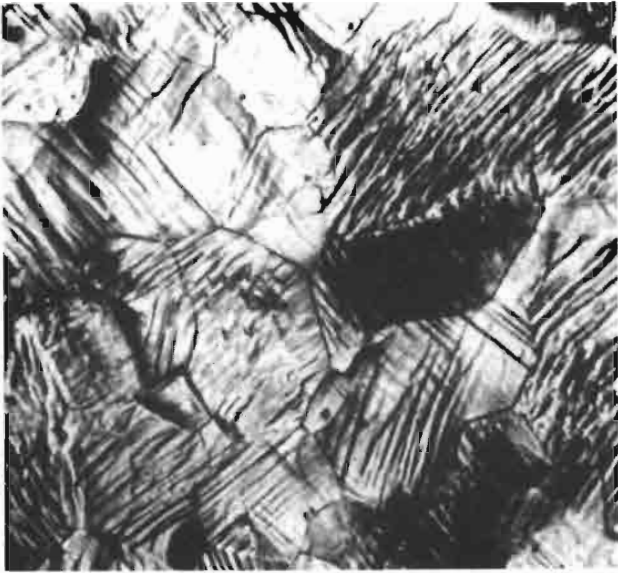


Bild 210
Gleitlinienbildung bei der langsamen Verformung von Reinaluminium [216].

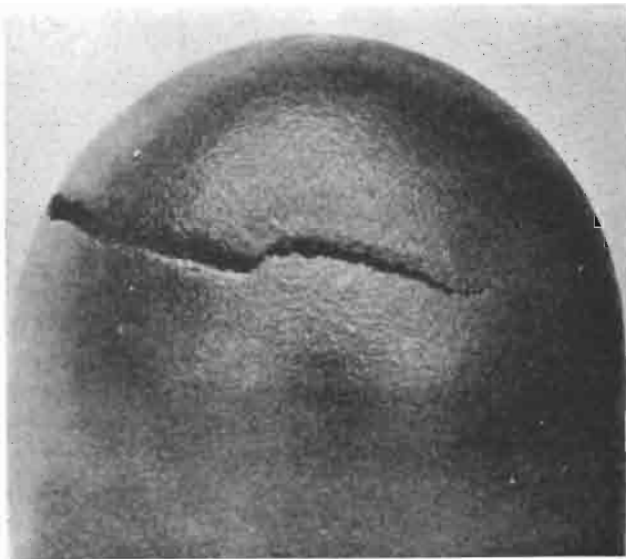


Bild 211
Beim Zugumformen wird die körnige Struktur des Werkstoffes sichtbar. Grobkörniges Messing [219].

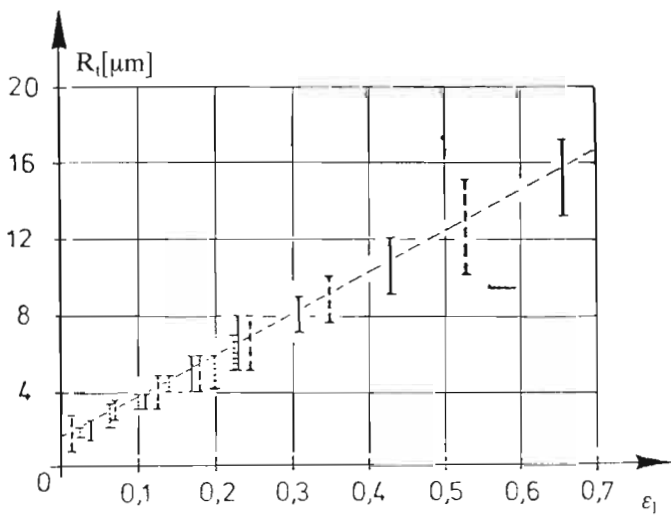


Bild 212
Rauhtiefen in Abhängigkeit von der Dehnung. Zugproben aus austenitischem Chrom – Nickel – Stahl [147].

Bild 213
Typische Fließfiguren [219].

