



**BAM**

Bundesanstalt für  
Materialforschung  
und -prüfung

Dr.-Ing. Michael Weber

**Strukturspannungsbe-  
rechnung bei zylindrischen  
Behältern mit Aufdachungen  
unter Innendruck**

224

**Forschungsbericht**



Die Aufgaben  
der Bundesanstalt  
stehen unter der Leitlinie:

## **Sicherheit und Zuverlässigkeit in Chemie- und Materialtechnik**

### **Die Aufgaben**

Die BAM hat gemäß ihrem Gründungs-  
erlaß die Zweckbestimmung,  
die Entwicklung der deutschen  
Wirtschaft zu fördern. Sie ist im Auf-  
gabenverbund „Material – Chemie –  
Umwelt – Sicherheit“ zuständig für:

- > Hoheitliche Funktionen zur öffentli-  
chen technischen Sicherheit,  
insbesondere im Gefahrstoff- und  
Gefahrgutrechtsbereich;
- > Mitarbeit bei der Entwicklung ent-  
sprechender gesetzlicher Rege-  
lungen, z. B. bei der Festlegung von  
Sicherheitsstandards und Grenz-  
werten;
- > Beratung der Bundesregierung, der  
Wirtschaft sowie der nationalen und  
internationalen Organisationen im  
Bereich der Materialtechnik und  
Chemie;
- > Entwicklung und Bereitstellung von  
Referenzmaterialien und -verfahren,  
insbesondere der analytischen  
Chemie und der Prüftechnik;
- > Unterstützung der Normung und  
anderer technischer Regeln für die  
Beurteilung von Stoffen, Materialien,  
Konstruktionen und Verfahren im  
Hinblick auf die Schadensfrüher-  
kennung bzw. -vermeidung, den  
Umweitschutz und den Erhalt volks-  
wirtschaftlicher Werte.

### **Die Tätigkeitsbereiche**

Das Tätigkeitsspektrum der BAM um-  
faßt die sich ergänzenden und aufein-  
ander bezogenen Tätigkeiten:

- > Forschung und Entwicklung
- > Prüfung, Analyse und Zulassung
- > Beratung und Information.

### **Die nationale und internationale Zusammenarbeit**

Die Aufgaben der BAM für Technik,  
Wissenschaft, Wirtschaft und Gesell-  
schaft erfordern eine interdisziplinäre  
Zusammenarbeit. Insofern arbeitet die  
Bundesanstalt mit Technologieinsti-  
tutionen des In- und Auslandes,  
insbesondere den nationalen  
Schwesterinstituten, eng zusammen.  
Sie berät Bundesministerien, Wirt-  
schaftsverbände, Industrieunternehmen  
sowie Verbraucherorganisationen und  
unterstützt mit Fachgutachten Verwal-  
tungsbehörden sowie Gerichte.  
Daneben ist sie in die internationale  
technische Zusammenarbeit eingebun-  
den und im Bereich „Meßwesen –  
Normung – Prüftechnik – Qualitätssi-  
cherung“ (MNPQ) als nationale Institu-  
tion für die Prüftechnik zuständig. Die  
Mitarbeiter der Bundesanstalt wirken in  
zahlreichen Fachgremien, gesetzlichen  
Körperschaften und normensetzenden  
Institutionen an der Aufstellung von  
technischen Regeln und Sicherheitsbe-  
stimmungen mit und vertreten die  
Bundesrepublik in nationalen und  
supranationalen Einrichtungen.

### **Der Status**

Die BAM ist als technisch-wissen-  
schaftliche Bundesoberbehörde im  
Geschäftsbereich des Bundes-  
ministeri-ums für Wirtschaft Nachfol-  
geinstitution des 1871 gegründeten  
Staatlichen Materialprüfungsamtes  
sowie der 1920 gebildeten Chemisch-  
Technischen Reichsanstalt (CTR). Sie  
hat dementsprechend die Funktion  
einer materialtechnischen und che-  
misch-technischen Bundesanstalt. In  
ihr sind etwa 1700 Mitarbeiter, darunter  
mehr als 800 Wissenschaftler und In-  
genieure, auf dem Stammgelände in  
Berlin-Lichterfelde sowie auf den  
Zweiggeländen in Berlin-Steglitz und  
Berlin-Adlershof tätig.

Dr.-Ing. Michael Weber

**Strukturspannungsberechnung  
bei zylindrischen Behältern mit  
Aufdachungen unter Innendruck**

**Forschungsbericht 224**

Berlin, 1998

## **Impressum**

Herausgegeben von  
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)  
Unter den Eichen 87, D-12205 Berlin  
Postanschrift: D-12200 Berlin  
Telefon (0 30) 81 04-0  
Telefax (0 30) 8 11 20 29

Copyright © 1998 by BAM

Herstellung und Verlag:  
Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Bürgermeister-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven  
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven  
Telefon (04 71) 9 45 44-0  
Telefax (04 71) 9 45 44 77/88

Umschlag: Lutz Mittenzwei  
Layout: BAM, Referat Z.9

ISSN 0938-5533  
ISBN 3-89701-159-X

# Kurzfassung

Für die Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit von geschweißten Behältern mit Aufdachungen unter Innendruck müssen die Biegezusatzspannungen berechnet oder wirklichkeitsnah abgeschätzt werden. Hierzu können verschiedene Verfahren herangezogen werden, die sich in Aufwand, Genauigkeit und zeitlicher Verfügbarkeit des Ergebnisses unterscheiden und entsprechend beim Entwurf von Behältern, im Betrieb oder im Schadensfall zum Einsatz kommen.

Im vorliegenden Beitrag werden Ansätze von Pich, Zeman, Brocks, IIW und FEM-Berechnungen bezüglich ihrer Methode diskutiert und gegenübergestellt. Pich und FEM arbeiten als „General Purpose“ Verfahren. Zeman entwickelt analytische Lösungen unter speziellen Voraussetzungen zur Behältergeometrie. Brocks schlägt eine einfache Handformel für die schnelle obere Biegespannungsabschätzung vor. IIW stellt eine örtliche Abschätzung mittels Intervallschachtelung durch Randbedingungen zur Verfügung, die geometrisch nichtlineare Korrekturterme enthält. Das Verhalten der Rechenverfahren wird durch Parameterstudien und Zahlenbeispiele an Behältern belegt. Zum Pich-Verfahren wird ein rechenzeitsparender Vereinfachungsvorschlag gemacht. Für das Pich-Verfahren insgesamt (Eingabe, Berechnung, Spannungsausgabe) werden eine VMS-Prozedur und ein Fortran-Code zur Verfügung gestellt.

Für den Benutzer der oben genannten Verfahren ist wesentlich, deren Voraussetzungen, Arbeitsweise und Aussagefähigkeit zu beherrschen. Ihre Anwendung zeigt, daß das mechanische System des Behälters mit Aufdachung sensitiv auf Modellannahmen reagiert.

## Sachworte:

Druckbehälter	Axialversatz
Schweißnaht	Winkelversatz
Aufdachung	Membranspannung
Ovalisierung	Biegespannung
Imperfektion	Strukturspannung

## Abstract

Safety and fitness for purpose of pressurized welded vessels with roof toppings demand the calculations or realistic estimation of additional bending stresses. Different procedures may be attached hereto, which distinguish among effort, accuracy and time schedule for the availability of results. Accordingly these procedures are used for design of the vessels, in action, or in the case of emergency.

The present contribution discusses approaches of Pich, Zeman, Brocks, IIW and FEM-calculation, and compares them by tracing their methods. Pich and the FEM work as general purpose procedures. Zeman develops analytical solutions due to special assumptions for the geometrical vessel shape. Brocks proposes a simple handy formula for the quick upper bound estimation of bending stresses. IIW presents a local estimation using interval bounds spanned by boundary conditions and containing correction terms for geometrical nonlinearity. Parametric studies and numerical vessel examples prove the behaviour of the numerical operators. For the Pich procedure a calculation time saving simplification algorithm is proposed. The Pich procedure in total (input, calculation, stress output) is presented containing a VMS procedure and a Fortran code.

The user of the above mentioned procedures essentially has to master their assumptions, modes of operation and capability of producing valid results. Application shows that the mechanical vessel system with roof topping is sensible to modelling.

## Keywords

Pressure Vessel	Axial Misalignment
Welded Joint	Angular Misalignment
Roof Topping	Membrane Stress
Ovalization	Bending Stress
Misalignment	Structural Stress

Vorwort	7
1 Der Behälter mit Aufdachung	9
1.1 Vorbemerkung	9
1.2 Behälterform und Imperfektion	9
1.3 Beanspruchungsarten	10
1.4 Spannungsverteilungsberechnung	11
1.5 Regelwerke	11
2 Statische Berechnungsmethoden	12
2.1 Vorbemerkung	12
2.2 Klassische Berechnung ideal zylindrischer Behälter	12
2.3 Analytische Berechnung vermessener Behälter nach Pich	13
2.4 Analytische Berechnungen nach Zeman und Böck/Zeman	13
2.4.1 Globale Ovalisierung mit Aufdachung nach Zeman	14
2.4.2 Lokale Betrachtung der Aufdachung nach Böck/Zeman	15
2.5 Abschätzungsformel von Brocks	16
2.6 Abschätzungsformeln des International Institute of Welding	17
2.7 Numerische Berechnung nach der Finite-Elemente-Methode	21
2.8 Numerische Berechnung nach der Randelemente-Methode	21
3 Pich-Verfahren	21
3.1 Vorbemerkung	21
3.2 Theoretische Grundlagen	22
3.3 Behältervermessung und Eingabevorschriften	23
3.4 Verahreigenschaften	24
3.4.1 Entwicklung der geometrischen Nichtlinearität an einem normierten Behälter unter Laststeigerung	25
3.4.2 Güte des Berechnungsverfahrens in Abhängigkeit von der Anzahl Fourierkoeffizienten	25
3.4.3 Verhalten des Vereinfachten Pich-Verfahrens	26
3.5 Spannungsverteilungszahlen in Beispielen	29
4 Finite-Elemente-Analyse	31
4.1 Vorbemerkung	31
4.2 Lineare Analyse Kreis/Tangente-System (LINROOF)	32
4.3 Geometrisch nichtlineare Analyse Kreis/Tangente-System (NONROOF)	33
4.4 Geometrisch nichtlineare Analyse, log. Feinnetzverzierung (NONLOGN)	35
4.5 Geometrisch nichtlineare Analyse, Axialwellenimperfektion (NONWAVE)	36
4.6 Geometrisch nichtlineare Analyse, Zeman-Geometrie (NONZEMN)	37
4.7 Behälter mit Schweißnaht wie bei Schadensfall (WELDSA)	37
4.8 Behälter mit Schweißnaht, innen beschliffen (WELDSB)	38
4.9 Behälter mit Schweißnaht, innen/außen beschliffen (WELDSC)	38
4.10 Schweißnaht innen beschliffen, außen aufgedickt (WELDSD)	39
4.11 Behälter mit Axialversatz abwärts (WELDSE)	39
4.12 Behälter mit Axialversatz aufwärts (WELDSF)	39
4.13 Axialversatz abwärts, innen beschliffen (WELDSG)	39
4.14 Tabellarische Finite-Elemente-Ergebnisse	40
5 Zusammenfassung	41
6 Literatur	42
7 Bezeichnungen	43
8 Anhang	
A 1 Vereinfachungsvorschlag zum Pich-Verfahren	45
A 2 Generierung von Finite-Elemente-Systemen	49
A 3 Prozedur und Programme zum Pich-Verfahren	50





## Vorwort

Der Behälterbau gehört seit dem Beginn der Industrialisierung zu den Standardaufgaben des Maschinenbaus. Aus der Einfachheit der Kesselformel sowie der allgemeinen technischen Entwicklung könnte daher die Schlußfolgerung abgeleitet werden, die Problematik sei heute hinreichend bekannt und beherrschbar. Jedoch zeigen Schadensfälle der Gegenwart und deren Diskussion, daß offenbar unbeherrschte Risiken in der Thematik liegen, die unmittelbaren Bedarf nach zusätzlicher Klärung von Einzelfragen und Erarbeitung sicherer Nachweismethoden nach sich ziehen.

Zum Teil werden die Probleme durch den im Wettbewerb liegenden Zwang zur Wirtschaftlichkeit verursacht, so daß man nicht sagen kann, die Schwierigkeiten entstünden primär aus mangelhafter Kenntnis physikalischer Zusammenhänge, unbekannter oder allzusehr schwankender Materialkennwerte und ggf. unzureichender mathematischer Berechnungsmöglichkeiten. Defizite dieser Art können vielmehr dann auftreten, wenn aus wirtschaftlichen Überlegungen Toleranzen durch Heranführen an Grenzbeanspruchungen aufgezehrt, versteckte Reserven ausgeschöpft und Sicherheitsfaktoren gesenkt werden sollen. Dies kann eine Erhöhung des Gefährdungspotentials vor allem dann zur Folge haben, wenn solchen Überlegungen unterzogene technische Systeme nicht-redundantes statisches Tragverhalten aufweisen. Bei Druckbehältern ist das in der Regel der Fall.

Der Zwang zur Wirtschaftlichkeit führt zu dem Bestreben, arbeitsintensive Schritte bei der Behälterfertigung zu vermeiden. Hieraus resultiert unter Umständen die Entscheidung, die imperfekt bleibenden Enden rundgewalzter Bleche nicht abzuschneiden, was auch zu Materialabfall führen würde, sondern stattdessen die Imperfektion im Rahmen gewisser Toleranzen bewußt zuzulassen und deren Wirkung rechnerisch nachzuweisen. Ist man sich prinzipiell über solches Vorgehen einig, bleibt die Frage nach dem Setzen der Maßstäbe, welche Toleranzen denn wohl akzeptabel sein könnten. Die Ergebnisse der Erörterung fließen dann in Empfehlungen, Richtlinien, Merkblätter und Normen ein, an denen sich Hersteller bei ihren Entwürfen und Produktionsverfahren orientieren. Für Betreiber von Behältern gelten sinngemäß die Betriebsbedingungen zu Be- und Entladungsvorgängen, Füllmenge, Anzahl der Lastspiele, stationärer Betrieb oder Behältertransport.

Die im vorliegenden Bericht behandelten Rechenverfahren und ihre Anwendung auf zylindrische Druckbehälter mit Aufdachung sollen zum einen derzeit übliche rechnerische Ansätze vergleichend vorstellen, zum anderen soll dem Leser das Verständnis des Systemverhaltens dieses Behältertyps nahegebracht werden, indem einige typische mechanische Eigenschaften sowohl im Gesamtsystem als auch in kritischen örtlichen Bereichen herausgearbeitet werden.

*Der Bericht entstand während meiner Tätigkeit im Laboratorium "Betriebsfestigkeit, Maschinenelemente". Ich danke meinen Kollegen für interessante Diskussionen und Anregungen zur Thematik. Die Art der Rückfragen zum Verständnis des mechanischen Systems haben mir gezeigt, wie sehr die gemeinsame Ingenieursprache bei interdisziplinär-arbeitsteiliger Zusammenarbeit der bindenden Klammer durch solche Gespräche bedarf, damit die zu vermittelnden technischen Aussagen am Ende auch diejenigen Adressaten erreichen können, für die sie gedacht sind.*

*Die rechnerischen Analysen wurden mit verschiedenen Ressourcen auf PC, AXP und CRAY durchgeführt, wo neben eigener Programmierung u. a. mit den FE-Programmen TPS10, NASTRAN und ABAQUS gerechnet und gegengerechnet wurde. Ich danke den Mitarbeitern des BAM-Rechenzentrums für wertvolle Service-Leistungen sowie der Zeichnerie und dem Fotolabor für sorgfältige Gestaltung.*

M. Weber



# 1 Der Behälter mit Aufdachung

## 1.1 Vorbemerkung

Ein zylindrischer Behälter mit Aufdachung entsteht durch Walzen eines ebenen Blechs in die Zylindergestalt (siehe Abb. 1.1), wobei die Blechenden aus Fertigungsgründen nicht die ideale zylindrische Krümmung bekommen, sondern unverformt bleiben. Werden diese Blechenden miteinander verschweißt, so entsteht ein sogenannter Aufdachungsbereich (siehe Abb. 1.4).

Behälter dieses Typs entwickeln unter hydrostatischem Innendruck in der Umgebung der Schweißnaht Biegespannungen, die sich der Membranspannung überlagern und auf der Innenseite im Schweißnahtbereich Zugspannungsspitzen hervorrufen.

Aufgrund eines vor einiger Zeit eingetretenen Schadensfalles [18] wurde die Diskussion um diesen Behältertyp neu entfacht. Dabei ist wesentlich, daß eine Vielzahl solcher Behälter in der Vergangenheit gebaut wurde, zu denen aktuell die sicherheitsrelevanten Aussagen überprüft werden müssen. Es geht einerseits um die Betriebsfestigkeitsfrage auf der Grundlage zuverlässiger rechnerischer Nachweise, andererseits um mögliche Folgerungen für den Umgang mit dem vorhandenen Inventar dieser Behälter, eventuelle Forderungen an die Betreiber und ggf. Regelwerksüberarbeitungen.

Das mechanische Verhalten dieses Behältersystems stellt sich bei näherem Hinsehen als keineswegs trivial dar. Äußerlich mag zunächst der Eindruck entstehen, daß die Abweichung von der Zylindergestalt eine Imperfektion kleinerer Größenordnung darstellt, während das Haupttragverhalten des Druckbehälters weiterhin mit der klassischen

Kesselformel erfaßt werden kann. Greift man jedoch zu verschiedenen bereits vorgeschlagenen Rechenoperatoren, die sich mit der Abschätzung des Einflusses der Imperfektion befassen, so zeigt sich, daß die erhaltenen Ergebnisse in hohem Maße schwanken. Die Ergebnisse reagieren empfindlich auf geringfügige Abweichungen in den approximativen Systemannahmen, die sowohl in der Art der Koordinatenbestimmung (messen, schätzen, rechnerisch interpolieren, Annahme idealisierter Ersatzsysteme) als auch in den unterschiedlichen Formelansätzen begründet sein können.

Für die mit der Problemstellung befaßten Experten besteht der Wunsch nach einer „griffigen“ Formel, die sich durch leichte Handhabung bei gleichzeitiger Zuverlässigkeit auszeichnet. In der Praxis zeigt sich aber, daß vorgeschlagene einfache Rechenverfahren entweder sehr konservativ sind, woraus unrealistisch hohe Forderungen an den Behälter, z. B. Nachbehandlung der Schweißnaht, oder Betriebseinschränkungen gestellt werden könnten. Oder aber die Formeln verharmlosen das Problem, indem eine erhaltene gutmütige rechnerische Aussage physikalisch nicht belegt ist. Wird nun der Ausweg in einem „General Purpose“ Rechenverfahren gesucht, so zeigt sich, daß der darin liegende größere Aufwand erst dann zu befriedigenden Resultaten führen kann, wenn entweder treffsichere Vorkenntnisse zum Systemverhalten des Behälters mit Aufdachung genutzt werden, oder mit Hilfe von geometrischen Parametervariationen die spezielle Eigenart eines bestimmten Objektes herausgearbeitet und gleichzeitig eingegrenzt wird.

## 1.2 Behälterform und Imperfektion

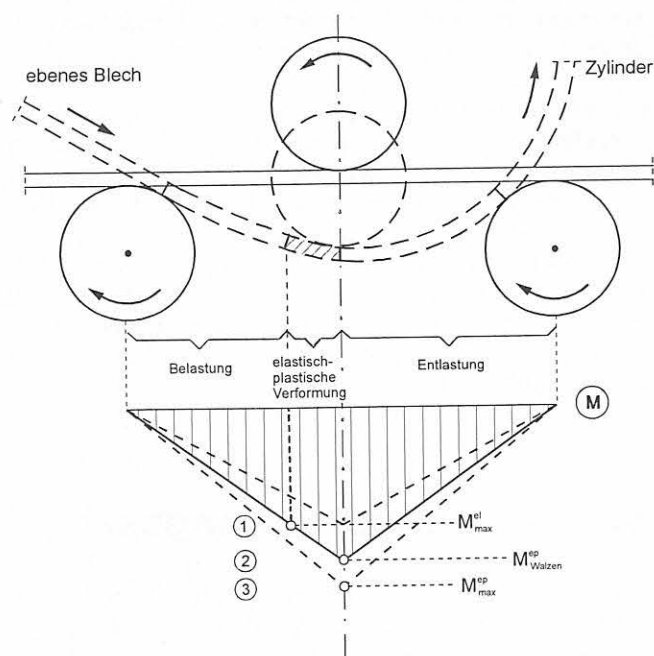


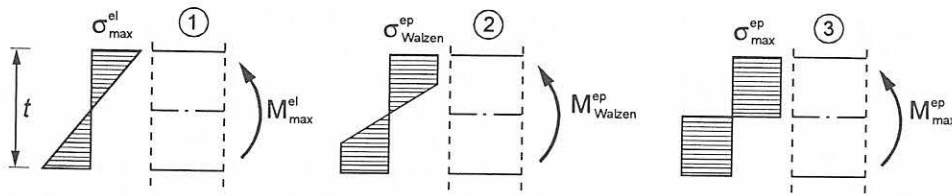
Abb. 1.1  
Walzvorgang (Prinzip) und Biegemomente bei der Herstellung zylindrischer Behälter

Die Form des zylindrischen Behälters mit Aufdachung entsteht durch Walzen eines ebenen Blechs in die Zylindergestalt (siehe Abb. 1.1 bis 1.4). Dabei üben drei Walzen, zwischen denen das Blech durchläuft, ein Biegemoment mit plastischen Anteilen auf den durchlaufenden Blechbereich aus (Abb. 1.1). Das Biegemoment soll zum Verständnis des Vorgangs hier vereinfacht als dreiecksförmig mit Spitzenwert an der mittleren Walze angenommen werden. Läuft ein bestimmter Querschnitt des Blechs, den der Beobachter verfolgt, in den Walzenbereich hinein, so steigt seine Biegespannung kontinuierlich an und stößt an die Fließgrenze. Für die dann folgende Spannungumlagerung wird hier der Einfachheit halber bilineares Verhalten (ideal-elastisch/ideal-plastisch) angenommen. So entsteht ein gemischt elastisch-plastischer Verlauf, der je nach Walzensystem bis zum vollplastischen Moment gehen kann. Dem Blech wird die gewünschte bleibende Verformung eingepreßt. Nach Passieren der mittleren Walze wird das Blech entlastet. Sein Biegemoment geht auf Null zurück, während die bilinear ausgeprägte Spannung nach Entlastung Eigenspannungen hinterläßt.

Der Walzvorgang macht deutlich, daß diejenigen Blechbereiche, die vollständig durchlaufen, gleiche bleibende Ver-

Elastische Biegung :

Elastisch-vollplastische Biegung :



$$M_{\max}^{\text{el}} = \sigma_{\max}^{\text{el}} \cdot \frac{t^2}{6}$$

$$M_{\max}^{\text{ep}} = \sigma_{\max}^{\text{ep}} \cdot \frac{t^2}{4}$$

$$M_{\max}^{\text{el}} < M_{\text{Walzen}}^{\text{ep}} \leq M_{\max}^{\text{ep}}$$

Abb. 1.2  
Elastische, elastisch-vollplastische und gemischte Biegung beim Walzen

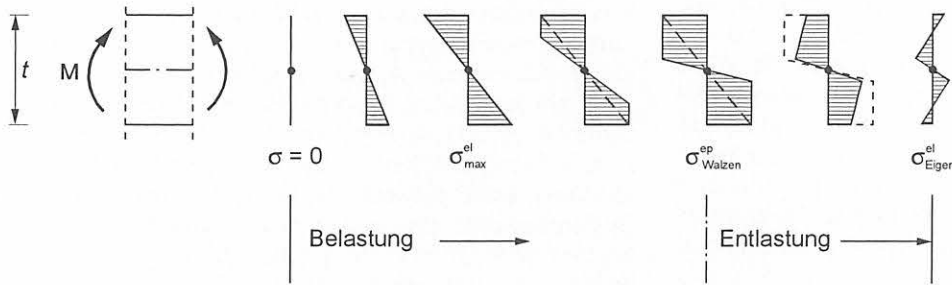


Abb. 1.3  
Spannungsentwicklung beim (ersten) Walzvorgang zur Herstellung zylindrischer Behälter

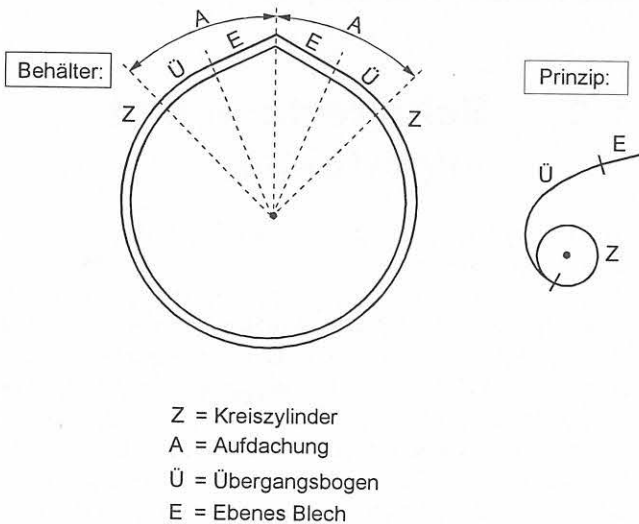


Abb. 1.4  
Behälter mit Aufdachung

Es liegt beim Hersteller, ob die Blechenden einschließlich der Übergangszonen vor der exakten Zylindergestalt abgeschnitten und nur exakt zylindrische Abschnitte zu einem Behälterteil zusammenschweißt werden. Wird auf ein Abschneiden verzichtet oder diesbezüglich ein ökonomischer Kompromiß gesucht, so entsteht die Aufdachung als bleibende geometrische Imperfektion.

In der Praxis weisen Behälter im allgemeinen noch weitere Imperfektionen auf, z. B. Ovalisierungen oder örtliche Einbeulungen. Des weiteren liefert die Schweißnaht selbst Quellen für die Entstehung örtlicher Imperfektionen. Dies betrifft vor allem die vom Nahttyp abhängigen Oberflächenwulstformen, Einbrandkerben, Lunker, Schlackeneinschlüsse, eventuelle Nachbearbeitungen oder den Verzicht hierauf. Die Schweißnaht zieht mögliche Spannungsprobleme an sich, wenn zusätzlich axiale Imperfektion über die Umfangsrichtung auszugleichen ist.

formung bekommen (konstante Krümmung), was die Zylindergestalt ergibt. Diejenigen Blechbereiche aber, die nur in die erste Hälfte des Drei-Walzensystems einlaufen, bleiben zu Anfang rein elastisch beansprucht (reversible Verformung), um dann in die ansteigende elastisch-plastische Verformung einzumünden, die an der Mittelwalze ihr Maximum erreicht. Die bleibende Verformung baut sich also längs des Bleches von Null auf ihren Endwert auf (ansteigende Krümmung). Dieser Bereich bildet einen Übergangsbogen zwischen dem ebenbleibenden und dem zylindrisch gewalzten Blech (siehe Abb. 1.4).

### 1.3 Beanspruchungsarten

Die Hauptbeanspruchung des Behälters folgt aus hydrostatischem Innendruck. Dieser schwankt mit dem Füllungsgrad des Behälters und ist unter Lastwechselgesichtspunkten zu behandeln. Die Anzahl der Lastwechsel in Verbindung mit der Lasthöhe ist Gegenstand von Betriebsfestigkeitsbetrachtungen. Die hydrostatische Belastung selbst wird rechnerisch als statischer Lastfall behandelt.

Soweit Spannungsspitzen durch örtliche Imperfektionen hervorgerufen werden, können auch örtliche Plastizierungen unterstellt werden, die die Spannungsspitzen dann kappen und örtliche Umlagerungen im Gesamtspannungsprofil bewirken. Diese zeigen bei vollständiger Entlastung dann Eigenspannungen in der Umgebung der örtlichen Imperfektion. Da sich die plastischen Umlagerungen im wesentlichen bereits in den ersten Lastwechseln einstellen, bleiben nachfolgende Lastwechselbeanspruchungen (steigender und fallender hydrostatischer Innendruck) weitgehend elastisch. Die Lastwechsel können zu Rißentstehung und Rißfortschritt führen, die unter bruchmechanischen Kriterien zu behandeln sind.

Weitere Beanspruchungen können durch chemische Einwirkung auf die Innenoberfläche des Behälters entstehen – insbesondere, wenn im Bereich von Einbrandkerben oder Anrissen unter Wasserstoff Spannungsrißkorrosion induziert wird, siehe hierzu ein Schadensfall [18], [19], [20]. Bei der sicherheitsrelevanten Beurteilung der Beanspruchungen von Behältern unter Innendruck ist daher der chemisch-zeitliche Einfluß auf Veränderungen der Struktur zu beachten. Hierbei nimmt die Berechnung globaler und lokaler Strukturspannungen den Stellenwert eines „Schnapschusses“ innerhalb eines langzeit-transienten Vorganges ein.

## 1.4 Strukturspannungsberechnung

Definiert man für einen perfekt kreiszylindrischen Behälter die Membranspannungen in Umfangsrichtung aus Innendruck als „Nennspannungen“, so liegt es nahe, die aus einer Ovalisierung und/oder Aufdachung entstehenden Biegezusatzspannungen den Membranspannungen zu überlagern und das Ergebnis für die Definition von „Strukturspannungen“ zu verwenden. Das Verhältnis von beiden ergibt die „Strukturspannungsformzahl“:

$$\begin{aligned} \text{Nennspannung: } & \sigma_{pu} \quad (\text{Membranspannung in Umfangsrichtung}) \\ & \sigma_b \quad (\text{Biegezusatzspannung in Umfangsrichtung}) \\ \text{Strukturspannung: } & \sigma_{pu} + \sigma_b \\ \text{Strukturspannungsformzahl: } & K_t = (\sigma_{pu} + \sigma_b) / \sigma_{pu} \quad (1.4-1) \end{aligned}$$

Die Strukturspannungsverteilung über den Behälterumfang gibt einen Überblick über möglicherweise kritische Stellen des Systems. Bei Behältern mit Aufdachungen ist es der Scheitelpunkt, an dem die Biegezusatzspannungen ihr Maximum haben (siehe Abb. 1.5) und die Strukturspannungsberechnung dort Grundlage aller nachfolgenden Überlegungen wird. An dieser Stelle liegt der Querschnitt der Längsschweißnaht des zylindrischen Behälters.

Strukturspannungen sind nicht Spitzenspannungen, die etwa an der Schweißnahtübergangskerbe oder durch Einbrandkerben entstehen. Wirkungen örtlicher Plastizierungen bleiben ebenfalls unberücksichtigt. Dagegen zeigt sich, daß das mechanische Verhalten des Behälters mit Aufdachung in hohem Maße durch geometrisch nichtlineare Verformungen

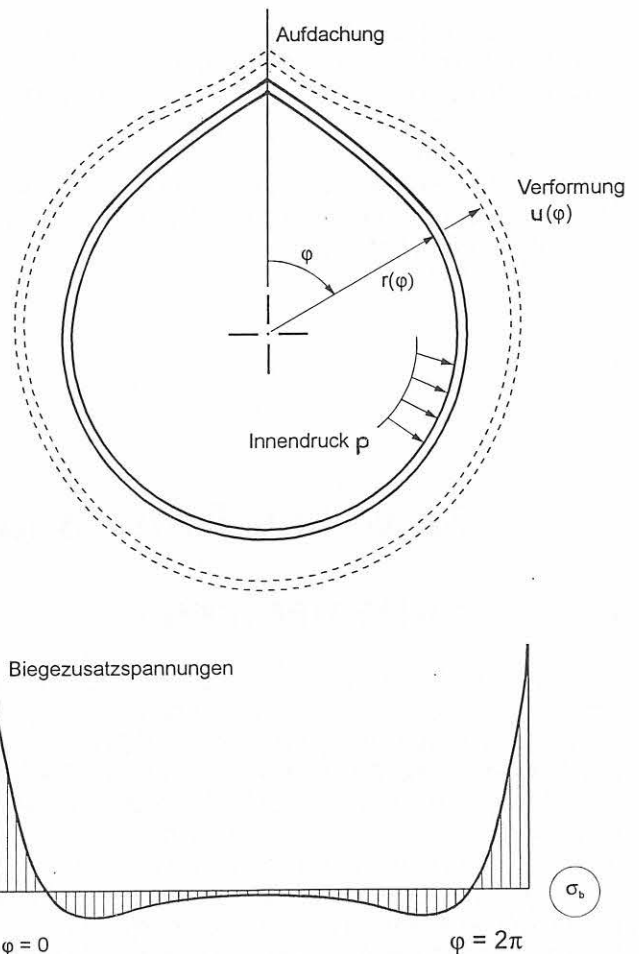


Abb. 1.5 Behälter mit Aufdachung, Verformung unter Innendruck, Biegezusatzspannungen mit Spannungsspitze

bestimmt ist, die mit der Höhe der Belastung aus Innendruck korrespondieren. Insofern werden die im Rahmen der nachfolgenden Untersuchungen berechneten Strukturspannungsformzahlen zu belastungsabhängigen Größen.

## 1.5 Regelwerke

Von der Arbeitsgemeinschaft „Druckbehälter“ werden die AD-Merkblätter herausgegeben [22], [23], [24], die für zyklisch beanspruchte Druckbehälter von Bedeutung sind. Im Gegensatz zu anderen Regelwerken (z. B. KTA-Regeln), die neben bestimmungsgemäßem Betrieb auch Störfall- und Prüfzustände behandeln, befaßt sich das AD-Regelwerk ausschließlich mit normalen Betriebszuständen.

So regelt AD-Merkblatt HP1 [22] Fragen zu Auslegung und Gestaltung von Druckbehältern, Einzelheiten zu Aufdachungen, Einziehungen (negative Aufdachungen) und örtlichen Wanddickenunterschreitungen. Im AD-Merkblatt S1 [23] werden ruhende Belastung und Schwelldruckbeanspruchung gegeneinander abgegrenzt. Dabei werden konstruktive, fertigungstechnische und prüftechnische Voraussetzungen behandelt. AD-Merkblatt S2 [24] befaßt sich mit Berechnung auf Schwingbeanspruchung. Maßgeblicher Beanspruchungskennwert ist die pseudoelastische Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma = 2 \cdot \sigma_a$  bei ein- bzw. mehrachsiger

Beanspruchung. Zusätzlich werden Einflüsse aus der Bauteiloberfläche und der Schweißnahtform, aus regelloser Schwingbelastung (Lastkollektive) und aus Temperatur berücksichtigt.

In [18] wird im Rahmen der Diskussion eines Schadensfalles die Auslegung und Herstellung von Druckbehältern nach dem AD-Regelwerk behandelt.

Die im vorliegenden Bericht dargestellten Berechnungsverfahren sind prinzipiell zunächst einmal unabhängig vom AD- oder anderen Regelwerken, da ihre mathematischen und physikalischen Voraussetzungen regelwerksneutral sind. Der Bezug zum Regelwerk wird dann hergestellt, wenn rechnerische Ergebnisse geeignet erscheinen, in dort aufgestellte Bedingungen einzufließen. Durch die Regelwerksunabhängigkeit wird aber ein Freiraum eröffnet, rechnerisch Szenarien nachzustellen, die im Regelwerk nicht vorkommen, um so in eine Diskussion über Regelwerksänderung oder Ergänzung einzutreten.

## 2 Statische Berechnungsmethoden

### 2.1 Vorbemerkung

Die statischen Berechnungsmethoden umfassen eine Palette von Möglichkeiten, die sich hinsichtlich des Ansatzes, des Umfanges, der benötigten Hilfsmittel sowie der Aussagefähigkeit der Ergebnisse sehr voneinander unterscheiden. Begrifflich wird hier zwischen der Methode an sich (mathematisch/mechanischer Ansatz) sowie dem auf der Methode beruhenden Verfahren (Rechenvorschrift) unterschieden. Der Anwender hat vor der Wahl des Verfahrens zu klären, wie schnell eine Aussage verlangt wird, ob eine Überschlagsrechnung ausreicht oder ein präzises Ergebnis unverzichtbar ist sowie, ob die ggf. benötigten Hilfsmittel für die Berechnung zur Verfügung stehen.

Insofern werden die in den folgenden Abschnitten vorgestellten Möglichkeiten hinsichtlich vereinfachter Berechnungsformeln, analytisch geschlossener, programmierbarer Formeln und den numerischen Methoden unterschieden. Die jeweilige Aussagekraft wird anhand der gemachten Voraussetzungen erörtert.

Im aktuellen Anwendungsfall werden in der Regel mehrere Rechenpfade parallel beschriftet werden, um die Ergebnisse gegenseitig abzusichern.

### 2.2 Klassische Berechnung ideal zylindrischer Behälter

Die klassische Behälterberechnung nach der Kesselformel liefert Membranspannungen unter der Annahme ideal zylindrischer, dünnwandiger Behälter. Die Kesselformel liegt in zwei Teilen vor. Mit ihr lassen sich Lösungen in Umfangsrichtung und in Axialrichtung des an den Enden geschlossenen Behälters angeben:

$$\sigma_{pu} = p \cdot r / s \quad (2.2-1)$$

$$\sigma_{pa} = p \cdot r / (2 \cdot s) \quad (2.2-2)$$

mit den Parametern:

$\sigma_{pu}$	=	Kessel-Membranspannung in Umfangsrichtung,
$\sigma_{pa}$	=	Kessel-Membranspannung in Axialrichtung,
$p$	=	Hydrostatischer Behälter-Innendruck,
$r$	=	Behälterradius,
$s$	=	Wanddicke des Behälters.

Die Formel dient (insbesondere auch in Gegenüberstellung zu höherwertigen Rechenoperatoren) als Faustformel für Überschlagsberechnungen, die sich zur ersten Plausibilitätsprüfung anderweitig ermittelter Ergebnisse eignen.

Ist bei einer Strukturspannungsanalyse nicht sofort erkennbar, ob die berechneten Spitzenspannungen stimmen können, so ergibt sich im abgeklungenen Bereich in einiger Entfernung von der Aufdachung, wo Konvergenz gegen die Membranspannungen herrschen muß, die erforderliche Plausibilität durch Gegenüberstellung mit der Kesselformel.

Es sei noch darauf hingewiesen, daß bei Zweifeln an der Zulässigkeit der Annahme der Dünnwandigkeit eines Behälters mit analytischen Formeln für dickwandige Behälter nach Lamé abgeschätzt werden kann, wie groß der durch die Annahme bedingte Fehler zwischen dünnwandigen und dickwandigen Behältern wird:

$$\sigma_{pu} = p \cdot r_i^2 / (r_a^2 - r_i^2) \cdot (1 + r_a^2 / r^2) \quad (2.2-3)$$

$$\sigma_{pr} = p \cdot r_i^2 / (r_a^2 - r_i^2) \cdot (1 - r_a^2 / r^2) \quad (2.2-4)$$

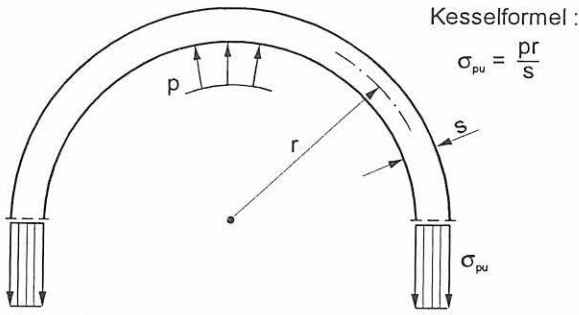
$$\sigma_{pa} = p \cdot r_i^2 / (r_a^2 - r_i^2) \quad (2.2-5)$$

wobei:

$\sigma_{pu}$	=	Kessel-Spannung in Umfangsrichtung,
$\sigma_{pr}$	=	Kessel-Spannung in Radialrichtung,
$\sigma_{pa}$	=	Kessel-Spannung in Axialrichtung,

$p$	=	Hydrostatischer Behälter-Innendruck,
$r_a$	=	Behälter-Außenradius,
$r_i$	=	Behälter-Innenradius,
$r$	=	Ortsabhängiger Behälterradius (Zylinderkoordinaten).

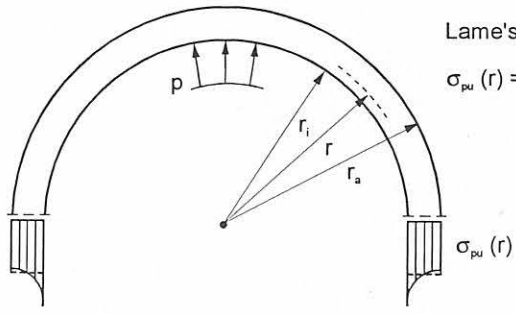
Der nicht-konstante Spannungsverlauf in Umfangsrichtung (siehe Abb. 2.2) kann bei Vergleich mit einem solchen nach der Balkentheorie grob in die Summe eines konstanten Membranspannungsanteils und eines überlagerten Quasi-Biege-



Kesselformel :  

$$\sigma_{pu} = \frac{pr}{s}$$

Abb. 2.1  
 Umfangsspannungen nach der Kesselformel für dünnwandige Behälter



Lame'sche Formel :  

$$\sigma_{pu}(r) = \frac{pr_i^2}{r_a^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_a^2}{r^2}\right)$$

Abb. 2.2  
 Umfangsspannungen nach der Lame'schen Formel für dickwandige Behälter

terms eingeteilt werden. Je dünnwandiger der Behälter, desto kleiner dieser Quasi-Biegeterm, und desto mehr konvergieren die Spannungen gegen die Werte der Kesselformel (siehe Abb. 2.1).

Die Vergleichsberechnung mit den Lame'schen Formeln sollte dann angestellt werden, wenn etwa bei einer Spannungsmessung an einem von der Zylinderform durch Imperfektion abweichenden Behälter (z. B. über DMS innen und außen messend und anschließend nach dem 3D Hooke'schen Gesetz daraus ableitend) echte Biegespannungen gegen etwaige Dickwandigkeitseinflüsse abgegrenzt werden müssen.

### 2.3 Analytische Berechnung vermessener Behälter nach Pich

Von Pich (siehe [3]) wurde eine Formel vorgeschlagen, die sich als praxisgeeignet bewährt hat und heute bei Behälterberechnungen insbesondere zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit von unrunder Behältern zum Einsatz kommt.

In dieser Formel wird der Behälter unter Innendruck als zweidimensionales System in seiner Querschnittsebene (Ebener Spannungszustand) formuliert. In der Formel vereinigen sich die klassische Theorie des gekrümmten Balkens kleiner Verformung nach Boussinesq (siehe Timoshenko/Lessels [1]), ein Ansatz von Schmidt [2] für die Beschreibung Sinus- bzw. Kosinus-förmiger Ovalitäten, sowie in systematischer Ausnutzung dieser Ansätze die Möglichkeit der Überlagerung und Approximation einer beliebigen Behälterquerschnittsgeometrie mittels Fourier-Analyse in Polarkoordinaten (siehe

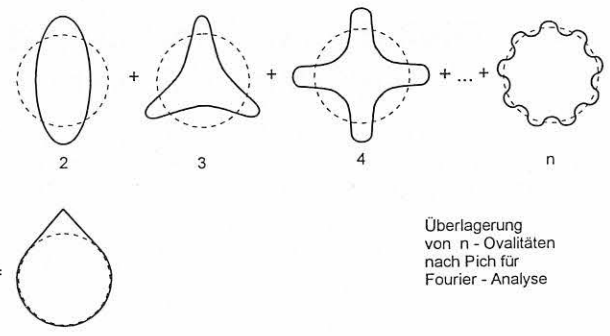
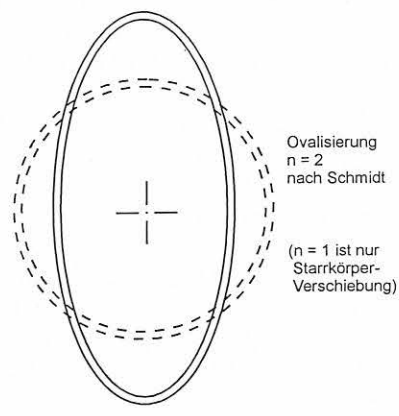


Abb. 2.3  
 Prinzip des Pich-Verfahrens für die Beschreibung beliebig unrunder Behälter

Abb. 2.3). Aus den Fourierkoeffizienten werden als geometrisch nichtlineare Lösung die Umfangsspannungen berechnet [3], [4], [5].

Der große Vorteil dieses analytischen Verfahrens liegt darin, daß die Lösung mit geometrischer Nichtlinearität wegen der Geschlossenheit der Formel in einem Rechenschritt erhältlich ist.

In Abschnitt 3 wird das Pich-Verfahren näher beschrieben und an Beispielen gezeigt, worin seine typischen Merkmale bestehen. Im Anhang A1 wird ein rechnerischer Vereinfachungsvorschlag gemacht, der ohne signifikanten Genauigkeitsverlust deutlich schneller zum Ergebnis führt.

### 2.4 Analytische Berechnungen nach Zeman und Böck/Zeman

Für den zylindrischen Behälter mit Aufdachung unter Innendruck machen Zeman [6], [7] und Böck/Zeman [8] Vorschläge zur analytischen Lösung des geometrisch nichtlinearen Spannungsproblems. Als Ursache für das Auftreten der Imperfektion betrachtet Zeman einerseits unkorrektes Auswalzen der Blechenden – dieser Effekt wird als „lokal“ bezeichnet –, andererseits unkorrektes Schweißen der schließenden Naht, dessen Auswirkung auf den Behälter mit „global“ bezeichnet wird. Letzteren Herstellungsfehler hält Zeman für wahrscheinlicher als den ersteren.

Geometrisch betrachtet meint „lokale“ Aufdachung ein Kreis/Tangente-System, das in der Regel auch bei Vermessung eines Aufdachbereiches unterstellt wird. Die mit „global“ bezeichnete Imperfektion führt dagegen zu einer Ovalisierung des Behälters, die stetig über den gesamten Behälterquerschnitt verteilt ist und in einer Aufdachungsspitze mündet.

Für beide Arten der Aufdachung werden Formeln für Korrekturfaktoren angegeben, mit denen die Maximalmomente nach Theorie 2. Ordnung (geometrische Nichtlinearität) abzuschätzen sind. Die Korrekturfaktoren beginnen bei Eins (Theorie 1. Ordnung) und fallen mit steigender Belastung durch Innendruck entsprechend dem geometrisch nichtlinearen Verhalten des Behältersystems.

### 2.4.1 Globale Ovalisierung mit Aufdachung nach Zeman

Kern der analytischen Betrachtung einer „globalen“ Unrundheit (Ovalisierung mit Aufdachung) ist der Geometrie- und Verformungs-Ansatz (siehe Abb. 2.4):

$$w = d \cdot (1 + \cos(\theta) - \theta \cdot \sin(\theta)) / 2 \quad (2.4-1)$$

Hierin sind:

$w$  = Geometrische Abweichung des Behälterquerschnitts von der idealen Kreisform in polaren Koordinaten, im verformten Zustand unter Belastung, wobei:

- $w$  =  $w_i + w_q$ ,
- $w_i$  = unbelasteter Anfangszustand,
- $w_q$  = Verformung unter Belastung,
- $d$  =  $w_0$  = Maximalwert bei Winkel  $\theta = 0$  (Starrkörperverschiebung),
- $\theta$  = Winkel, Koordinate im Polarsystem,  $-\pi < \theta < \pi$ . (Die Aufdachungsspitze liegt bei  $-\pi$  bzw.  $\pi$ .)

Mit diesem Geometrieansatz löst Zeman die Differentialgleichung:

$$w_q'' + k^2 \cdot w_q = K \cdot m \quad (2.4-2)$$

mit den Parametern:

$$k^2 = 1 - K \cdot p \cdot R, \quad (2.4-3)$$

$$K = R^2 \cdot (1 - \mu^2) / (E \cdot I), \quad (2.4-4)$$

Schalenparameter,

$R$  = Sollradius,

$E$  = E-Modul,

$$I = t^3 / 12, \quad (2.4-5)$$

Trägheitsmoment bezogen auf axiale Längeneinheit des Behälters,

$t$  = Blechdicke des Behälters,

$\mu$  = Querkontraktion,

$p$  = Behälter-Innendruck,

$m$  =  $m(\theta)$ , Biegemoment in der Behälterwand.

Für das maximale Biegemoment in der Aufdachungsspitze an der Stelle  $\theta = \pi$  führt Zeman den Unterschied zwischen Ergebnis nach Theorie 1. und 2. Ordnung ein:

$$m_{\max}^{(2)} = CF^{(2)} \cdot m_{\max}^{(1)} \quad (2.4-6)$$

mit:

$m_{\max}^{(1)}$  = max. Biegemoment nach Theorie 1. Ordnung,

$m_{\max}^{(2)}$  = max. Biegemoment nach Theorie 2. Ordnung,

$CF^{(2)}$  = Korrekturfaktor mit Fallunterscheidung  $CF^{(2)} = C_1$  oder  $C_2$ .

Im Ergebnis erhält Zeman die Momentenformeln:

$$\begin{aligned} m_{\max}^{(1)} &= 3/4 \cdot p \cdot R \cdot d, \\ m_{\max}^{(2)} &= C_1 \cdot m_{\max}^{(1)} \quad \text{für } k^2 = 1 - K \cdot p \cdot R, \\ &\quad K \cdot p \cdot R < 1, \\ m_{\max}^{(2)} &= C_2 \cdot m_{\max}^{(1)} \quad \text{für } k^2 = K \cdot p \cdot R - 1, \\ &\quad K \cdot p \cdot R > 1, \end{aligned} \quad (2.4-7)$$

mit den Korrekturfaktoren:

$$\begin{aligned} C_1 &= 4/3 \cdot H_1, \\ C_2 &= 4/3 \cdot H_2, \end{aligned} \quad (2.4-8)$$

$$H_1 = 1/2 - \pi / (2 \cdot k) \cdot \cot(k \cdot \pi) - (k^2 - 1) / (2 \cdot k^2) + 1 / (k^2 - 1),$$

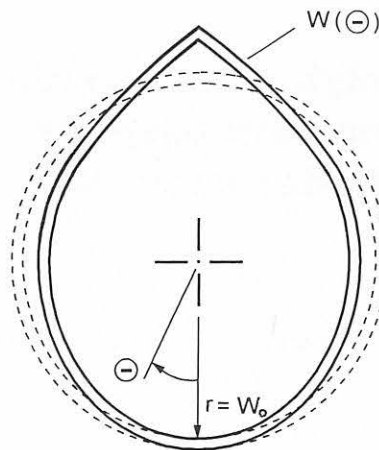
$$H_2 = 1/2 + \pi / (2 \cdot k) \cdot \coth(k \cdot \pi) - (k^2 + 1) / (2 \cdot k^2) - 1 / (k^2 + 1). \quad (2.4-9)$$

Bei der Ermittlung der Strukturspannungsformzahl sind aus diesen Biegemomenten die Biegezusatzspannungen zu berechnen und den Membranspannungen zu überlagern:

$$\begin{aligned} K_t &= 1 + \frac{\sigma_b}{1 + (6 \cdot m_{\max}^{(2)} / t^2)} \cdot \frac{1}{\sigma_n} \\ &= \frac{1 + \sigma_b}{1 + (6 \cdot m_{\max}^{(2)} / t^2)} \cdot \frac{1}{p \cdot R / t} \end{aligned} \quad (2.4-10)$$

mit:

- $K_t$  = Strukturspannungsformzahl,
- $\sigma_n$  = Membranspannung,
- $\sigma_b$  = Biegezusatzspannung.



$$W(\Theta) = \frac{1}{2} W_0 (1 + \cos \Theta - \Theta \sin \Theta)$$

↑ Faktor, der die Aufdachung erzeugt

Abb. 2.4 Globaler Ovalisierungsansatz für unrunde Behälter mit Aufdachung nach Zeman



Der analytisch-methodische Ansatz von Zeman [7] nutzt die Vorteile der geschlossenen Lösung aus, wie sie durch die einheitliche Beschreibung der imperfekten Behälter-Geometrie und Verformung vorgegeben sind. Die beim Kreis/Tangente-System notwendige Bereichsunterteilung entfällt. Gleichzeitig ist die Lösung aber an die hierdurch festliegende Verformungsgestalt gebunden. Grundsätzlich ist es denkbar, durch Vermessen eines Behälters zur Akzeptanz der Zeman-Geometrie zu gelangen. Auf jeden Fall besteht dieser Geometrieansatz durch seine einparametrische Beschreibung: Neben den üblichen Systemgrößen (Radius, Wanddicke, E-Modul, Intensität des Innendrucks) geht in die Problembeschreibung nur die Aufdachungshöhe ein.

Nachteil dieses Geometrieansatzes: Während die Gesamthöhe des Behälters aus zwei mal Radius plus Aufdachung durch entsprechend durchlaufene Geometriepunkte ausgewiesen wird, entsteht in Breitenrichtung (rund um  $\theta = 90^\circ$  bzw.  $-90^\circ$ ) eine Unterschreitung des Durchmessers. Hier gibt es also Konflikte bei Gegenüberstellung mit der Kesselformel. Durch Umrechnen des Nenn-Durchmessers auf einen Wert, der die horizontale Unterschreitung kompensiert und Umrechnen der Aufdachungshöhe, so daß vertikal das Gesamtmaß ebenfalls auf den gewünschten Wert kommt, läßt sich die Zeman-Geometrie wieder der Vergleichbarkeit mit der Kesselformel zuführen. Solch eine Anpassung führt aber zu einer zusätzlichen geometrischen Glättung, die die zu berechnende Spannungsspitze abmindert.

Interessant wird die Gegenüberstellung der Zeman-Ergebnisse mit den Lösungen aus anderen Geometrie-Postulaten dann, wenn bei der Bewertung der Spannungsspitzen die Konservativität der Rechnung nachgewiesen werden muß. Die gemischte Ovalität mit Aufdachung gemäß dem vorliegenden Vorschlag von Zeman führt zu einer ausgesprochen niedrigen Strukturspannungsformzahl. Diese entsteht allein aus Gründen der speziellen Wahl der unbeanspruchten Geometrie. Der ebenfalls vorhandene spannungsmindernde Effekt der geometrischen Nichtlinearität bei Beanspruchung durch Innendruck (Theorie 2. Ordnung) ist hierfür nicht verantwortlich, da er auch bei anderen Rechenoperatoren (z. B. Pich) wirkt. In den Abschnitten 3.4 und 3.5 sind Vergleichsrechnungen zusammengestellt worden, die das Verhalten einer Kreis/Tangente-Geometrie gegenüber der Zeman-Geometrie zeigen (siehe *Tabellen 3.41 und 3.51 bis 3.55*).

So ist zunächst festzustellen, daß Zeman eine taschenrechnergeeignete Formel liefert, die praktisch ohne Systemerfassungsaufwand sofort ein Ergebnis produziert. Ist man sich aber über die wirklichen Verhältnisse am Behälter noch im unklaren, ist es empfehlenswert, die so erhaltene Strukturspannungsformzahl vorläufig als Mindestwert aufzufassen. Dem überschläglichen Kalkulierenden bleibt es dann unbenommen, auch einen Maximalwert abzuschätzen. Hierzu eignet sich z. B. die Formel von Brocks [9], die mit einem sehr einfachen Ansatz auskommt und für die Theorie 1. Ordnung eine konservative Obergrenze liefert, oder die Böck/Zeman-Formel [8] (s. Abschnitt 2.4.2).

Der Grund für das „milde“ Ergebnis von Zeman-global wird sofort sichtbar, wenn man den Winkel im Knickpunkt der Aufdachungsspitze berechnet und diesen z. B. mit dem entsprechenden Winkel am Kreis/Tangente-System vergleicht.

Für übliche Aufdachungshöhen (z. B. 3 bis 10 [mm]) liegt der Winkelunterschied im Verhältnis 1 zu 10 und mehr. Hierin zeigt sich, wie die Zeman-Geometrie der Ovalität Vorrang vor dem Knick in der Aufdachungsspitze einräumt, so daß dieser kaum mehr wirklichkeitsnah beschrieben wird. Soll der globale Zeman-Ansatz dennoch akzeptiert werden, muß ein Kriterium gefunden werden, einen real vermessenen Behälter und den Zeman-Ansatz einander anzupassen. Hierfür könnten verschiedene Bedingungen formuliert werden, z. B. Volumenkonstanz des Behälterinhalts, oder gleiche Umfangslänge in Rechenmodell und Realität. Es könnte auch ein Ausgleichsproblem formuliert werden, bei dem etwa mit der Fehlerquadrat-Methode die Abweichung der gemessenen und rechnerisch angesetzten Radien zum Entscheidungskriterium für die Akzeptanz der globalen Zeman-Formel gemacht wird.

Für die wirklichkeitsnahe Erfassung des Winkels im Knickpunkt der Aufdachung dürfte es aber wohl kaum einen Kompromiß geben.

## 2.4.2 Lokale Betrachtung der Aufdachung nach Böck/Zeman

Für die als „lokal“ bezeichnete Aufdachung geben Böck und Zeman in [6] und [8] analytische Formeln an, die den geometrisch-nichtlinearen Abminderungseffekt für die Abschätzung der Biegezusatzspannungen und Strukturspannungsformzahlen ähnlich wie bei der globalen Ovalität mit Aufdachung bestimmen. Jedoch geht hier zusätzlich der Knickwinkel  $\alpha_p$  der Aufdachungsspitze mit ein. Hier werden ebenfalls die Differentialgleichung (2.4) und die Momentenformel (2.6) zugrundegelegt. Die „lokalen“ Korrekturfaktoren werden wie folgt bestimmt:

$$C_1 = H_1 \quad \text{für } k^2 = 1 - K \cdot p \cdot R, \quad K \cdot p \cdot R < 1, \quad (2.4-11)$$

$$C_2 = H_2 \quad \text{für } k^2 = K \cdot p \cdot R - 1, \quad K \cdot p \cdot R > 1,$$

$$H_1 = \frac{(1 - \alpha_p / (3 \cdot \pi) + 2 \cdot (k^2 - 1) / (k^2 \cdot \alpha_p^2)) \cdot (1 - \cos(k \cdot \alpha_p) - (k \cdot \alpha_p - \sin(k \cdot \alpha_p)) \cdot \cot(k \cdot \pi))}{k^2 + C}, \quad (2.4-12)$$

$$H_2 = \frac{(\alpha_p / (3 \cdot \pi) - 1 + 2 \cdot (k^2 + 1) / (k^2 \cdot \alpha_p^2)) \cdot (\cos h(k \cdot \alpha_p) - 1 + (k \cdot \alpha_p - \sin h(k \cdot \alpha_p)) \cdot \coth(k \cdot \pi))}{k^2 + C}, \quad (2.4-13)$$

$$C = \alpha_p / (3 \cdot \pi) + 4 \cdot (\alpha_p - \sin(\alpha_p)) / (\alpha_p^2 \cdot \pi), \quad (2.4-14)$$

Die Korrekturfaktoren werden sinngemäß in (2.6) eingesetzt, worauf dann (2.8) folgt.

Wie oben erwähnt liegt der lokalen Lösung das Kreis/Tangente-System zugrunde, was unvermeidlich die Bereichsunterteilung besitzt. Diese ermöglicht keine analytisch geschlossene Lösung der Differentialgleichung. Die obige Lösung ist, wie Böck [8] beschreibt, eine Näherungslösung auf der Grundlage einer Euler-Reihe. Zur Verfahrensgegenüberstellung sei gesagt, daß das methodische Prinzip, eine

Reihe anzusetzen, auch bei Pich zu finden ist (siehe Abschnitt 3). Jedoch erfordert die dort verwendete Fourier-Reihe die numerische Erfassung möglichst vieler Glieder, während Böck seine analytische Approximation mittels Euler-Reihe bereits nach dem ersten Glied abbricht.

Die Akzeptanz der Lösung für lokal betrachtete Aufdachungen nach Böck/Zeman ist daran gebunden, das Kreis/Tangente-System als zutreffend zu betrachten. Abweichungen, die sich aus Vermessung eines Behälters etwa als zusätzliche Ovalitäten im Kreisbereich ergeben, gehen in diese Lösung nicht ein. In *Tabelle 3.41* (siehe Abschnitt 3.4) werden Strukturspannungsformzahlen nach Böck/Zeman mit den entsprechenden Kreis/Tangente-Werten nach Pich gegenübergestellt. Es zeigt sich, daß die lokalen Böck/Zeman-Ergebnisse näher an der Pich-Lösung liegen als die Werte nach Zeman-global, jedoch unter den Pich-Werten bleiben. Dieses wird in Abschnitt 3.5 bei Anwendung auf praxisnahe Behälterbeispiele bestätigt.

## 2.5 Abschätzungsformel von Brocks

Wie in Abschnitt 2.4 erwähnt, kann es hilfreich sein, für die schnelle Abschätzung einer konservativen Obergrenze der Spannungsspitze auf der Innenseite der Aufdachung eines Behälters unter Innendruck einen Richtwert zur Verfügung zu haben. Hierzu leitet Brocks [9] eine leicht nachvollziehbare Formel her:

$$\sigma_{\max} = p \cdot r / s + 3 \cdot p \cdot (2 \cdot r \cdot h + h^2) / s^2 \quad (2.5-1)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{pu} &= p \cdot r / s \\ K_t &= \sigma_{\max} / \sigma_{pu} \end{aligned} \quad (2.5-2)$$

Darin sind:

- $\sigma_{\max}$  = Maximale Biegespannung an der Randfaser der Innenoberfläche des Behälters infolge Innendruck  $p$ ,
- $\sigma_{pu}$  = Membranspannung,
- $p$  = Hydrostatischer Behälter-Innendruck,
- $r$  = Behälterradius,
- $s$  = Wanddicke des Behälters,
- $h$  = Aufdachungshöhe (gemäß Kreis/Tangente-System).

Die Formel setzt ein Kreis/Tangente-System an, bei dem das durch die Aufdachung induzierte Biegemoment nach Art eines Kragarmes seinen Maximalwert in der Aufdachungsspitze hat und an der Übergangsstelle von der Tangente zum Kreis auf Null geht. Im ungestörten Behälterbereich wird reines Membranspannungsverhalten angesetzt (wie bei der Kesselformel).

Das Kraftgrößenverhalten entspricht einem statisch bestimmten Grundsystem, welches im Übergangspunkt zwischen Kreis und Tangente ein Biegemomentengelenk und ein Querkraftgelenk besitzt (siehe *Abb. 2.5*). Die elastische Wirkung der statischen Unbestimmtheit wird nicht berechnet. Deren spannungsmindernde und umlagernde Wirkung entfällt. Somit gibt es ansatzbedingt auch kein elastisch alternieren-

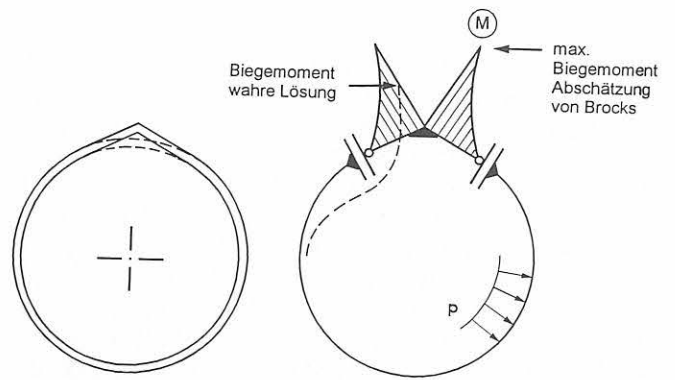


Abb. 2.5 Deutung der Abschätzungsformel von Brocks als Momentenbestimmung am statisch bestimmten Grundsystem

des Abklingen des Biegemoments in zunehmender geometrischer Entfernung von der Aufdachungsspitze. Das Spannungsergebnis in der Aufdachungsspitze selbst liegt auf der sicheren Seite. Die Formel setzt voraus, daß nur geringe Aufdachungshöhen betrachtet werden. Bei größeren Aufdachungshöhen wächst die berechnete Spannungsspitze überproportional, so daß für deren sinnvolle Erfassung Formeln mit größerem Rechenaufwand unumgänglich werden, und zwar auch dann, wenn nur überschläglich abgeschätzt werden soll.

In *Tabelle 2.51* sind Strukturspannungsformzahlen nach Brocks unter Variation der Aufdachungshöhe zusammengestellt. Zum Vergleich werden die entsprechenden Werte nach dem Pich-Verfahren (siehe Abschnitte 2.3 und 3) gegenübergestellt. Für den Schadensfall-Behälter mit Außendurchmesser 2800 [mm], Blechdicke 22 [mm], Aufdachung 8 [mm] und Innendruck 4.513 [Mpa] ergibt sich nach Brocks eine Strukturspannungsformzahl  $K_t = 3.188$ .

Tabelle 2.51 Strukturspannungsformzahlen für Kreis/Tangente-Systeme nach Brocks unter verschiedenen Aufdachungshöhen; Vergleich mit Werten nach Pich

Behältergeometrie			Innendruck	Strukturspannungsformzahl	
$r_0[-]$	$s[-]$	$h[-]$		Brocks	Pich Kreis/Tang.
1005	10	0	1.000	1.000	1.000
1005	10	1	1.000	1.603	1.539
1005	10	2	1.000	2.207	2.034
1005	10	3	1.000	2.812	2.502
1005	10	4	1.000	3.417	2.951
1005	10	5	1.000	4.023	3.384
1005	10	6	1.000	4.629	3.803
1005	10	7	1.000	5.236	4.216
1005	10	8	1.000	5.843	4.608
1005	10	9	1.000	6.451	5.000
1005	10	10	1.000	7.060	5.374
1005	10	11	1.000	7.669	5.745
1005	10	12	1.000	8.279	6.109
1005	10	13	1.000	8.890	6.466
1005	10	14	1.000	9.501	6.817
1005	10	15	1.000	10.113	7.162
1005	10	16	1.000	10.725	7.502
1005	10	17	1.000	11.338	7.836
1005	10	18	1.000	11.951	8.166
1005	10	19	1.000	12.565	8.491
1005	10	20	1.000	13.180	8.811

## 2.6 Abschätzungsformeln des International Institute of Welding

Das International Institute of Welding (IIW) hat in seinem Bericht 'Fitness-for-Purpose Assessment of Misalignment ...' [12] einen Vorschlag zur Erfassung des Winkelverzuges infolge Aufdachung in Behälter-Schweißnähten gemacht, der in Analogie zum Winkelverzug bei Schweißnähten in ebenen Platten formuliert ist. Darin wird der Einfluß geometrischer Nichtlinearität durch einen von der Höhe der Belastung abhängigen Faktor  $\beta$  berücksichtigt, der in Verbindung mit einem hyperbolischen Tangens den Übergang vom linearen Verhalten zur geometrischen Nichtlinearität regelt. Mit diesen Formeln wird ebenso wie bei winkerverzogenen Platten ein Systemausschnitt der Länge  $L$  betrachtet, bei dem als Randbedingungen an den Ausschnitt-Enden die Grenzfälle „Vollständige Einspannung“ („Fixed Ends“) bzw. „Vollgelenkige Lagerung“ („Pinned Ends“) gesetzt werden (siehe Abb. 2.6).

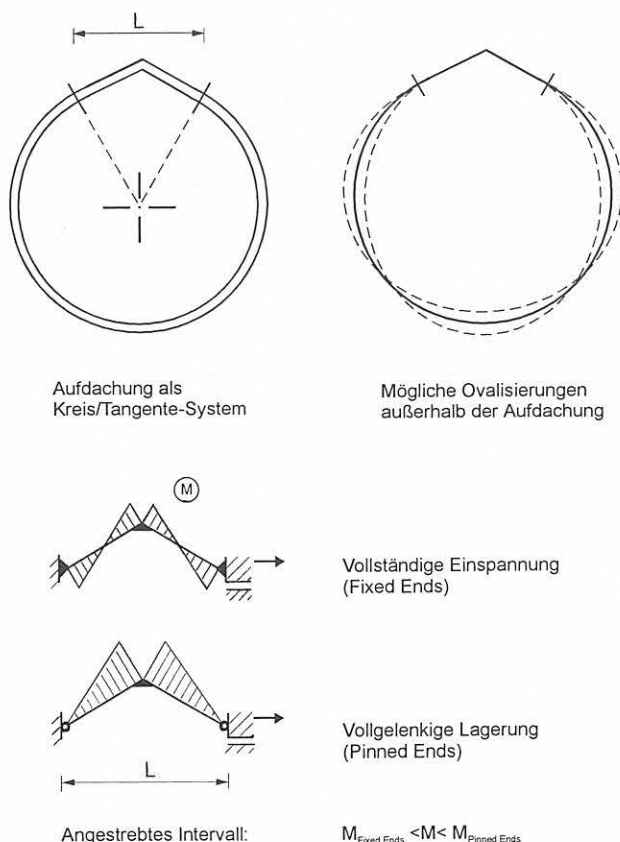


Abb. 2.6 Intervallschachtelung für Biegemomente durch vollständige Einspannung (Fixed Ends) und vollgelenkige Lagerung (Pinned Ends) nach IIW

Die Methode geht davon aus, daß das tatsächliche Systemverhalten an den Ausschnitt-Enden bei Platzierung des Schnittprinzips durch Drehfedern als Randbedingungen zu charakterisieren ist, deren Federkonstanten Werte zwischen den beiden Grenzfällen „Einspannung“ und „Gelenk“ annehmen. Die rechnerische (aufwendige) Bestimmung dieser Federkonstanten soll aber grundsätzlich vermieden werden. Stattdessen sollen als Ersatzsysteme die oben beschriebenen

ebenen Systemausschnitte dienen. Die Legitimation der Vorgehensweise liegt darin, daß die tatsächliche Spannungssituation durch die beiden Randbedingungs-Grenzfälle eingeschachtelt wird, was konservative Spannungs-Abschätzungen ermöglicht.

Der Denkansatz für dieses Wirkungsprinzip wurde offensichtlich von verschweißten, auf Zug beanspruchten, ebenen Platten auf Behälter mit Aufdachung übertragen. Hier jedoch stellt sich die Frage, ob der bei ebenen Platten sicher richtige Grundgedanke konfliktfrei auf Behälter mit Aufdachung übertragbar ist.

Bei Platten wird das winkelperfekt verschweißte und im übrigen eben angenommene Plattensystem durch geometrische Nichtlinearität tendenziell in eine Gesamtebene hinein gestreckt. Die nach dem Schnittprinzip an den Ausschnitt-Enden anzusetzenden Randbedingungen reagieren „passiv“ auf das durch die Winkelimperfection der Schweißnaht bei Zugbelastung induzierte Biegemoment, indem sie stets solche Verdrehungen zulassen, die zwischen den Grenzfällen „Einspannung“ und „Gelenk“ liegen, und somit den Aufdachbereich entlasten.

Bei Übertragung des Grundgedankens auf Behälter mit Aufdachung ist aber zu berücksichtigen, daß auch Ovalitäten beliebiger Gestalt zusätzlich die tatsächliche Behälterform außerhalb des Aufdachbereichs bestimmen können (siehe Abb. 2.6). Hierbei können Biegemomente aus entfernt liegender Ovalitäts-Imperfektion in den Aufdachungsbereich hineinstreuen. Solche Biegemomente können an den betrachteten Behälterausschnitt-Enden außerhalb des Wertebereichs liegen, der von den Grenzfällen „Vollständige Einspannung“ („Fixed Ends“) und „Vollgelenkige Lagerung“ („Pinned Ends“) eingeschachtelt werden soll. Die geometrische Nichtlinearität wird bei Innendruck stets die Tendenz zeigen, den Behälter in Richtung der idealen Kreisgestalt zu verformen. Hierbei werden sowohl die Aufdachung, als auch etwaige ausbeulende oder einbeulende Ovalitäten geglättet. Die Randbedingungen an den betrachteten Ausschnitt-Enden reagieren somit „aktiv“ auf den steigenden Innendruck, indem sie nicht nur als Drehfedern nachgeben, sondern zusätzlich von außen verursachte Drehungen dem Aufdachungsbereich einprägen (aktiv = vergleichbar einer Regelung mit Servohydraulik). Dem Biegemoment aus der Aufdachungsspitze werden die Biegewirkungen der Ovalitäten aus dem abgeschnittenen Systemteil überlagert. Da dieser Anteil nunmehr unbekannt ist, verhalten sich die Abschätzungsformeln nicht mehr in jedem Falle konservativ (siehe Abb. 2.7, S. 18).

Mit der Einführung der Begriffe „passiv“ und „aktiv“ für Randbedingungen und dem daraus sich ergebenden Verständnis für das Systemverhalten betrachteter Aufdachungs-Ausschnitte kann im Anwendungsfall die Frage der Akzeptanz der IIW-Formeln erörtert werden. In der Tabelle (2.63) werden Ergebnisse einer Studie demonstriert, die zeigen, wie in Abhängigkeit von der Variation einer seitlichen Behälter-Ovalisierung das Biegespannungsergebnis an den Ausschnitt-Enden der oben liegenden Aufdachung das von „Einspannung“ und „Gelenk“ gesetzte Spannungs-Intervall in beiden Richtungen überschreitet (zu große und zu kleine Strukturspannungsformzahlen).

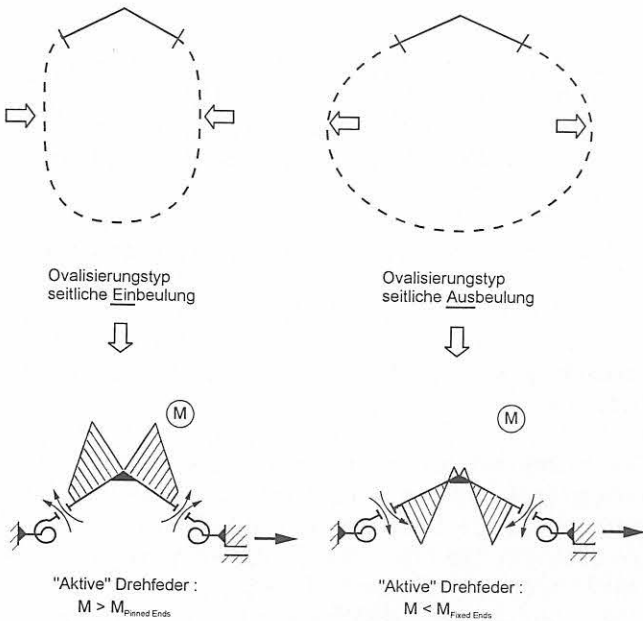


Abb. 2.7 Nicht-konservative Biegemomente infolge "aktiver" Drehfedern, die entfernt von der Aufsatzung liegende Ovalsierungswirkungen übertragen.

Bei Vergleich der IIW-Formeln (2.6-1) bis (2.6-3) für Behälter mit denen für Platten fällt auf, daß im ersteren Fall ein Faktor  $(1 - \mu^2)$  mitgeführt wird, der im letzteren Fall fehlt (siehe [15], [21]). Dies hängt mit unterschiedlich getroffenen Annahmen zwischen Behältern mit geschweißten Aufsatzungsspitzen und winkelimperfekt geschweißten Platten zusammen.

Beim Zugriff auf die IIW-Formeln hat der Anwender vorher zu prüfen, ob seine eigenen Annahmen hinsichtlich ebenem Spannungszustand oder ebenem Verzerrungszustand mit den IIW-Annahmen zusammentreffen. Die IIW-Formeln für winkelimperfekt geschweißte Platten nehmen schmale Plattenstreifen an. Die Biegezusatzspannung wird daher als ebener Spannungszustand aufgefaßt. Dagegen wird bei Behältern mit Aufsatzung, deren Membranspannungsanteile in Umfangsrichtung und Axialrichtung wie gewohnt nach den Kesselformeln bestimmt werden und somit im Verhältnis 2:1 stehen, die Biegezusatzspannung aus Aufsatzung unter der Annahme abgeschätzt, daß parallele Behälterquerschnitte sich in Axialrichtung hinsichtlich der Querdehnung gegenseitig behindern. Die Querdehnungsbehinderung resultiert, wie sich aus dem Hooke'schen Gesetz ergibt, in einer Erhöhung der Biegezusatzspannung in Umfangsrichtung um den Faktor  $1/(1 - \mu^2)$ .

Die IIW-Formeln werden im „British Standard PD 6493:1991, Table 14, Angular misalignment at seams in vessels“ (siehe [21]) jeweils für die Randbedingungen „Vollständige Einspannung“ („Fixed Ends“) und „Vollgelenkige Lagerung“ („Pinned Ends“) wie folgt angegeben:

Fixed Ends:  

$$K_t = 1 + 3 \cdot d / (t \cdot (1 - \mu^2)) \cdot \tanh(\beta/2) / (\beta/2) \quad (2.6-1)$$

Pinned Ends:  

$$K_t = 1 + 6 \cdot d / (t \cdot (1 - \mu^2)) \cdot \tanh(\beta) / \beta \quad (2.6-2)$$

mit dem hyperbolischen Tangens-Korrekturfaktor:

$$\beta = L / t \cdot (3 \cdot (1 - \mu^2) \cdot \sigma / E)^{0.5} \quad (2.6-3)$$

und den Parametern:

- $K_t$  = Spannungsüberhöhungsfaktor (Strukturspannungsformzahl),
- $d$  = Aufsatzungshöhe über dem ideal zylindrischen Behälter (= h),
- $t$  = Blechdicke (= s),
- $L$  = Sekantenlänge des Aufsatzung-Bereichs (Projektion der Aufsatzungstangenten),  $L = 2 \cdot l$ , wobei:
- $l$  = Halbe Sekantenlänge (wird erwähnt, weil so in Lit. verwendet),
- $E$  = E-Modul,
- $\mu$  = Querkontraktion,
- $s$  = Membranspannung (entsprechend Kesselformel).

Die IIW-Formeln eignen sich im Rahmen ihrer Gültigkeit wie beabsichtigt für die schnelle, vereinfachte Abschätzung von Strukturspannungsformzahlen. Im IIW-Bericht selbst wird darauf hingewiesen, daß bei Zweifeln an ihrer Gültigkeit andere Methoden, z. B. Finite Elemente, heranzuziehen sind.

In Tabelle 2.61 sind Strukturspannungsformzahlen aus den IIW-Formeln für vollständige Einspannung („Fixed Ends“) und vollgelenkige Lagerung („Pinned Ends“) unter Variation der Aufsatzungshöhe für eine Laststufe  $p = 1$  zusammengestellt. Die Ergebnisse können mit den entsprechenden exakten Werten eines idealen Kreis/Tangente-Systems, wie sie das Pich-Verfahren ermittelt (siehe Abschnitte 2.3 und 3), verglichen werden.

Es zeigt sich, daß der IIW-Ansatz für diese Parameterkonstellation die Eigenschaft der Intervallschachtelung besitzt: Die gesuchten Strukturspannungsformzahlen werden mit „Fixed Ends“ und „Pinned Ends“ als unterer bzw. oberer Schranke eingegrenzt. Im vorliegenden Fall wird also für alle technologisch denkbaren Aufsatzungshöhen das IIW-Intervall eingehalten. Der tatsächliche Wert der Strukturspannungsformzahl ergibt sich aus dem Vergleich mit der Berechnung nach Pich.