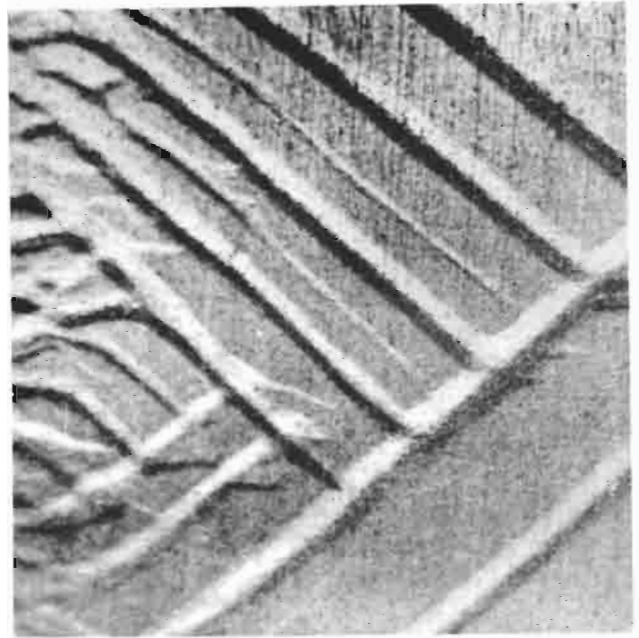


Bild 214
Die Zipfelbildung beim Tiefziehen ist Ausdruck der Anisotropie.

- a tiefgezogener Napf aus isotropem Werkstoff.
- b tiefgezogener Napf aus anisotropem Werkstoff.

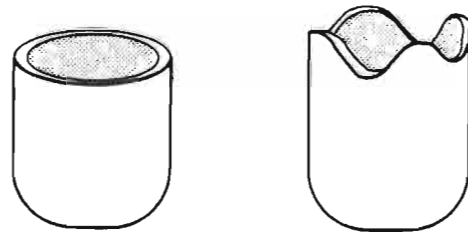
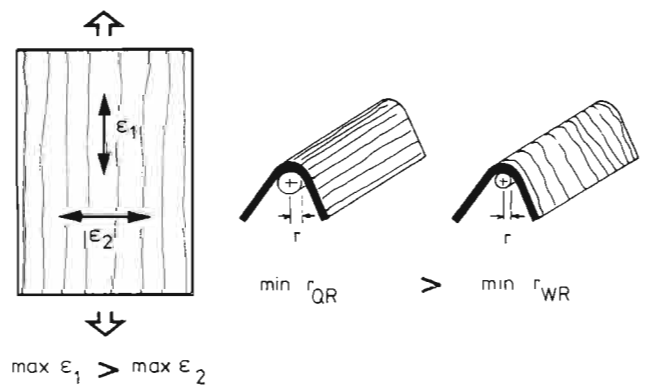


Bild 215
Grenzdehnungen und Grenzbiegeradien in Abhängigkeit von der Richtung der Probenentnahme [219].



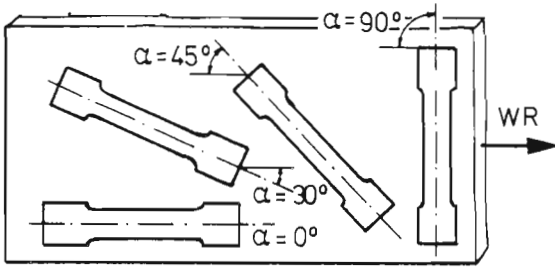
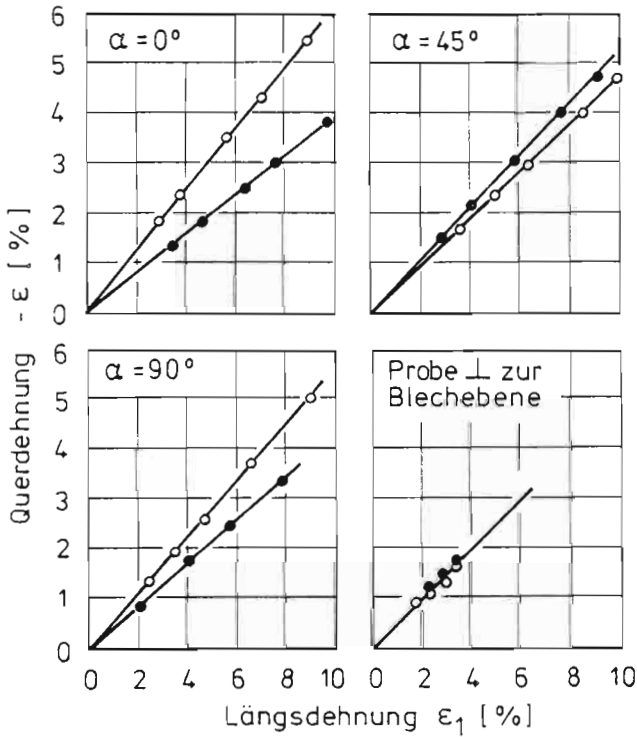


Bild 216

Darstellung der Anisotropie des Dehnungsverhaltens von Blechproben aus einer Aluminiumlegierung.