Tabelle 2.61 Strukturspannungsformzahlen aus den IIW-Formeln für einen normierten Behälter mit verschiedenen Aufsatzungshöhen bei gleicher Laststufe, Vergleich mit Werten aus Kreis/Tangente-Systemen nach Pich

Behältergeometrie			Innendruck	Strukturspannungsformzahl		
$r_0$ [-]	$s$ [-]	$h$ [-]	$p$ [-]	IIW <sub>fixed</sub>	IIW <sub>pinned</sub>	Pich K/T.
1005	10	0	1.000	1.000	1.000	1.000
1005	10	1	1.000	1.327	1.637	1.539
1005	10	2	1.000	1.648	2.234	2.034
1005	10	3	1.000	1.964	2.795	2.502
1005	10	4	1.000	2.275	3.324	2.951
1005	10	5	1.000	2.581	3.824	3.384
1005	10	6	1.000	2.882	4.299	3.803
1005	10	7	1.000	3.178	4.751	4.216
1005	10	8	1.000	3.470	5.182	4.608
1005	10	9	1.000	3.757	5.594	5.000
1005	10	10	1.000	4.040	5.988	5.374
1005	10	12	1.000	4.594	6.731	6.109
1005	10	14	1.000	5.133	7.421	6.817
1005	10	16	1.000	5.657	8.066	7.502
1005	10	18	1.000	6.168	8.671	8.166
1005	10	20	1.000	6.666	9.243	8.811

Tabelle 2.62

Strukturspannungsformzahlen aus den IIW-Formeln an einem normierten Behälter unter fiktiver Laststeigerung bis  $\infty$ , Entwicklung der geometrischen Nichtlinearität bei IIW, Vergleich mit Kreis/Tangente-Werten nach Pich

Behältergeometrie			Innendruck	Strukturspannungsformzahl		
$r_0$ [-]	s [-]	h [-]	p [-]	IIW <sub>fixed</sub>	IIW <sub>pinned</sub>	Pich K/T.
1005	10	10	0.001	4.296	7.591	6.726
1005	10	10	0.002	4.296	7.589	6.720
1005	10	10	0.005	4.295	7.582	6.702
1005	10	10	0.010	4.294	7.571	6.673
1005	10	10	0.020	4.291	7.549	6.622
1005	10	10	0.050	4.283	7.483	6.501
1005	10	10	0.100	4.269	7.376	6.355
1005	10	10	0.200	4.241	7.175	6.147
1005	10	10	0.500	4.162	6.655	5.762
1005	10	10	1.000	4.040	5.988	5.374
1005	10	10	2.000	3.827	5.101	4.905
1005	10	10	5.000	3.361	3.844	4.184
1005	10	10	10.000	2.895	3.048	3.608
1005	10	10	20.000	2.422	2.453	3.055
1005	10	10	50.000	1.917	1.919	2.425
1005	10	10	100.000	1.650	1.650	2.047
1005	10	10	200.000	1.459	1.459	1.754
1005	10	10	500.000	1.291	1.291	1.471
1005	10	10	1000.000	1.205	1.205	1.318
1005	10	10	1000000.0	1.006	1.006	1.001

In einer weiteren Studie, deren Ergebnisse in *Tabelle 2.62* aufgeführt sind, wird das Verhalten der IIW-Formeln bei Laststeigerung untersucht, während die geometrischen Systemparameter festgehalten werden, d. h. ein bestimmtes Behältersystem unter verschiedenen hydrostatischen Belastungszuständen beschreiben. Diese Studie ist deshalb interessant, weil bei kleiner Last der irrtümliche Eindruck entstehen könnte, das vorliegende System verhalte sich konservativ.

Da es sich hier jedoch um den numerischen Test einer Formel handelt, deren Verhalten für alle denkbaren Anwendungsfälle abgesichert sein soll, wird der zugrundegelegte Behälter als fiktiv aufgefaßt, indem seine Materialparameter (E-Modul und Querkontraktion) konstant für beliebige Lasthöhen angenommen werden. Die Belastung durch hydrostatischen Innendruck soll numerisch alle denkbaren Werte von  $p = 0.001$  bis  $1000000.0$  (quasi  $\infty$ ) durchlaufen. Die Werte werden daher insgesamt als physikalisch dimensionslos vereinbart (siehe auch Abschnitt 3.4-A).

Die Ergebnisse zeigen, daß mit IIW zunächst ein Toleranzbereich für die gesuchte Strukturspannungsformzahl aufgespannt wird, der bei einem sehr kleinen Startwert der Last am größten ist (lineare Lösung), und mit zunehmender Last-

steigerung infolge der sich entwickelnden geometrischen Nichtlinearität aufgezehrt wird. Bei unendlich großer Last sind die Lösungen für vollständige Einspannung und vollgelenkige Lagerung („Fixed Ends“, Pinned Ends“) identisch.

Der Vergleich mit der exakten Lösung (berechnet mit dem Pich-Verfahren) zeigt, daß die IIW-Werte hier nur im Anfangslastenbereich einschachtelnde Wirkung haben. Bei einem (dimensionslosen) Innendruck zwischen  $p = 2.0$  und  $5.0$  tritt der exakte Wert aus dem IIW-Intervall heraus. Die IIW-Formeln sind von hier ab nicht mehr konservativ. Bei der Last  $p = 5.0$ , die durchaus auch physikalisch sinnvoll interpretierbar ist und in der Praxis vorkommt, ist die nach IIW berechnete Strukturspannungsformzahl um 8 Prozent niedriger als der exakte Wert. (Bei  $p = 10.0$  sind es bereits 15 Prozent!) Lediglich bei rechnerischer (nicht physikalischer) Laststeigerung gegen  $\infty$  konvergiert IIW auch gegen Strukturspannungsformzahl 1.

Die IIW-Formeln (2.6-1) bis (2.6-3) stellen eine Weiterentwicklung von Ansätzen aus [11] dar, die den Korrekturfaktor  $\beta$  noch nicht enthalten. Zu Beginn einer Belastung stimmen die Ergebnisse aus alten und neuen Formeln überein. Bei Laststeigerung liegen die Werte der alten Formeln über denen mit dem Korrekturfaktor  $\beta$ . Die alten Formeln verhalten sich beim hier betrachteten Kreis/Tangente-System insoweit also konservativ. Mit  $\tanh \beta$  soll aber der spannungsmindernde Effekt der geometrischen Nichtlinearität ausgenutzt werden, so daß es unbefriedigend wäre, zu den alten Formeln zurückzukehren. Wollte man aber die IIW-Formeln weiter ertüchtigen, so müßte ihr Verhalten unter Bezugnahme auf die geometrische Grundstruktur des Behältersystems untersucht werden. Es ist zu unterstellen, daß verschiedene Gestalten der Imperfektion (Kreis/Tangente-System, Ovalität, sonstige Abweichung von der idealen Kreisform) unterschiedliches geometrisch-nichtlineares Verhalten bei Laststeigerung entwickeln werden, was nicht mit ein- und denselben Abschätzungsformeln gleichermaßen konservativ und wirtschaftlich erfaßt werden kann.

Im übrigen liegt der Grund für das von der Realität abweichende Verhalten der IIW-Formeln darin, daß mit der  $\tanh \beta$ -Korrektur zunächst deren Eigenschaften bei  $\beta = 0$  und  $\beta = > \infty$  ausgenutzt werden sollen, was auch erfolgreich ist (wie oben erörtert). Jedoch erzeugen die Definition von  $\beta$  und der damit gebildete hyperbolische Tangens nach guter Paßform im Anfangslastenbereich von einer gewissen Lasthöhe an einen für diese Anwendung zu schnell fallenden Verlauf der zu berechnenden Strukturspannungsformzahl, während die geometrische Nichtlinearität des Behälters tatsächlich offenbar eine etwas andere Charakteristik besitzt (siehe *Abb. 2.8*).

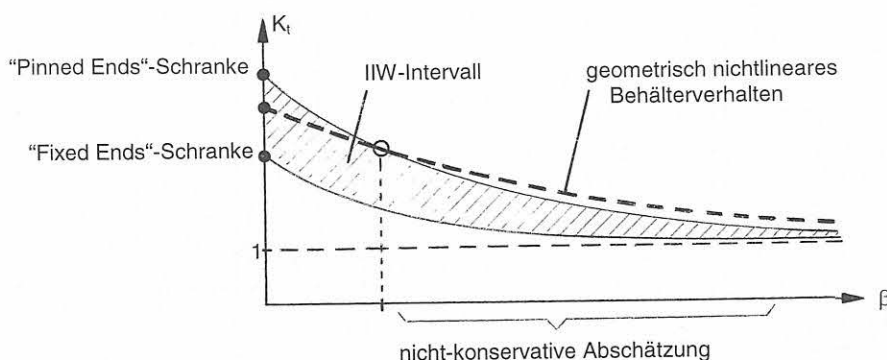


Abb. 2.8 IIW-Intervall der Strukturspannungsformzahlen in Abhängigkeit von der  $\tanh \beta$ -Korrektur, vergleichbare tatsächliche geometrisch nichtlineare Entwicklung bei einem Behälter

Es sei angemerkt, daß die IIW-Formeln durchaus mit ähnlichen Mitteln wie bei der Einführung von  $\beta$  weiter der Realität angepaßt werden können, indem zum Beispiel für die „Pinned Ends“-Schranke das zugrundeliegende  $\beta$  mit einer „Bauchigkeitsfunktion“ verzerrt wird. Dieses gelingt rechnerisch sofort, soll hier aber nicht weiter verfolgt werden, weil es für solch ein Vorgehen numerisch beliebig viele funktionierende Möglichkeiten gibt, die im Einzelfall aber nicht physikalisch zwingend sind.

Eine weitere Schwierigkeit bei Anwendung der IIW-Formeln folgt aus ihrer assoziativen Bindung an Kreis/Tangente-Systeme: Werden nämlich Behälter betrachtet, die nicht die ausgeprägte gerade Tangentengestalt im Bereich der Aufdachung besitzen (vgl. zum Beispiel Zeman-Geometrie mit kontinuierlicher Ovalität bis zur Aufdachungsspitze, siehe Abschnitt 2.4), so können die festzulegenden Parameter  $L = 2 \cdot l$  (Sekantenlänge) und  $d$  (Aufdachungshöhe) dann nur geschätzt werden. Eine Aussage über die Konservativität der Schätzung ist nicht mehr möglich. Gerade von einer wirklichkeitsnahen Schätzung von  $L$  durch den Anwender hängt aber bei den IIW-Formeln deren Aussagekraft überhaupt ab.

Im folgenden soll noch das oben erörterte, möglicherweise „aktive“ Randbedingungenverhalten an den Ausschnitt-Enden einer Aufdachung studiert werden. Die Ergebnisse sind in *Tabelle 2.63* zusammengefaßt. Als Ausgangspunkt wird auf bereits in *Tabelle 2.62* enthaltene Strukturspannungsformzahlen gemäß IIW-Formeln für „Fixed Ends“ und „Pinned Ends“ zur Belastungsstufe  $p = 0.2$  Bezug genommen, die – wie oben erwähnt – die gewünschte Intervallschachtelungs-Wirkung für die wahre Strukturspannungsformzahl des untersuchten Kreis/Tangente-Systems hat.

Nun aber wird das Kreis/Tangente-System dahingehend verändert, daß seitlich im rechten Winkel zur Aufdachungsspitze eine zusätzliche Imperfektion in Gestalt einer kosinusförmigen Ovalität eingeprägt wird (vgl. *Abb. 2.7*). Diese wird symmetrisch angesetzt und beginnt an der Stelle, wo die Tangente des Aufdachungsbereiches in den Kreis mündet. Auf diese Weise haben die IIW-Formeln keine Gelegenheit, Kenntnis von der außen liegenden Systemveränderung zu erlangen, indem der Kreis/Tangente-Übergangspunkt weiterhin maßgebend für die bei IIW benötigte Sekantenlänge  $L$  bleibt. Demzufolge müssen die IIW-Formeln unabhängig von jeder solchen Variation stets dasselbe Ergebnis wie beim perfekten Kreis/Tangente-System liefern.

Das ovalisierte System jedoch wird wie üblich insgesamt nach Pich berechnet. Dabei entwickelt die Ovalisierung einen eigenständigen Beitrag zum Biegeverhalten, der der Wirkung der Aufdachung überlagert ist. Betrachtet man nun diejenigen Stellen, die bei IIW Gegenstand des Postulates von „Fixed Ends“ und „Pinned Ends“ sind, so zeigt sich, was alternativ hierzu die sogenannten „aktiven“ Drehfedern bedeuten: Je nach Richtungstendenz und Ausmaß der Ovalisierung (seitliche Einbeulung bzw. Ausbeulung) wird über die Randbedingungsstellen aus dem bei IIW abgeschnittenen Systemteil ein Biegeanteil übertragen, der den Aufdachungsbereich zusätzlich belasten oder entlasten kann. Dabei werden bereits bei geringfügigen Ovalisierungen, die hier als prozentuale Abweichung vom Soll-Radius ausgedrückt sind, die von IIW „Fixed Ends“ und „Pinned Ends“ gesetzten Intervallgrenzen der zu ermittelnden Strukturspannungsformzahlen in beiden Richtungen überschritten: *Tabelle 2.63* zeigt diese Effekte bei Einbeulung von 97 % bzw. Ausbeulung von 105 %. Insoweit kann die IIW-Formel für Schweißnähte von Behältern mit Aufdachung grundsätzlich nicht als konservativ gelten, wenngleich dieses oft so in Erscheinung tritt.

Für den Schadensfall-Behälter mit Außendurchmesser 2800 [mm], Blechdicke 22 [mm], Aufdachung 8 [mm] und Innendruck 4.513 [Mpa] ergeben sich nach IIW die den gesuchten Wert eingrenzenden Strukturspannungsformzahlen  $K_{t \text{ Fixed Ends}} = 2.136$  und  $K_{t \text{ Pinned Ends}} = 2.975$ .

Abschließend soll noch erwähnt werden, daß zwischen der IIW-Formel für „Vollgelenkige Lagerung“ (Pinned Ends) und der von Brocks angegebenen Formel (siehe Abschnitt 2.4) eine gewisse Verwandtschaft besteht. Bei entsprechender Angleichung von Voraussetzungen auf beiden Seiten lassen sich beide ineinander überführen, was im folgenden gezeigt wird. Mit Brocks und der Kesselformel erhält man zunächst für die Strukturspannungsformzahl (siehe Abschnitt 2.5):

$$\begin{aligned}
 K_t &= \frac{\sigma_{\max} / \sigma_{pu}}{(p \cdot r / s + 3 \cdot p \cdot (2 \cdot r \cdot h + h^2) / s^2) / (p \cdot r / s)} \\
 &= \frac{1}{1 + 3 \cdot h \cdot (2 \cdot r + h) / (s \cdot r)}
 \end{aligned}
 \tag{2.5-2}$$

Darin sind:

- $K_t$  = Strukturspannungsformzahl,
- $\sigma_{\max}$  = Maximale Biegespannung,
- $\sigma_{pu}$  = Membranspannung nach Kesselformel,
- $p$  = Hydrostatischer Behälter-Innendruck,

*Tabelle 2.63*

*Strukturspannungsformzahlen gemäß IIW-Formeln und Gegenüberstellung mit modifizierten Kreis/Tangente-Systemen, die seitlich eingebrachte Kosinus-Ovalitäten (prozentuale Änderung des seitlichen Behälterradius) besitzen. Diese erzeugen „aktive“ Drehfedern an den IIW-Randbedingungsstellen (Berechnung mit Pich).*

Behältergeometrie				Innendruck	Strukturspannungsformzahl		
$r_0$ [-]	Oval	s [-]	h [-]	p [-]	IIW <sub>fixed</sub>	IIW <sub>pinned</sub>	Aktiv-RB
1005	97 %	10	10	0.200	4.241	7.175	7.528
1005	98 %	10	10	0.200	4.241	7.175	7.054
1005	99 %	10	10	0.200	4.241	7.175	6.594
1005	100 %	10	10	0.200	4.241	7.175	6.147
1005	101 %	10	10	0.200	4.241	7.175	5.712
1005	102 %	10	10	0.200	4.241	7.175	5.290
1005	103 %	10	10	0.200	4.241	7.175	4.880
1005	104 %	10	10	0.200	4.241	7.175	4.482
1005	105 %	10	10	0.200	4.241	7.175	4.095

- $r$  = Behälterradius,  
 $s$  = Wanddicke des Behälters (Brocks), identisch mit:  
 $t$  = Wanddicke des Behälters (IIW),  
 $h$  = Aufdachungshöhe (Brocks), identisch mit:  
 $d$  = Aufdachungshöhe (IIW).

Für sehr kleine Aufdachungshöhen  $h$  kann bei Brocks näherungsweise  $r + h = r$  gesetzt werden, so daß folgt:

$$\begin{aligned}
 K_t &= 1 + 3 \cdot h \cdot (2 \cdot r + h) / (s \cdot r) \\
 &= 1 + 3 \cdot h \cdot (2 \cdot r) / (s \cdot r) \\
 &= 1 + 6 \cdot h / s
 \end{aligned}
 \quad (2.5-3)$$

Dieses Ergebnis folgt auch aus IIW-Formel (2.11) „Pinned Ends“ zu Beginn einer Belastung bei  $\beta = > 0$ , indem dann wegen  $\tanh(\beta)/\beta = > 1$  geometrische Linearität vorliegt, sowie, wenn gleichzeitig der Einfluß der Querkontraktion  $\mu$  ausgeschlossen wird (ebener Spannungszustand):

$$\begin{aligned}
 K_t &= 1 + 6 \cdot d / (t \cdot (1 - \mu^2)) \cdot \tanh(\beta) / \beta \\
 &= 1 + 6 \cdot d / t \\
 d &= h, \\
 t &= s.
 \end{aligned}
 \quad (2.6-2)$$

## 2.7 Numerische Berechnung nach der Finite-Elemente-Methode

Reichen die vereinfachten Berechnungsverfahren für die Abschätzung eines wirklichkeitsnahen Ergebnisses zum Problem des Behälters mit Aufdachung nicht aus oder treffen bestimmte in analytischen Verfahren gemachte Voraussetzungen nicht zu, so bleibt als allgemeine Möglichkeit zur Beschreibung und Lösung des Problems z. B. die Methode der Finiten Elemente.

In Abschnitt 4 wird ausführlich auf deren Anwendung eingegangen. Dabei kommt der Aktivierung der geometrischen Nichtlinearität sowie den flexiblen Möglichkeiten zur Modellierung lokaler Bereiche besondere Bedeutung zu.

## 2.8 Numerische Berechnung nach der Randelemente-Methode

Unter den Möglichkeiten zum Einsatz numerischer Methoden könnte in gewissem Rahmen auch die Randelemente-Methode von Interesse sein. Deren Vorteil gegenüber der Finite-Elemente-Methode wird vor allem darin gesehen, daß für den Anwender ein verringerter Modellierungsaufwand wegen Beschränkung auf die Modell-Konturen entsteht. Dies ist bei ausgeprägten Volumenstrukturen oder kompliziert umrandeten ebenen Gebieten wesentlich.

Die hier erörterte Behälterstruktur ist aber schlank und hinsichtlich der Modellierung einfach, so daß deren numerische

Betrachtung nicht unbedingt über die Randelemente-Methode erfolgen muß. Sollte der Einsatz dieser Methode dennoch gewünscht werden, müßte vorher die strategische Frage beantwortet werden, wie denn das geometrisch nichtlineare Verhalten erfaßt würde.

## 3 Pich-Verfahren

### 3.1 Vorbemerkung

Das Pich-Verfahren ist ein zweidimensionales analytisches Verfahren zur Berechnung der Spannungen imperfekt unrunder zylindrischer Behälter unter hydrostatischem Innendruck (siehe *Abb. 3.1, 3.2*). Es setzt voraus, daß der zu untersuchende Behälter im unbelasteten Zustand geometrisch in Polarkoordinaten vermessen worden ist, oder aber ein nach geometrischem Bildungsgesetz angenommenes Behältermodell zugrundegelegt wird. Für Behälter mit Aufdachung ist dieses dann häufig der Kreisquerschnitt mit gerader Tangente zur Aufdachungsspitze. Bei Behältern, die mit wenigen Meßdaten die Geometrie gut erfassen lassen, ist für verfahrensinterne Zwecke eine Interpolation (z. B. Spline) einzusetzen, um redundante Daten und Übergangsbereiche wertemäßig zu besetzen.

Der Behälter wird in seiner Querschnittsebene betrachtet und als ebenes Spannungsproblem aufgefaßt. Die in dieser Ebene vorhandenen geometrischen Imperfektionen (Ovalitäten und Aufdachungen) sollen repräsentativ für einen längeren Behälterabschnitt in Axialrichtung sein. Der Übergang zum Behälterboden oder Behälterdeckel wird nicht Gegenstand der Berechnung. (Bei den in Abschnitt 4 behandelten dreidimensionalen Finite-Elemente-Modellen zeigt sich, daß im Übergangsbereich zum Behälterboden durchaus höhere Spannungen als im Behälter-Mittelnbereich auftreten können. Diese werden durch die Randbedingungen, d. h. Zwangungen hervorgerufen.)

Im Rahmen dieser Studie wird das Pich-Verfahren aktiviert für die Beschreibung eines Behälters mit Aufdachung durch einen perfekten Kreisquerschnitt und perfekt anliegende gerade Tangenten, die die Aufdachung bilden. Variiert man bei diesem System einzelne Parameter, wie z. B. die Aufdachungshöhe, die Wanddicke, den Radius oder den hydrostatischen Innendruck, so erhält man ein repräsentatives Sortiment von Ergebnissen zur Beschreibung des kritischen Verhaltens dieses Systems. Hiermit lassen sich Strukturspannungsformzahlen auf der Innenseite der Aufdachung als Verhältniszahl von Spitzenspannung zu Membranspannung bestimmen und in Beziehung zur betrachteten Parametervariation setzen.

Wie oben erwähnt, ist zu berücksichtigen, daß bereits die Festlegung eines Kreisquerschnitts mit gerader Tangente für die Aufdachung eine rigide Vereinfachung gegenüber wirklichkeitsnahen Behältergeometrien darstellt (die meist aber auf der sicheren Seite liegt). Zur Verdeutlichung des Pro-

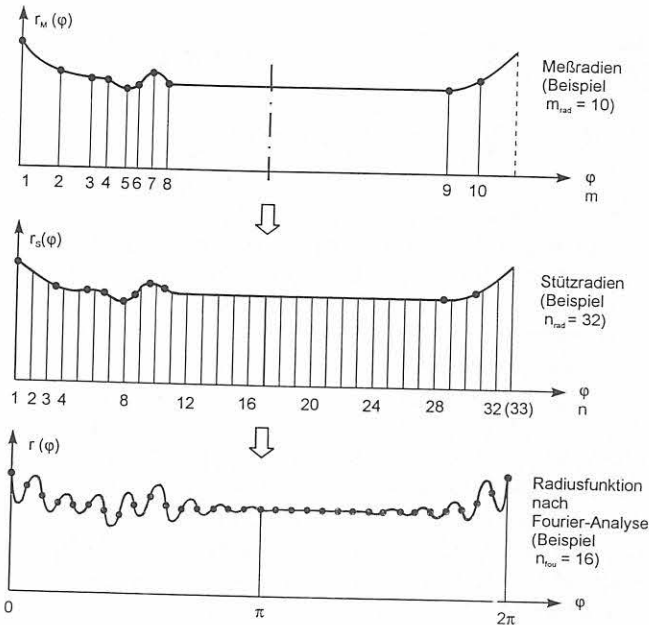
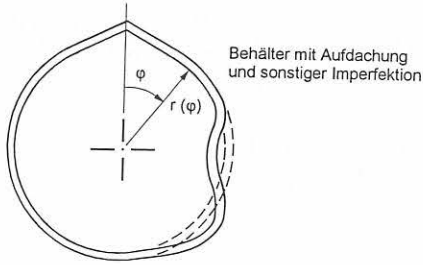


Abb. 3.1  
Messung der Behälterradien und Aufbereitung für das Pich-Verfahren

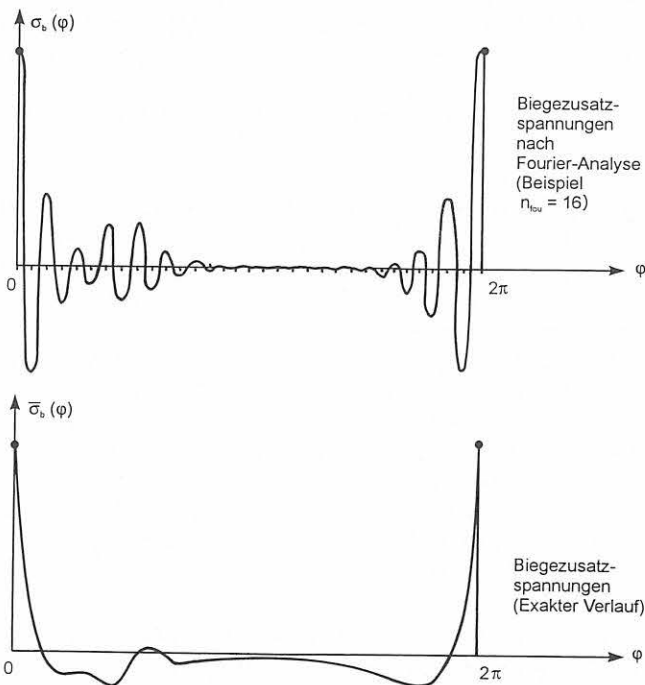


Abb. 3.2  
Berechnung der Biegezusatzspannungen für Behälter mit Aufdachung und sonstiger Imperfektion unter Innendruck nach dem Pich-Verfahren

blems wird mit der Pich-Formel der geometrische, globale Ansatz von Zeman (siehe Abschnitt 2.4 und [7]) nachgebildet und dabei gezeigt, wie unterschiedlich dann die Ergebnisse ausfallen.

Im folgenden werden die Grundlagen des Verfahrens kurz dargestellt, Verfahrenseigenschaften getestet und Strukturspannungsformzahlen in Beispielen berechnet.

### 3.2 Theoretische Grundlagen

Vorläufer der Pich-Formel ist eine Formel von Schmidt [2], die für ovale (elliptische) Behälter aufgestellt worden ist. Schmidt legt seinen Betrachtungen die Differentialgleichung des schwach gekrümmten Balkens nach Boussinesq [1] zugrunde:

$$\partial^2 w / \partial \phi^2 + w = - (1 - \mu^2) / (E \cdot I) \cdot r^2 \cdot M_\phi \tag{3.2-1}$$

Die Gleichung ist in Polarkoordinaten formuliert. Sie enthält die Parameter:

- w = Elastische Durchbiegung,
- phi = Winkel (Polarkoordinate),
- E = Elastizitätsmodul,
- I = Trägheitsmoment,
- mu = Querkontraktion,
- r = Radius,
- M\_phi = Biegemoment.

Hiervon ausgehend entwickelt Schmidt eine Spannungsformel für den Behälter als ringförmig geschlossenes Balkensystem, bei dem die Abweichung von der Kreisform durch Kosinus-Terme beschrieben wird. Einzelheiten sind [2] zu entnehmen. Die Schmidt-Formel wird unter der Betrachtung von Biegung im verformten Zustand bei Innendruck aufgestellt und berücksichtigt eine Ordnungszahl n der Ovalität. Die Ordnungszahl n gibt an, wie viele Kosinus-Perioden im Intervall der Polarkoordinate phi = 0 bis 2 \* pi untergebracht sind (siehe Abb. 2.3). Realistische technische Anwendungen sind für n = 2 (elliptisch-ovaler Querschnitt) denkbar. Die Fälle n = 3 und mehr (dreiecksförmig, kissenförmig, Pentagon usw.) sind – wenn sie für sich allein stehen – nur von theoretischem Wert.

Jedoch kommt dem Schmidt-Ansatz und der Ordnungszahl n als Grundlage für das darauf aufbauende Pich-Verfahren erhebliche Bedeutung zu: Der Ansatz stellt die analytische Grundlage für die Superposition von n-Ovalitäten im Rahmen einer Fourier-Analyse dar (siehe Abb. 2.3):

$$\underline{\text{Boussinesq} + \text{Schmidt} + \text{Fourier} = \text{Pich.}}$$

Die Zusammenführung dieser Ansätze liefert also im Ergebnis das Pich-Verfahren, bestehend aus Fourierreihen für die Beschreibung eines beliebigen Behälter-Radius r = r(phi) und zu diesem System gehörigen Biegespannungen sigma\_b = sigma\_b(phi):

$$r = r_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cdot \cos(n \cdot \phi) + B_n \cdot \sin(n \cdot \phi)) \tag{3.2-2}$$

$$\sigma_b = 6 \cdot p \cdot r_0 / s^2 \cdot \sum_{n=2}^{\infty} K_n \cdot (A_n \cdot \cos(n \cdot \phi) + B_n \cdot \sin(n \cdot \phi)) \tag{3.2-3}$$



Pich verwendet in seinen Formeln  $n$  als laufenden Index, um die Assoziation mit der Ordnungszahl von Schmidt zu wahren. Der Endindex bei der Harmonischen Analyse wird daher hier mit  $n_{\text{fou}}$  bezeichnet, wobei  $n_{\text{fou}}$  an die Stelle von  $\infty$  tritt.

Bei Hinzuziehung von Literatur zur Fourier-Analyse und Software-Dokumentation zu Fourier-Analysen-Aufrufen ist hinsichtlich der jeweiligen Bedeutung des verwendeten  $n$  für den Leser erhöhte Aufmerksamkeit geboten!

Der Einfluß von Schmidt schlägt sich in der Pich-Formel in dem Faktor  $K_n$  nieder, der die Elastizität, Ordnungszahl, Belastung, Geometrie und Berücksichtigung des statischen Gleichgewichts am verformten Zustand (geometrische Nichtlinearität) enthält:

$$K_n = 1/(1 + m) \quad (3.2-4)$$

$$m = 3/2 \cdot (1 - \mu^2)/(n^2 - 1) \cdot p/E \cdot (D_m / s)^3 \quad (3.2-5)$$

$$D_m = 2 \cdot r_0 \quad (3.2-6)$$

Zur Vervollständigung werden hier noch der Membranspannungsanteil  $\sigma_p$ , die damit von Pich definierte Spannungskennzahl  $\psi_b$  und die Strukturspannungsformzahl  $f$  angegeben:

$$\sigma_p = (p \cdot D_m)/(2 \cdot s) \quad (3.2-7)$$

$$\psi_b = \sigma_b/\sigma_p = 6/s \cdot \sum_{n=2}^{\infty} K_n \cdot (A_n \cdot \cos(n \cdot \varphi) + B_n \cdot \sin(n \cdot \varphi)) \quad (3.2-8)$$

$$f = 1 + \psi_b \quad (3.2-9)$$

Obige Formeln enthalten die Parameter:

$r$	=	$r(\varphi)$ , Behälterradius an der Stelle $\varphi$ ,
$\varphi$	=	Winkel im Polarkoordinatensystem,
$r_0$	=	mittlerer Behälterradius,
$n$	=	laufender Index,
$A_n, B_n$	=	Fourierkoeffizienten,
$\sigma_b$	=	$\sigma_b(\varphi)$ , Biegespannung an der Innenoberfläche,
$p$	=	Hydrostatischer Behälter-Innendruck,
$s$	=	Wanddicke des Behälters,
$K_n$	=	Koeffizient für das elastische Verhalten,
$E$	=	Elastizitätsmodul,
$\mu$	=	Querkontraktion,
$D_m$	=	mittlerer Behälter-Durchmesser,
$\sigma_p$	=	Dampfdruckspannung (Kesselformel),
$\psi_b$	=	$\psi_b(\varphi)$ , Spannungskennzahl an der Innenoberfläche,
$f$	=	Strukturspannungsformzahl.

Eine ausführliche Erläuterung der Parameter ist im Anhang A1 enthalten, wo gleichzeitig ein rechenzeitsparender Vereinfachungsvorschlag gemacht wird.

Die von Pich entwickelte Formel stand anfangs vor der Hürde des mit großer Anzahl Koeffizientenpaare  $n_{\text{fou}}$  (Approximation von  $\infty$ ) explodierenden Rechenaufwandes, zumal seinerzeit noch nicht der Fast-Fourier-Algorithmus gefunden worden war und die Rechenautomaten langsam arbeiteten.

Diese Hemmnisse sind zwischenzeitlich beseitigt, und es bereitet keine Schwierigkeit mehr, die gewünschten Spannungsergebnisse aus der Pich-Formel ohne merkliche Rechenzeit zu erhalten.

### 3.3 Behältervermessung und Eingabevorschriften

Die Praxisnähe des Pich-Verfahrens drückt sich darin aus, daß vorhandene Behälter innen durch Aufspannen eines Dreibeins in einer bestimmten Querschnittsebene und anschließende Vermessung durch Winkel und Radius erfaßt und so dem Rechenverfahren zugeführt werden können. Dabei ist das Meßprotokoll zunächst noch frei hinsichtlich der Bestimmung der Meßpunktedichte und eventueller Konzentration auf örtlich starke Imperfektion aufweisende Behälter-Bereiche.

Jedoch muß dem Meßdatenerfasser von vornherein klar sein, daß die aufgenommenen Daten auf die Eingabevorschrift des Pich-Verfahrens umzuwandeln sein werden. Die in den Fourier-Reihen auftretenden Ordnungszahlen  $n$  haben auf der Eingabeseite den Charakter, den Winkelbereich  $\varphi = 0$  bis  $2 \cdot \pi$  äquidistant in  $2 \cdot n_{\text{fou}}$ -Bereiche mit entsprechend vielen Stützstellen zu unterteilen. Jede dann vorhandene Stützstelle muß wertmäßig mit Angabe eines Radius besetzt werden. Dieses führt auf die Stützstellenzahl:  $n_{\text{rad}} = 2 \cdot n_{\text{fou}}$  (siehe Abb. 3.1).

Für weitgehend perfekte kreisförmige Behälter heißt dieses, den Nennradius so oft wiederholend einzugeben, wie die Eingabevorschrift es verlangt. Ist das Meßprotokoll nicht entsprechend mit Werten besetzt, so sind diese nach Art einer Interpolation zu ergänzen. Entsprechendes gilt, wenn ein Behälter nicht vermessen, sondern durch geometrisches Bildungsgesetz definiert wird.

Die Besetzung von  $n_{\text{rad}} = 2 \cdot n_{\text{fou}}$  Eingabewerten macht die Pich-Formel für den Anwender etwas unhandlich. Dabei ist es unerheblich, ob etwa  $n_{\text{rad}} = 128, \dots, 1024$  oder vielleicht nur 64 ist, weil für den Anwender jede über Einzelwerte hinausgehende, in Tabellenumfang bereitzustellende Datenmenge (Radien) unbequem ist. Der Anwender wird daher nach einer Interpolationsformel suchen, die es ihm ermöglicht, weiterhin mit wenigen Meßwerten auszukommen und die benötigten Zwischenwerte automatisch erzeugen zu lassen. Interpolationsformeln können z. B. mit Hilfe von Spline-Funktionen aufgestellt werden. Hierzu ist im Anhang A3 ein entsprechend programmierter Vorschlag zu finden, der in Aufwand und Datenkontrolle anwenderfreundlich ist, weil er von einer im allgemeinen sehr viel kleineren Meßdatenmenge  $m_{\text{rad}}$  (Radien) ausgeht.

Dem Anwender hat bei der Frage der Eingabedaten aber bewußt zu sein, daß das mechanische Problem des imperfekten Behälters mit Aufdachung außerordentlich empfindlich bereits gegen kleine Variationen im Interpolationsbereich ist, was in entsprechend großen Spannungsausschlägen sichtbar wird. Diese Sensitivität kommt im Rahmen der vor-

liegenden Studie, z. B. bei Gegenüberstellung des Kreis/Tangente-Systems mit der globalen Zeman-Geometrie (siehe Abschnitt 2.4), zum Ausdruck. Bei Anwendung von Spline-Funktionen sei daher empfohlen, sich durch numerische Variationen mit den Interpolationseigenschaften vertraut zu machen. Um die Spline-Funktion nicht zu überfordern und zu falschen Glättungen oder Ausbuchtungen zu veranlassen, kann der Anwender in Bereichen, wo die Meßdaten unstrittig durch Redundanzen ergänzt werden können (z. B. über einen größeren Winkelsektor konstant gemessener Behälterradius), entsprechende Werte vor dem Spline-Aufruf von Hand in die Eingabedaten einfügen, und so die Spline-Funktion zusätzlich stützen (siehe Abb. 3.3).

Um Mißverständnisse auszuschließen, sei betont, daß es sich bei den Rahmenbedingungen nicht um eine Schwäche des Pich-Verfahrens handelt, sondern im Gegenteil eher um eine Stärke:

Die Pich-Formel kann eine in der Praxis vorkommende Behältergeometrie bei Bedarf beliebig genau erfassen. Gleichzeitig bietet sie dem Anwender aber auch Möglichkeiten für vereinfachte Systemannahmen oder Anpassung an anderweitig vorgegebene geometrische Bildungsgesetze. Die analytische Stärke des Pich-Verfahrens läßt sich an einem Kontrast-Beispiel belegen (siehe Abb. 3.7): Wird ein Behälter mit ideal quadratischem Querschnitt für Testzwecke modelliert und unter Innendruck mit Pich berechnet, so zeigt der Verlauf der Biegezusatzspannung über eine Behälterkante den zu erwartenden Momentenverlauf wie bei einem an beiden Enden eingespannten Biegestab – jedoch erweitert um den Entlastungseffekt infolge geometrisch nichtlinearer Wirkung der über die Ecken eingebrachten Axialzugkraft. Querschnitte dieser Art sind im übrigen bei Klimaanlagen oder Rauchgaskanälen durchaus praxisnah.

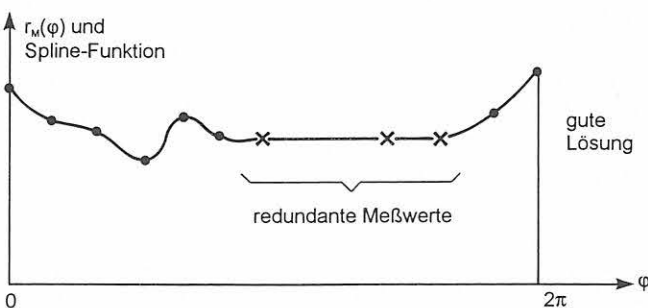
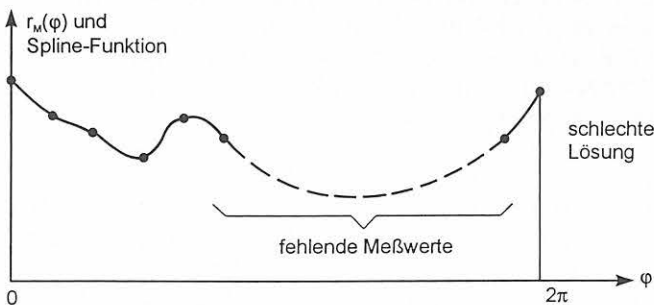


Abb. 3.3 Erzeugung von Spline-Funktionen für die numerisch interpolierende Ergänzung von Meßdaten (Anwendung auf Radien beim Pich-Verfahren)

### 3.4 Verfahrenseigenschaften

Der Einsatz des Pich-Verfahrens in der Praxis verlangt vom Anwender die Beherrschung der „Steuerparameter“ sowie Sicherheit in der Beurteilung des Verhaltens dieses Verfahrens. Jederzeit sollte der Anwender in der Lage sein, die berechneten Ergebnisse auf mechanische Plausibilität, Zutreffen der rechnerischen Tendenz und zahlenmäßigen Größenordnung zu überprüfen. Um dem Anwender hierzu einige verfahrenstypische Merkmale zur Verfügung zu stellen, werden die folgenden Verhaltensweisen des Pich-Verfahrens studiert:

- Entwicklung der geometrischen Nichtlinearität an einem normierten Behälter unter Laststeigerung,
- Güte des Berechnungsverfahrens in Abhängigkeit von der gewählten Anzahl Fourierkoeffizienten,
- Verhalten des Vereinfachten Pich-Verfahrens (siehe auch A1).

Es werden Kreis/Tangente-Systeme und Behälterformen mit Zeman-Geometrie parallel untersucht. Dabei werden auch Extremformen aus diesen Geometrie-Ansätzen betrachtet (Steile Spitzen bei Kreis/Tangente-Systemen, Überwiegen der Ovalität bei Zeman). Der Durchmesser bleibt zur besseren Vergleichbarkeit der Systeme konstant. Variiert werden jeweils für sich die Parameter: Wanddicke, Aufdachungshöhe und Innendruck.

Bezeichnungen:

E-Modul:  $E = 210000.0 [-]$  (dimensionslos gesetzt)

Querkontraktion:  $\mu = 0.3$

Belastung:  $p =$  Innendruck dimensionslos  $[-]$ , teilweise hypothetisch, d. h. ohne Bezug zur Realität, nur numerische Studie

Die Eliminierung der physikalischen Dimension bei E und p soll Mißverständnissen in der Interpretation vorbeugen.

#### 3.4.1 Entwicklung der geometrischen Nichtlinearität an einem normierten Behälter unter Laststeigerung

Wie in Abschnitt 3.2 erwähnt hat das Pich-Verfahren die Eigenschaft, den zu berechnenden Behälter mit Imperfektionen geometrisch nichtlinear zu behandeln. Diese Eigenschaft geht aufgrund der Theorie des gekrümmten Balkens mit Berücksichtigung der Verformungen in das Verfahren ein. Um die Eigenschaft zu demonstrieren, wird ein fiktiver Behälter postuliert, dessen mechanisches Verhalten nur unter Rechengesichtspunkten, nicht aber für die Realität sinnvoll ist. Mit diesem System wird nun eine Lastschrittfolge gerech-

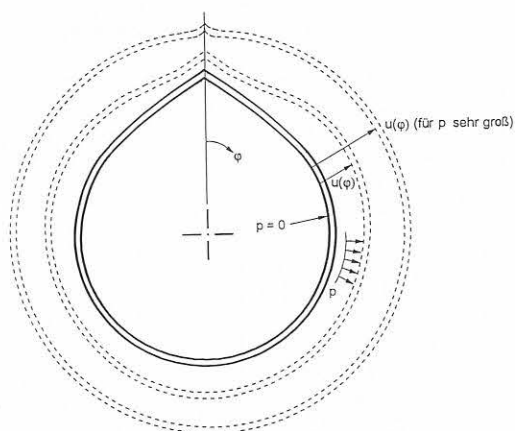


Abb. 3.4 Tendenz der geometrischen Nichtlinearität bei Behälterverformung unter Innendruck

net, die mit einem sehr kleinen Startwert für den hydrostatischen Innendruck (0.001) beginnt, sodann Werte mit steigenden Größenordnungen durchläuft, und schließlich bei einem Wert endet (1000000.0), der für fast  $\infty$  steht.

Diese Laststeigerung ist verbunden mit der Beibehaltung linear-elastischer Materialparameter (ebenfalls hypothetisch angenommen). Streckgrenze und sonstige Materialnichtlinearität werden ignoriert (siehe auch Abschnitt 2.6).

Die zu Beginn der Belastung ermittelte Strukturspannungsformzahl stellt praktisch den geometrisch linearen Fall (Spitzenwert) dar. Im Laufe der Laststeigerung muß die Strukturspannungsformzahl wegen geometrisch nichtlinearer Verformung des Behälters mit der Tendenz, die ideale Zylindergestalt zu erreichen, kontinuierlich abnehmen. Wird ein unendlich großer Innendruck numerisch simuliert, so wird rechnerisch die durch die Aufdachung bedingte Behälterimperfection verschwindend klein, weil die Zylindergestalt nahezu erreicht ist (siehe Abb. 3.4). Die Strukturspannungsformzahl muß dann gegen 1 konvergieren, was Tabelle 3.41 zeigt.

Tabelle 3.41 Entwicklung der geometrischen Nichtlinearität an einem normierten Behälter unter fiktiver Laststeigerung bis  $\infty$ ; Vergleich zwischen Kreis/Tangente-Geometrie (berechnet mit Pich) und Zeman-Geometrie global sowie Böck/Zeman lokal.

Behältergeometrie			Innendruck p [-]	Strukturspannungsformzahl		
$r_0$ [-]	s [-]	h [-]		Kreis/ Tang.	Zeman	Böck/ Zeman
1005	10	10	0.001	6.726	5.458	5.495
1005	10	10	1.000	5.374	2.138	4.480
1005	10	10	2.000	4.905	1.836	4.127
1005	10	10	5.000	4.184	1.547	3.588
1005	10	10	10.000	3.608	1.393	3.156
1005	10	10	20.000	3.055	1.281	2.743
1005	10	10	50.000	2.425	1.179	2.274
1005	10	10	100.000	2.047	1.126	1.996
1005	10	10	200.000	1.754	1.088	1.781
1005	10	10	500.000	1.471	1.054	1.578
1005	10	10	1000.000	1.318	1.036	1.471
1005	10	10	1000000.0	1.001	1.000	1.229

Diese Betrachtung ist – obwohl für Druckbehälter in der Praxis zahlenmäßig so nicht vorkommend – in der Aussage wesentlich: Es wird numerisch plausibel gezeigt, daß das Rechenverfahren in den richtigen Grenzen arbeitet.

### 3.4.2 Güte des Berechnungsverfahrens in Abhängigkeit von der Anzahl Fourierkoeffizienten

Das Pich-Verfahren hatte ursprünglich den Nachteil, hohe Rechenzeit in Kauf zu nehmen, so daß die Frage nach der erforderlichen Anzahl Fourierkoeffizienten aus wirtschaftlichen Gründen gestellt wurde. Mit der Bereitstellung der Fast-Fourier-Transformation (FFT) und der Weiterentwicklung der Rechenautomaten wurde diese Frage gegenstandslos soweit es allein um die Bestimmung der Fourierkoeffizienten geht. Die im Gesamtverfahren mit enthaltene Spannungsberechnung läßt sich allerdings nicht der FFT unterwerfen, weil nicht-konstante Faktoren in die einzelnen Fourier-Reihenglieder einzumultiplizieren sind. Dieses wird aber in der Regel nicht zum Engpaß, wenn nur die Maximalspannung an vorher bekannter Stelle (Aufdachungsspitze) berechnet werden soll.

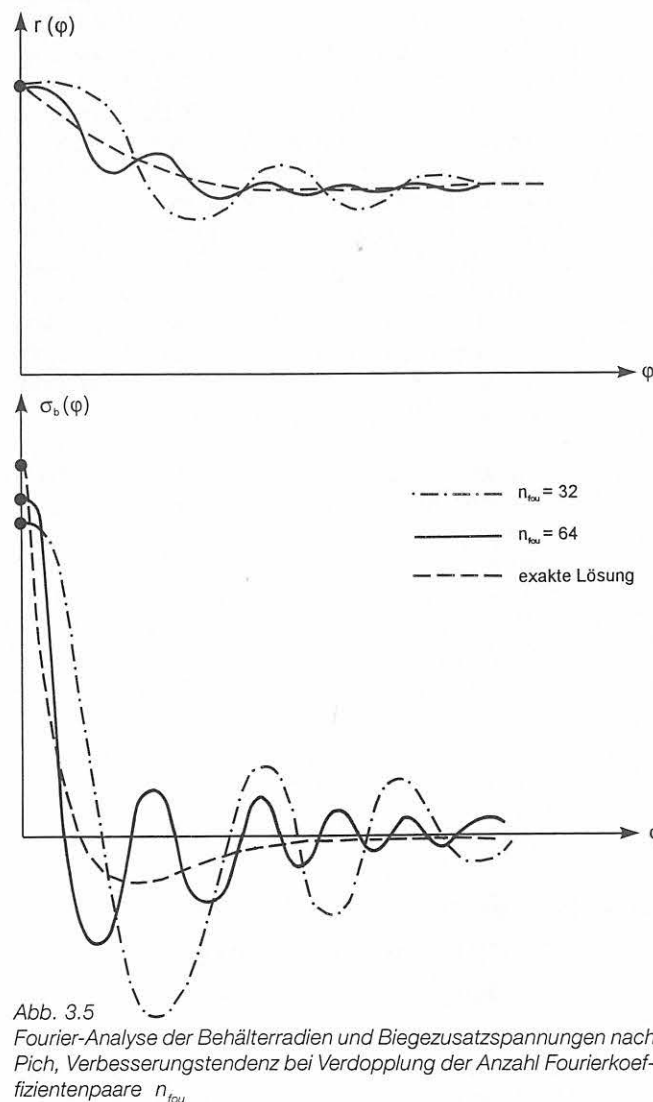


Abb. 3.5 Fourier-Analyse der Behälterradien und Biegezusatzspannungen nach Pich, Verbesserungstendenz bei Verdopplung der Anzahl Fourierkoeffizientenpaare  $n_{Fou}$

Tabelle 3.42  
Güteeigenschaften des Berechnungsverfahrens in Abhängigkeit von der gewählten Anzahl Fourierkoeffizienten ( $2 \cdot n_{\text{fou}}$  entspr.  $n_{\text{fou}}$  Paare  $A_{r_i}, B_{r_i}$ )

Behältergeometrie				Innen- druck	Fourier	Strukturspannungsformzahl			
$r_0$ [-]	s [-]	h [-]	p [-]			Kreis/Tangente		Zeman	
				$2 \cdot n_{\text{fou}}$	Pich	Pich-V	Pich	Pich-V	
1005	10	10	1.0	8	2.027	2.027	1.770	1.770	
1005	10	10	1.0	16	2.569	2.569	1.781	1.781	
1005	10	10	1.0	32	3.877	3.877	1.985	1.985	
1005	10	10	1.0	64	4.951	4.951	2.091	2.091	
1005	10	10	1.0	128	5.256	5.256	2.125	2.125	
1005	10	10	1.0	256	5.345	5.348	2.135	2.135	
1005	10	10	1.0	512	5.368	5.371	2.137	2.138	
1005	10	10	1.0	1024	5.374	5.377	2.138	2.138	
1005	10	10	1.0	2048	5.376	5.378	2.138	2.138	
1005	10	10	1.0	4096	5.376	5.379	2.138	2.138	

An dieser Stelle sei auch darauf hingewiesen, daß bei Analysen mit kleiner Fourierkoeffizientenzahl der Gesamtspannungsverlauf über die Periode das für Fourier-Analysen typische alternierende Verhalten in stark ausgeprägter Form zeigt (siehe Abb. 3.5). Als Spannungsverlauf ist dann das Ergebnis in der Regel nicht mehr durchgängig verwendbar, während aber die Spitzenspannung an der Aufdachungsstelle durchaus brauchbar sein kann.

Für den Anwender ist es aber in jedem Fall wichtig zu wissen, welche Genauigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl Fourierkoeffizienten zu erwarten ist. Das Verhalten des Operators hängt sehr von der vorgegebenen imperfektions-behafteten Geometrie ab: Folgt der imperfekte Behälterradius mehr einer ovalen Form, so könnte diese bereits durch wenige Fourierkoeffizienten beschrieben werden. Man stelle sich z. B. die Eingabe eines rein elliptischen Behälters vor. Das Pich-Verfahren würde dann die Schmidt-Lösung für Ordnungszahl  $n = 2$  erzeugen. Höhere Fourierkoeffizienten würden zu Null ermittelt. Sind viele Unregelmäßigkeiten – z. B. bei Vermessung des Behälters – erfaßt worden, oder sind Winkelversatz und Axialversatz stark ausgeprägt, so benötigt der Fourier-Algorithmus entsprechend mehr Koeffizienten, um diese wirklichkeitsnah abzubilden.

Tabelle 3.42 zeigt, wie die Strukturspannungsformzahlen mit zunehmender Anzahl Fourierkoeffizienten gegen ihre Endwerte konvergieren. Die Endwerte selbst werden für das Kreis/Tangente-System und die gemischte Ovalität/Aufdachung nach Zeman bestimmt. Ferner wird der Verfahrenseinfluß von Pich-Original gegenüber Pich-Vereinfacht (siehe Abschnitt A1) bei der Toleranzschwelle  $K_{\text{lim}} = 0.99$  gezeigt. Die Studie des vereinfachten Algorithmus selbst folgt unter 3.4.3.

Alle Berechnungen werden an einem normierten System mit einheitlicher Laststufe durchgeführt.

### 3.4.3 Verhaltensstudie des Vereinfachten Pich-Verfahrens

Für Anwendungszwecke des Pich-Verfahrens, bei denen aus bestimmten Gründen doch die Rechenzeit kritisch wird (etwa,

weil eine Taschenrechner-Programmierung erfolgen soll oder Spannungsberechnung an allen Stützstellen und mehreren Interpolierten gefordert ist), wird hier der rechenzeitsparende Vereinfachungsvorschlag angeboten. Die vereinfachte Pich-Formel wird in Abschnitt A1 hergeleitet. Zum Verständnis der Studie mache sich der Leser vorher vertraut.

Die Studie des vereinfachten Algorithmus zeigt, welcher Fehler bei der berechneten Strukturspannungsformzahl in Abhängigkeit vom Grad der Vereinfachung entsteht. Den Berechnungen werden normierte Kreis/Tangente-Systeme zugrundegelegt. Die Untersuchungen werden für verschiedene Aufdachungshöhen, Laststufen und Anzahl Fourierkoeffizienten durchgeführt. Für jedes System werden verschiedene Toleranzschwellen  $K_{\text{lim}}$  gesetzt, die daraus folgenden Schranken  $n_{\text{lim}}$  ermittelt und die Strukturspannungsformzahlen berechnet. Diese werden denen aus dem Original-Pich-Verfahren gegenübergestellt und der Fehler in Prozenten bestimmt.

Der Verfahrenseinfluß von Pich-Original gegenüber Pich-Vereinfacht (siehe Abschnitt A1) wird unter Variation der Toleranzschwelle  $K_{\text{lim}}$  mit den Werten 0.90, 0.95 und 0.99 gezeigt. Die Ergebnisse der Studie sind in den Tabellen 3.43 bis 3.46 zusammengestellt. Die Ergebnisse belegen die hohe Effizienz des vereinfachten Pich-Verfahrens.

Zunächst fällt auf, daß jeweils für ein in einer Tabelle zusammengestelltes System die ermittelten Fourier-Schranken  $n_{\text{lim}}$  scheinbar unabhängig von der vorgegebenen Stützstellenzahl  $n_{\text{rad}}$  sind. Dieses ist aber nicht der Fall. Es besteht lediglich eine gewisse Unempfindlichkeit gegenüber  $n_{\text{rad}}$ , indem sich zeigt, daß bei Vergleich zweier Fourier-Analysen mit unterschiedlich großen Koeffizientenzahlen die Werte der niedrig indizierten Koeffizienten sich nur wenig ändern. (Zusätzliche hochindizierte Koeffizienten verfeinern den Verlauf des Ergebnisses, haben aber kaum Einfluß auf die Höhe der durch niedrigindizierte Koeffizienten bestimmten Amplituden.)

Zum Verständnis der Beziehung zwischen  $K_{\text{lim}}$  und  $n_{\text{lim}}$  sei Abschnitt A1 hier wie folgt resümiert (siehe Abb. 3.6):

- Die Toleranzschwelle  $K_{\text{lim}}$  ist Eingabeparameter.
- Die Fourier-Schranke  $n_{\text{lim}}$  wird berechnet.
- Der Verfahrensalgorithmus arbeitet nach dem Prinzip: Welche Schranke  $n_{\text{lim}}$  wird bei Vorgabe einer bestimmten Toleranzschwelle  $K_{\text{lim}}$  eines bestimmten Behälter-

Tabelle 3.43

Verhaltensstudie des Vereinfachten Pich-Verfahrens, Aufdachungshöhe 5 [-], Innendruck 1.0 [-]

Behältergeometrie				Innen- druck		Toleranz- Schwelle	Fourier- Schränke	Form- Zahl	Fehler
$r_0$ [-]	s [-]	h [-]	p [-]	$n_{\text{fou}}$	$K_{\text{lim}}$	$n_{\text{lim}}$	Pich-V	[%]	
1005	10	5	1.0	256	0.90	22	3.427	1.403	
1005	10	5	1.0	256	0.95	32	3.400	0.599	
1005	10	5	1.0	256	0.99	73	3.382	0.054	
1005	10	5	1.0	256	1.00	> 256	3.380	0.000	
1005	10	5	1.0	512	0.90	22	3.431	1.381	
1005	10	5	1.0	512	0.95	32	3.404	0.584	
1005	10	5	1.0	512	0.99	73	3.386	0.049	
1005	10	5	1.0	512	1.00	> 512	3.384	0.000	
1005	10	5	1.0	1024	0.90	22	3.432	1.375	
1005	10	5	1.0	1024	0.95	32	3.405	0.580	
1005	10	5	1.0	1024	0.99	73	3.387	0.047	
1005	10	5	1.0	1024	1.00	> 1024	3.385	0.000	

Tabelle 3.44

Verhaltensstudie des Vereinfachten Pich-Verfahrens, Aufdachungshöhe 5 [-], Innendruck 10.0 [-]

Behältergeometrie				Innen- druck		Toleranz- Schwelle	Fourier- Schränke	Form- Zahl	Fehler
$r_0$ [-]	s [-]	h [-]	p [-]	$n_{\text{fou}}$	$K_{\text{lim}}$	$n_{\text{lim}}$	Pich-V	[%]	
1005	10	5	10.0	256	0.90	69	2.596	0.772	
1005	10	5	10.0	256	0.95	101	2.584	0.297	
1005	10	5	10.0	256	0.99	229	2.577	0.013	
1005	10	5	10.0	256	1.00	> 256	2.576	0.000	
1005	10	5	10.0	512	0.90	69	2.607	0.700	
1005	10	5	10.0	512	0.95	101	2.595	0.261	
1005	10	5	10.0	512	0.99	229	2.589	0.027	
1005	10	5	10.0	512	1.00	> 512	2.589	0.000	
1005	10	5	10.0	1024	0.90	69	2.609	0.677	
1005	10	5	10.0	1024	0.95	101	2.598	0.247	
1005	10	5	10.0	1024	0.99	229	2.592	0.023	
1005	10	5	10.0	1024	1.00	> 1024	2.592	0.000	

Tabelle 3.45

Verhaltensstudie des Vereinfachten Pich-Verfahrens, Aufdachungshöhe 10 [-], Innendruck 1.0 [-]

Behältergeometrie				Innen- druck		Toleranz- Schwelle	Fourier- Schränke	Form- Zahl	Fehler
$r_0$ [-]	s [-]	h [-]	p [-]	$n_{\text{fou}}$	$K_{\text{lim}}$	$n_{\text{lim}}$	Pich-V	[%]	
1005	10	10	1.0	256	0.90	22	5.448	1.482	
1005	10	10	1.0	256	0.95	32	5.396	0.509	
1005	10	10	1.0	256	0.99	73	5.371	0.050	
1005	10	10	1.0	256	1.00	> 256	5.368	0.000	
1005	10	10	1.0	512	0.90	22	5.453	1.461	
1005	10	10	1.0	512	0.95	32	5.401	0.496	
1005	10	10	1.0	512	0.99	73	5.377	0.046	
1005	10	10	1.0	512	1.00	> 512	5.374	0.000	
1005	10	10	1.0	1024	0.90	22	5.454	1.456	
1005	10	10	1.0	1024	0.95	32	5.402	0.492	
1005	10	10	1.0	1024	0.99	73	5.378	0.044	
1005	10	10	1.0	1024	1.00	> 1024	5.376	0.000	

systems gefunden, das durch seine Geometrie, Steifigkeit und Höhe des Innendrucks charakterisiert ist ?

- Die Systemantwort enthält zwei wesentliche Einflüsse:
  1. Grad der Kompliziertheit der Ausgangsgeometrie,
  2. Maß der Inanspruchnahme geometrisch nichtlinearer Verformung unter Innendruck.

Die Fourier-Schranken  $n_{\text{lim}}$  hängen also unmittelbar von den gewählten Toleranzschwellen  $K_{\text{lim}}$  ab. Im übrigen hängen sie von dem mechanisch aktivierten geometrischen System-Verformungsverhalten ab. Ändert sich die Behältergeometrie

unter Innendruck nur wenig, so wirkt sich dieses in einer niedrigen Fourier-Schränke  $n_{\text{lim}}$  aus. Starke Verformung (Gestaltänderung) führt dagegen zu größeren Werten  $n_{\text{lim}}$ . Beispielsweise zeigt der Vergleich von *Tabelle 3.43* und *3.44*, daß allein bedingt durch Erhöhung des Innendrucks unter Beibehaltung aller übrigen Parameter die vom Verfahrensalgorithmus automatisch ermittelten Werte  $n_{\text{lim}}$  ansteigen. Wegen der Geschlossenheit der analytischen Lösung kann die Evaluierung der Werte  $n_{\text{lim}}$  direkt und vor der übrigen mechanischen Berechnung erfolgen.

Tabelle 3.46  
Verhaltensstudie des Vereinfachten Pich-Verfahrens, Aufdachungshöhe 10 [-], Innendruck 10.0 [-]

Behältergeometrie			Innen- druck		Toleranz- Schwelle	Fourier- Schranke	Form- Zahl	Fehler
$r_0$ [-]	$s$ [-]	$h$ [-]	$p$ [-]	$n_{\text{tot}}$	$K_{\text{lim}}$	$n_{\text{lim}}$	Pich-V	[%]
1005	10	10	1.0	256	0.90	69	3.621	0.840
1005	10	10	1.0	256	0.95	101	3.601	0.298
1005	10	10	1.0	256	0.99	229	3.591	0.013
1005	10	10	1.0	256	1.00	> 256	3.591	0.000
1005	10	10	1.0	512	0.90	69	3.636	1.766
1005	10	10	1.0	512	0.95	101	3.618	0.260
1005	10	10	1.0	512	0.99	229	3.609	0.027
1005	10	10	1.0	512	1.00	> 512	3.608	0.000
1005	10	10	1.0	1024	0.90	69	3.640	0.743
1005	10	10	1.0	1024	0.95	101	3.622	0.246
1005	10	10	1.0	1024	0.99	229	3.614	0.024
1005	10	10	1.0	1024	1.00	> 1024	3.613	0.000

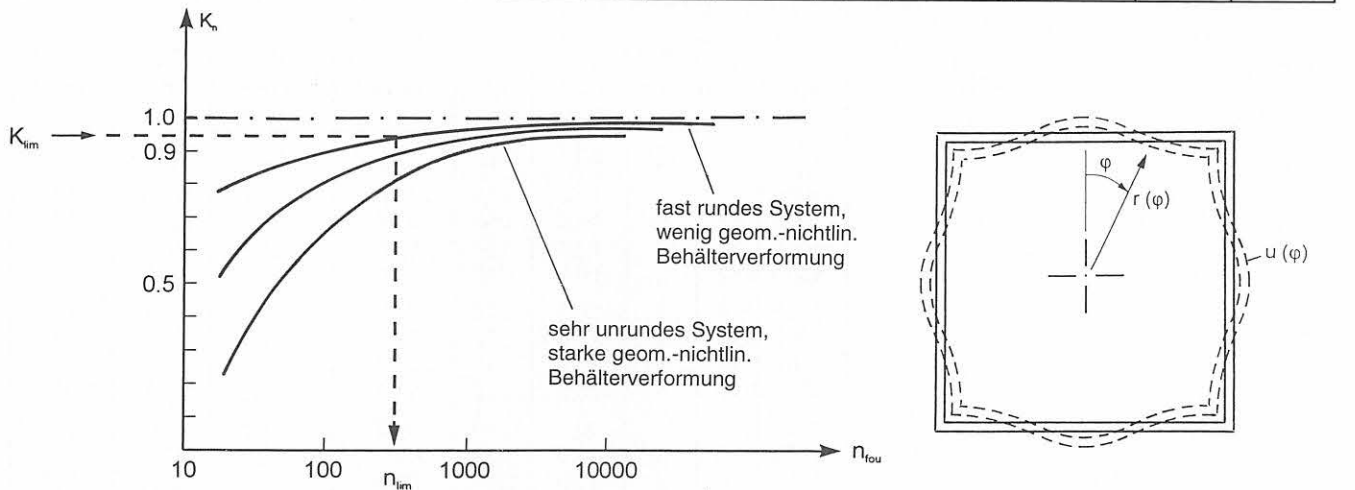


Abb. 3.6  
Vereinfachtes Pich-Verfahren, Beziehung zwischen Toleranzschwelle  $K_{\text{lim}} < 1$  und Fourier-Schranke  $n_{\text{lim}} < n_{\text{tot}}$

In den Tabellen bedeuten die Toleranzschwellen  $K_{\text{lim}} = 1.0$  ein Ausschalten des Vereinfachungs-Algorithmus und damit Rückkehr zum Original-Pich-Verfahren. Dieses ist so zu verstehen, daß  $K_{\text{lim}} = 1.0$  fordert, erst nach unendlich vielen, in die explizite Summation (siehe A1) einzubeziehenden Koeffizientenpaaren die numerische Vereinfachung einsetzen zu lassen, während aber die tatsächlich durchgeführte Harmonische Analyse mit begrenzter Anzahl Koeffizientenpaare  $n_{\text{tot}}$  arbeitet.

Die Rechenbeispiele in Tabelle 3.43 bis 3.46 zeigen, daß der durch den Vereinfachungsalgorithmus eingeschleppte Fehler bei der Bestimmung der Strukturspannungsformzahl sich mühelos weit unter 1 Prozent halten läßt.

Unter dem Aspekt der Programmierung sei noch einmal (vgl. A1) darauf hingewiesen, daß an der Spannungs-Bestimmungsstelle  $\varphi$  der dort vorliegende Behälterradius  $r(\varphi)$  in die Vereinfachungsformel mit eingeht. Dieser Radius ist – unabhängig von der Art seiner Erfassung durch Messung, Berechnung oder idealisierte Modellannahme – nach der Festlegung mit dem vollständigen Satz Fourierkoeffizienten assoziiert. Dies mag verdeutlichen, warum die Fourier-Schranke  $n_{\text{lim}}$  nicht als ein Vernachlässigen der weitergehenden Fourierkoeffizienten mißzuverstehen ist.

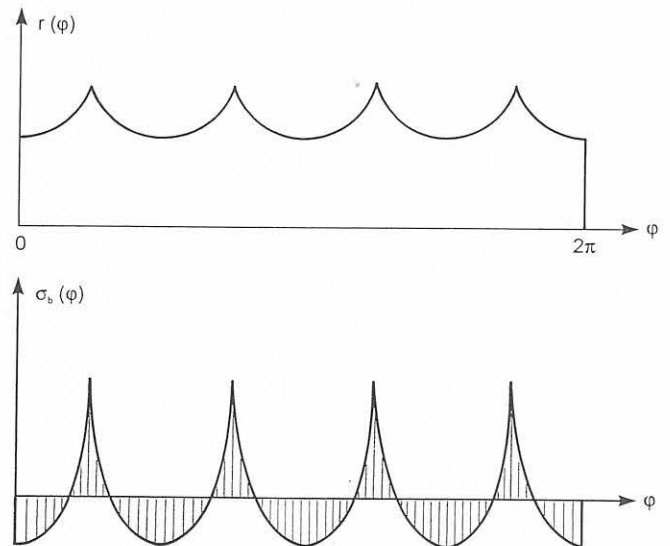


Abb. 3.7  
Testbeispiel Behälter mit quadratischem Querschnitt unter Innendruck, Berechnung der Biegespannungen mit dem Pich-Verfahren

### 3.5 Strukturspannungsformzahlen in Beispielen

Im folgenden soll das Pich-Verfahren für die Berechnung von Strukturspannungsformzahlen eingesetzt werden. Dabei wird ein Behälter zugrundegelegt, der Gegenstand eines Schadensfalles [18], [19], [20] geworden ist. Mit Parametervariationen werden hiervon ausgehend weitere mögliche Behältergeometrien mit verschiedenen Laststufen berechnet und tabellarisch gegenübergestellt.

Als geometrische Bildungsgesetze werden dem Pich-Verfahren das idealisierte Kreis/Tangente-System sowie hierzu vergleichend die globale Ovalisierung nach Zeman und der lokale analytische Kreis/Tangente-Ansatz nach Böck/Zeman vorgegeben. Variiert werden Durchmesser, Wanddicke und Aufdachungshöhe. Alle Systeme werden mit Laststufen gerechnet, die sich an der  $R_{p0,2}$ -Streckgrenze orientieren. Für alle gerechneten Systeme gelten folgende Parameter:

- E-Modul:  $E = 210000.0$  [MPa]
- Querkontraktion:  $\mu = 0.3$
- Belastung:  $p =$  Innendruck in [MPa]
- $p^* = 4.513$  [MPa],  
Bezug zu Schadensfall [18]
- $p_{max} = 2 \cdot 300 \cdot t/D_i$   
= zu  $0.7 \cdot R_{p0,2}$  gehöriger Innendruck

Die Ergebnisse sind in den Tabellen 3.51 bis 3.55 zusammengestellt. Darin kennzeichnet jeweils der mit einem “\*\*” markierte Wert p die Laststufe, die dem zulässigen Betriebsdruck des Schadensfall-Behälters entspricht. Wie sich aus den Tabellen ergibt, sind die Strukturspannungsformzahlen nach Zemanglobal grundsätzlich niedriger als die nach dem Kreis/Tangente-Bildungsgesetz. Die Kreis/Tangente-Ergebnisse nach Böck/Zeman liegen nahe an den Pich-Ergebnissen, sind aber auch nur als untere Abschätzung zu den tatsächlichen Werten aufzufassen. Insofern sollten diese für konservative Betrachtungen um eine Obergrenze, z. B. nach Brocks oder IIW-Pinned-Ends, ergänzt werden. Über die Akzeptanzfrage (vgl. obige Erörterung) kann sodann der Anwender leichter entscheiden, indem die Frage sich auf die Akzeptanz des Kreis/Tangente-Systems allein erstreckt.

Behältergeometrie			Innendruck p [MPa]	Strukturspannungsformzahl		
$D_a$ [mm]	s [mm]	h [mm]		Kreis/Tang.	Zeman	Böck/Zeman
2400	22	3	$2.801 = p_{max} \cdot 1/2$	1.732	1.220	1.562
2400	22	3	$3.735 = p_{max} \cdot 2/3$	1.720	1.196	1.553
2400	22	3	$4.513 = p^*$	1.711	1.181	1.546
2400	22	3	$5.603 = p_{max}$	1.700	1.165	1.538
2400	22	5	$2.801 = p_{max} \cdot 1/2$	2.181	1.366	1.914
2400	22	5	$3.735 = p_{max} \cdot 2/3$	2.157	1.326	1.896
2400	22	5	$4.513 = p^*$	2.140	1.301	1.883
2400	22	5	$5.603 = p_{max}$	2.118	1.275	1.866
2400	22	8	$2.801 = p_{max} \cdot 1/2$	2.823	1.586	2.424
2400	22	8	$3.735 = p_{max} \cdot 2/3$	2.777	1.521	2.389
2400	22	8	$4.513 = p^*$	2.744	1.482	2.364
2400	22	8	$5.603 = p_{max}$	2.703	1.439	2.334

Tabelle 3.51  
Strukturspannungsformzahlen nach Pich für Kreis/Tangente-Systeme und Systeme nach Zeman, Böck/Zeman, Parametervariante:  
 $D_a = 2400, s = 22$

Behältergeometrie			Innendruck p [MPa]	Strukturspannungsformzahl		
$D_a$ [mm]	s [mm]	h [mm]		Kreis/Tang.	Zeman	Böck/Zeman
2800	22	3	$2.395 = p_{max} \cdot 1/2$	1.726	1.194	1.556
2800	22	3	$3.193 = p_{max} \cdot 2/3$	1.713	1.172	1.547
2800	22	3	$4.513 = p^*$	1.695	1.148	1.534
2800	22	3	$4.790 = p_{max}$	1.692	1.144	1.531
2800	22	5	$2.395 = p_{max} \cdot 1/2$	2.169	1.323	1.903
2800	22	5	$3.193 = p_{max} \cdot 2/3$	2.143	1.286	1.883
2800	22	5	$4.513 = p^*$	2.108	1.246	1.857
2800	22	5	$4.790 = p_{max}$	2.102	1.240	1.852
2800	22	8	$2.395 = p_{max} \cdot 1/2$	2.799	1.517	2.402
2800	22	8	$3.193 = p_{max} \cdot 2/3$	2.750	1.458	2.365
2800	22	8	$4.513 = p^*$	2.685	1.394	2.316
2800	22	8	$4.790 = p_{max}$	2.673	1.384	2.307

Tabelle 3.52  
Strukturspannungsformzahlen nach Pich für Kreis/Tangente-Systeme und Systeme nach Zeman, Böck/Zeman, Parametervariante:  
 $D_a = 2800, s = 22$

Tabelle 3.53  
 Strukturspannungsformzahlen nach Pich für  
 Kreis/Tangente-Systeme und Systeme nach  
 Zeman, Böck/Zeman, Parametervariante:  
 $D_a = 2800, s = 44$

Behältergeometrie			Innendruck	Strukturspannungsformzahl		
$D_a$ [mm]	s [mm]	h [mm]	p [MPa]	Kreis/Tang.	Zeman	Böck/Zeman
2800	44	3	$4.513 = p^*$	1.385	1.168	1.295
2800	44	3	$4.867 = p_{max} \cdot 1/2$	1.384	1.164	1.294
2800	44	3	$6.490 = p_{max} \cdot 2/3$	1.381	1.149	1.291
2800	44	3	$9.735 = p_{max}$	1.375	1.128	1.287
2800	44	5	$4.513 = p^*$	1.631	1.280	1.486
2800	44	5	$4.867 = p_{max} \cdot 1/2$	1.629	1.274	1.484
2800	44	5	$6.490 = p_{max} \cdot 2/3$	1.622	1.248	1.479
2800	44	5	$9.735 = p_{max}$	1.610	1.214	1.470
2800	44	8	$4.513 = p^*$	1.988	1.449	1.767
2800	44	8	$4.867 = p_{max} \cdot 1/2$	1.985	1.438	1.765
2800	44	8	$6.490 = p_{max} \cdot 2/3$	1.971	1.397	1.754
2800	44	8	$9.735 = p_{max}$	1.949	1.345	1.737

Tabelle 3.54  
 Strukturspannungsformzahlen nach Pich für  
 Kreis/Tangente-Systeme und Systeme nach  
 Zeman, Böck/Zeman, Parametervariante:  
 $D_a = 2800, s = 66$

Behältergeometrie			Innendruck	Strukturspannungsformzahl		
$D_a$ [mm]	s [mm]	h [mm]	p [MPa]	Kreis/Tang.	Zeman	Böck/Zeman
2800	66	3	$4.513 = p^*$	1.263	1.156	1.201
2800	66	3	$7.421 = p_{max} \cdot 1/2$	1.261	1.139	1.200
2800	66	3	$9.895 = p_{max} \cdot 2/3$	1.259	1.129	1.198
2800	66	3	$14.843 = p_{max}$	1.257	1.114	1.197
2800	66	5	$4.513 = p^*$	1.433	1.260	1.334
2800	66	5	$7.421 = p_{max} \cdot 1/2$	1.429	1.232	1.330
2800	66	5	$9.895 = p_{max} \cdot 2/3$	1.426	1.215	1.328
2800	66	5	$14.843 = p_{max}$	1.421	1.190	1.324
2800	66	8	$4.513 = p^*$	1.685	1.416	1.531
2800	66	8	$7.421 = p_{max} \cdot 1/2$	1.677	1.371	1.525
2800	66	8	$9.895 = p_{max} \cdot 2/3$	1.670	1.344	1.520
2800	66	8	$14.843 = p_{max}$	1.660	1.304	1.512

Tabelle 3.55  
 Strukturspannungsformzahlen nach Pich für  
 Kreis/Tangente-Systeme und Systeme nach  
 Zeman, Böck/Zeman, Parametervariante:  
 $D_a = 4800, s = 22$

Behältergeometrie			Innendruck	Strukturspannungsformzahl		
$D_a$ [mm]	s [mm]	h [mm]	p [MPa]	Kreis/Tang.	Zeman	Böck/Zeman
4800	22	3	$1.388 = p_{max} \cdot 1/2$	1.700	1.121	1.535
4800	22	3	$1.850 = p_{max} \cdot 2/3$	1.684	1.106	1.523
4800	22	3	$2.775 = p_{max}$	1.659	1.088	1.504
4800	22	3	$4.513 = p^*$	1.623	1.070	1.478
4800	22	5	$1.388 = p_{max} \cdot 1/2$	2.118	1.202	1.859
4800	22	5	$1.850 = p_{max} \cdot 2/3$	2.087	1.177	1.836
4800	22	5	$2.775 = p_{max}$	2.037	1.147	1.798
4800	22	5	$4.513 = p^*$	1.968	1.117	1.747
4800	22	8	$1.388 = p_{max} \cdot 1/2$	2.704	1.323	2.319
4800	22	8	$1.850 = p_{max} \cdot 2/3$	2.646	1.283	2.275
4800	22	8	$2.775 = p_{max}$	2.554	1.235	2.207
4800	22	8	$4.513 = p^*$	2.430	1.187	2.114



## 4 Finite-Elemente-Analyse

### 4.1 Vorbemerkung

Die Berechnung von Behältern mit Aufdachung nach der Finite-Elemente-Methode ist numerisch aufwendig und in der Regel auch mit hohem Vor- und Nachbereitungsaufwand verbunden. Daher wird für Belange der Praxis oft angestrebt, den Einsatz der Methode zu vermeiden oder in Grenzen zu halten.

Hier wird die Methode benutzt, um bestimmte Fragen zu behandeln, die mit den einfacheren Berechnungsverfahren nicht zu beantworten sind. Dazu werden zunächst Rechen-ergebnisse zum Problem des Behälters mit Aufdachung erzeugt, die über andere Verfahren bereits bestimmt worden sind und sich somit zur numerischen Verifizierung des Finite-Elemente-Modells eignen.

Das gewählte Grundsystem besteht aus der dreidimensionalen Struktur eines größeren Behälterteils mit Simulation eines Behälterdeckels am Ende (vereinfacht als translationssteife Scheibe, rotationsweich), und eines eben bleibenden Mittenquerschnitts, jeweils mit kinematischen Randbedingungen entsprechend modelliert (siehe Abb. 4.11). Als Elementtyp wird das Volumenelement mit 27 Knoten gewählt, das sich durch Vollständigkeit des isoparametrischen Elementansatzes auszeichnet (Abb. 4.12). Dieses ist wichtig, um den Einsatz des Elementes für Spannungszustände zu ermöglichen, die allen drei Zylinderrichtungen (tangential umlaufend, radial, längsaxial) ausgeprägtes Gradientenverhalten aufweisen (Membranspannung, Biege- und Schubspannung). Im eigentlich interessierenden Bereich der Behälteraufdachung wird ein Feinnetz aus drei Schichten mit engerer Vermaschung als im übrigen Behälterbereich modelliert (Abb. 4.13), das sich für Systemstudien mit Kontinuumsverhalten eignet.

Vorversuche mit Systemen vorwiegend ebenen Charakters, die mit einer Elementschicht in Axialrichtung und demzufolge sehr kleiner Unbekanntenzahl gebildet sind (Abb. 4.14), ergeben, daß wegen der großen Schlankheit dieser Systeme aufgrund des Verhältnisses von kleiner Wanddicke zu großem Radius numerische Konditionsprobleme auftreten. Mit verschiedenen Programmcodes, die unabhängig voneinander laufen, gibt es Probleme, den physikalisch vorhandenen Gleichgewichtszustand aus Innendruckbelastung und elastischer Verformung zu bestimmen: Direkte Gleichungslöser melden Singularität bei der Pivot-Bestimmung. Iterative Gleichungslöser entwickeln numerisches Schwingen ohne Konvergenz.

Abhilfe wird durch Expansion der Finite-Elemente-Systeme in Axialrichtung geschaffen (Abb. 4.15). Diese für die Interpretation der Ergebnisse in der Regel nicht notwendige Systemerweiterung hat eine signifikant bessere Kondition des statischen Gleichungssystems zur Folge. Die erzielte Stützwirkung erklärt sich aus der gegenüber dem Einschichtsystem erweiterten dreidimensionalen Nebendiagonalkopplung, sowie der konditionsverbessernden Wirkung der kinematischen Fesseln am Behälterende.