- a Lage der Proben im gewalzten Blech, Bezeichnungen.
- b Abhängigkeit der Querdehnungen von der Längsdehnung und der Richtung der Probenentnahme [219].



ϵ_1 Längsdehnung

●—●— ϵ_2 Querdehnung in der Blechebene

○—○— ϵ_3 Querdehnung senkrecht zur Blechebene (Dickenänderung)

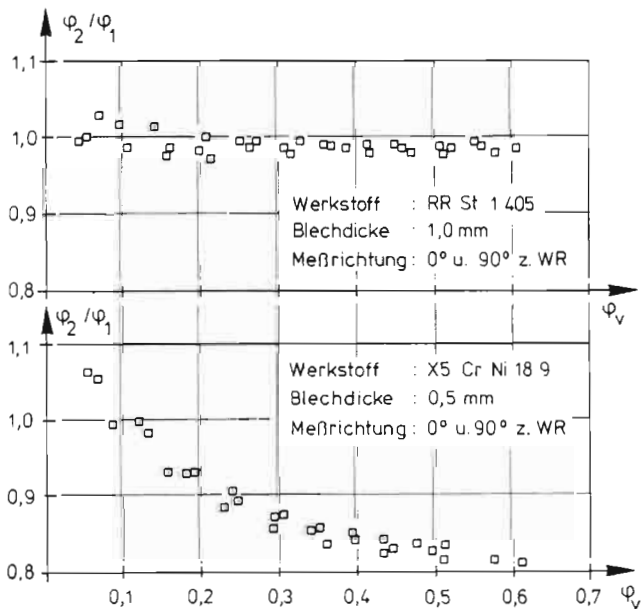


Bild 217

Verhältniszahlen der Hauptdehnungen φ_2/φ_1 beim hydraulischen Tiefungsversuch im Polbereich für den RR ST 1405 und den X5 Cr Ni 18 9 [160].

Bild 218

Bruch- und Gleichmaßdehnung einiger für das Streckziehen verwendeter Werkstoffe [148].

Werkstoff		Gleichmaßdehnung %	Bruchdehnung %
Tiefziehblech		25-35	50-60
C-Stähle			
austentisches		50-60	70-80
Stahlblech			
Messing	weich	45-50	55-70
	hart		10-18
Aluminium	weich	25-30	30-50
	hart		5-10
Al-Legierung	weich	10-30	10-40
	hart		5
Kupfer	weich		38
	hart		5-6
Cu-Legierungen	weich		40-60
	hart		3-5

Bild 219

Werkzeug für den Erichsen-Tiefungsversuch [148].

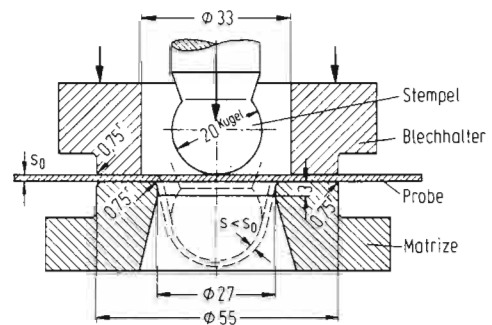
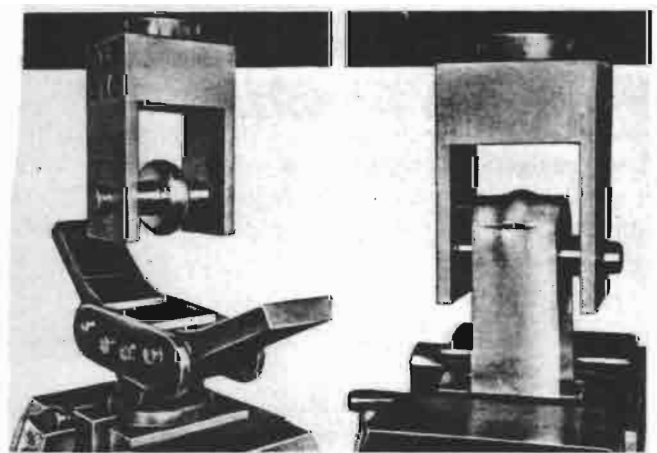


Bild 220

Streckziehprüfung nach Güth [148].