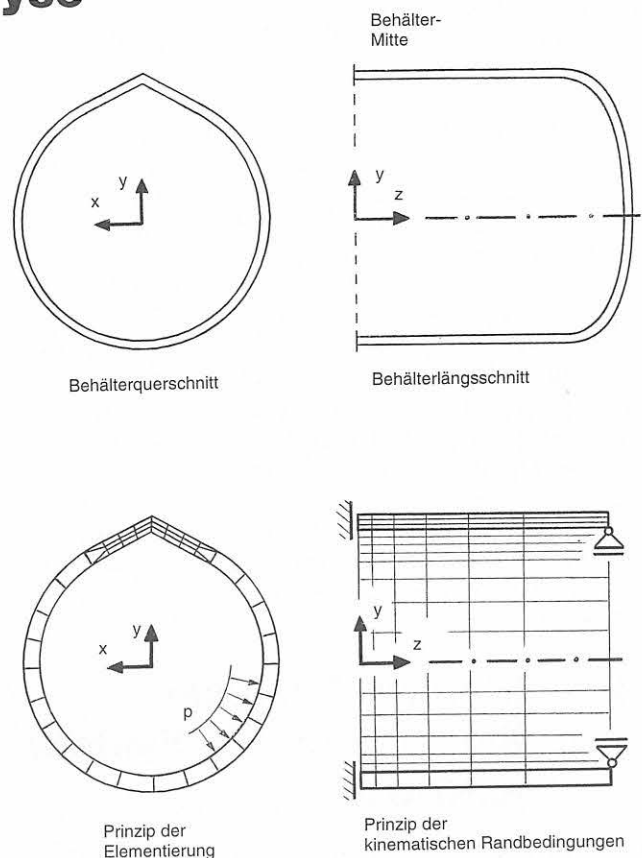


Abb. 4.11  
Modellierung des Behälters mit Aufdachung durch Finite Elemente  
(Prinzip, ohne Maßstab)

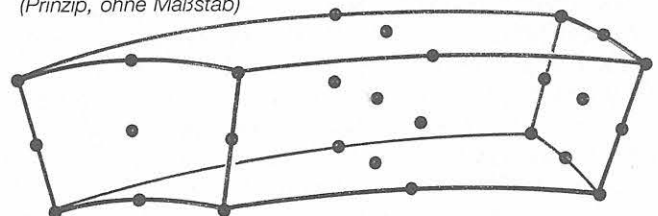


Abb. 4.12  
Isoparametrisches Volumenelement mit 27 Knoten

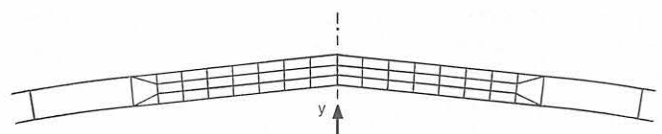


Abb. 4.13  
Finite-Elemente-Feinnetz im Aufdachungsbereich

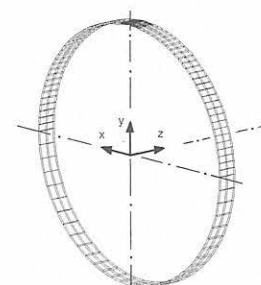


Abb. 4.14  
Modellierung eines quasi-ebenen Systemausschnittes aus der Behältermitte für den Test der numerischen Stabilität verschiedener Lösungs-  
algorithmen

Mechanisch ist dieser Effekt plausibel, wenn man einen in den Endquerschnitten geschlossenen Behälter mit einem offenen zylindrischen Behälterteil (ohne Boden und Deckel) vergleicht. Ein solches Behälterteil ist weniger stabil.

Beim Finite-Elemente-System ist nunmehr aber darauf zu achten, daß der Einfluß des Endquerschnittes mit seinen kinematischen Fesseln am ungefesselt zu interpretierenden Querschnitt in Behältermitte abgeklingen ist. Dieses wird durch Verformungskontrolle sowie Vergleich benachbarter Spannungszustände überprüft. Das Verformungsprofil auf der Oberfläche zeigt in Axialrichtung eine Wellenlinie, die in eine zur unverformten Gestalt parallele Gerade einmündet (Abb. 4.16). Die Spannungszustände steigen in Axialrichtung zur Behältermitte hin an und konvergieren (nach alternierendem Abklingen des Randeinflusses) auf die gewünschten Werte in Behältermitte (Abb. 4.17 und 4.18).

Diese Ausführungen gelten für alle gerechneten Finite-Elemente-Systeme. In den folgenden Abschnitten werden die speziellen Merkmale der Modellvariation mit ihrer Bedeutung behandelt.

## 4.2 Lineare Analyse Kreis/Tangente-System (LINROOF)

Das System LINROOF beinhaltet das Grundsystem des Behälters mit Aufdachung nach dem Bildungsgesetz Kreis/Tangente (Abb. 4.21). Diese Behälterform postuliert, daß das Fertigungsergebnis mit der Winkelimperfection in der Längsschweißnaht vereinfachend in dieser Weise beschrieben werden kann, während die tatsächliche Geometrie weitere Imperfektionen haben könnte, die nur durch genaue Vermessung des Behälters erhältlich sind. Die Kombination Kreis/Tangente geht von kreisrund gewalzten Blechen aus, bei denen die Blechenden unverformt bleiben. In der Praxis gibt es zwischen Kreis und Tangente eventuell noch eine Übergangszone, die aus allmählicher Verringerung der Plastizierung im Blech entsteht (siehe Abb. 1.1 und 1.4). Genaue Angaben hierzu sind aber herstellerabhängig. Fehlen diese und liegen hierzu auch keine Meßdaten vor, so ist bei rechnerischen Nachweisen nur die Gegenüberstellung verschiedener Modelle möglich.

Die Finite-Elemente-Analyse für das Kreis/Tangente-Grundsystem wird mit linear-elastischem Materialgesetz und Annahme der Theorie kleiner Verformungen (Geometrische Linearität) gerechnet. Die Verformungskontrolle zeigt das für alle Behälter mit Aufdachung typische Verhalten, den elastischen Gleichgewichtszustand derart zu finden, daß eine ideale Zylindergestalt des verformten Systems angestrebt wird. Die radialen Verschiebungsbeträge sind in der Aufdachungsspitze kleiner als im Bereich des geometrisch ungestörten Zylinders. In der Umgebung des Kreis/Tangente-Übergangsbereiches tritt örtliche Biegung mit einmaligem Vorzeichenwechsel des Biegeterms ein, welcher dem allgemeinen (auch nach der Kesselformel abschätzbaren) Membranspannungszustand überlagert ist.

Die Finite-Elemente-Analyse ließe sich grundsätzlich mit beliebigen geeigneten Elementtypen durchführen, etwa für 2D-

Analysen mit Balkenelementen oder Scheibenelementen, für 3D-Analysen mit Schalenelementen oder Volumenelementen. Hier wird bewußt von vornherein die 3D-Analyse mit Volumenelementen gewählt, um für Modellvariationen im Kontinuumsbereich der kritischen Schweißnaht in der Aufdachungsspitze gerüstet zu sein. Im Grundsystem LINROOF bleiben die mit Volumenelementen erzielbaren Aussagen noch weitgehend so, wie sie bei Verwendung von Balkenelementen herausgekommen wären. Was aber erkennbar wird, ist die Entwicklung einer Spannungsspitze auf der Innenseite der Aufdachung, die bei nicht vorhandener Ausrundung ( $r = 0$ ) kontinuumsmechanisch eine Singularität darstellt, und deren numerische Begrenzung auf einen endlichen Wert von der Diskretisierung durch das angrenzende Finite Element bewirkt wird. Die Verwendung dieses Spitzenwertes für die Interpretation von Schweißnahtspannungen ist so noch nicht sinnvoll, da hier mehrere nicht wirklichkeitsnahe Idealisierungen zusammenlaufen (Verzicht auf Schweißnahtmodellierung, Kerbradius Null, keine Erfassung örtlicher Plastizität).

Für die Interpretation von Spannungen würde sich eher eine definierte Stelle in der Nachbarschaft der Aufdachungsspitze eignen. Diese könnte nach einer Vorgehensweise gemäß DIN 8551 festgelegt werden, indem z. B. Bezug genommen wird auf Vermaßung und Öffnungswinkel der Fugen-

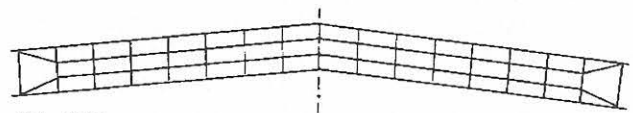


Abb. 4.21 Finite-Elemente-Netz im Aufdachbereich System LINROOF (ohne Modellierung der Schweißnaht)

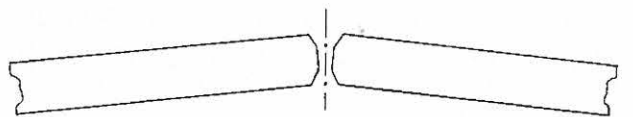


Abb. 4.22 Fugenform gemäß Schweißnahtvorbereitung nach DIN 8551, Kennzahl 7, und daraus abgeleitete Anwendung auf den Behälter mit Aufdachung

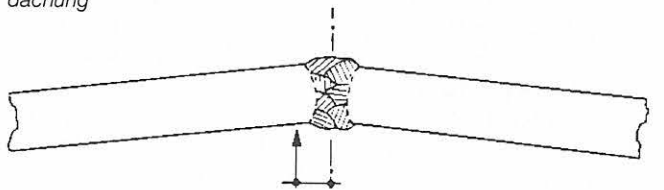


Abb. 4.23 Örtliche Schweißnahtsituation mit Kerben am Übergang vom Grundwerkstoff zur Schweißnaht, Festlegung der Stelle der Interpretation von Strukturspannungen

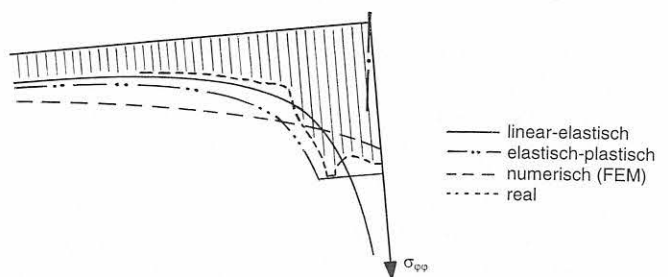


Abb. 4.24 Unterschiedliche Spannungsarten je nach Ansatz der Betrachtung

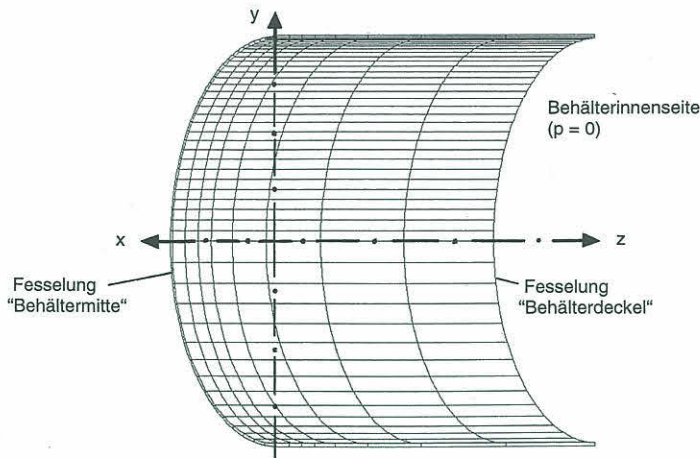


Abb. 4.15 Finite-Elemente-Gesamtmodell des Behälters mit Aufdachung (halbes System dargestellt); Proportionen zwischen grober und feiner Elementierung entsprechend erforderlicher Auflösung

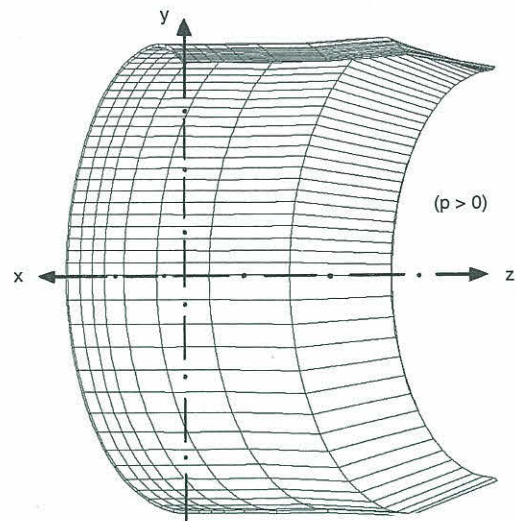


Abb. 4.16 Verformung des Finite-Elemente-Modells bei hydrostatischem Innendruck; Elastisches Durchschwingen vom gefesselten Rand (rechts, "Behälterdeckel") zur Behältermitte (links)

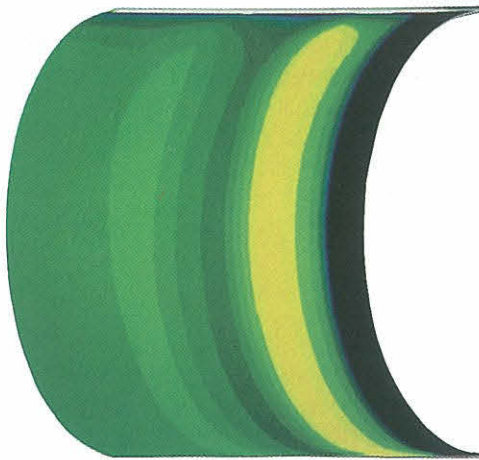


Abb. 4.17 Spannungskomponente  $\sigma_{00}$  in Umfangsrichtung tangential auf der Innenoberfläche des Finite-Elemente-Modells des Behälters mit Aufdachung infolge Innendruck

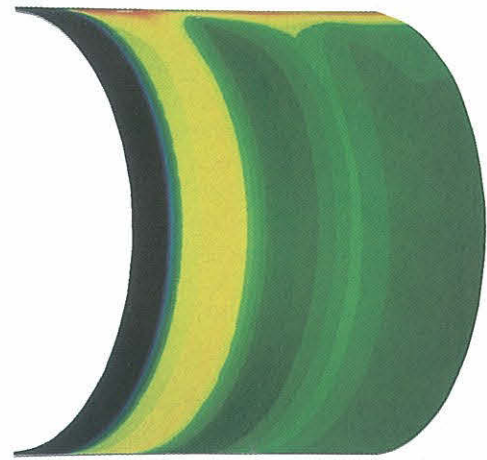


Abb. 4.18 Spannungskomponente  $\sigma_{00}$  in Umfangsrichtung tangential auf der Außenoberfläche des Finite-Elemente-Modells des Behälters mit Aufdachung infolge Innendruck

form für eine DY-Schweißnaht (Abb. 4.22). Findet die Schweißnahtvorbereitung an Blechenden statt, die mit Aufdachung zusammengeschweißt werden, so ergibt sich die in Abb. 4.23 dargestellte örtliche Situation, in die der Spitzenwinkel der Aufdachungsspitze mit eingeht.

Um die gesuchten Strukturspannungen wirklichkeitsnah abschätzen zu können, ist es empfehlenswert, sich die theoretisch unterschiedlichen Spannungsarten vor Augen zu führen (Abb. 4.24):

- Spannungsspitze als Singularität gemäß linear-elastischer Kontinuumsbetrachtung (wie oben erwähnt),
- Spannungsmaximum bei örtlicher Plastizierung an der Aufdachungsspitze,
- Spannungsergebnis aus numerischer Berechnung in Abhängigkeit von den analytischen Finite-Element-Eigenschaften und bei Variation der Finite-Elemente-Netzfeinheit,
- Reale Spannungen im Bereich der Schweißnaht (mit allen Fertigungseinflüssen).

Die Gegenüberstellung der Spannungsarten zeigt, daß es im allgemeinen nicht gelingt, mit einem Schritt die „richtige“

Spannung zu bestimmen. Im folgenden werden zunächst Finite-Elemente-Rechnungen mit Parametervariationen angestellt.

### 4.3 Geometrisch nichtlineare Analyse Kreis/Tangente-System (NONROOF)

Das System NONROOF übernimmt vom System LINROOF die Geometrie, Randbedingungen, Materialparameter und Belastung. Für die statische Analyse wird im Unterschied zu vorher gefordert, Theorie großer Deformationen anzuwenden (Geometrische Nichtlinearität = Große System-Verschiebungen und Verdrehungen). Dieses hat zur Folge, daß das Finite-Elemente-System nicht mehr in einem Schritt direkt berechnet werden kann. Stattdessen wird der statische Gleichgewichtszustand iterativ gesucht, indem die Belastung (hydrostatischer Innendruck) orthogonal zur verformten Struktur bleibt und daher laststufenabhängig in ihrer Rich-

tung zu korrigieren ist. Der sich einstellende Verformungszustand ist in seiner Gestalt abhängig von der Höhe der Belastung. Zwischen einzelnen Laststufen besteht keine geometrische Ähnlichkeit mehr. Das bei linearen Systemen häufig gebrauchte Superpositionsgesetz für Spannungen aus verschiedenen Lastfällen wird ungültig. Der Aufbau des elastischen Potentials ist damit ebenfalls nichtlinear.

Die rechnerische Entwicklung des Last/Verformungs-Pfades wird nach Art einer Anfangswertaufgabe verfolgt, so daß die laststufenabhängige Folge der Gleichgewichtszustände unter Vorgabe bewährter Schrittweitespielräume zu einer gut approximierenden Gesamtlösung führt.

Im ersten Berechnungsschritt der geometrisch-nichtlinearen Analyse ist das Zwischenergebnis noch nahezu proportional zur linearen Analyse. Da die Überprüfung der Gleichgewichtszustände und Entscheidung über Größe der Schrittweite einzelner Lastschritte vom Rechenoperator im Finite-Elemente-Programm automatisch erfolgt, kann anhand des protokollierten Ergebnisses der so gewählten Schrittweiten im nachhinein bewertet werden, inwieweit geometrisch nichtlineare Systemumlagerung stattgefunden hat. Je kleiner die akzeptierte Schrittweite eines Inkrementes, desto mehr Umlagerung – je größer die Schrittweite, desto weniger Umlagerung. Stößt die akzeptierte Schrittweite an die vom Programm benutzer vorgegebene untere Schranke, ist Vorsicht geboten, da die numerische Integration des elastischen Potentials nicht minimiert werden konnte. Stößt die automatisch gewählte Schrittweite an die vorgegebene Obergrenze, so besteht keine Gefahr. Lediglich die Berechnung wird unwirtschaftlich.

Im vorliegenden Fall wird vorgegeben, die kleinste inkrementelle Schrittweite solle nicht weniger als 1 Prozent der Gesamtlast betragen, die größte Schrittweite nicht mehr als

20 Prozent. Die daraufhin vom Rechenprogramm gefundenen optimalen Schrittweiten beginnen mit 5 Prozent (also sehr stabil) und erreichen nach fünf Inkrementen die festgelegte Obergrenze von 20 Prozent. Nach insgesamt 8 Inkrementen sind 100 Prozent der Last erreicht.

Die zugehörige nichtlineare Entwicklung der Verformungen und Spannungen an charakteristischen Stellen des Behälters mit Aufdachung System NONROOF ist in *Tabelle 4.31* und *4.32* zusammengefaßt und für den Aufdachungsbereich in *Abb. 4.31* dargestellt.

Vergleicht man die Rechenergebnisse der Systeme LINROOF und NONROOF untereinander (siehe *Tabelle 4.141*), so zeigt sich die für geometrische Nichtlinearität typische Spannungsabminderung in der Aufdachungsspitze gegenüber der linearen Berechnung. Im vorliegenden Fall wird eine etwa zehnprozentige Abminderung für die Maximalspannungen auf der Innenseite ermittelt. In der Aufdachungsspitze liegt bei beiden Systemen das Maximum des Biegeterms, der dem Membranspannungszustand überlagert ist. Der Biegeterm klingt über der Polarkoordinate  $\varphi$  des Behälterquerschnitts unter Vorzeichenwechsel ab und konvergiert bei beiden Systemen gegen Null. In einem gewissen Abstand von der Aufdachungsspitze weisen sowohl das lineare als auch das geometrisch nichtlineare System den Membranspannungszustand aus, der über die Kesselformel nachprüfbar ist.

Für Praxisbelange ist der Unterschied zwischen geometrisch nichtlinearer und linearer Berechnung wesentlich, da die linearen Spannungsergebnisse zwar konservativ, aber hoch sind, und sich so nicht allein für Bewertungen von Behältern eignen. Lediglich eine erste Abschätzung der bestehenden Verhältnisse ist erzielbar. Die linear zu hoch berechnete Spannung würde zu unbegründeten Forderungen an den Betrieb der Behälter führen.

Inkrement	Zeitpunkt	Aufdach.-Spitze		Behälterseite		Behälterboden	
		$u_{r a}$	$u_{r i}$	$u_{r a}$	$u_{r i}$	$u_{r a}$	$u_{r i}$
1	0.050	- 0.0038	- 0.0035	0.0922	0.0926	0.0933	0.0938
2	0.100	- 0.0002	0.0004	0.1840	0.1849	0.1865	0.1874
3	0.175	0.0166	0.0177	0.3214	0.3230	0.3262	0.3278
4	0.287	0.0631	0.0650	0.5271	0.5297	0.5358	0.5384
5	0.456	0.1689	0.1719	0.8357	0.8399	0.8506	0.8547
6	0.656	0.3349	0.3394	1.2020	1.2080	1.2250	1.2310
7	0.856	0.5326	0.5385	1.5700	1.5780	1.5990	1.6070
8	1.000	0.6894	0.6964	1.8360	1.8450	1.8690	1.8780

*Tabelle 4.31*  
Entwicklung der Verformungen  $u_r$  in Radialrichtung des Behälters mit Aufdachung außen (a) und innen (i) bei statischer Analyse unter geometrischer Nichtlinearität

Inkrement	Zeitpunkt	Aufdach.-Spitze		Behälterseite		Behälterboden	
		$\sigma_{\varphi\varphi \text{ min a}}$	$\sigma_{\varphi\varphi \text{ max i}}$	$\sigma_{\varphi\varphi a}$	$\sigma_{\varphi\varphi i}$	$\sigma_{\varphi\varphi a}$	$\sigma_{\varphi\varphi i}$
1	0.050	- 10.5	46.7	14.1	14.2	14.0	14.2
2	0.100	- 20.5	92.7	28.2	28.4	28.1	28.5
3	0.175	- 34.6	160.5	49.3	49.7	49.1	49.9
4	0.287	- 54.2	260.1	81.0	81.7	80.7	82.0
5	0.456	- 80.4	405.2	128.3	129.8	128.0	130.1
6	0.656	-107.4	571.8	184.4	187.0	184.2	187.3
7	0.856	-131.0	733.7	240.6	244.2	240.4	244.4
8	1.000	-146.1	847.7	281.0	285.4	280.8	285.5

*Tabelle 4.32*  
Entwicklung der Spannungen  $\sigma_{\varphi\varphi}$  in Umfangsrichtung des Behälters mit Aufdachung außen (a) und innen (i) bei statischer Analyse unter geometrischer Nichtlinearität

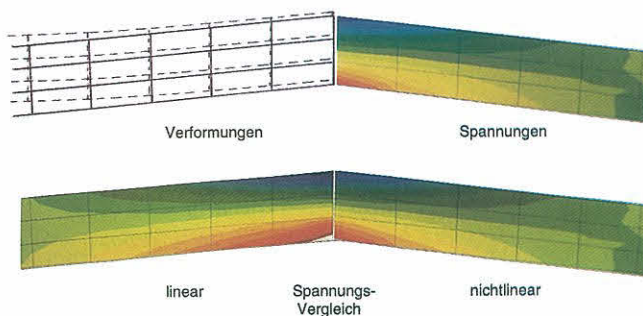


Abb. 4.31  
Verformungen und Spannungen im Aufdachungsbereich bei geometrischer Nichtlinearität, Vergleich mit den geometrisch linear berechneten Spannungen

Die geometrisch nichtlineare Berechnung läßt dagegen wirklichkeitsnähere Gestaltänderung des Behälters zu, die mit einem Umlagerungsverhalten des typischen Spannungsprofils verbunden ist. Es findet eine (zutreffende) Glättung der Spannungen in den Imperfektionsbereichen mit Abbau zu hoher Spannungsspitzen statt.

Die weitergehende Frage, ob die berechneten Spannungen über oder unter den wahren Werten liegen, ist von den übrigen FEM-Parametern abhängig. Hierzu gehören u. a.:

- die Finite-Elemente-Netzgestaltung,
- die Wahl des Finite-Element-Typs,
- das postulierte Materialgesetz.

Da das Lösungsverfahren des FE-Programms auf der Deformationsmethode beruht, führt eine Netzverfeinerung zu besserer Abbildung der Behälter-Gestaltänderungen. Die Spannungsverläufe sind differenzierter, d. h. unzulässige Spannungs-Glättungen wegen zu großer Steifheit über zu große Elementlänge werden vermieden.

Die zu große Steifheit tritt dann auf, wenn der Verschiebungsansatz des Finiten Elements (günstigenfalls ein bis zu triparabolisches Polynom bei Volumenelementen) nicht mehr ausreicht, um die tatsächliche örtliche Gestaltänderungsgradierte nachzufahren. Die Netzverfeinerung bewirkt dann eine dichtere stückweise Zusammensetzung dieser Verschiebungsfunktionen. Gegenüber einer zu glatten Spannung sind dann (zutreffende) örtliche Erniedrigungen und Erhöhungen zu erwarten.

Die Eigenschaften des gewählten Elements sind entscheidend für die grundsätzliche Eignung, die mechanischen Anforderungen zu erfüllen, z. B. Membranwirkung, Biegung und Schub. Bei vorwiegender Membranwirkung werden vorhandene Element-Biegeeigenschaften nicht ausgenutzt, wenngleich sie nicht stören. Tritt örtlich erhebliche Zusatzbiegung auf, kann es sein, daß die vorhandenen Element-Biegeeigenschaften plötzlich überfordert sind. Entsprechendes gilt für Schub, sowie dessen mechanische Kopplung mit der Biegung.

Der Unterschied verschiedener Elementeigenschaften wird deutlich, wenn z. B. ein vorhandenes Netz auf Volumenelemente mit acht Eckpunkten (Knoten) ausgelegt und berechnet wird, und anschließend ein Vergleichssystem mit 27-Knoten-Elementen bei gleichem Netzraster gegenübergestellt wird.

Generell gilt für jedes Element, das mit isoparametrischen Ansätzen arbeitet (gleicher Ansatz für Geometrie und Verschiebung) und keine Sondereigenschaften enthält, daß die Spannungen bei Kraftkontrolle etwas zu niedrig, bei Verschiebungskontrolle etwas zu hoch ausfallen können. Bei Einbettung des Elements in eine elastische Wechselwirkung mit dem übrigen FE-Netz tritt an den Elementknoten ein kombinierter Kraft/Verschiebungs-Zustand auf, der wegen komplexen Systemverhaltens i. a. örtlich nur schwer eine Vorhersage im Sinne konservativer Spannungen ermöglicht.

Das postulierte Materialgesetz kann entscheidenden Einfluß auf die Spannungsergebnisse haben. Wird linear elastisches Materialverhalten angenommen, weil erkennbar ist, daß – wie hier bei der Behälterberechnung – große Systembereiche damit zutreffend beschrieben werden, so kann davon ausgegangen werden, daß das Gesamt-Spannungsprofil wirklichkeitsnah erfaßt ist und nur örtliche Spitzenspannungen überhöht berechnet sind. Sodann stellt sich die Frage, ob eine Korrektur nicht ingenieurmäßig allein durch Kapung des Spitzenwertes erfolgen kann, weil örtliche plastische Umlagerung hiermit vielleicht ausreichend genau beschrieben wird. Die Beantwortung ist an der Gegenfrage zu prüfen, ob vielleicht die örtliche Plastizierung bereits zu einem Fließgelenk geführt haben könnte. Die dann bei Behältern mit Aufdachung an der Spitze zu erwartende plastische Winkeländerung wäre nicht mehr rein lokal. Sie hätte eine System-Umverteilung in Verformung und Spannung zur Folge.

An dieser Stelle sollen die oben angesprochenen Fragestellungen dazu dienen, das geometrisch-nichtlinear und material-linear berechnete Behältersystem NONROOF gegen das vorangehende System LINROOF sowie die nachfolgenden Modellvariationen gedanklich abzugrenzen.

Es sei noch erwähnt, daß die soweit vorgestellte Finite-Elemente-Rechnung noch nicht auf Fragestellungen der Schweißtechnik, Betriebsfestigkeit und Bruchmechanik eingeht. Für die Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit von geschweißten Behältern wird die Betriebsfestigkeit üblicherweise nach dem Strukturspannungskonzept abgeschätzt. Ggf. muß das Risiko von wasserstoff-induzierter Spannungsrißkorrosion erörtert werden.

## 4.4 Geometrisch nicht-lineare Analyse, log. Feinnetzverziehung (NONLOGN)

Mit dieser Systemvariante wird überprüft, inwieweit die mit dem vorangehend behandelten System NONROOF berechnete Spannungs-Charakteristik vom gewählten Finite-Elemente-Raster im Feinnetzbereich abhängt. Die kontinuumsmechanisch begründete Singularität auf der Innenseite der Aufdachungsspitze bleibt bei allen den Aufdachungswinkel ohne Ausrundung ( $r = 0$ ) enthaltenden Systemen bestehen, da auf die rechnerische Erfassung örtlicher Plastizität verzichtet wird.

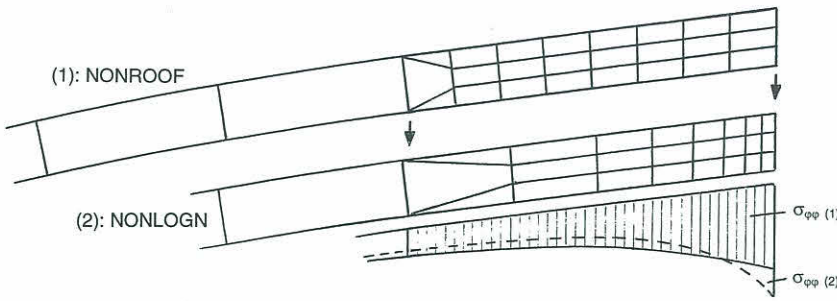


Abb. 4.41  
Spannungsanstieg in Richtung der Spannungsspitze, Einfluß der FE-Netz-Unterteilung im Aufdachungsbereich, Vergleich der Systeme NONROOF, NONLOGN

Kleine plastische Zonen, die sich in Kerbgründen ausbilden, führen bei global sehr großen Systemen nur zu geringfügigen Änderungen der interessierenden System-Spannungszustände, so daß man mit guter Näherung die linear ermittelten Spannungsspitzen an ihrer Plastizitätsgrenze kappen kann (vgl. Abschnitt 4.3). Jedoch bleibt weiterhin interessant, mit welchem Gradient über der Kontur des Behälters in Umfangsrichtung und in Richtung der Aufdachungsspitze die Spannung ansteigt. Dieses wird durch die Grob- oder Feinmaschigkeit des FE-Netzes mit beeinflusst und deswegen hier untersucht.

Abb. 4.41 zeigt den Unterschied des Spannungsanstieges bei Vergleich der Systeme NONROOF und NONLOGN. Der Elementierungsunterschied besteht lediglich in einem Verziehen der Systemknoten-Koordinaten gemäß einer logarithmischen Teilung des Geradenbereiches der Aufdachung. Neben der zu erwartenden Erhöhung der Spannungsspitze im System NONLOGN (siehe Tabelle 4.141) wird hier auch die größere Steilheit des Spannungsanstieges kurz vor dem Maximum deutlich, während System NONROOF eher mit glättender Tendenz umverteilt und dabei an einer gemäß DIN 8551 (siehe Abschnitt 4.2) festgelegten Interpretationsstelle geringfügig höhere Spannungen ermittelt als System NONLOGN.

Die größte Druckspannung liegt bei NONLOGN nicht in der Aufdachungsspitze selbst (dort sind es: -121,82 MPa), sondern in deren Nachbarschaft: -142,50 MPa. Der Effekt erklärt sich so, daß das nach außen gewölbte Oberflächenprofil der Aufdachungsspitze außen sich tendenziell der Spannungsaufnahme entzieht. Daß dieser Effekt beim vorangehend erörterten System NONROOF nicht zu beobachten ist, hängt unmittelbar mit dem dort grobmaschigeren Finite-Elemente-Raster zusammen: Das betreffende Element interpoliert etwas zu glatt über diesen Effekt hinweg.

## 4.5 Geometrisch nicht-lineare Analyse, Axialwellenimperfection (NONWAVE)

Die Dreidimensionalität des Finite-Elemente-Systems zum Behälter mit Aufdachung kann genutzt werden, um Effekte, die über die Betrachtung der Behälterquerschnittsebene hinausgehen, zu analysieren. Mit der hier vorgestellten Systemvariante soll untersucht werden, ob eine Abweichung von der in Axialrichtung geometrisch perfekt projizierenden Systemannahme aller Behälterquerschnitte zusätzliche ungünstige Einflüsse auf die zu ermittelnden Spannungen nach sich zieht. Es wird das System NONROOF zugrundegelegt und diesem zusätzlich eine kosinus-förmige axiale Wellenimperfection im Interpretationsbereich des Behälters als Einbeulung eingeprägt. Die Wellenimperfection hat eine örtliche Erniedrigung der Aufdachungshöhe (hier 3 mm) zur Folge (siehe Abb. 4.51).

Das Spannungsergebnis zeigt, daß das Gesamtsystemverhalten aus Dreidimensionalität hierdurch keine Verschlechterungen der Situation erfährt. Eher besteht die Tendenz zu einer leichten Verbesserung, da in Axialrichtung Stützwirkungen durch Wölbung wie bei dreidimensional gekrümmten Schalen einsetzen.

Somit kann das Fazit gezogen werden, daß die rein zweidimensionale Betrachtung des Behälterproblems mit Aufdachung (wie z. B. mit dem Pich-Verfahren praktiziert, siehe Abschnitt 3) unempfindlich bezüglich nicht betrachteter ste-

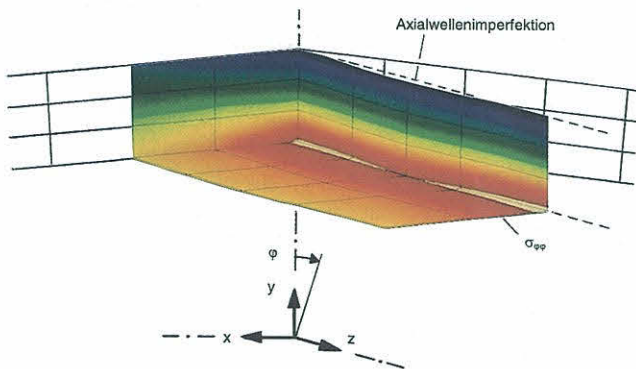


Abb. 4.51  
Axialwellenimperfection im Aufdachungsbereich (Einbeulung), örtliche Spannungsabminderung  $\sigma_{\phi\phi}$  in Umfangsrichtung, System NONWAVE

tiger axial-imperfekter Einbeulung ist. Ohne rechnerischen Beleg kann andererseits gefolgert werden, daß eine örtliche Ausbeulung über die Höhe der Aufdachung hinaus eine leichte Spannungserhöhung bewirken wird.

## 4.6 Geometrisch nichtlineare Analyse, Zeman-Geometrie (NONZEMN)

Die bisher untersuchten Systeme basierten alle auf dem Bildungsgesetz Kreis/Tangente, welches aus praktischer Sicht wegen seiner geometrischen Einfachheit bevorzugt wird. Gleichzeitig wird in Expertenkreisen aber das Problem des Behälters mit Aufdachung auch unter dem Imperfektionstyp „Ovalität“ erörtert. Generell sind die hierdurch erzeugten Biegespannungen von kleinerer Größenordnung als bei Aufdachungsspitzen.

Zur Begriffsverwendung sei erläutert, daß in Abschnitt 3 der Ovalisierung – anders als hier – methodisch die Bedeutung zukommt, Grundlage für ein analytisches Verfahren der Spannungsermittlung durch Einsatz eines Fourier-Verfahrens mit Überlagerung von Ovalisationen zu sein (Schmidt, Pich). Dieses resultiert i. a. in nicht-ovalen Imperfektionen. Hier jedoch steht eine ausgeprägte Einzel-Ovalisierung im Vordergrund, die Hauptbestandteil der Gesamt-Imperfektion sein soll. Zu deren Behandlung macht Zeman den in Abschnitt 2.4 sowie hier behandelten („globalen“) Vorschlag.

Ein Behälter mit Aufdachungsspitze kann in der Rechnung grundsätzlich nicht durch einen ovalisierten Behälter ersetzt werden. Im Rahmen geometrischer Bildungsgesetze kann aber die zusätzliche Berücksichtigung einer Ovalisierung die Eigenschaft haben, über mehr wirklichkeitsnahe Erfassung der Behältergeometrie einen Beitrag zur Abschätzung niedrigerer Spannungsspitzen zu leisten, was aus Praxissicht wünschenswert ist. Dies erfordert letztlich aber auch die Bestätigung des eingeführten Ovalisierungsansatzes durch Behältervermessung.

In [7] macht Zeman seinen Vorschlag für die analytisch geschlossene Berechnung von Spannungsspitzen am Behälter mit Aufdachung. Grundlage des entwickelten analytischen Verfahrens ist eine kosinusförmige Ovalisierung, die sich bei

Abwicklung über den Winkel als Polarkoordinate des Behälters durch Gangunterschied in der Periodenlänge zeigt. Durch Abschneiden dieser Ansatzfunktion am Winkel  $0$  bzw.  $2 \cdot \pi$  des Behälters entsteht eine Aufdachungsspitze, so daß das Gesamtsystem eine Kombination aus Aufdachung und über den gesamten Behälterquerschnitt verteilter Ovalität ist. Legt man diesem Geometrie-Ansatz die Eckwerte des Behälters mit Aufdachung so wie beim Kreis/Tangente-System zugrunde (Radius, Aufdachungshöhe), so folgt, daß die Gesamtgestalt dieser hier als Zeman-Geometrie bezeichneten Form etwas bauchiger ausfällt als die ideale Kreis/Tangente-Form. Es ergibt sich auch, daß der Aufdachungswinkel bei Zeman etwa halb so groß wird wie bei Kreis/Tangente. Hieraus folgt, daß der Biegeterm im Aufdachungsbereich eine kleinere Größenordnung bekommt.

Die Spitzenspannungen sind der *Tabelle 4.141* zu entnehmen. Wie der Vergleich mit den vorher behandelten Kreis/Tangente-Systemen zeigt, erzeugt die „globale“ Zeman-Geometrie in der Aufdachungsspitze keinen Vorzeichenwechsel mehr, da hier die Membranspannung überwiegt (siehe *Abb. 4.61*). Die Akzeptanz dieses Ergebnisses hängt – wie bereits erwähnt – von der vorherigen Bestätigung ab, daß der reale und der so berechnete Behälter bezüglich der Ovalitätsfunktion hinreichend korrelieren.

## 4.7 Behälter mit Schweißnaht wie bei Schadensfall (WELDSA)

Die rechnerischen Untersuchungen zum Behälter mit Aufdachung wurden aktuell aufgrund eines Schadensfalles, bei dem sehr hoher Sachschaden und akute Personengefährdung eingetreten waren – siehe hierzu [18], [19], [20]. Die vielfältigen, zu berücksichtigenden Zusammenhänge für die Ursachenermittlung können – wie meistens – nicht in einem Rechenmodell zusammenfließen. Hierzu gehören neben Konstruktion und Fertigung des Behälters auch die Vorgeschichte der Nutzung mit ihren chemisch-physikalischen Einflüssen und die daraus ableitbaren Veränderungen der Materialeigenschaften. An dieser Stelle kann aber versucht werden, Antwort auf eine Teilfrage zu geben, die sich mit Bedingungen im Bereich der Schweißnaht in der Aufdachungsspitze befaßt.

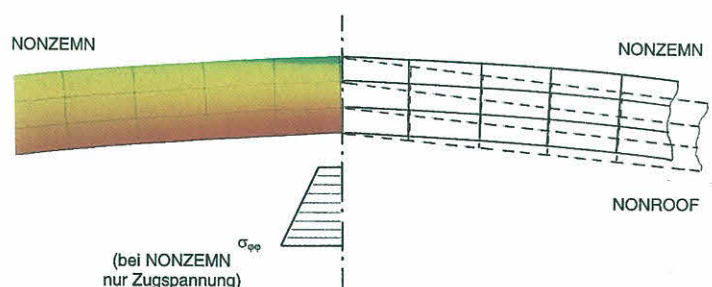


Abb. 4.61  
Spannungen  $\sigma_{\phi\phi}$  im Aufdachungsbereich,  
System NONZEMN, zum Vergleich Geo-  
metrie System NONROOF

Das Rechenmodell WELDSA beschreibt simulierend den Schadensfall-Behälter, indem ein typischer Schweißnahtquerschnitt mit realer Gestalt der Schweißraupenoberfläche wirklichkeitsnah in das übrige Kreis/Tangente-Modell eingepaßt wird (siehe Abb. 4.71). Die mit diesem Modell berechneten Spitzenspannungen liegen nunmehr nicht in der geometrischen Systemmitte, sondern in den Übergangspunkten zwischen Grundwerkstoff und Schweißnaht, wo im Real-system auch Einbrandkerben sein können. Nicht mitmodelliert werden Schweißfolgen, Eigenspannungen, Einbrandkerben, eventuell vorhandene Anrisse, die in anderen Arbeiten [10], [13], [16] als wesentlich angesehen werden, sowie Werkstoffänderungen zwischen Grundwerkstoff und Schweißgut. Der Analysetyp bleibt die Strukturspannungsanalyse eines homogen-isotropen Ersatzsystems mit Modellierung der Oberflächengestalt, nicht aber die Analyse örtlicher Spitzenspannungen im Sinne der Erfassung aller Einflüsse. Der modellierte Schweißnahtquerschnitt ist unsymmetrisch. Im übrigen wird angenommen, daß die Systemachsen der zusammenlaufenden Bleche sich ohne Axialversatz im Aufdachungsspitzenpunkt treffen.