6.3 Über Blechprüfverfahren

Zur quantitativen Ermittlung und Kontrolle verschiedener bei der Verarbeitung, dem Gebrauch und in der Forschung bedeutsamen Eigenschaften von Blechen gibt es eine große Anzahl von Prüfverfahren. Eine ausführliche Darstellung ist insbesondere in [242] enthalten.

fungsversuch nach Erichsen (Bild 219), der hydraulische Tiefungsversuch [160] und die Streckziehprüfung nach Güth (Bild 220). Weitere Angaben sind in [242] und [231] enthalten.

6.3.1 Blechdicke und Mikrogeometrie der Blechoberfläche

Die Dicke ist die wesentlichste Abmessung von Blechen. Durch die Produktion mit Vielwalzengerüsten ist ein Kaltwalzen von Feinblech mit sehr geringen Dickentoleranzen möglich. Zulässige Toleranzen für die Blechdicke sind in den Maßnormen (Tafeln 1 und 2) oder den Werkstoffblättern der Hersteller enthalten.

Die auf die Verarbeitung der Bleche durch Stanzen oder Pressen eingestellten Dickentoleranzen sind so klein, daß sie für die Verwendung von Blech als Membranbaustoff durchaus genügen. Der zur Anwendung kommende zähe Werkstoff kann Dickenabweichungen ohnehin gut kompensieren.

Die Verfahren zur Dickenmessung können unterschieden werden nach der Art des verwendeten physikalischen Prinzips oder danach, ob die Messung von einer Seite durchgeführt werden kann, oder ob auf der Gegenseite ein Stützpunkt erforderlich ist. Eine ganze Gruppe von Meßverfahren dient der Bestimmung der Schichtdicke von Überzügen.

Zur Messung der Dicke an kleinen Proben eignet sich die Mikrometerschraube am besten. Ist die Blechmembran nur von einer Seite zugänglich, so sind Ultraschallverfahren empfehlenswert.

Die Feingestalt der Blechoberfläche kann durch mikroskopische Betrachtung unmittelbar qualitativ und quantitativ beurteilt werden. Zur Messung der Rauigkeit werden Tastschnittgeräte verwendet, bei denen eine sehr spitz geschliffene Saphirnadel (Spitzenradius $R = 0,01\text{mm}$, Kegelwinkel 30°) kleinste Vertiefungen und Erhebungen der Oberfläche abtastet.

6.3.2 Festigkeitseigenschaften und Umformeignung

Zur Bestimmung der Festigkeitseigenschaften von Blechen werden Kenngrößen des Zugversuches (Zugfestigkeit, Streckgrenze, Bruchdehnung und Brucheinschnürung) und die Härteprüfung (Brinell, Vickers, Rockwell) herangezogen. Der Härteversuch wird vorzugsweise beim Sortieren der Stahlsorten auf dem Lager angewandt.

Abgesehen vom Zugversuch, dessen Bedeutung zum Beurteilen der Umformeignung in 6.2.5 erwähnt ist, gibt es eine Gruppe verfahrensbezogener Tests, die die Umformbedingungen des Fertigungsverfahrens in abstrahierter und genormter Weise nachvollziehen. Hierzu gehören der Tie-

Verzeichnis der bisher erschienenen Mitteilungen des SFB 64

1/72	Jahresbericht 1970/71 (Eigenverlag SFB 64, 1972)	18/73 G. Milev	Ausgleichung, Analyse und Interpretation von Deformationsmessungen (Verlag der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München, als Heft 192/Reihe C, Dissertation, 1974)
2/72 G. Brinkmann	Untersuchungen zur Geometrie und Statik gleichmaschiger Netze (Eigenverlag SFB 64, 1972)	19/73 F. Leonhardt, J. Schlaich	Vorgespannte Seilkonstruktionen - Das Olympiadaach in München (Eigenverlag SFB 64, Gebundener Sonderdruck aus „Der Stahlbau“, 1974)
3/72 L. Gründig, U. Hangleiter	Gleichgewichtsberechnungen an einem kleinen Seilnetz - Systematische Experimente mit verschiedenen Berechnungsmethoden (Eigenverlag SFB 64, 1973)	20/74 J. Noesgen	Vorgespannte Seilnetztragwerke - Zum Tragverhalten des quadratischen Netzes mit starrem Rand (Werner-Verlag, Düsseldorf 1976)
4/72 F. Otto	Wandelbare Dächer (Eigenverlag Institut für leichte Flächentragwerke Universität Stuttgart, als IL 5, 1973)	21/82 K. Gabriel, U. Dillmann	Weitgespannte Flächentragwerke - Hochfester Stahldraht für Seile und Bündel in der Bautechnik (Werner-Verlag, Düsseldorf 83)
5/72 H. Altmann	Seilkonstruktionen - Untersuchungen an Klemmen für verschlossene Spiralseile (Werner-Verlag, Düsseldorf 1973)	22/74 G. Mayr	Seilkonstruktionen - Untersuchungen an offenen Spiralseilen (Werner-Verlag, Düsseldorf 1975)
6/73 G. Mayr	Seilkonstruktionen - Untersuchungen an verschlossenen Spiralseilen (Werner-Verlag, Düsseldorf 1974)	23/74	Jahresbericht 1973/74 (Eigenverlag SFB 64, 75)
7/73 G. Mayr	Seilkonstruktionen - Untersuchungen an Netzlitzten, -knoten und -endbeschlägen (Werner-Verlag, Düsseldorf 1975)	24/75 W. Knudson, D. Nagy	Spline-Interpolation and Automatic Generation of Initial Geometry for Cable-Net Structures (Eigenverlag SFB 64, 1975)
8/73 M. Fischer, W. Alda	Versuche zur Ermittlung des Tragverhaltens einer hyperbolischen Paraboloidschale aus einlagigen Trapezprofilblechen (Eigenverlag SFB 64, 1973)	25/75 J.H. Argyris, P.C. Dunne, T. Angelopoulos	The Dynamic Response by Large Step Integration (Eigenverlag SFB 64, 1975)
9/73	Jahresbericht 1972 (Eigenverlag SFB 64, 1973)	26/74 J.H. Argyris, P.C. Dunne, T. Angelopoulos, B. Bichat	Large Natural Strains and Some Special Difficulties Due to Non-Linearity and Incompressibility in Finite Element (Eigenverlag SFB 64, 1975)
10/73 G. Mayr	Untersuchungen an Parallellitzenbündeln (Werner-Verlag, Düsseldorf 1974)	27/75 H. Dirlwanger, E. Geisler	Ein Vergleich der Erlebniswirkung weitgespannter Flächentragwerke, Methoden und Ergebnisse (Eigenverlag SFB 64, 1975)
11/73 R. Bergermann	Untersuchungen an Seilköpfen (Werner-Verlag, Düsseldorf 1974)	28/75	Kolloquium Psychologie und Bauen (Eigenverlag SFB 64, 1975)
12/73 K. Kleinhanß	Beitrag zur Berechnung von Seilen und Seilnetzen mit Berücksichtigung der Theorie II. Ordnung und elastisch nachgiebiger Lagerung (Werner-Verlag, Düsseldorf 1974)	29/75 Gemeinschaftsbericht IMS, IAGB, ISD	Vergleichende Untersuchungen am physikalischen und mathematischen Modell eines vorgespannten Seilnetzes (Eigenverlag SFB 64, 1976)
13/74 U. Otto	Zusammenstellung und Vergleiche rechnerischer Verfahren zur näherungsweise Berechnung vorgespannter Seilnetze (Werner-Verlag, Düsseldorf 1977)	30/75 Institut für leichte Flächentragwerke	Gitterschalen (Eigenverlag Institut für leichte Flächentragwerke Universität Stuttgart, als IL 10, 1975)
14/73 J.H. Argyris, P.C. Dunne	Nichtlineare Schwingungen/Nonlinear Oscillations Using the Finite Element Technique (Eigenverlag Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen, Universität Stuttgart, als ISD-Bericht Nr. 136, 1973)	31/75 H.-W. Reinhardt	Ein- und zweiachsige Verformungs- und Festigkeitsuntersuchungen an einem beschichteten Gittergewebe (Eigenverlag SFB 64, 1975)
15/73 J. Knörzer	Ähnlichkeitsvergleich weitgespannter Flächentragwerke zur Überprüfung erlebensrelevanter Gestaltparameter (Eigenverlag SFB 64, 1973)	32/75	Jahresbericht 1975 (Eigenverlag SFB 64, 76)
16/73 H. Dirlwanger, E. Geisler	Die Wirkung weitgespannter Flächentragwerke auf das Erleben ihrer Nutzer (Eigenverlag SFB 64, 1975)	33/75 N. Bauer	Zur Darstellung von Falten in Membranen mit Hilfe der Methode der finiten Elemente (Eigenverlag SFB 64, 1976)
17/73 M. El-Masri	Theorie und Berechnung nichtlinearer Schwingungen vorgespannter Membrane (Eigenverlag SFB 64, 1974)	34/75 L. Gründig	Die Berechnung vorgespannter Seil- und Hängernetze unter Berücksichtigung ihrer topologischen und physikalischen Eigenschaften und der Ausgleichsrechnung (Eigenverlag SFB 64, 1976)