Die so berechneten extremalen Zug- und Druckspannungen fallen deutlich niedriger aus als bei den vorangehenden Rechenmodellen. Der Effekt der leichten Unsymmetrie schlägt sich in einem kleinen Werteunterschied in den beiden Schweißnaht-Kerbpunkten an der Behälterinnenseite nieder (siehe Abb. 4.72, Tabelle 4.141). Interessanterweise wurde im Schadensfall-Behälter genau die vergleichbare Kerbe mit dem hier höher berechneten Spannungswert zum Ausgangspunkt des explosiven Berstens. Jedoch soll wegen zu geringem Umfang gesicherter Daten hiermit noch keine korrelierende Schlußfolgerung gezogen werden.

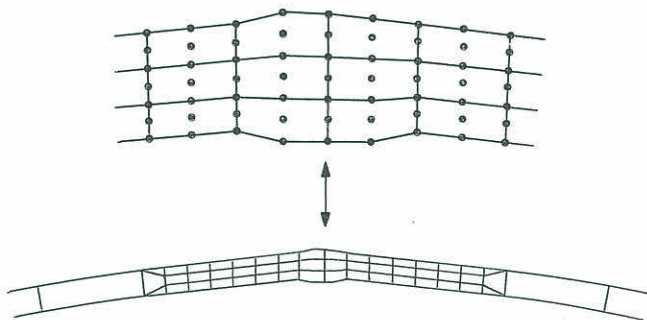


Abb. 4.71  
Modell der Schweißnahtoberfläche in Anlehnung an einen Schadensfall-Behälter (Hanau), System WELDSA

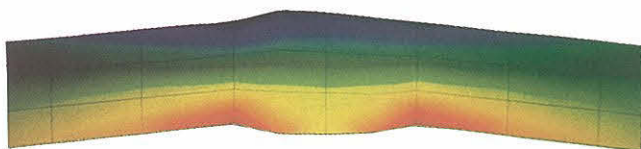


Abb. 4.72  
Spannungsverteilung im Bereich der Schweißnaht System WELDSA: Modellierung einer unbehandelten Schweißnahtoberfläche, vergleichbar Schadensfallbehälter Hanau

## 4.8 Behälter mit Schweißnaht, innen beschliffen (WELDSB)

Im Zuge des oben erwähnten Schadensfalles wurde die Frage erörtert, ob für bestehende Behälter ähnlicher Bauart und neu zu bauende Behälter Maßnahmen gefordert werden müssen, die sich in Regelwerken niederschlagen würden. Das Inventar bestehender Behälter ist so groß, daß eine etwaige Forderung des nachträglichen Beschleifens erhebliche technische und wirtschaftliche Folgen hätte und daher keineswegs selbstverständlich wäre. Für neue Behälter gilt ähnliches. Wie sich ein Beschleifen der Schweißnaht rechnerisch auf die Spannungsumverteilung auswirkt, wird im folgenden kurz demonstriert (siehe Abb. 4.81).

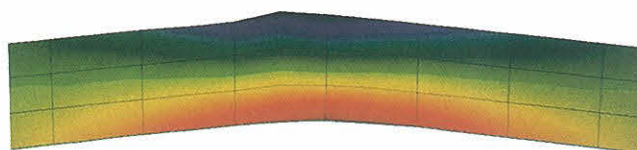


Abb. 4.81  
Spannungsverteilung im Bereich der Schweißnaht System WELDSB: Schweißnaht innen beschliffen, Vermeidung von Spitzenspannungen im Kerbgrund zwischen Grundwerkstoff und Schweißnaht

Das Rechenmodell WELDSB variiert das vorangehende Modell WELDSA, indem die simulierte Schweißnaht innen beschliffen wird. Das Ergebnis der Analyse belegt einen deutlich mehr ausgeglichenen Spitzenspannungsverlauf über einen größeren Verteilungsbereich bei gleichzeitiger Vermeidung von Kerbspannungen. Es tritt ein Umlagerungseffekt zu Lasten des außen liegenden Druckbereiches ein, der aber unkritisch ist (siehe Tabelle 4.141). Das Rechenergebnis ist signifikant und legt nahe, bei der Behälterherstellung entsprechend zu verfahren.

## 4.9 Behälter mit Schweißnaht, innen/außen beschliffen (WELDSC)

Es liegt nahe, auch die weitergehende Frage zu stellen, ob durch ein Beschleifen der Schweißnaht außen eine zusätzliche Verbesserung des Spannungsverhaltens im Aufdachungsbereich erzielt werden kann. Dieses wird mit dem Modell WELDSC untersucht.



Abb. 4.91  
Spannungsverteilung im Bereich der Schweißnaht System WELDSC: Schweißnaht innen und außen beschliffen, Studie des zusätzlichen Effektes durch Glättung der Außenoberfläche



Das Ergebnis zeigt, daß einerseits wie zu erwarten jetzt auch außen eine Glättung des Spannungsverlaufes eintritt (siehe *Abb. 4.91, Tabelle 4.141*). Andererseits zeigt sich die Wirkung des Materialabtrages außen: Das in der Meridianebene des Behälters zu betrachtende Widerstandsmoment ist kleiner geworden, so daß das Spannungsmaximum innen ansteigt. Insofern wäre ein Beschleifen der Schweißnaht außen nach dieser Berechnung unbegründet.

## 4.10 Schweißnaht innen beschliffen, außen aufgedickt (WELDSD)

Schließlich soll noch die Systemvariante untersucht werden, bei der die Schweißnaht außen mit größerer Aufdickung ausgeführt ist, während gleichzeitig innen beschliffen wurde. Das erzielte Spannungsergebnis des Systems WELDSD zeigt den Umkehreffekt zu System WELDSA: Durch Anordnung eines Materialauftrages in dem für die Spannung selbst unkritischen Druckbereich außen wird der kritische Zugbereich innen entlastet, weil nun mehr Umverteilung möglich ist (*Abb. 4.101, Tabelle 4.141*). Dieser Effekt entspricht einer Erfahrung, die auch mit automatisch arbeitenden Systemoptimierungsalgorithmen gemacht wird. Die Profilvariation führt zu vorgeschlagenen Gestaltgebungen, die unter Spannungsgesichtspunkten optimal sind, obwohl dieses für das menschliche Auge nicht immer sofort einsichtig ist. Die weitergehende Frage der fabrikmäßigen Fertigung führt dann aber meist zur Einführung von Restriktionen, mit denen andere, meist fertigungstechnische Aspekte, mit höherer Priorität als die technisch-mechanische Optimierung Berücksichtigung finden.

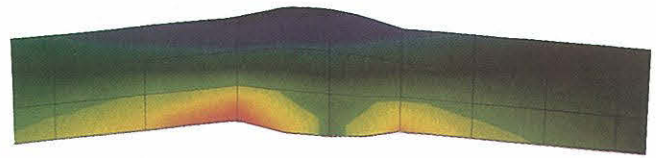


*Abb. 4.101*  
Spannungsverteilung im Bereich der Schweißnaht System WELDSD: Schweißnaht innen beschliffen, außen aufgedickt, Studie des spannungsmindernden Effektes der Aufdickung außen

## 4.11 Behälter mit Axialversatz abwärts (WELDSE)

In Erweiterung der Fragestellung, wie sich eine wirklichkeitsnah modellierte Schweißnaht in einer numerischen Systemumgebung verhält, wird nun zusätzlich angenommen, daß die vor Ort vermessene Aufdachung – wegen der Schweißnahtwülste ggf. versteckt – Axialversatz der zusammenstoßenden Blechenden aufweist. Das Modell WELDSE nimmt gegenüber WELDSA an, daß das eine Blechende gegenüber dem anderen mit einer Differenz von 3 mm in die Umgebung der Schweißnaht einmündet. Für den Betrachter

von *Abb. 4.111* stellt sich dieses als „von links nach rechts: abwärts“ dar. Im übrigen soll die Schweißnahtoberfläche durch Verziehen den Axialversatz optisch ausgleichen. (Bei örtlicher Vermessung des Aufdachbereiches durch eine Meßlehre ist es im allgemeinen schwierig, einen Axialversatz dieser Art sicher zu erkennen.)



*Abb. 4.111*  
Spannungsverteilung im Bereich der Schweißnaht System WELDSE: Schweißnaht-Verziehung innen zur Kompensierung eines angenommenen Axialversatzes v.l.n.r. abwärts

Das in *Abb. 4.111* und *Tabelle 4.141* dargestellte Spannungsergebnis ist plausibel. Ein Vergleich der absoluten Spannungswerte gegenüber WELDSA ist aber nur bedingt möglich, weil das Verziehen der Schweißnaht insgesamt zu mehr Materialauftrag geführt hat. Wichtig ist aber die Feststellung, daß die Größenordnung der Maximalspannung sich nicht wesentlich verändert hat.

## 4.12 Behälter mit Axialversatz aufwärts (WELDSF)

Mit dem Modell WELDSF wird gegenüber WELDSE nur die Flanke für das Einbringen der Axialimperfektion gewechselt. Das Ergebnis ist analog zu dem vorher Gesagten zu sehen (siehe *Abb. 4.121, Tabelle 4.141*).



*Abb. 4.121*  
Spannungsverteilung im Bereich der Schweißnaht System WELDSF: Schweißnaht-Verziehung innen zur Kompensierung eines angenommenen Axialversatzes v.l.n.r. aufwärts

## 4.13 Axialversatz abwärts, innen beschliffen (WELDSG)

Als letzte Modellvariation wird noch betrachtet, wie ein zusätzlich in der Querschnittsebene axial imperfekter Aufdachungsbereich unter örtlichem Ausgleichen mittels Schweißnahtformgebung durch Inkaufnahme einer Schiefe innen beschliffen wird (siehe *Abb. 4.131*). Bei der Betrachtung der Spannungsergebnisse sind zweckmäßigerweise gegenüberzustellen:

WELDSA und WELDSB,  
WELDSE und WELDSG.

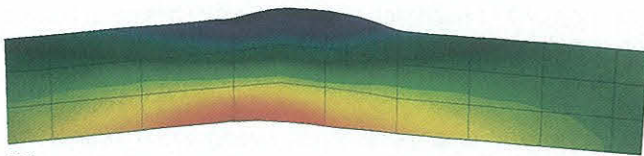


Abb. 4.131  
Spannungsverteilung im Bereich der Schweißnaht System WELDSG: Schweißnaht-Verziehung innen zur Kompensierung eines angenommenen Axialversatzes v. l. n. r. abwärts, Oberfläche innen beschliffen

Die Spannungswerte sind der Tabelle 4.141 zu entnehmen. Die Folgerung hinsichtlich der Zweckmäßigkeit des Beschleifens entspricht der Aussage zu Modell WELDSB. Insgesamt ergibt sich ferner durch gleichzeitige Betrachtung aller Modellvariationen mit Schweißnahtmodellierung, in welcher Bandbreite die Größenordnung der Spitzenspannung als Strukturspannung bei dem Behälter mit Aufdachung als Kreis/Tangente-System und den übrigen vorgegebenen Systemwerten anzunehmen ist.

## 4.14 Tabellarische Finite-Elemente-Ergebnisse

Die berechneten FE-Systeme weisen im Aufdachungsbe- reich die in Tabelle 4.141 zusammengestellten Extremalspan- nungen in Umfangsrichtung auf. Die dort mit ausgewiesenen Strukturspannungsformzahlen wurden unter Bezugnahme auf diese Extremalspannungen sowie die Nennspannung laut Kesselformel wie folgt ermittelt:

$$K_t = \frac{\sigma_{\varphi\varphi \max}}{\sigma_{pu}} = 4.513 \cdot 1378/22.$$

Es sei noch einmal darauf hingewiesen, daß die Extremal- spannungen auf der Innenseite der Aufdachung – auch bei flachen Flanken im Kerbgrund – bei FEM-Berechnung die Tendenz haben, die kontinuumsmechanisch begründete Sing- ularität anzustreben. Somit ist z. B. die Strukturspannungs- formzahl  $K_t = 2.999$  des Systems NONROOF gegenüber dem vergleichbaren mit Pich berechneten Wert  $K_t = 2.685$  (siehe Tabelle 3.52) aus diesem Grunde leicht erhöht. Die bei System NONLOGN erkennbare weitere Erhöhung wird ebenso begründet (siehe auch Abschnitt 4.4 und Bild 4.41).

Tabelle 4.141  
Extremalspannungen  $\sigma_{\varphi\varphi}$  in Umfangsrichtung im Aufdachungsbereich des Behälters außen und innen für verschiedene berechnete FE-Systeme

System	$\sigma_{\varphi\varphi \min a}$	$\sigma_{\varphi\varphi \max i}$	Struktursp.- Formzahl	Erläuterung
LINROOF	-215.40	941.10	3.329	Kreis/Tangente, geometrisch lineare Verformung
NONROOF	-146.10	847.70	2.999	Kreis/Tangente, geometrisch nichtlineare Verformung
NONLOGN	-142.50	959.20	3.393	Kreis/Tangente, geom. n. l., log. Feinnetzteilung
NONWAVE	-146.00	845.00	2.989	Kreis/Tangente, geom. n. l., axiale Wellenimperfektion
NONZEMN	-114.00	798.00	2.823	
	+175.70	392.10	1.387	Geometrieansatz von Zeman, geom. nichtlin. Verform.
WELDSA	-50.09	701.70	2.482	Hanau
WELDSB	-153.00	697.70	2.468	Hanau innen beschliffen
WELDSC	-123.70	707.50	2.503	Innen/außen beschliffen
WELDSD	-163.80	688.90	2.437	Innen beschliffen, außen aufgedickt
WELDSE	-66.81	755.20	2.671	Axial imperfekt abwärts
WELDSF	-45.52	751.90	2.660	Axial imperfekt abwärts
WELDSG	-113.20	688.40	2.435	Axial imperfekt abwärts, innen beschliffen

## 5 Zusammenfassung

Die in diesem Bericht vorgestellten Berechnungsverfahren zum Problem des Behälters mit Aufdachung unterscheiden sich hinsichtlich Aussagekraft und Aufwand. Die Verfahrenswahl sollte unter dem Aspekt erfolgen, ob eine vereinfachte Abschätzung der durch die Aufdachung induzierten Biegezusatzspannungen ausreicht bzw. als erste Schätzung zu verstehen ist, oder aber ob sicherheitsrelevante Aspekte, Gebrauchstauglichkeit, Gewährleistungsfragen bzw. eingetretene Schadensfälle die bestmögliche Berechnung des zugrundeliegenden mechanischen Systems erfordern.

Die Formeln von Zeman, Böck/Zeman, Brocks und dem IIW eignen sich für schnelle Abschätzungen und können parallel zueinander verwendet werden. Inwieweit die den Formeln zugrundeliegenden Voraussetzungen erfüllt sind, ist aus den Ergebnissen aber nicht erkennbar und kann wegen des Charakters, das Problem verkürzt zu beschreiben, auch nicht parametrisch in die rechnerischen Aussagen eingearbeitet werden. Die Verantwortung für die Akzeptanz der Ergebnisse bleibt daher stets beim Anwender.

Für genauere Aussagen sind schrittweise entweder der Einsatz des Pich-Verfahrens (zweidimensional) oder die Finite-Elemente-Analyse (zwei- und dreidimensional) erforderlich.

Das Pich-Verfahren ist offenbar das beste hinsichtlich des Aussage-zu-Aufwand-Verhältnisses. Der Anwender hat lediglich sicherzustellen, daß keine unsymmetrischen Einflüsse aus dem übrigen Behälterbereich in die zweidimensionale Querschnittsbetrachtung einstreuen. Auch die Datenkontrolle ist benutzerfreundlich, sofern der Anwender mit der Arbeitsweise des Verfahrens theorie-seitig vertraut ist. Daher sollte das Pich-Verfahren auch stets zum Gegenrechnen solcher Ergebnisse verwendet werden, die mit höherem Auf-

wand etwa über die FEM erzielt wurden. Oft ist es möglich, zumindest eine Plausibilitätsprüfung durchzuführen, die Größenordnung der zu erwartenden Biegezusatzspannungen zu bestimmen und günstigenfalls identische Teil-Aussagen etwa zwischen Pich-2D und FEM-3D in der Behältermitte zu gewinnen.

Daß mit der Möglichkeit der Finite-Elemente-Methode praktisch unbegrenzt die Beantwortung weiterer, anders nicht zu erfassender Fragen möglich ist, braucht hier nicht sonderlich betont zu werden. Im vorliegenden Bericht werden hierzu einige Beispiele geliefert. Der speziell mit Behälterfragen befaßte Anwender der FEM mag sich aber Arbeitstechniken im Pre- und Postprozessorbereich zurechtlegen, die für wiederkehrende oder ähnlich gelagerte Fälle zu einer Standardisierung der Arbeitsweise führen können und mittelfristig den Aufwand reduzieren. Möglichkeiten hierzu sind etwa im Preprozessor-Bereich zu suchen, indem einmalig aufgestellte Prozeduren für die Systemgenerierung wiederholt ablaufen, sowie im Postprozessor-Bereich die systematische Ergebnisauswertung organisiert werden kann. So dann verliert die FEM einiges von ihrem Hürdencharakter, der oftmals unnötig ihren Einsatz verhindert.

Wie die mit allen Verfahren berechneten Ergebnisse gemeinsam zeigen, ist das Problem des Behälters mit Aufdachung besonders empfindlich gegen geringfügige Modellvariationen. Dies liegt offenbar in erster Linie an der Schlankheit der Struktur und der daraus folgenden ausgeprägten geometrischen Nichtlinearität. Dem Anwender sei empfohlen, Tuchfühlung zum mechanischen Systemverhalten durch Testrechnungen aufzunehmen, um sich für die Beurteilung der Verwendbarkeit von Ergebnissen abzusichern.

## 6 Literatur

### (A) Berechnungsverfahren

- [1] Timoshenko, S., Lessels, I. M.: Festigkeitslehre, Berlin 1928, S.211
- [2] Schmidt, K.: Beanspruchung unrunder Druckbehälter, VDI-Z.102 (1960) Nr.1, 1. Januar, S.11-15
- [3] Pich, R.: Der Zusammenhang zwischen Unrundheit von Kesseltrommeln und den zugehörigen Biegezusatzspannungen, Mitt. VGB (1966) H.103, S. 270-279
- [4] Brauch, W., Dreyer, H.-J., Haacke, W.: Mathematik für Ingenieure des Maschinenbaus und der Elektrotechnik, B. G.Teubner, Stuttgart 1977, S. 490-491
- [5] IMSL Math/Library FORTRAN-Subroutines for Mathematical Applications, Chapter 6: Transforms (FFT), IMSL Inc. Houston Texas, USA 1989
- [6] Zeman, J. L.: Aufdachung an Längsnähten zylindrischer Schüsse, TÜ Bd. 34 (1993) Nr. 7/8, Juli/August, S. 292-295
- [7] Zeman, J. L.: On the problem of angular misalignment at longitudinal weld joints of cylindrical shells, Int. J. Pres. Ves. & Piping 58 (1994) pp 179-184
- [8] Böck, N., Zeman, J. L.: On bending stresses at longitudinal weld joints of cylindrical shells due to peaking, Int. J. Pres. Ves. & Piping 60 (1994) pp 103-106
- [9] Brocks, W.: Spannungsabschätzung bei einer Aufdachung h am Behälter, Persönliche Notiz, 1992
- [10] Maddox, S. J.: Calculating the Fatigue Strength of Welded Joints using Fracture Mechanics, Metal Construction and British Welding Journal 17 (1979) pp 327-331
- [11] Maddox, S. J.: Fatigue Strength of Welded Structures, Abington Publishing Cambridge UK 1991
- [12] Maddox, S. J.: Fitness-for-Purpose Assessment of Misalignment in Transverse Butt Welds Subject to Fatigue Loading, The Welding Inst. Cambridge UK, Report 279 (1985)
- [13] Hobbacher, A.: Zur Betriebsfestigkeit von Schweißverbindungen auf bruchmechanischer Grundlage, Archiv Eisenhüttenwesen 48 (1977) S. 109-114
- [14] Hobbacher, A.: Internationale Empfehlungen zur Schwingfestigkeit geschweißter Bauteile, Schweißen und Schneiden 44 (1992) Heft 2, S. 82-87
- [15] Hobbacher, A. (Chairman): Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, Int. Inst. of Welding, doc. XIII-1539-96/XV-845-96

[16] Dharmavasan, S., Webborn, T. J. C.: Die Bestimmung der Restlebensdauer bei Ermüdungsschäden in geschweißten Rohrkonstruktionen, Der Maschinenschaden 59 (1986) 4, S. 173-178

[17] ABAQUS Version 5.5 (Finite Element Program Doc.: Theory, User's Manuals, Application of Volume Elements, Nonlinear Geometry, etc.), Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc., USA 1996

### (B) Schadensfall

- [18] Behrend, E., Jaenicke, B., Krafka, H., Schmidtchen, U.: Folgenschwere Explosion – Bericht über Ursachen und Hergang des Berstens eines Wasserstofftanks in Hanau. Teil 1, Sicherheitstechnik TÜ Bd. 34 (1993) Nr. 4 (April) S. 176-179, Teil 2, Sicherheitstechnik TÜ Bd. 34 (1993) Nr. 5 (Mai) S. 225-226
- [19] Behrend, E., Jaenicke, B., Krafka, H., Schmidtchen, U.: Ursachen des Berstens eines Wasserstoffbehälters mit anschließender Explosion, Verband der Sachversicherer (VdS), Brandschutzseminar Köln 15.-16. März 1994
- [20] Behrend, E., Schmidtchen, U.: Fortentwicklung technischer Regelwerke aus Anlaß von Schadensfällen, Schadensprisma 2/95, S. 28-32

### (C) Regelwerke

- [21] British Standard (BS) PD 6493: 1991: Guidance on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Fusion Welded Structures, BSI 1991
- [22] AD-Merkblatt HP1: Herstellung und Prüfung von Druckbehältern – Auslegung und Gestaltung, Beuth-Verlag Berlin, Januar 1995
- [23] AD-Merkblatt S1: Abgrenzung zwischen der Berechnung gegen vorwiegend ruhende Innendruckbeanspruchung und der Berechnung gegen Schwellbeanspruchung, Beuth-Verlag Berlin, März 1990
- [24] AD-Merkblatt S2: Berechnung auf Schwingbeanspruchung, Beuth-Verlag Berlin, März 1990

## 7 Bezeichnungen

### Geometrie:

$r$	Behälter-Radius
$r_i$	Behälter-Innenradius
$r_a$	Behälter-Außenradius
$r(\varphi)$	Radius an der Stelle $\varphi$
$r_o$	Mittlerer Behälter-Radius
$D_m$	Mittlerer Behälter-Durchmesser
$\varphi$	Winkel, Polarkoordinate des Behälterquerschnittes
$\theta$	Winkel, Polarkoordinate des Behälterquerschnittes um $180^\circ$ gedreht (Zeman)
$x,y$	Kartesische Koordinaten der Behälterquerschnittsebene (entsprechend $r,\varphi$ )
$z$	Kartesische Koordinaten der Zylinderachse des Behälters
$s$	Behälter-Wanddicke
$t$	Behälter-Wanddicke (Zeman)
$h$	Aufdachungshöhe (Brocks)
$d$	Aufdachungshöhe (Zeman, IIW)
$w(\theta)$	Geometrie- und Verformungsansatz (Zeman)
$w_i$	Geometrie (Zeman)
$w_q$	Verformung (Zeman)

### Material und Steifigkeit:

$E$	Elastizitätsmodul
$\mu$	Querkontraktionskoeffizient
$I$	Trägheitsmoment
$K$	Schalenparameter (Zeman)
$K_n$	Koeffizient für elastisches Behälterverhalten (Pich)

### Belastung:

$p$	Hydrostatischer Behälter-Innendruck
-----	-------------------------------------

### Steuerungsparameter für das Pich-Verfahren:

$m_{rad}$	Eingegebene Meßdaten (Behälterradien): Anzahl Stützstellen mit Stützradien für die interpolierende Erzeugung von $n_{rad}$ Radien
$n_{rad}$	Endindex bei Pich: Anzahl Stützstellen mit Stützradien für das Pich-Verfahren, $n_{rad} = 2 \cdot n_{fou}$
$n$	Ordnungszahl von Schmidt (Anzahl Ovalitäten), laufender Index der Fourierkoeffizienten bei Pich
$n_{fou}$	Endindex bei Pich: Anzahl der in die Harmonische Analyse eingehenden Fourier-Koeffizientenpaare $n = 1$ bis $n_{fou}$
$n_{lim}$	Endindex für das vereinfachte Pich-Verfahren: Limitierte Anzahl Fourier-Koeffizientenpaare $n = 1$ bis $n_{lim}$

$K_{lim}$  Toleranzschwelle für die Bestimmung von  $n_{lim}$  nach dem vereinfachten Pich-Verfahren,  $0.0 < K_{lim} < 1.0$  (i. a. mindestens:  $0.95 < K_{lim} < 1.0$ )

$n_{bib}$  Endindex bei Aufruf Fourieranalyse aus der IMSL-Bibliothek,  $n_{bib} = 2 \cdot n_{fou}$

$n_{sig}$  Anzahl Auswertestellen für die nach Pich berechneten Spannungen (grundsätzlich frei wählbar, hier:  $n_{sig} = 2 \cdot n_{rad} + 1$ )

### Berechnungsgrößen:

$A_n, B_n$	Fourierkoeffizienten
$m(\theta)$	Biegemoment in der Behälterwand (Zeman)
$M_\varphi$	Biegemoment in der Behälterwand (Pich)
$\sigma_{pu}$	Kessel-Membranspannung in Umfangsrichtung (Kesselformel, Lamé')
$\sigma_{pa}$	Kessel-Membranspannung in Axialrichtung (Kesselformel, Lamé')
$\sigma_{pr}$	Kessel-Spannung in Radialrichtung (Kesselformel, Lamé')
$\sigma_n$	Membranspannung (Zeman)
$\sigma_p$	Membranspannung (Pich)
$\sigma_b$	Biegezusatzspannung (allgemein)
$\psi_b$	Spannungskennzahl (Pich)
$f$	Strukturspannungsformzahl (Pich)
$K_t$	Strukturspannungsformzahl (allgemein)
$u_{rr}(r, \varphi, z)$	Verschiebung in Radialrichtung (FEM)
$\sigma_{\varphi\varphi}(r, \varphi, z)$	Spannung in Umfangsrichtung (FEM)



## 8 Anhang

### A1 Vereinfachungsvorschlag zum Pich-Verfahren

Die Programmierung der Pich-Formel in der vom Autor vorgeschlagenen Form (1966) unter Berücksichtigung der Aufruf-Möglichkeit einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) zeigt, daß der Rechenzeit-Engpaß am Schluß entsteht, wenn mit vorhandenem Satz berechneter Fourierkoeffizienten die gesuchte Zusatz-Biegespannung ermittelt werden soll. Der Engpaß entsteht deswegen, weil die der Spannungsberechnung nach Pich zugrundeliegende Fourier-Reihe in den einzelnen Summanden mit einem veränderlichen Faktor zu multiplizieren ist, der das elastische Verhalten des Behälter-Systems repräsentiert. Auf diese Weise geht der algorithmische Vorteil verloren, der in der FFT bei der Bestimmung der Fourierkoeffizienten den entscheidenden Rechenzeitvorteil ausmacht.

Es erscheint unbefriedigend, in dieser Situation dann den Kompromiß in einer Verringerung der zu bestimmenden Anzahl Fourierkoeffizienten zu suchen. Der Engpaß läßt sich aber auf andere Weise reduzieren, wozu hier der im folgenden beschriebene Vorschlag gemacht wird. Die von Pich entwickelten Formeln lauten in ihrer Originalgestalt (siehe (3.2) ff.):

$$r = r_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cdot \cos(n \cdot \varphi) + B_n \cdot \sin(n \cdot \varphi)) \quad (3.2-2)$$

$$\sigma_b = 6 \cdot p \cdot r_0 / s^2 \cdot \sum_{n=2}^{\infty} K_n \cdot (A_n \cdot \cos(n \cdot \varphi) + B_n \cdot \sin(n \cdot \varphi)) \quad (3.2-3)$$

$$K_n = 1 / (1 + m) \quad (3.2-4)$$

$$m = 3 / 2 \cdot (1 - \mu^2) / (n^2 - 1) \cdot p / E \cdot (D_m / s)^3 \quad (3.2-5)$$

$$D_m = 2 \cdot r_0 \quad (3.2-6)$$

$$\sigma_p = (p \cdot D_m) / (2 \cdot s) \quad (3.2-7)$$

$$\psi_b = 6 / s \cdot \sum_{n=2}^{\infty} K_n \cdot (A_n \cdot \cos(n \cdot \varphi) + B_n \cdot \sin(n \cdot \varphi)) \quad (3.2-8)$$

$$= \sigma_b / \sigma_p$$

Die Parameter haben folgende Bedeutung:

$r$  =  $r(\varphi)$ , Behälterradius an der Stelle  $\varphi$   
als Ansatz auf der Grundlage einer Fourier-Reihe.

$\varphi$  = Umlaufender Winkel des Polarkoordinatensystems des Behälters,  
beginnend und endend in der Aufdachungsspitze (Andere Autoren  
lassen die Nullage bei 180 Grad gegenüberliegend erscheinen).

$r_0$  = Mittlerer Radius des Behälters in der betrachteten Querschnittsebene  
des zweidimensionalen Systems.  
Dieser ist Bestandteil des Ergebnisses der noch durchzuführenden Fourier-  
Analyse und weicht im allgemeinen vom Sollradius des Kreisbehälters ab.

$n$  = Laufender Index der Fourierkoeffizienten.  
Die hier vereinbarte Indexverwaltung der Fourierkoeffizienten geht von der  
Konvention aus, daß  $A_0, A_1, \dots, A(n_{\text{fou}})$  und  $B_1, \dots, B(n_{\text{fou}}-1)$  den Umfang  
der numerischen Analyse bestimmen. Dies erfordert die Bereitstellung von  
 $n_{\text{rad}} = 2 \cdot n_{\text{fou}}$  Stützradien  $r(\text{Eingabe})$ , über die  $r(\varphi)$  interpoliert wird.

- $n_{\text{rad}}$  = Anzahl Stützradien  $r$ .
- $n_{\text{fou}}$  = Anzahl Fourierkoeffizientenpaare  $A_n, B_n$ .
- $A_n, B_n$  = Fourierkoeffizienten. Für das Ergebnis der Analyse ist es unerheblich, ob ein reeller oder komplexer FFT-Aufruf gewählt wird. Im Teststadium wurde sichergestellt, daß bei Aufruf entsprechender Algorithmen aus der IMSL-Bibliothek lediglich Schnittstellenadaptation sowie nachträgliches Multiplizieren mit einem freigelassenen Faktor zu beachten waren.
- $\sigma_b$  =  $\sigma_b(\varphi)$ , Biegespannung an der Randfaser der Innenoberfläche des Behälters nach Theorie 2. Ordnung infolge Innendruck  $p$  sowie der durch  $r(\varphi)$  bestimmten geometrischen Behälter-Imperfektionen.
- $p$  = Hydrostatischer Behälter-Innendruck.
- $s$  = Wanddicke des Behälters.
- $K_n$  =  $K(n,p)$ , Koeffizient, der das elastische Verhalten des Behältersystems nach Theorie 2.Ordnung repräsentiert.
- $E$  = Konstant angenommener Elastizitätsmodul.
- $\mu$  = Querkontraktions-Koeffizient (Poisson).
- $D_m$  = Mittlerer Durchmesser des Behälters in der betrachteten Querschnittsebene des zweidimensionalen Systems.  
Dieser ist (wie  $r_0$ ) Bestandteil des Ergebnisses der noch durchzuführenden Fourier-Analyse und weicht im allgemeinen vom Solldurchmesser des Kreisbehälters ab.

Die Pichformeln sind für  $r_0$  und  $D_m$  bezogen auf die Mittelfaser der Behälterwand formuliert. Bei Gegenüberstellung mit anderen Formeln (z.B. Kessel-formel) ist daher zu beachten, ob und wie die Annahme kleiner Wanddicke im Verhältnis zum Durchmesser bei einem eventuellen Ergebnisvergleich zu berücksichtigen ist.

- $\sigma_p$  = konstant, Dampfdruckspannung als Membranspannungsanteil nach Art der Kesselformel.
- $\psi_b$  =  $\psi_b(\varphi)$ , Spannungskennzahl an einer beliebigen Stelle  $\varphi$  an der Innenoberfläche des Behälters. Die Auswertung erfolgt in der Regel für die Spitzen-Zugspannung im Knickpunkt der Aufdachung.

Um die korrespondierende Spannung und Spannungskennzahl an der Außenoberfläche des Behälters zu erhalten, ist - wie auch sonst in der Mechanik üblich - Biegung mit Längskraft zu betrachten und die der Membranspannung überlagerte Biege-Zusatzspannung bei Zug zu addieren und bei Druck zu subtrahieren.

Untersucht man nun in der Pich-Formel speziell den Faktor  $K_n$ , so zeigt sich zum einen aus seiner Konstruktion, daß er vorzugsweise von der Höhe des rechnerisch angesetzten Innendrucks  $p$  und dem Fourier-Laufindex  $n$  abhängt. Die übrigen Systemgrößen  $E, \mu, D_m, s$  werden innerhalb einer Analyse konstant gehalten. Zum anderen zeigt sich, daß der Wertebereich stets zwischen Null und Eins liegt, sowie daß die entscheidenden Faktorisierungen im Raum niedriger Indizes  $n$  stattfinden. Für höhere Indizes  $n$  konvergiert  $K_n$  monoton gegen Eins. Dieser Umstand legt nahe, die



Fourierreihe in der Biegespannungsformel nach Pich in zwei Abschnitte zu unterteilen, die durch eine Toleranzschwelle voneinander getrennt sind. Als Toleranzschwelle wird zunächst allgemein ein Summationsindex  $n_{lim}$  eingeführt. Die vor dem Summenzeichen stehenden Faktoren werden auf die linke Seite der Gleichung gebracht:

$$\begin{aligned}
 (\sigma_b \cdot s^2) / (6 \cdot p \cdot r_0) &= \sum_{n=1}^{n_{lim}} K_n \cdot (A_n \cdot \cos(n \cdot \varphi) + B_n \cdot \sin(n \cdot \varphi)) \\
 + \sum_{n=n_{lim}+1}^{\infty} K_n \cdot (A_n \cdot \cos(n \cdot \varphi) + B_n \cdot \sin(n \cdot \varphi)) & \quad (A1-1)
 \end{aligned}$$

Die Summation beginnt hier formal bereits beim Index  $n = 1$ , was problemlos möglich wird, wenn die Berechnung von  $K_n$  durch Umformung frei von Singularitäten gehalten wird (siehe unten). Dann zeigt sich, daß  $K_1 = 0$  ist. Sodann werden die beiden durch Toleranzschwelle getrennten Abschnitte auch in der Radiusformel von Pich eingeführt:

$$\begin{aligned}
 r - r_0 &= \sum_{n=1}^{n_{lim}} (A_n \cdot \cos(n \cdot \varphi) + B_n \cdot \sin(n \cdot \varphi)) \\
 + \sum_{n=n_{lim}+1}^{\infty} (A_n \cdot \cos(n \cdot \varphi) + B_n \cdot \sin(n \cdot \varphi)) & \quad (A1-2)
 \end{aligned}$$

Die Toleranzschwelle  $n_{lim}$  soll nun so bestimmt werden, daß alle  $K_n$  jenseits dieser Schwelle in der Spannungsformel einen bestimmten Schwellwert  $K_{lim}$  überschreiten, so daß für  $n > n_{lim}$  gilt:

$$K_{lim} < K_n < 1.$$

Der Schwellwert  $K_{lim}$  mag nach Wahl des Formelanwenders z.B. 0.99 oder 0.999 betragen. Aufgrund dieser Festlegung wird nun entschieden, daß in der Spannungsformel für  $n > n_{lim}$  näherungsweise alle folgenden  $K_n = 1$  gesetzt werden können.

Subtrahiert man nach dieser Maßnahme die obige Radiusformel (A1-2) von der Spannungsformel (A1-1), so heben sich die Fourierreihen-Abschnitte jenseits der Toleranzschwelle gegenseitig auf, und es folgt:

$$\begin{aligned}
 (\sigma_b \cdot s^2) / (6 \cdot p \cdot r_0) - (r - r_0) &= \\
 \sum_{n=1}^{n_{lim}} K_n \cdot (A_n \cdot \cos(n \cdot \varphi) + B_n \cdot \sin(n \cdot \varphi)) & \\
 - \sum_{n=1}^{n_{lim}} (A_n \cdot \cos(n \cdot \varphi) + B_n \cdot \sin(n \cdot \varphi)) & \\
 = \sum_{n=1}^{n_{lim}} (K_n - 1) \cdot (A_n \cdot \cos(n \cdot \varphi) + B_n \cdot \sin(n \cdot \varphi)) &
 \end{aligned}$$

Durch Umordnung folgt die neue, vereinfachte Spannungsformel:

$$\sigma_b = (6 \cdot p \cdot r_0) / s^2 \cdot (r - r_0 + w) \quad (\text{A1-3})$$

mit:

$$w = \sum_{n=1}^{n_{\text{lim}}} (K_n - 1) \cdot (A_n \cdot \cos(n \cdot \varphi) + B_n \cdot \sin(n \cdot \varphi)) \quad (\text{A1-4})$$

Damit  $K_n$  niemals singular wird, ist anstelle der von Pich angegebenen Quotientenbildung die folgende, im Ergebnis identische Formel zu verwenden:

$$K_n = (n^2 - 1) / (n^2 - 1 + h) \quad (\text{A1-5})$$

$$h = 3 / 2 \cdot (1 - \mu^2) \cdot p / E \cdot (D_m / s)^3 \quad (\text{A1-6})$$

Wie der Vergleich mit der Original-Pich-Spannungsformel zeigt, geht jetzt der Radius  $r = r(\varphi)$  mit in die Spannungsformel  $\sigma_b = \sigma_b(\varphi)$  ein. In der praktischen Anwendung stehen die Radien  $r(\varphi)$  zu dem Zeitpunkt, wo sie benötigt werden, bereits vollständig als Stützwerte (und ggf. Interpolierte) zur Verfügung, so daß auf sie zugegriffen werden kann.

Die neue Spannungsformel ist wie folgt zu deuten:

Es werden keineswegs die über  $n_{\text{lim}}$  hinausgehenden Fourierkoeffizienten ignoriert! Vielmehr sind diese nach Einarbeitung der Radiusformel "virtuell" weiter in der Spannung enthalten! Nur die ihnen zugeordneten elastischen Faktoren  $K_n$  wurden jenseits der Toleranzschwelle näherungsweise auf 1 gesetzt, wobei der vom Anwender wählbare, sehr kleine Approximationsfehler für  $n \Rightarrow \infty$  gegen Null geht.

Wie sich an Rechenbeispielen zeigt, läßt sich der Gesamtfehler in der Spannungsaussage bequem unter 1 Prozent halten. Das Ergebnis liegt auf der sicheren Seite, weil die so erhaltenen Spannungen und Spannungskennzahlen leicht erhöht sind. Dafür ist die Einsparung an Rechenzeit drastisch. Beispielsweise wird an einem typischen Anwendungsfall für 1024 Stützradien bzw. 512 Fourierkoeffizientenpaare bei dem Schwellwert  $K_{\text{lim}} = 0.99$  der Schwellenindex  $n_{\text{lim}} = 77$  gefunden. Das bedeutet: Die Summierung endet in der vereinfachten Spannungsformel bei 77 anstelle von 512. Die damit berechnete Spannungskennzahl ist aber nur um weniger als 0.1 Prozent erhöht.