35/75	M. Fischer, W. Harre	Zur Beul- und Traglast von Scheiben und Schalen aus Trapezprofilblechen (Eigenverlag SFB 64, 1976)	53/79	Patzak, M.	Die Bedeutung der Reibkorrosion für nicht ruhend belastete Verankerungen und Verbindungen metallischer Bauteile des konstruktiven Ingenieurbaus (Eigenverlag SFB 64, 1979)
36/37	Institut für leichte Flächentragwerke	Netze in Natur und Technik (Eigenverlag Institut für leichte Flächentragwerke Universität Stuttgart, als IL 8, 1976)			
37/76	Institut für leichte Flächentragwerke	Wandelbare Pneus (Eigenverlag Institut für leichte Flächentragwerke Universität Stuttgart, als IL 12, 1976)			
38/76	Institut für leichte Flächentragwerke	Multihalle Mannheim (Eigenverlag Institut für leichte Flächentragwerke Universität Stuttgart, als IL 13, 1978)			
39/76	Institut für leichte Flächentragwerke	Anpassungsfähig Bauen (Eigenverlag Institut für leichte Flächentragwerke Universität Stuttgart, als IL 14, 1976)			
40/76	R.K. Müller, S.F. Stierner, L. Wessolly	Modelltechnik für Seilnetze (Eigenverlag SFB 64, 1976)			
41/76	J. Noesgen	Vorgespannte Seilnetztragwerke - zum Tragverhalten des quadratischen Netzes mit elastischem Rand (Werner-Verlag, Düsseldorf 1976)			
42/76	G. Brinkmann	Statische Berechnung von gleichmaschigen Netzen und Membranen auf speziellen Flächen mit Hilfe der Vektoranalysis (Eigenverlag SFB 64, 1977)			
43/77		Jahresbericht 1976/77 (Eigenverlag SFB 64, 1978)			
44/78	U. Nürnberger M. Patzak	Metallische Verankerungen für dynamisch beanspruchte Zugglieder (Eigenverlag SFB 64, 1978)			
45/78	M. Patzak, U. Nürnberger	Grundlagenuntersuchungen zur statischen und dynamischen Belastbarkeit von metallischen Drahtseilvergüssen (Vergußverankerungen) (Eigenverlag SFB 64, 1978)			
46/78	D. Schwenkel	Mathematisch-numerische Methoden zur Approximation und Abbildung der Systemgeometrie weitgespannter Flächentragwerke (Eigenverlag SFB 64, 1978)			
47/78	Institut für leichte Flächentragwerke	Leichtbau und Energietechnik (Eigenverlag Institut für leichte Flächentragwerke Universität Stuttgart, als IL 11, 1978)			
48/78		Jahresbericht 1978 (Eigenverlag SFB 64, 1979)			
49/78	IAGB	Benutzerhandbuch zur Programmbibliothek FASNET (Eigenverlag SFB 64, 1979)			
50/78	ISD	WIDSPAN - Ein Programmsystem zur statischen und dynamischen Berechnung von weitgespannten Flächentragwerken (Eigenverlag SFB 64, 1979)			
51/79	Knudson, W.C., Surya Kumar	Explicit Time Integration Operators for Nonlinear Structural Dynamics (Eigenverlag SFB 64, 1979)			
52/79	Argyris, J.H., Doltsinis, J.S., William, K.J.	New Developments in the Inelastic Analysis of Quasistatic and Dynamic Problems (Eigenverlag SFB 64, 1979)			