Programmintern wird  $n_{\text{lim}}$  durch Umordnung der Formel für  $K_n$  ermittelt, nachdem der Anwender  $K_n$  gewählt hat:

$$h = 3 / 2 \cdot (1 - \mu^2) \cdot p / E \cdot (D_m / s)^3 \quad (\text{A1-6})$$

$$1/n_{\text{lim}}^2 = (1 - K_n) / (1 - K_n + K_n \cdot h) \quad (\text{A1-7})$$

Falls  $1/n_{\text{lim}}^2$  numerisch signifikant  $> 0$ , ergibt sich durch die reziproke Wurzel  $n_{\text{lim}}$ . Wird  $K_n$  jedoch vom Anwender zu nahe an 1 gefordert, so kann  $n_{\text{lim}}$  größer als die vorhandene Anzahl Fourierkoeffizientenpaare werden. In diesem Fall wird die Summation wie ursprünglich gehabt über alle Fourierkoeffizienten durchgeführt. Das Ergebnis stimmt dann mit dem der Original-Pich-Formel überein. Nur die Rechenzeiterparnis entfällt.

Der rechnerische Vorteil des Vereinfachungs-Algorithmus wirkt sich insbesondere dann aus, wenn mit dem Pich-Ansatz nicht nur die Spannungskennzahl in der Aufdachungsspitze berechnet werden soll, sondern der Verlauf der Biege-Zusatzspannung über den gesamten Behälter-Umfang von Interesse ist, z.B. zur Beurteilung der Güte der Berechnung, Bestimmung des Abstandes zur zweitgrößten Spannung, oder Studie des allgemeinen Behälterverhaltens.

## A2 Generierung von Finite-Elemente-Systemen

Ein wesentlicher Teil des Aufwandes bei der Arbeit mit der Finite-Elemente-Methode entsteht in der Phase der Aufstellung der Rechenmodelle. Hierzu stehen i.a. Preprozessoren zur Verfügung, die für Topologien mit bestimmten Bildungsgesetzen automatische Netzgenerierungen anbieten. In der Regel stoßen diese Preprozessoren aber an Grenzen, die bei bestimmten Forderungen des Anwenders nicht ohne weiteres zu überwinden sind. Im vorliegenden Fall ging es darum, Modellaufstellungen zu wiederholen, indem jeweils ein bestimmter Modellierungsaspekt verändert wird, während die übrige Modellaufstellung möglichst ohne Wiederholung des bisherigen Arbeitsaufwandes zu bleiben hat. Als Beispiel sei erwähnt: Veränderung der Aufdachungshöhe des Behälters mit sukzessivem Verziehen aller Modellkoordinaten gemäß dem Kreis/Tangente-Bildungsgesetz, aber ohne Verändern der Knotennummern-Systematik oder Elementdefinition.

Die zur Modellaufstellung verwendbaren Preprozessoren haben mehr General-Purpose-Charakter und können so weitgehende Spezialwünsche nur bedingt erfüllen. Der Wiederholungsaufwand zieht dann eine gewisse Fehleranfälligkeit in der Modell-Codierung nach sich: Bereits ausgetestete Modelle können nicht wiederverwendet werden. Aus diesem Grunde wird die Modellerzeugung mittels eines eigens dafür entwickelten Generierungsprogramms organisiert, das schwerpunktmäßig auf die speziellen Modellvariationen ausgerichtet ist. Folgerichtig wächst dieses Programm mit der Aufnahme weiterer Modelländerungswünsche und erlaubt zu jeder Zeit den Rückgriff auf bereits früher aufgestellte Modelle. Die wesentlichen Entwicklungsstufen dieses Generierungsprogramms für Behälter mit Aufdachungen sind:

- Erzeugen Halbsystem Kreis/Tangente mit unterschiedlichen Maschenweiten: Unterer 90°-Sektor des Behälters (dieser ist abwählbar, so daß ein Viertelsystem entsteht, welches obere und untere Aufdachung interpretiert), oberer Kreissektor, oberer Tangentensektor (Dachbereich, mit Übergangselementen an den Kreissektor angeschlossen), mehrere Schichten in Axialrichtung.
- Studie einer Variante zum Kreis/Tangente-System: Parabolische Ovalisation des Tangentebereiches nach Maßgabe eines vorgegebenen Winkels in der Aufdachungsspitze zusätzlich zur Aufdachungshöhe, tangential in den Kreissektor einmündend.
- Logarithmisches Verziehen des Feinnetzbereiches in der Umgebung der Aufdachungsspitze für die Verifikation des Feinheitgrades des Finite-Elemente-Netzes.
- Erweitern des Elementtyps vom 20-Knoten-Volumen-Element zum 27-Knoten-Volumenelement für die Erfassung vollständiger isoparametrischer Elementansatzfunktionen entsprechend der Elementbibliothek des FE-Programms ABAQUS.
- Verziehen der Element-Spannweite in Behälter-Axialrichtung für die axiale Umverteilung der vorhandenen Knotenpunkte in den für die Spannungsermittlung wesentlichen Auswertebereich.
- Geometrisches Bildungsgesetz für den Behälter mit globaler Ovalisation nach Zeman.
- Einprägen einer wellenförmigen Imperfektion in Axialrichtung des Behälters für die Erfassung dreidimensionaler Wirkungen nichtkonstanter Aufdachungshöhen.
- Erweitern des symmetrisch interpretierenden Halbsystems auf Vollsysteme, mit dem Ziel der Erfassung örtlicher Unsymmetrien: Modellierung wirklichkeitsnaher Schweißnahtwulst-Oberflächen mit oder ohne Beschleifen. Überlagerung von Axialversätzen durch links und rechts unterschiedlich einmündende Aufdachungshöhen, ggf. mit Anpassung beim Beschleifen.

Die gewählte Vorgehensweise hat den zusätzlichen Vorteil, durch Wahl des Ausgabeformates Eingabedateien für verschiedene Finite-Elemente-Programme und Postprozessoren erzeugen zu können. Hierdurch wird einerseits Gegenrechnen möglich, andererseits können Testsysteme mit geringem Datenumfang erzeugt und auf PC-Ebene gelöst werden, während grobnumerische Leistungssysteme in den Höchstleistungs-Stapelbetrieb eingeschleust werden können.

# A3 Prozedur und Programme zum Pich-Verfahren

Das Pich-Verfahren wurde an einem VAX-Rechner unter dem Betriebssystem VMS implementiert und die Beispiele dort gerechnet. Die Verfahrenssteuerung erfolgt mit einer VMS-Prozedur, die im Anwenderdialog Parameter und Zuordnung von Datensätzen abfragt sowie die Rechenprogramme aufruft. Bei Übertragung auf ein anderes System (z.B. Windows auf PC) ist für den Ablauf eine entsprechende Steuerungsschale bereitzustellen.

## A3.1 VMS-Steuerungsprozedur zum Pich-Verfahren

```

$ SET NOVERIFY
$!
$!-----
$! Prozedur AUFDACH_PICH:
$!
$! Berechnung der Biegezusatzspannungen von Behältern
$! mit Aufdachung nach dem PICH-Verfahren
$!
$! Lit.:
$! R.Pich: "Der Zusammenhang zwischen der Unrundheit von Kessel-
$! trommeln und den zugehörigen Biegezusatzspannungen"
$! Mitteilungen der VGB, Heft 103, August 1966.
$!
$! BAM - V.32 / Weber / Version Juni 1995
$!-----
$! Das PICH-Verfahren berechnet Biegezusatzspannungen an einem
$! vorrangig auf Membranspannung (Kesselformel) beanspruchten
$! Behälter unter hydrostatischem Innendruck nach Theorie 2.Ord-
$! nung (Geometrische Nichtlinearität).
$!
$! Das Verfahren vereinigt in sich die Theorie 2.Ordnung des
$! schwach gekrümmten Balkens (Boussinesq), dessen Anwendung auf
$! n-ovale Imperfektionen kreisförmiger Behälter (K.Schmidt),
$! und die systematische Überlagerung von Ovalitäten zu einer
$! FOURIER-Reihe.
$! Der von Schmidt entwickelte Ovalitätsansatz ergibt in karte-
$! nischer Darstellung für n = 2 eine Ellipse; n = 1 stellt die
$! Starrkörperverschiebung dar; n > 2 zeigt eine wellenförmige
$! Imperfektion. In Polarkoordinaten werden die Ovalitäten durch
$! Sinus- und Kosinus-Funktionen beschrieben, so daß sie als
$! FOURIER-Reihe überlagert werden können.
$!
$! Das Verfahren stellt eine direkte Beziehung zwischen dem von
$! einem Mittelwert abweichenden Radius an allen Stellen eines
$! Behälterumfangs und den daraus folgenden Biegezusatzspannun-
$! gen her. Die nach Vorgabe der Stützradialen ermittelten FOUR-
$! RIER-Koeffizienten legen die Interpolationsfunktion für die
$! übrigen Radialen fest. Gleichzeitig dienen sie unter Hinziele-
$! hung von Faktoren Kn zur Angabe der dort vorhandenen Biege-
$! zusatzspannungen.
$!
$! Die Prozedur AUFDACH_PICH verwaltet
$!
$! - die Eingabe der Kontur eines Behälters mit Aufdachung
$! mit mehreren Möglichkeiten der Koordinaten-Eingabe
$! (Polarkoordinaten-System),
$! - Berechnung eines Satzes von FOURIER-Koeffizienten,
$! - Berechnung von Biegezusatzspannungen nach PICH infolge
$! von in der Behälterkontur vorhandenen geometrischen
$! Imperfektionen, insbesondere Aufdachungen.
$!
$! Die Arbeitsschritte sind in getrennte Programme unterteilt.
$! Die Zwischenergebnisse werden in getrennten Dateien
$! gespeichert.
$!
$! (Datei Nr. 41, 42 ...)
$! Programm:
$! |-----+-----+-----+-----+-----+
$! | KOORD01 | | KOORD02 | | KOORD03 | | KOORDi | | (user
$! |-----+-----+-----+-----+-----+ | | | | |
$! | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
$! |-----+-----+-----+-----+-----+ | | | | |
$! (Datei Nr. 51) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
$! Programm: | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
$! |-----+-----+-----+-----+-----+ | | | | |
$! | FOURI01 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
$! |-----+-----+-----+-----+-----+ | | | | |
$! (Datei Nr. 61) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
$! Programm: | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
$! |-----+-----+-----+-----+-----+ | | | | |
$! | SPANN01 | | SPANN02 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
$! |-----+-----+-----+-----+-----+ | | | | |
$! (Datei Nr. 71, 72 ...)
$!
$!-----
$ WRITE SYS$OUTPUT "ENTER PROZEDUR AUFDACH_PICH"
$ ASSIGN TT SYS$INPUT
$!
$ WRITE SYS$OUTPUT "=====
$ WRITE SYS$OUTPUT " Eingabe Dateiname in VMS-Konvention (ohne "
$ WRITE SYS$OUTPUT ".typ) für die Übernahme und Erzeugung "
$ WRITE SYS$OUTPUT " von Dateien des aktuell zu berechnenden "
$ WRITE SYS$OUTPUT " Problems"
$ WRITE SYS$OUTPUT "=====
$ INQUIRE datei "Dateiname (ohne .typ) ?"
$!

```

```

$ ASSIGN 'datei'.D41 FOR041
$ ASSIGN 'datei'.D42 FOR042
$ ASSIGN 'datei'.D51 FOR051
$ ASSIGN 'datei'.D61 FOR061
$ ASSIGN 'datei'.D71 FOR071
$ ASSIGN 'datei'.D72 FOR072
$!
$!-----
$! Eingabe Geometrie des Behälters
$!-----
$ MANF:
$ WRITE SYS$OUTPUT "=====
$ WRITE SYS$OUTPUT " Eingabe Kennziffer für die Art der Bestim-
$ WRITE SYS$OUTPUT " mung der geometrischen Behälter-Kontur: "
$ WRITE SYS$OUTPUT "=====
$ WRITE SYS$OUTPUT " "
$ WRITE SYS$OUTPUT "- Einlesen Koordinaten aus Datei Nr.41: 11"
$ WRITE SYS$OUTPUT "- Einlesen Meß-Daten aus Datei Nr.42: 12"
$ WRITE SYS$OUTPUT "- Interaktiv eingeben:"
$ WRITE SYS$OUTPUT " Kreis/Tangente-System: 13"
$ WRITE SYS$OUTPUT "- Interaktiv eingeben ZEMAN-Kontur: 14"
$ WRITE SYS$OUTPUT "- ... 15"
$ WRITE SYS$OUTPUT "- ... 16"
$ WRITE SYS$OUTPUT "- ... (Nachträge 'user supplied') 17"
$ WRITE SYS$OUTPUT "- ... 18"
$ WRITE SYS$OUTPUT "- Stop: -1"
$ WRITE SYS$OUTPUT " "
$ INQUIRE kennz "Kennziffer ?"
$!
$ IF kennz .EQ. 11 THEN GOTO M11
$ IF kennz .EQ. 12 THEN GOTO M12
$ IF kennz .EQ. 13 THEN GOTO M13
$ IF kennz .EQ. 14 THEN GOTO M14
$!IF kennz .EQ. 15 THEN GOTO M15
$!IF kennz .EQ. 16 THEN GOTO M16
$!IF kennz .EQ. 17 THEN GOTO M17
$!IF kennz .EQ. 18 THEN GOTO M18
$ IF kennz .LE. 0 THEN GOTO MENDE
$ GOTO MANF
$!
$ M11:
$ WRITE SYS$OUTPUT "(11) Einlesen Koordinaten aus Datei Nr.41:"
$ WRITE SYS$OUTPUT "(11) Programm KOORD01 erwartet die Eingabe"
$ WRITE SYS$OUTPUT "(11) in der Form: nrad (15) "
$ WRITE SYS$OUTPUT "(11) r_1 (F10) "
$ WRITE SYS$OUTPUT "(11) r_2 (F10) "
$ WRITE SYS$OUTPUT "(11) ... "
$ WRITE SYS$OUTPUT "(11) r_nrad (F10) "
$ WRITE SYS$OUTPUT " "
$ RUN KOORD01
$ GOTO MFOUR
$!
$ M12:
$ WRITE SYS$OUTPUT "(12) Einlesen Meß-Daten aus Datei Nr.42: "
$ WRITE SYS$OUTPUT "(12) Programm KOORD02 erwartet die Eingabe"
$ WRITE SYS$OUTPUT "(12) in der Form: nrad, nrad (2I5) "
$ WRITE SYS$OUTPUT "(12) phi_1, r_1 (2F10) "
$ WRITE SYS$OUTPUT "(12) phi_2, r_2 (2F10) "
$ WRITE SYS$OUTPUT "(12) ... "
$ WRITE SYS$OUTPUT "(12) phi_nrad, r_nrad (2F10) "
$ WRITE SYS$OUTPUT "(12) Die Meß-Stellen phi_i können unregel-
$ WRITE SYS$OUTPUT "(12) mäßig verteilt sein."
$ WRITE SYS$OUTPUT "(12) (Intervall 0 =< phi_i < 2*Pi). "
$ WRITE SYS$OUTPUT "(12) Sie werden als Stützstellen einer "
$ WRITE SYS$OUTPUT "(12) kubischen Splinesfunktion verwendet, "
$ WRITE SYS$OUTPUT "(12) die zur Erzeugung äquidistanter "
$ WRITE SYS$OUTPUT "(12) FOURIER-Stützstellen dient."
$ WRITE SYS$OUTPUT " "
$ RUN KOORD02
$ GOTO MFOUR
$!
$ M13:
$ WRITE SYS$OUTPUT "(13) Eingeben Kreis/Tangente-System: "
$ WRITE SYS$OUTPUT "(13) Programm KOORD03 fordert interaktiv "
$ WRITE SYS$OUTPUT "(13) die Eingabeparameter zur Beschreibung "
$ WRITE SYS$OUTPUT "(13) eines Behälters mit Aufdachung über "
$ WRITE SYS$OUTPUT "(13) Terminal an."
$ RUN KOORD03
$ GOTO MFOUR
$!
$ M14:
$ WRITE SYS$OUTPUT "(14) Eingeben ZEMAN-Kontur:"
$ WRITE SYS$OUTPUT "(14) Programm KOORD04 fordert interaktiv "
$ WRITE SYS$OUTPUT "(14) die Eingabeparameter zur Beschreibung "
$ WRITE SYS$OUTPUT "(14) eines Behälters mit Aufdachung über "
$ WRITE SYS$OUTPUT "(14) Terminal an."
$ RUN KOORD04
$ GOTO MFOUR
$!
$ M15:
$ WRITE SYS$OUTPUT "(15) (Weitere Eingabealternativen"
$ WRITE SYS$OUTPUT "(15) nicht implementiert)"
$!RUN KOORD05
$!GOTO MFOUR
$ GOTO MENDE
$!-----
$! FOURIER-Analyse
$!-----
$ MFOUR:
$ RUN FOURIO1
$!

```

```

$!-----
$! Biegezusatzspannungen nach PICH
$!-----
$ MSPAN:
$ WRITE SYS$OUTPUT "=====  

$ WRITE SYS$OUTPUT " Eingabe Kennziffer für Art der Bestimmung "  

$ WRITE SYS$OUTPUT " der Biegezusatzspannungen des Behälters: "  

$ WRITE SYS$OUTPUT "=====  

$ WRITE SYS$OUTPUT " "  

$ WRITE SYS$OUTPUT "-- Auswertung PICH-Formel "  

$ WRITE SYS$OUTPUT " "  

$ WRITE SYS$OUTPUT " an der Gesamtkontur: 31 "  

$ WRITE SYS$OUTPUT " PICH-Vereinfacht an der Gesamtkontur: 32 "  

$ WRITE SYS$OUTPUT " .. 33 "  

$ WRITE SYS$OUTPUT " .. 34 "  

$ WRITE SYS$OUTPUT " .. (Nachträge 'user supplied') 35 "  

$ WRITE SYS$OUTPUT " .. Stop: 36 "  

$ WRITE SYS$OUTPUT " "  

$ INQUIRE kenn2 "Kennziffer "  

$!  

$ IF kenn2 .EQ. 31 THEN GOTO M31  

$ IF kenn2 .EQ. 32 THEN GOTO M32  

$ IF kenn2 .EQ. 33 THEN GOTO M33  

$ IF kenn2 .EQ. 34 THEN GOTO M34  

$ IF kenn2 .EQ. 35 THEN GOTO M35  

$ IF kenn2 .EQ. 36 THEN GOTO M36  

$ IF kenn2 .LE. 0 THEN GOTO MENDE  

$ GOTO MSPANN
$!  

$ M31:  

$ WRITE SYS$OUTPUT "(31) Auswertung PICH-Formel an der Gesamt-"  

$ WRITE SYS$OUTPUT "(31) kontur: Programm SPANN01 berechnet "  

$ WRITE SYS$OUTPUT "(31) Biegezusatzspannungen nach PICH an "  

$ WRITE SYS$OUTPUT "(31) allen Stützstellen der Kontur, sowie "  

$ WRITE SYS$OUTPUT "(31) zusätzlich jeweils einen Zwischenwert "  

$ WRITE SYS$OUTPUT "(31) (zur Beurteilung der Glattheit des "  

$ WRITE SYS$OUTPUT "(31) Ergebnisses der FOURIER-Analyse). "  

$ WRITE SYS$OUTPUT " "  

$ RUN SPANN01  

$ GOTO MENDE
$!  

$ M32:  

$ WRITE SYS$OUTPUT "(32) PICH-Vereinfacht an der Gesamtkontur: "  

$ WRITE SYS$OUTPUT "(32) Programm SPANN02 berechnet die Biege- "  

$ WRITE SYS$OUTPUT "(32) zusatzspannungen nach einem verein- "  

$ WRITE SYS$OUTPUT "(32) fachten Verfahren (zur Verkürzung der "  

$ WRITE SYS$OUTPUT "(32) Rechenzeit), bei dem mit Vorgabe "  

$ WRITE SYS$OUTPUT "(32) einer Toleranz für die gegen '1' kon- "  

$ WRITE SYS$OUTPUT "(32) vergierenden elastischen Koeffizien- "  

$ WRITE SYS$OUTPUT "(32) ten Kn ein Näherungswert der Zusatz- "  

$ WRITE SYS$OUTPUT "(32) spannung bestimmt wird. "  

$ WRITE SYS$OUTPUT "(32) Berechnung an allen Stützstellen der "  

$ WRITE SYS$OUTPUT "(32) Kontur, sowie zusätzlich jeweils ein "
```

```

$ WRITE SYS$OUTPUT "(32) Zwischenwert (zur Beurteilung der "  

$ WRITE SYS$OUTPUT "(32) Glattheit des Ergebnisses der "  

$ WRITE SYS$OUTPUT "(32) FOURIER-Analyse). "  

$ RUN SPANN02  

$ GOTO MENDE
$!  

$!-----  

$! Prozedur Ende  

$!-----  

$ MENDE:  

$ DEASSIGN FOR041  

$ DEASSIGN FOR042  

$ DEASSIGN FOR051  

$ DEASSIGN FOR061  

$ DEASSIGN FOR071  

$ DEASSIGN FOR072  

$!  

$ WRITE SYS$OUTPUT " "  

$ WRITE SYS$OUTPUT "EXIT PROZEDUR AUFDACH_PICH"  

$ EXIT
```

A3.2 Rechenprogramme zum Pich-Verfahren

Die Rechenprogramme zum Pich-Verfahren bilden eine in drei Ebenen gestaffelte Programmkette. Ebene 1 enthält die "Vorlauf"-Programme, die die Geometrie des zu untersuchenden Behälters beschreiben. Die Geometrie kann in unterschiedlicher Weise eingegeben werden: Wahlweise über eine bereits existierende Datei mit Radien in der Konvention der Fourier-Analyse, oder über eine Meßdatendatei. Oder aber es werden interaktiv Systemparameter zu einem Behälter mit Kreis/Tangente-Geometrie oder Zeman-Geometrie eingelesen. Weitere Möglichkeiten der Behältereingabe können auf Ebene 1 vom Anwender hinzuprogrammiert werden. Aus den unterschiedlich möglichen Eingabedaten werden einheitlich Radien in der Konvention der Fourier-Analyse erzeugt (äquidistant im Intervall von 0 bis 2·π) und in einer eigenen Datei abgelegt.

Ebene 2 enthält das "Kern"-Programm. Dieses führt die Fourier-Analyse mit Hilfe des Aufrufes einer reellen Fast-Fourier-Transformation (FFT) doppelter Genauigkeit durch (ISML-Bibliothek (5)), faktorisiert und ordnet die berechneten Fourierkoeffizienten entsprechend einer Indexkonvention, die Brauch/Dreyer/Haacke [4] entnommen worden ist und hier zur Schnittstellenvereinbarung für die Übergabe an Nachlaufprogramme erklärt wurde. Der Anwender kann bei Bedarf andere Fourier-Analysen auf Ebene 2 programmieren, sollte dann aber zweckmäßigenweise die vorgegebene Schnittstellenvereinbarung adaptieren. Die Fourierkoeffizienten werden in einer eigenen Datei abgelegt.

Ebene 3 enthält die "Nachlauf"-Programme, mit denen nach Pich oder einem modifizierten Verfahren Biegezusatzspannungen des Behälters mit Imperfektionen, insbesondere Aufdachungen, berechnet werden. Hier kann der Anwender für Zwecke anderer Ergebnisdarstellung nach Belieben weitere Nachlaufprogramme (z.B. mit feinerer Interpolation für graphische Kurvendarstellung) hinzufügen.

Die graphische Ausgabe selbst ist Gegenstand einer Ebene 4, die in dieser Programmkette (die nur das Pich-Verfahren zum Inhalt hat) nicht dokumentiert ist.

## Vorlaufprogramm KOORD01

Das Vorlaufprogramm KOORD01 liest Radien mit äquidistanter Winkelteilung für einen Behälter mit imperfitem Kreisquerschnitt (Unrundheit z.B. als Ovalität oder Aufdachung) aus einer Datei, sowie interaktiv die übrigen Behälter-Systemdaten (siehe programminterne Dokumentation) und stellt diese formatgerecht in einer Ausgabedatei den nachfolgenden Programmen für die Fourier- und Pich-Analyse zur Verfügung. KOORD01 hat somit nur die Aufgabe des Sammelns von Daten und der Format-Verifikation.

```

C-----
C   BAM - V.32 / Weber / Version Juni 1995
C-----
C   IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C   DATA ISCR / 5/
C   DATA JSCR / 6/
C   DATA IIXY /41/
C   DATA JJXY /51/
C-----
C
C-----
C   WRITE (JJXY,601)
C   FORMAT('DATEIANFANG*','*')
C   &'* Behälter mit Aufdachung(en) und ggf. Ovalität:/'
C   &'* Eingeliesene Geometriedaten (Radien) als Meßwerte/'
C   &'* oder aus anderweitig vorgegebenem Bildungsgesetz. '/'
C   &'*')
C
C-----
C
C-----
C   WRITE (JSCR,602)
C   FORMAT(
C   &' Dateieingabe Stützstellenanzahl nrad:/'
C   &' zulässig: nrad=8,16,32,64,128,256,512,1024,2048,4096')
C
C
C   NTRIAL = 0
C   NTRIAL = NTRIAL + 1
C   IF (NTRIAL .GT. 1000) GOTO 72
C   READ (IIXY,*,ERR=71,END=92) NRAD
C   K = 4
C   DO I = 1,10
C     K = K * 2
C     IF (NRAD.EQ.K) GOTO 10
C   ENDDO
C   WRITE (JSCR,604) NRAD
C   FORMAT (
C   &' *** KOORD01: Fehlerhafte Dateizuordnung oder/'
C   &' Stützstellenanzahl falsch: nrad =', I10)
C   STOP
C   CONTINUE
C
C-----
C   'RADI', 'DICK', 'DRUC', 'EMOD', 'NUE'
C-----
C   WRITE (JSCR,605)
C   FORMAT(
C   &' Interaktive Eingabe des Behälter-Radius:/'
C   &' in [mm], z.B.: 1389.0'/'
C   &' Festwert bestätigen: 0')
C   READ (ISCR,*) RADIUS
C   IF (RADIUS.LE.0.0) RADIUS = 1389.0
C   WRITE (JJXY,('RADI','E16.8')) RADIUS

```

```

C-----
C   Spannungsanalyse nach Fourier/Pich
C   =====
C   Vorlaufprogramm KOORD01:
C
C   Behälter mit Aufdachung/Ovalität, Einlesen Geometrie-
C   daten (Radien) als Meßwerte des Behälters, hier:
C
C   Formatfreie Eingabe aus Datei (Werte zeilenweise),
C   formatierte Ausgabe in Datei für Übergabe an Fourier-
C   analyse.
C-----
C   Dateieingabe:
C   Stützstellenzahl nrad z.B. 512,
C   nrad Radien, äquidistant über
C   den Winkelbereich
C   phi = 0 bis < 2*Pi.
C   Datei: FOR041.DAT.
C
C   Interaktive Eingabe:
C   Behältersollradius z.B. 1389 [mm],
C   Behälter-Wanddicke z.B. 22 [mm],
C   Behälter-Innendruck z.B. 4.513 [N/mm2],
C   E-Modul z.B. 210000 [N/mm2],
C   Querkontraktion Nue z.B. 0.3 [./.].
C-----
C   Dateiausgabe:
C   Schlüsselwortgebunden:
C   'RADI' in SP.1-4, (A4,E16.8) Sollradius,
C   'DICK' IN SP.1-4, (A4,E16.8) Wanddicke,
C   'DRUC' IN SP.1-4, (A4,E16.8) Innendruck,
C   'EMOD' IN SP.1-4, (A4,E16.8) E-Modul,
C   'NUE' IN SP.1-4, (A4,E16.8) Nue,
C   Kommentare: 'nichtleerzeichen' in Spalte 1,
C   Format (I5):
C   nrad
C   Format (E20.12):
C   Radien (Meßdaten): Y(1),...,Y(nrad)
C   Datei: FOR051.DAT.

```

```

CCC NN = NRAD + 1
    WRITE (JJKY, '(E20.12)') Y0
C
    WRITE (JJKY, '('*'/'/'*DATEIENDE*')')
    STOP
92  WRITE (JSCR, 600)
    WRITE (JJKY, 600)
600 FORMAT (
    &' *** KOORD01: Fehler, ',
    &' vorzeitiges Dateieinde beim Einlesen!')
    STOP
    END

```

#### Vorlaufprogramm KOORD02

Das Vorlaufprogramm KOORD02 liest Radien als Meßwerte (oder Quasi-Meßwerte) unter beliebigen Winkeln im Polarkoordinatensystem des Behälterquerschnitts ein. Die zugehörigen Winkel müssen mit angegeben werden. Aus diesen Daten wird interpolierend ein Satz Radien mit äquidistanter Winkelteilung erzeugt. Dieser wird gemeinsam mit den übrigen Behälter-Systemdaten, die interaktiv eingelesen werden, formatgerecht in einer Ausgabedatei den nachfolgenden Programmen für die Fourier/Pich-Analyse zur Verfügung gestellt.

```

C-----
C Spannungsanalyse nach Fourier/Pich
C =====
C Vorlaufprogramm KOORD02:
C
C Behälter mit Aufdachung/Ovalität, Einlesen Geometrie-
C daten (Radien) als Meßwerte des Behälters, hier:
C
C Eingabe von Wertepaaren phi, r aus Datei
C (Wertepaare zeilenweise),
C kubische Spline-Interpolation über die Eingabewerte,
C formatierte Ausgabe in Datei für Übergabe an Fourier-
C Analyse.
C-----
C Dateieingabe:
C mrad, nrad (2I5)
C phi_1, r_1 (2F10)
C phi_2, r_2 (2F10)
C ...
C phi_mrad, r_mrad (2F10)
C
C wobei:
C Meßstellenzahl mrad, i.a. kleiner als nrad,
C Stützstellenzahl nrad, z.B. 512,
C mrad Winkel phi_i,
C mrad Radien r_i,
C i.a. nicht-äquidistant
C über den Winkelbereich
C phi = 0 bis 2*pi.
C

```

```

C-----
606 WRITE (JSCR, 606)
    FORMAT (
    &' Interaktive Eingabe der Behälter-Wanddicke: '/
    &' in [mm], z.B.: 22.0' /
    &' Festwert bestätigen: 0')
    READ (ISCR, *) SDICKE
    IF (SDICKE.LE.0.0) SDICKE = 22.0
    WRITE (JJKY, '('*DICK'',E16.8)') SDICKE
C-----
607 WRITE (JSCR, 607)
    FORMAT (
    &' Interaktive Eingabe des Behälter-Innendruckes: '/
    &' in [N/mm2], z.B.: 4.513' /
    &' Festwert bestätigen: 0')
    READ (ISCR, *) PDRUCK
    IF (PDRUCK.LE.0.0) PDRUCK = 4.513
    WRITE (JJKY, '('*DRUC'',E16.8)') PDRUCK
C-----
608 WRITE (JSCR, 608)
    FORMAT (
    &' Interaktive Eingabe des E-Moduls: '/
    &' in [N/mm2], z.B.: 210000.0' /
    &' Festwert bestätigen: 0')
    READ (ISCR, *) EMOD
    IF (EMOD.LE.0.0) EMOD = 210000.0
    WRITE (JJKY, '('*EMOD'',E16.8)') EMOD
C-----
609 WRITE (JSCR, 609)
    FORMAT (
    &' Interaktive Eingabe Querkontraktion Nue: '/
    &' in [././], z.B.: 0.3' /
    &' Festwert bestätigen: 0')
    READ (ISCR, *) RNUE
    IF (RNUE.LE.0.0) RNUE = 0.3
    WRITE (JJKY, '('*NUE'',E16.8)') RNUE
C-----
C-----ERLÄUTERUNG VON NRAD:
C NRAD = TEILINTERVALLE ENTSPRECHEND NRAD+1 STELLEN,
C DAVON NRAD STUETZSTELLEN UND STUETZWERTE,
C DIE NRAD+1. STELLE BEI 2*PI IST PERIODE.
C
81 WRITE (JJKY, '(I5)') NRAD
    CONTINUE
    READ (IIXY, *, ERR=81, END=92) Y0
    WRITE (JJKY, '(E20.12)') Y0
    DO I = 2, NRAD
        CONTINUE
        READ (IIXY, *, ERR=91, END=92) Y
        WRITE (JJKY, '(E20.12)') Y
    ENDDO
91

```





```

C-----KUBISCHE SPLINE-AUSWERTUNG
DPHI = 2*PI/NRAD
DO I = 1,NRAD+1
  PHI = (I-1)*DPHI
  RADIUS = CSVAL (PHI,NRAD, BREAK, CSCOEFF)
  WRITE (JJXY, '(E20.12)') RADIUS
ENDDO
C
WRITE (JJXY, '(*****/'**DATEIENDE**')')
STOP
92 WRITE (JSCR,600)
600 FORMAT (
&' *** KOORD02: Fehler,',
&' vorzeitiges Dateieinde beim Einlesen!')
STOP
END

```

Vorlaufprogramm KOORD03

Das Vorlaufprogramm KOORD03 erzeugt die Radien für einen Behälter mit Aufdachung, der als ideales Kreis/Tangente-System definiert wird. Hierzu werden die (wenigen) Systemparameter interaktiv eingelesen und entsprechend der gewählten Stützstellenanzahl  $n_{rad}$  die Radien bestimmt. Systemparameter und Radien werden in eine Datei ausgegeben. Alternativ zum Behälter mit einer Aufdachung können auch zwei identische, um  $180^\circ$  gegenüberliegende Aufdachungen erzeugt werden.

```

C-----
C Spannungsanalyse nach Fourier/Fich
=====
C Vorlaufprogramm KOORD03:
C
C Behälter mit Aufdachung, Generierung Geometriedaten
  (Radien) als Quasi-Messwerte des Behälters, hier:
C
C Kreis/Tangente-System (Perfekte Kreisform mit perfekt
  tangential anliegender gerader Aufdachung).
C-----
C Interaktive Eingabe:
C
C Stützstellenzahl nrad, z.B. 512,
  Behälterradius, z.B. 1389 [mm],
  Maß der Aufdachung, z.B. 8 [mm],
  Behältertyp z.B. 1 oder 2 (Aufdachungen),
  Behälter-Wanddicke z.B. 22 [mm],
  Behälter-Innendruck z.B. 4.513 [N/mm2],
  E-Modul z.B. 210000 [N/mm2],
  Querkontraktion Nue z.B. 0.3 [./.]
C

```

```

C-----
607 WRITE (JSCR,607)
  FORMAT (
&' Interaktive Eingabe des Behälter-Innendruckes:.'/
&' in [N/mm2], z.B.: 4.513.'/
&' Festwert bestätigen: 0')
  READ (ISCR,*) PDRUCK
  IF (PDRUCK.LE.0.0) PDRUCK = 4.513
  WRITE (JJXY, '( 'DRUC'',E16.8)') PDRUCK
C-----
608 WRITE (JSCR,608)
  FORMAT (
&' Interaktive Eingabe des E-Moduls:.'/
&' in [N/mm2], z.B.: 210000.0.'/
&' Festwert bestätigen: 0')
  READ (ISCR,*) EMOD
  IF (EMOD.LE.0.0) EMOD = 210000.0
  WRITE (JJXY, '( 'EMOD'',E16.8)') EMOD
C-----
609 WRITE (JSCR,609)
  FORMAT (
&' Interaktive Eingabe Querkontraktion Nue:.'/
&' in [./.], z.B.: 0.3.'/
&' Festwert bestätigen: 0')
  READ (ISCR,*) RNUE
  IF (RNUE.LE.0.0) RNUE = 0.3
  WRITE (JJXY, '( 'NUE'',E16.8)') RNUE
C

```

```

C-----
C ERLAUTERUNG VON NRAD:
NRAD = TEILINTERVALLE ENTSPRECHEND NRAD+1 STELLEN,
  DAVON NRAD STUETZSTELLEN UND STUETZWUERTE,
  DIE NRAD+1. STELLE BEI 2*PI IST PERIODE.
C
WRITE (JJXY, '(I5)') NRAD
C
C-----EINLESEN WINKEL UND MESSWERTE DER RADIIEN
DO I = 1,NRAD
  CONTINUE
  READ (I,XY, '(2F10.0)',ERR=81,END=92) PBUF, RBUF
  PHIEIN(I) = PBUF
  REIN(I) = RBUF
ENDDO
C
C-----BEDINGUNG
PHIEIN(1) = 0.0
PHIEIN(NRAD+1) = 2.0 * PI
REIN(NRAD+1) = REIN(1)
C
C-----KUBISCHE SPLINE-BERECHNUNG
CALL CSINT (NDATA, XDATA, FDATA, BREAK, CSCOEFF)
CALL CSINT (MRAD+1, PHIEIN, REIN, BREAK, CSCOEFF)

```



## Vorlaufprogramm KOORD04

Das Vorlaufprogramm KOORD04 erzeugt die Radien für einen Behälter mit kombinierter Ovalität und Aufdichtung nach dem Bildungsgesetz von Zeman. Die Systemparameter werden interaktiv eingelesen. Entsprechend der gewählten Stützstellenanzahl  $n_{rad}$  werden die Radien bestimmt. Systemparameter und Radien werden in eine Datei ausgegeben.

```

C-----
C      READ (ISCR,*)      EMOD
C      IF (EMOD.LE.0.0) EMOD = 210000.0
C      WRITE (JJXY,('EMOD',E16.8)) EMOD
C-----
C      WRITE (JSCR,609)
C      FORMAT (
C      & ' Interaktive Eingabe Querkontraktion Nue:/'
C      & ' in [./.] , z.B.:      0.3/'
C      & ' Festwert bestätigen:
C      READ (ISCR,*)      RNUE
C      IF (RNUE.LE.0.0) RNUE = 0.3
C      WRITE (JJXY,('NUE ',E16.8)) RNUE
C-----
C-----Erläuterung von NRAD:
C      NRAD = Teilintervalle entsprechend NRAD+1 Stellen,
C      davon: NRAD Stützstellen und Stützweite.
C      Die NRAD+1. Stelle bei 2*PI ist Periode.
C-----
C      WRITE (JJXY,(I5)) NRAD
C      DO I = 1,NRAD
C-----Generierung Radien: Funktion y(i)
C      RADMAX = RADIUS + AUFDACH
C      PHIT = ACOS (RADIUS / RADMAX)
C      EINPIM = PI - PHIT
C      EINPIP = PI + PHIT
C      ZWEIPIM = 2.0 * PI - PHIT
C      X(I) = 2.0 * PI / NRAD * (I-1)
C      PHI = 2.0 * PI / NRAD * (I-1)
C      Y(I) = RADIUS
C      IF (PHI.LT.PHIT) Y(I) = RADIUS / COS (PHIT- PHI)
C      IF (PHI.GT.ZWEIPIM) Y(I) = RADIUS / COS (PHI - ZWEIPIM)
C-----Beidseitiges Spitzprofil (siehe Pich-Aufsatz, S.274)
C      IF (ITYP.EQ.2) THEN
C      IF (PHI.GT.EINPIM .AND. PHI.LE.PI) THEN
C      Y(I) = RADIUS / COS (PHI - EINPIM)
C      ENDIF
C      IF (PHI.LT.EINPIP .AND. PHI.GE.PI) THEN
C      Y(I) = RADIUS / COS (EINPIP - PHI)
C      ENDIF
C      ENDIF
C-----Ausgabe
C      WRITE (JJXY, '(E20.12)') Y(I)
C      ENDDO
C      WRITE (JJXY,('***'/'**DATELENDE**'))
C      STOP
C      END

```

```

C-----
C      Spannungsanalyse nach Fourier/Pich
C      =====
C      Vorlaufprogramm KOORD04:
C-----
C      Behälter mit Aufdichtung und Ovalität,
C      Generierung Geometriedaten (Radien)
C      als Quasi-Messwerte des Behälters, hier:
C-----
C      Geometrische Kontur nach Zeman (analytische
C      Formel für Kombination Ovalität/Aufdichtung)
C-----
C      Interaktive Eingabe:
C-----
C      Stützstellenzahl nrad, z.B. 512,
C      Behälterradius, z.B. 1389 [mm],
C      Maß der Aufdichtung, z.B. 8 [mm],
C      Behälter-Wanddicke z.B. 22 [mm],
C      Behälter-Innendruck z.B. 4.513 [N/mm2],
C      E-Modul z.B. 210000 [N/mm2],
C      Querkontraktion Nue z.B. 0.3 [./.].
C-----
C      Dateiausgabe:
C-----
C      Schlüsselwortgebunden:
C      'RADI' in Sp.1-4, (A4,E16.8) Radius,
C      'AUFD' in Sp.1-4, (A4,E16.8) Aufdichtung,
C      'DICK' IN SP.1-4, (A4,E16.8) Wanddicke,
C      'DRUC' IN SP.1-4, (A4,E16.8) Innendruck,
C      'EMOD' IN SP.1-4, (A4,E16.8) E-Modul,
C      'NUE ' IN SP.1-4, (A4,E16.8) Nue,
C-----
C      Kommentare: 'nichtleerzeichen' in Spalte 1,
C      Format (I5): nrad
C      Format (E20.12):
C      Generierte Radien (Quasi-Messdaten): Y(1),...,Y(nrad)
C-----
C      Datei: FOR051.DAT.
C-----
C      BAM - V.32 / Weber / Version Juni 1995
C-----
C      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C      DATA PI /3.141592653589793/

```

```

DATA ISCR / 5/
DATA JSCR / 6/
DATA JJXY /51/

WRITE (JJXY,600)
FORMAT('DATEIANFANG*','*')
&' Behälter mit Aufdachung und Ovalität: '/
&' * Generierte Geometriedaten (Radien) nach Zeman. '/**')

C-----
C-----
C-----
1. WRITE (JSCR,601)
601 FORMAT(' Interaktive Eingabe Stützstellenanzahl nrad: '/
&' zulässig: '/
&' nrad = 8,16,32,64,128,256,512,1024,2048,4096')
READ (ISCR,*) NRAD
K = 4
DO I = 1,10
K = K * 2
IF (NRAD.EQ.K) GOTO 10
ENDDO
GOTO 1
10 CONTINUE

C-----
C-----
C-----
'RADI', 'AUFD', 'DICK', 'DRUC', 'EMOD', 'NUE'
C-----
WRITE (JSCR,602)
602 FORMAT(' Interaktive Eingabe des Behälter-Radius: '/
&' in [mm], z.B.: 1389.0' /
&' Festwert bestätigen: 0')
READ (ISCR,*) RADIUS
IF (RADIUS.LE.0.0) RADIUS = 1389.0
WRITE (JJXY,('RADI',E16.8)) RADIUS

C-----
603 FORMAT(' Interaktive Eingabe Maß der Aufdachung: '/
&' in [mm], z.B. 8.0' /
&' Festwert bestätigen: 0')
READ (ISCR,*) AUFDACH
IF (AUFDACH.LE.0.0) AUFDACH = 8.0
WRITE (JJXY,('AUFD',E16.8)) AUFDACH

C-----
WRITE (JSCR,604)
604 FORMAT(' Interaktive Eingabe der Behälter-Wanddicke: '/
&' in [mm], z.B.: 22.0' /
&' Festwert bestätigen: 0')
READ (ISCR,*) SDICKE
IF (SDICKE.LE.0.0) SDICKE = 22.0
WRITE (JJXY,('DICK',E16.8)) SDICKE

WRITE (JSCR,605)
FORMAT(
&' Interaktive Eingabe des Behälter-Innendruckes: '/
&' in [N/mm2], z.B.: 4.513' /
&' Festwert bestätigen: 0')
READ (ISCR,*) PDRUCK
IF (PDRUCK.LE.0.0) PDRUCK = 4.513
WRITE (JJXY,('DRUC',E16.8)) PDRUCK

C-----
WRITE (JSCR,606)
606 FORMAT(' Interaktive Eingabe des E-Moduls: '/
&' in [N/mm2], z.B.: 210000.0' /
&' Festwert bestätigen: 0')
READ (ISCR,*) EMOD
IF (EMOD.LE.0.0) EMOD = 210000.0
WRITE (JJXY,('EMOD',E16.8)) EMOD

C-----
WRITE (JSCR,607)
607 FORMAT(' Interaktive Eingabe Querkontraktion Nue: '/
&' in [./], z.B.: 0.3' /
&' Festwert bestätigen: 0')
READ (ISCR,*) RNUE
IF (RNUE.LE.0.0) RNUE = 0.3
WRITE (JJXY,('NUE',E16.8)) RNUE

C-----
C-----
C-----
Erläuterung von NRAD:
NRAD = Teilintervalle entsprechend NRAD+1 Stellen,
davon NRAD Stützstellen und Stützwerte.
Die NRAD+1. Stelle bei 2*PI ist Periode.

WRITE (JJXY,(i5))NRAD

C-----
Zeman "Displacement"-Formel 17,
hier als Ansatz für unbelastete Geometrie:

DELTA = AUFDACH
DO I = 1,NRAD
PHI = 2.0 * PI / NRAD * (I-1)
THETA = PHI - PI
WI17 = DELTA *(1.0+COS(THETA)-THETA*SIN(THETA))*0.5
Y = RADIUS + WI17

C-----Ausgabe
WRITE (JJXY,(E20.12)) Y
ENDDO

C-----
WRITE (JJXY,('**','*DATEIENDE**'))
STOP
END

```

Kernprogramm FOURI01

Auf Ebene 2 der Programmkette steht das Kernprogramm, das die Fourier-Analyse durchführt.

```

C-----
C Spannungsanalyse nach Fourier/Fich
C =====
C Kernprogramm FOURI01:
C
C Behälter mit Aufdachung, Fourieranalyse der durch ein
C Vorlaufprogramm bereitgestellten und hier einzulesenden
C Geometriedaten (Radien) des Behälters, hier:
C Bestimmung der reellen Fourierkoeffizienten A0 und
C A1,B1 bis A(n/2),B(n/2-1) durch IMSL-Aufruf der
C reellen Transformation doppelter Genauigkeit.
C-----
C Eingabe: Stützstellenzahl: nrad,
C Geometriedaten (Radien) Y(1),...,Y(nrad)
C Formate: (I5),(E20.12),
C Kommentare: 'nichtleerzeichen' in Spalte 1
C Datei: FOR051.DAT.
C
C Ausgabe: Stützstellenzahl: nrad,
C Berechnete A(0),
C Fourierkoeffizienten A(1), B(1)
C ... A(nrad/2-1), B(nrad/2-1)
C ... A(nrad/2)
C Formate: (I5),(2E20.12),
C Kommentare: 'nichtleerzeichen' Spalte 1,
C 'leerzeichenkette' Spalte 1 bis 20,
C Datei: FOR061.DAT.
C-----
C BAM - V.32 / Weber / Version Juni 1995
C-----
C IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C COMMON Y(10000),COEF(10000)
C CHARACTER*80 LINE
C DATA PI /3.141592653589793/
C DATA JSCR/6/
C DATA JEIN/51/
C DATA JAUS/61/
C
C WRITE (JSCR, '( ' *** Beginn FOURI01 **** )' )
C
C-----Eingabe
C
C 1 READ (JEIN, '(A) ' ) LINE
C IF (LINE(1:1) .NE. ' ' ) GOTO 1
C IF (LINE(1:20) .EQ. '

```

```

READ (LINE, '(I5) ' ) NRAD
WRITE (JSCR, '( ' FOURI01: NRAD= ' ', I5) ' ) NRAD
IF (NRAD.GT.10000) THEN
WRITE (JSCR,
& '( ' *** FOURI01: Feldüberlauf NRAD > 10000) ' )' )
STOP
ENDIF
DO I=1,10000
READ (JEIN, '(A) ' ,END=100) LINE
IF (LINE(1:1) .NE. ' ' ) GOTO 2
READ (LINE, '(F20.0) ' ) Y(I)
ENDDO
C
100 WRITE (JSCR,
& '( ' FOURI01: Dateneinlesen beendet) ' )' )
C-----IMSL-Aufruf:
NBIB = NRAD
CALL DFFTRF (NBIB,Y,COEF)
C
C-----
WRITE (JAUS, '( ' *DATEIANFANG* ' / ' )' )
& ' ' * Behälter mit Aufdachung und ggf. Ovalität: ' ' /
& ' ' * Berechnete Fourierkoeffizienten aus Geometrie- ' ' /
& ' ' * daten (Radien) des Behälters: ' ' / ' * ' ' /
& ' ' * Bestimmt wurden die reellen Fourierkoeffizienten ' ' /
& ' ' * A0 und A1,B1 bis A(nrad/2),B(nrad/2-1) ' ' /
& ' ' * durch IMSL-Aufruf der reellen Transformation ' ' /
& ' ' * doppelter Genauigkeit: ' ' / ' * ' ' /
& ' ' * Stützstellenzahl: nrad, ' ' /
& ' ' * Fourierkoeffizienten: A(0),
& ' ' * A(1), B(1) ' ' /
& ' ' * ... A(nrad/2-1),B(nrad/2-1) ' ' /
& ' ' * ... A(nrad/2) ' ' / ' * ' ' /
C
C-----Ordnen der berechneten Fourierkoeffizienten gemäß FORMAT
C und Multiplizieren mit Faktor, Ausgabe in Datei
C
CALL MODIFIZ (JSCR,JEIN,JAUS,NRAD,Y,COEF)
C
WRITE (JAUS, '( ' * ' / ' * DATEIENDE* ' )' )
WRITE (JSCR, '( ' FOURI01: FOURIER-Analyse beendet) ' )' )
WRITE (JSCR, '( ' *** Ende FOURI01 ****) ' )
STOP
END

```

```

C-----
C SUBROUTINE MODIFIZ(JSCR,JEIN,JAUS,N,Y,COEF)
C IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C DIMENSION Y(1),COEF(2,1)
C-----
C ---Ordnern der berechneten Fourierkoeffizienten gemäß FORMAT
C und Multiplizieren mit Faktor
C
C RN = N
C NB = N / 2
C FAKB = -2.0 / RN
C FAKA = 2.0 / RN
C
C DO J = 1,NB+1
C   COEF(1,J) = COEF(1,J) * FAKB
C   COEF(2,J) = COEF(2,J) * FAKA
C ENDDO
C COEF(1,1) = COEF(1,1)*(-1)
C-----Ausgabe in Datei
C
C WRITE (JAUS, '(I5)') N
C WRITE (JAUS, '(E20.12)') COEF(1,1)
C MEND = N / 2
C DO J = 1,MEND
C   WRITE (JAUS, '(2E20.12)') COEF(2,J), COEF(1,J+1)
C ENDDO
C
C RETURN
C END
C-----
C
C Nachlaufprogramm SPANN01
C
C Das Programm berechnet aus einem gegebenen Satz Fourierkoeffizienten Biegezusatzspannungen nach Pich. Diese werden an allen Stützstellen sowie in allen Intervallen an je einem interpolierten Zwischenpunkt (zur Beurteilung der Glattheit des Ergebnisses) ausgewertet.
C-----
C Spannungsanalyse nach Fourier/Pich (original)
C =====
C Nachlaufprogramm SPANN01:
C
C Berechnung der zusätzlichen Biege-Spannungen
C infolge Imperfektionen (z.B. Aufdichtung, Ovalität)
C von Behältern unter Innendruck durch Evaluierung
C der Fourierkoeffizienten nach Pich.
C-----

```

Eingabe über Datei:

Behälter-Radius in [mm],  
 (Sollradius Kreis, nur zu Vergleichszwecken.  
 Die Spannungsberechnung benötigt den rechnerisch  
 ermittelten Mittelwert = 1/2 Fourierkoeff. A0.)  
 Behälter-Wanddicke in [mm],  
 Behälter-Innendruck in [N/mm2],  
 E-Modul in [N/mm2],  
 Querkontraktion Nue in [./.].  
 Stützstellenzahl: nrad,  
 Fourierkoeffizienten A0, ----  
 A1, B1  
 ... A(nrad/2-1), B(nrad/2-1) ----  
 ... A(nrad/2) ----  
 Formate: (I5),(2E20.12),  
 Kommentare: 'nichtleerzeichen' in Spalte 1  
 werden überlesen.  
 Datei: FOR061.DAT.

Ausgabe nach Datei:

Anzahl: nsig ( = 2\*nrad + 1),  
 Nach Pich berechnete Biege-Zusatzspannungen an nsig  
 Ausgabepunkten, hier:  
 - an den Stützstellen und dem Endpunkt bei 2\*pi,  
 - in den Intervall-Mitten zwischen den Stützstellen,  
 alle in geometrischer Reihenfolge geordnet.  
 Formate: (I5),(E20.12),  
 Kommentare: 'nichtleerzeichen' in Spalte 1,  
 Datei: FOR071.DAT.

Bildschirmausgabe:

Dampfdruckspannung Sigma\_p [N/mm2],  
 Max. Biegespannung (Pich) Sigma\_b [N/mm2],  
 Min. Biegespannung (Pich) Sigma\_b [N/mm2],  
 Max. Zusatz-Biegespannung Delta\_Sigma b-p [N/mm2],  
 Spannungskennzahl Psi\_b [N/mm2].

BAM - V.32 / Weber / Version Juni 1995

IMPLICIT REAL\*8 (A-H,O-Z)  
 COMMON X(1),Y(1), A(10000),B(10000)  
 CHARACTER\*80 LINE  
 DATA ISCR / 5/  
 DATA JSCR / 6/  
 DATA JXYN /51/  
 DATA JEIN /61/  
 DATA JAUS /71/  
 DATA PI /3.141592653589793/





```

C-----Ausgabe in die Datei
WRITE (JAUS, '(E20.12)') SIGMAB
IF (SIGMAB .GT. DSIGMAX) DSIGMAX = SIGMAB
CC IF (SIGMAB .LT. DSIGMIN) DSIGMIN = SIGMAB
1000 CONTINUE
C
C-----Spannungskennzahl Pich (9):
PSIB = DSIGMAX / SIGMAP
C-----Strukturspannungsformzahl:
PSIB1 = 1.0 + PSIB
C-----Maximalwert der Biegespannung
mit Biege-Zusatzspannung nach Pich:
SIGMAX = SIGMAP + DSIGMAX
C-----Zugehöriger kleinerer Wert:
SIGZUG = SIGMAP - DSIGMAX
C
C-----Ausgabe
WRITE (JSCR, 602) RSOILL, RAD0, SDICKE, PDRUCK, EMOD, RNUE
602 FORMAT(' ', 47(' '),
&' Behälter mit Aufdachung / Ovalität: ' /
&' Berechnete Biege-Zusatzspannungen nach Pich' / 1X /
&' Systemwerte: ' /
&' - Sollradius =', F10.1, ' [mm]' /
&' - Mittl. Radius =', F10.1, ' [mm]' /
&' - Wanddicke =', F10.1, ' [mm]' /
&' - Innendruck =', F10.3, ' [N/mm2]' /
&' - E-Modul =', F10.1, ' [N/mm2]' /
&' - Nue =', F10.1, ' [./.]' / 1X /
&' ', 47(' '))
WRITE (JSCR, 603) SIGMAP, DSIGMAX, SIGMAX, SIGZUG, PSIB, PSIB1
603 FORMAT(' ', 52(' '))
&' Dampfdruckspannung Sigma_p =', E14.7, ' [N/mm2]' /
&' Max.Zus.Spg. Sigma_b (Pich) =', E14.7, ' [N/mm2]' /
&' Max. Bieespg.(Pich) Sig_p+b =', E14.7, ' [N/mm2]' /
&' Zug. Bieespg.(Pich) Sig_p-b =', E14.7, ' [N/mm2]' /
&' Spannungskennzahl Psi_b =', E14.7, ' [N/mm2]' /
&' Strukturspannungsformzahl =', E14.7, ' [N/mm2]' /
&' ', 52(' '))
C-----
WRITE (JAUS, '(***'/'**DATEIENDE***'))
STOP
END

Nachlaufprogramm SPANN02

Das Programm berechnet aus einem gegebenen Satz Fourierkoeffizienten sowie unter Zuhilfenahme zum selben Problem gehöriger, vorher ermittelter Behälterradial Biegezusatzspannungen nach Pich, jedoch nach einem modifizierten (vereinfachten) Verfahren zur Rechenzeiterparnis, wobei das Ergebnis konservativ ist. Die Spannungen werden an allen Stützstellen sowie in allen Intervallen an je einem interpolierten Zwischenpunkt (zur Beurteilung der Glattheit des Ergebnisses) ausgewertet.

```

```

601 WRITE (JSCR, 601)
FORMAT(
&' *** SPANN01: ' /
&' Sollen alle Spannungen oder nur Spannung' /
&' in der Aufdachungsspitze berechnet werden? ' /
&' Alle Spannungen: 1 ' /
&' Nur Aufdachungsspitze: 0 ' ) C
READ (ISCR, *) IANZSIG
IF (IANZSIG .GT. 0) NEND = NSIG
IF (IANZSIG .LE. 0) NEND = 1
C-----Schleife über alle Ausgabestellen (Stützstellen plus
Interpolierte): Berechnung SIGMAB (Pich-Formel (3) )
C
WRITE (JAUS, '(I5)') NEND
WRITE (JSCR, '( / 1X)')
DO 1000 II = 1, NEND
ICOUNT = ICOUNT + 1
IF (ICOUNT.EQ.10) THEN
ICOUNT = 0
WRITE (JSCR,
&' ('+', 5** Schleife', i5, ' von', i5)') II, NSIG
ENDIF
KINTR = ZWEIPI / (2 * NRAD) * (II - 1)
GRAD = XINTR * 180.0 / PI
SUM = 0.0
C-----Summenformel Pich (3) für Sigma_b:
2 = Anfangsindex bei Pich-original Sigma_b,
weil 1. Index einen Null-Term erzeugt
C-----Term für indesmäßig überschüssigen Koeffizient A:
Die Erhöhung von MEND um 1 bewirkt Mitnahme des letzten
A-Koeffizienten ohne Änderung der Schleifenorganisation
bei gleichzeitiger Dummy-Mitnahme eines nicht
existierenden B-Koeffizienten (Null).
CCC DO M = 2, MEND
DO M = 2, MEND + 1
RM = M
C-----Pich (5):
FM = 1.5 * (1.0 - RNUE * RNUE) / (RM * RM - 1.0) *
& PDRUCK / EMOD * (DM / SDICKE) ** 3.0
C-----Pich (4):
FAK = 1.0 / (1.0 + FM)
C-----Pich (3):
SUM = SUM + FAK *
& (A(M+1) * COS(RM * XINTR) + B(M) * SIN(RM * XINTR))
ENDDO
C-----Pich (3):
SIGMAB = 6.0 * PDRUCK * RAD0 / (SDICKE ** 2.0) * SUM
C

```

```

C-----
C Spannungsanalyse nach Fourier/Pich (vereinfacht)
C=====
C Nachlaufprogramm SPANN02:
C
C Berechnung der zusätzlichen Biege-Spannungen
C infolge Imperfektionen (z.B. Aufdachung, Ovalität)
C von Behältern unter Innendruck durch Evaluierung
C der Fourierkoeffizienten nach Pich (vereinfacht).
C-----
C
C Eingabe über Datei:
C
C Behälter-Radius in [mm],
C (Sollradius Kreis, nur zu Vergleichszwecken.
C Die Spannungsberechnung benötigt den rechnerisch
C ermittelten Mittelwert = 1/2 Fourierkoeff. A0.)
C
C Behälter-Wanddicke in [mm],
C Behälter-Innendruck in [N/mm2],
C E-Modul in [N/mm2],
C Querkontraktion Nue in [./.].
C Stützstellenzahl: nrad,
C Fourierkoeffizienten A0, -----
C A1, B1
C ... A(nrad/2-1), B(nrad/2-1)
C ... A(nrad/2) -----
C
C Formate: (I5),(E20.12),
C Kommentare: 'nichtleerzeichen' in Spalte 1
C werden überlesen.
C Datei: FOR061.DAT.
C
C Ausgabe nach Datei:
C
C Anzahl: nsig (= 2*nrad + 1),
C Nach Pich berechnete Biege-Zusatzspannungen an nsig
C Ausgabepunkten, d.h.:
C - an den Stützstellen und dem Endpunkt bei 2*Pi,
C - in den Intervall-Mitten zwischen den Stützstellen,
C alle in geometrischer Reihenfolge geordnet.
C Formate: (I5),(E20.12),
C Kommentare: 'nichtleerzeichen' in Spalte 1,
C Datei: FOR072.DAT.
C
C Bildschirmausgabe:
C
C Dampfdruckspannung Sigma_p [N/mm2],
C Max. Biegespannung (Pich) Sigma_b [N/mm2],
C Min. Biegespannung (Pich) Sigma_b [N/mm2],
C Max. Zusatz-Biegespannung Delta_Sigma b-p [N/mm2],
C Spannungskennzahl Psi_b [N/mm2].

```

```

C-----
C BAM - V.32 / Weber / Version Juni 1995
C-----
C IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C COMMON X(10000),Y(10000), A(10000),B(10000)
C CHARACTER*80 LINE
C DATA ISCR / 5/
C DATA JSCR / 6/
C DATA JXYN /51/
C DATA JEIN /61/
C DATA JAUS /72/
C DATA PI /3.141592653589793/
C ZWEIPI = 2.0 * PI
C ICOUNT = 0
C
C -----Einlesen Systemwerte aus Datei, die vom Vorlaufprogramm
C geschrieben wurde
C
C NWERTE = 0
C CONTINUE
C READ (JXYN,(A),END=151) LINE
C IF (LINE(1:1).EQ.'R') THEN
C READ (LINE,'(4X,F16.0)') RSOLL
C WRITE(JSCR,
C & '( ' ' Soll-Radius (Kreis): R_soll =',E20.10)' ) RSOLL
C NWERTE = NWERTE + 1
C ENDIF
C IF (LINE(1:2).EQ.'DI') THEN
C READ (LINE,'(4X,F16.0)') SDICKE
C WRITE(JSCR,
C & '( ' ' Wanddicke:',16X,'d =',E20.10)' ) SDICKE
C NWERTE = NWERTE + 1
C ENDIF
C IF (LINE(1:2).EQ.'DR') THEN
C READ (LINE,'(4X,F16.0)') PDRUCK
C WRITE(JSCR,
C & '( ' ' Innendruck:',15X,'p =',E20.10)' ) PDRUCK
C NWERTE = NWERTE + 1
C ENDIF
C IF (LINE(1:1).EQ.'E') THEN
C READ (LINE,'(4X,F16.0)') EMOD
C WRITE(JSCR,'(' ' E-Modul:',18X,'E =',E20.10)' ) EMOD
C NWERTE = NWERTE + 1
C ENDIF
C IF (LINE(1:1).EQ.'N') THEN
C READ (LINE,'(4X,F16.0)') RNUE
C WRITE(JSCR,
C & '( ' ' Querkontraktion:',8X,'Nue =',E20.10)' ) RNUE
C NWERTE = NWERTE + 1
C ENDIF
C IF (NWERTE.LT.5) GOTO 51
C CONTINUE

```

```

C-----MEND = Endindex für vorletztes Ai und letztes Bi
C      (i: Indexkonvention Brauch/Dreyer/Haacke)
C      MEND = NRAD/2 - 1
C
C-----Kesselformel (Pich Formel (8) ):
CCC  SIGMAP = PDRUCK * 2.0*RSOLL / (2.0*SDICKE)
C      SIGMAP = PDRUCK * A(1) / (2.0*SDICKE)
C
C-----Ausgabe
WRITE (JAUS,600) RSOLL, RADO, SDICKE, PDRUCK, EMOD, RNUE
600  FORMAT('DATEIANFANG*','*/
& '* Behälter mit Aufdachung / Ovalität: '/
& '* Berechnete Biege-Zusatzspannungen nach Pich: '/**'/
& '* Systemwerte: '/
& '* - Eingabe-Radius =',F10.1,' [mm]'/
& '* - Mittl. Radius =',F10.1,' [mm]'/
& '* - Wanddicke =',F10.1,' [mm]'/
& '* - Innendruck =',F10.3,' [N/mm2]'/
& '* - E-Modul =',F10.1,' [N/mm2]'/
& '* - Nue =',F10.1,' [./.]'/
& '*')
C
C-----Schleife über alle Ausgabestellen (Stützstellen plus
C      Interpolierte): Berechnung SIGMAB (Pich-Formel (3),
C      vereinfacht)
WRITE (JAUS, '(I5)') NSIG
WRITE (JSCR, '(/1X)')
C
C-----Vereinfachte Spannungsberechnung:
C
C      Ausnutzung der Eigenschaft, daß Kn von 0 über 0.99 gegen
C      1 konvergiert. Ein Teil der evaluierten Fourierreihe wird
C      daher vereinfacht mit Kn = 1 faktorisiert.
C      Das Spannungsergebnis ist konservativ. Die Spannungs-Über-
C      schätzung kann nach Wahl des Anwenders im Bereich von unter
C      1 Prozent gehalten werden.
C      Faustformel: Für Kn > 0.99 kann Kn = 1 gesetzt werden.
C      Daraus folgt die Eingabe des Vereinfachungsgrades
C      FAKC = 0.99 .
C
C      11 CONTINUE
WRITE (JSCR,601)
601  FORMAT(
& ' *** SPANN02: '/
& ' Sollen alle Spannungen oder nur Spannung? '/
& ' in der Aufdachungsspitze berechnet werden? '/
& ' Alle Spannungen: 1'/
& ' Nur Aufdachungsspitze: 0')
C
C      READ (ISCR,*) IANZSIG
IF (IANZSIG .GT. 0) NEND = NSIG
IF (IANZSIG .LE. 0) NEND = 1
C

```

```

IF (NWERTE.LT.5) THEN
WRITE (JSCR,
& '( ' *** Fehler: Dateiende Systemdaten ****')')
STOP
ENDIF
C
C-----Einlesen Radien-Vektor Y(i)
REWIND JXYN
CALL YEINLES (JSCR,JXYN,Y,NREDUND)
C
C-----Einlesen der berechneten Fourierkoeffizienten
C      (mit Plausibilitätstest bei der Anzahl nrad, ob die
C      beiden Dateien zum gleichen Problem gehören könnten)
C
1  READ (JEIN, '(A)') LINE
IF (LINE(1:1).NE.' ') GOTO 1
READ (LINE, '(I5)') NRAD
IF (NRAD .NE. NREDUND) THEN
WRITE (JSCR,610) NRAD,NREDUND
610  FORMAT(
& ' *** SPANN02: Widerspruch bei 2x eingelesenem nrad: ',
& 2I6)
ENDIF
C
2  READ (JEIN, '(A)') LINE
IF (LINE(1:1).NE.' ') GOTO 2
C-----Fourierkoeffizient A0
C      (0: Indexkonvention Brauch/Dreyer/Haacke)
READ (LINE, '(E20.12)') A(1)
C
C      M = (NRAD-1)/2
DO I=1,M
3  READ (JEIN, '(A)') LINE
IF (LINE(1:1).NE.' ') GOTO 3
C-----Fourierkoeffizienten Ai, Bi
C      (i: Indexkonvention Brauch/Dreyer/Haacke)
READ (LINE, '(2E20.12)') A(I+1), B(I)
ENDDO
C
C-----
DSIGMAX = -1.0E20
DSIGMIN = 1.0E20
C-----Mittlerer Radius:
RADO = A(1)*0.5
C
C-----Spannungsformel von Pich
C      mit einem Interpolations-Zwischenpunkt
C
C-----Koeffizient A0 = mittl. Durchmesser Dm
DM = A(1)
C-----NSIG = Stuetzstellen + Interpolations-Zwischenpunkte
C      + 2Pi-Stelle
NSIG = 2*NRAD + 1
C

```

```

602 WRITE (JSCR, 602)
FORMAT(
& ' *** SPANN02: ' /
& ' Eingabe des Vereinfachungsgrades ' /
& ' für die Spannungs-Ermittlung: ' /
& ' z.B.: FAKC = 0.99, 0.999, oder 1.0 ' /
& ' Vereinfachung = ' ,
& ' stark...schwach...Keine Vereinfachung.' )
C
READ (ISCR, 'F10.0') FAKC
IF (FAKC.LT.0.9 .OR. FAKC.GT.1.0) GOTO 11
PCO = 1.5 * (1.0 - RNUE*RNUE) * PDRUCK/EMOD *
(DM/SDICKE)**3.0
W0 = FAKC * PCO
REZIP = ((1.0 - FAKC) / (1.0 - FAKC + W0))**0.5
RMERF = 1.0E8
IF (REZIP.GT.1.0E-6) RMERF = 1.0/REZIP
C-----Aufrundung:
MERF = RMERF + 1.0
C-----Setzen MLIMIT als kleineren Wert aus zwei Vergleichswerten
MLIMIT = MEND
IF (MERF .LT. NRAD/2) MLIMIT = MERF
WRITE (JSCR, 603) MLIMIT, MERF, MEND
603 FORMAT(' *** Endindex MLIMIT = min (MERF, MEND): ' /
& 17X, I5, 7X, 2I5 // )
C
C-----Schleife
DO 1000 II = 1, NEND
C-----Übernehmen laufenden Meßradius aus Datei 51,
C Hier linear interpolieren zusätzlich in Intervallmitte
C (bei II gerade, mit NSIG=2*NRAD+1)
KK = II/2
LL = II - KK*2
IF (LL .EQ. 0) THEN
Index II=2, 4, 6, 8, ...
KK=1, 2, 3, 4, ...
===> Interpolation
RAD51 = (Y(KK) + Y(KK+1)) * 0.5
IF (II .EQ. NSIG-1) RAD51 = (Y(KK) + Y(1)) * 0.5
ELSE
Index II=1, 3, 5, 7, ...
Y(I): I = 1, 2, 3, 4, ...
RAD51 = Y(II/2+1)
IF (II .EQ. NSIG) RAD51 = Y(1)
ENDIF
ICOUNT = ICOUNT + 1 IF (ICOUNT.EQ.10) THEN
ICOUNT = 0
WRITE (JSCR,
' (' , *** Schleife ' , I5, ' von ' , I5) ' ) II, NSIG
&
ENDIF

```

```

XINTR = ZWEIPI/(2*NRAD)*(II-1)
GRAD = XINTR * 180.0 / PI
SUM = 0.0
C
C-----Summenformel Pich (3) für Sigma_b, jedoch:
C Vereinfachte Spannungsberechnung
C Jetzt: 1 = Anfangsindex bei Pich Sigma_b
C (Pich (5), (4) so dargestellt,
C daß Index bei 1 beginnen kann)
C
C-----Term für indexmäßig überschüssigen Koeffizient A:
C Die Erhöhung von MLIMIT um 1 bewirkt Mitnahme des
C letzten A-Koeffizienten ohne Änderung der Schleifen-
C organisation bei gleichzeitiger Dummy-Mitnahme eines
C nicht existierenden B-Koeffizienten (Null).
CCC DO M = 1, MLIMIT
DO M = 1, MLIMIT+1
RM = M
C s.o. PCO = 1.5 * (1.0 - RNUE*RNUE) * PDRUCK/EMOD *
C s.o. (DM/SDICKE)**3.0
FAK = (RM*RM - 1.0) / (RM*RM - 1.0 + PCO)
C
C-----Vereinfachung:
FAK1 = FAK - 1.0
C
C-----Statt Pich (3) jetzt Vereinfachung:
SUM = SUM + FAK1 *
& (A(M+1)*COS(RM*XINTR) + B(M)*SIN(RM*XINTR))
ENDDO
C
C-----Statt Pich (3) jetzt Vereinfachung:
SIGMAB = (SUM + (RAD51-RAD0)) *
& 6.0*PDRUCK*RAD0 / (SDICKE*SDICKE)
C
C-----Ausgabe in die Datei
WRITE (JAUS, 'E20.12') SIGMAB
IF (SIGMAB .GT. DSIGMAX) DSIGMAX = SIGMAB
IF (SIGMAB .LT. DSIGMIN) DSIGMIN = SIGMAB
1000 CONTINUE
C
C-----Spannungskennzahl Pich (9):
PSIB = DSIGMAX / SIGMAP
C-----Strukturspannungsformzahl:
PSIB1 = 1.0 + PSIB
C-----Maximalwert der Biegespannung
C mit Biege-Zusatzspannung nach Pich:
SIGMAX = SIGMAP + DSIGMAX
C-----Zugehöriger kleinerer Wert:
SIGZUG = SIGMAP - DSIGMAX
C

```

```

C-----Ausgabe
WRITE (JSCR,604) RSOLL, RAD0, SDICKE, PDRUCK, EMOD, RNUE
604 FORMAT(' ',47('**')/
&' Behälter mit Aufdachung / Ovalität:/'
&' Berechnete Biege-Zusatzspannungen nach Pich'/1X/
&' Systemwerte:/'
&' - Sollradius      =',F10.1,' [mm]'/
&' - Mittl. Radius   =',F10.1,' [mm]'/
&' - Wanddicke      =',F10.1,' [mm]'/
&' - Innendruck     =',F10.3,' [N/mm2]'/
&' - E-Modul        =',F10.1,' [N/mm2]'/
&' - Nue            =',F10.1,' [././]'/1X/
&' ',47('**'))
WRITE (JSCR,605) SIGMAP,DSIGMAX,SIGMAX,SIGZUG, PSIB,PSIB1
605 FORMAT(' ',52('**')/
&' Dampfdruckspannung   Sigma_p =', E14.7,' [N/mm2]'/
&' Max.Zus.Spg. Sigma_b (Pich) =', E14.7,' [N/mm2]'/
&' Max. Biegespg.(Pich) Sig_p+b =', E14.7,' [N/mm2]'/
&' Zug. Biegespg.(Pich) Sig_p-b =', E14.7,' [N/mm2]'/
&' Spannungskennzahl Psi_b =', E14.7,' [N/mm2]'/
&' Strukturspannungsformzahl =', E14.7,' [N/mm2]'/
&' ',52('**')//
C-----
WRITE (JAUS,('**'/'**DATEIENDE**'))
STOP
END
C-----
SUBROUTINE YEINLES (JSCR,JEIN,Y,NRAD)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION Y(10000)
CHARACTER*80 LINE
C-----
C   Eingabe: Stützstellenzahl:   nrad,
C   Geometriedaten (Radien) Y(1),...,Y(nrad)
C   Formate: (I5),(E20.12),
C   Kommentare: 'nichtleerzeichen' in Spalte 1
C               werden überlesen.
C   Datei: FOR051.DAT.
C-----
1  READ (JEIN,'(A)') LINE
IF (LINE(1:1).NE.' ') GOTO 1
READ (LINE,'(I5)') NRAD
WRITE (JSCR,('*** YEINLES: NRAD = ',I5)) NRAD
C
DO I=1,10000
2  READ (JEIN,'(A)',END=100) LINE
IF (LINE(1:1).NE.' ') GOTO 2
READ (LINE,'(F20.0)') Y(I)
ENDDO
100 WRITE (JSCR,
&'('*** YEINLES: Einlesen Radien Y(i) beendet'))
RETURN
END

```

# Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

Nr. 1/1968

**Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)**

Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft

Nr. 2/1970 (vergriffen)

G. Andreas

**Zum Problem des Feuchtigkeitsschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern**

Nr. 3/1970

J. Ziebs

**Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungsseilen als Beispiel für Verbundbauteile**

Nr. 4/1970 (vergriffen)

A. Burmester

**Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit — Grundlagen und Vergütungsverfahren**

Nr. 5/1971

N. Steiner

**Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken**

Nr. 6/1971

P. Schneider

**Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen**

Nr. 7/1971

H.-J. Petrowitz

**Chromatographie und chemische Konstitution — Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie**

Nr. 8/1971

H. Veith

**Zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung**

Nr. 9/1971

K.-H. Möller

**Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen**

Nr. 10/1972

D. Aurich, E. Martin

**Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode**

Nr. 11/1972

H.-J. Krause

**Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden**

Nr. 12/1972

H. Feuerberg

**Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren**

Nr. 13/1972

K.-H. Habig, K. Kirschke, W.-W. Maennig, H. Tischer  
**Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und  $2.10^{-7}$  Torr**

Nr. 14/1972

E. Fischer

**Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz**

Nr. 15/1972

H. Pohl

**Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse**

Nr. 16/1972

E. Knublauch

**Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102 Blatt 2 im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadenfeuer**

Nr. 17/1972

P. Reimers

**Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen**

Nr. 18/1973

W. Struck

**Das Sprödbbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches**

Nr. 19/1973

K. Kaffanke, H. Czichos

**Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen**

Nr. 20/1973

R. Rudolphi

**Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden**

Nr. 21/1973

D. Klaffke, W. Maennig

**Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung**

Nr. 22/1973

R. Rudolphi, E. Knublauch

**Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen**

Nr. 23/1973

W. Ruske

**Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin. Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen**

Nr. 24/1973

J. Stanke, E. Klement, R. Rudolphi

**Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung**

Nr. 25/1973

E. Knublauch

**Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen**

Nr. 26/1974

P. Jost, P. Reimers, P. Weise

**Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM — Eigenschaften und erste Anwendungen**

Nr. 27/1974

H. Wüstenberg

**Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall**

Nr. 28/1974

H. Heinrich

**Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern**

Nr. 29/1974

P. Schneider

**Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem Idealisotropen porösen Material mit starrem Skelett für senkrechten, schrägen und allseitigen Schalleinfall**

Nr. 30/1974 (vergriffen)

H. Czichos, G. Salomon

**The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology**

Nr. 31/1975

G. Fuhrmann

**Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung**

Nr. 32/1975

R. Rudolphi, B. Böttcher

**Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen**

Nr. 33/1975

A. Wagner, G. Kieper, R. Rudolphi

**Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens**

Nr. 34/1976 (vergriffen)

H.-J. Deppe

**Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoff**

Nr. 35/1976

E. Limberger

**Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper — Vorschlag für ein Prüfverfahren**

Nr. 36/1976 (vergriffen)

J. Hundt

**Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles**

Nr. 37/1976

W. Struck

**Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen — Vorschlag für ein Prüfverfahren**

Nr. 38/1976

K.-H. Habig

**Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionitriertem Stahl 42 CrMo 4**

Nr. 39/1976

K. Kirschke, G. Kempf

**Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit Nicht-Newtonschem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Schwerbeanspruchung**

Nr. 40/1976

H. Hantsche

**Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren**

Nr. 41/1976

B. Böttcher

**Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten**

Nr. 42/1976

S. Diellen

**Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft**

Nr. 43/1976

W. Struck

**Das Sprödbbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches**

Nr. 44/1976

W. Mathees

**Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms "Stab-Werk"**

Nr. 45/1976

W. Paatsch

**Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten**

Nr. 46/1977 (vergriffen)

G. Schickert, H. Winkler

**Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung**

**(Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses)**

- Nr. 47/1977  
A. Plank  
**Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen**
- Nr. 48/1977  
U. Holzlöhner  
**Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn**
- Nr. 49/1977  
G. Wittig  
**Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung**
- Nr. 50/1978 (vergriffen)  
N. Czaika, N. Mayer, C. Amberg, G. Magiera, G. Andraea, W. Markowski  
**Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und Überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern**
- Nr. 51/1978  
J. Sickfeld  
**Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen**
- Nr. 52/1978  
A. Tomov  
**Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung**
- Nr. 53/1978  
R.-G. Rohrmann, R. Rudolphi  
**Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge**
- Nr. 54/1978  
H. Sander  
**Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung**
- Nr. 55/1978  
D. Klaffke  
**Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristalle polykristalliner 99,999 %-Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung**
- Nr. 56/1979  
W. Brünner, C. Langlie  
**Stabilität von Sandwichbauteilen**
- Nr. 57/1979  
M. Stadthaus  
**Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung (Investigations on Inspection-Media for Magnetic Particle-Testing)**
- Nr. 58/1979  
W. Struck  
**Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau**
- Nr. 59/1979  
G. Plauk  
**Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl**
- Nr. 60/1979  
H. Spreckelmeyer, R. Helms, J. Ziebs  
**Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken**
- Nr. 61/1979  
K. Richter  
**Beschreibung von Problemen der höheren Farbmetrik mit Hilfe des Gegenfarbensystems**
- Nr. 62/1979  
W. Gerisch, G. Becker  
**Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle**
- Nr. 63/1979  
E. Behrend, J. Ludwig  
**Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase**
- Nr. 64/1980  
W. Rucker  
**Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung**
- Nr. 65/1980  
P. Schmidt, D. Aurich, R. Helms, H. Veith, J. Ziebs  
**Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte**
- Nr. 66/1980  
M. Hattwig  
**Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung**
- Nr. 67/1980  
W. Matthees  
**Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung**
- Nr. 68/1980  
D. Petersohn  
**Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik—Entwicklung eines volleuzentrischen Präzisions-Goniometers**
- Nr. 69/1980  
F. Buchhardt, P. Brandl  
**Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitsbehältern (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise**
- Nr. 70/1980 (vergriffen)  
G. Schickert  
**Schwellenwerte beim Betondruckversuch**
- Nr. 71/1980  
W. Matthees, G. Magiera  
**Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen**
- Nr. 72/1980  
R. Rudolphi  
**Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen**
- Nr. 73/1980  
P. Wegener  
**Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen**
- Nr. 74/1980  
R. Rudolphi, R. Müller  
**ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz**
- Nr. 75/1980  
H.-J. Heinrich  
**Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen**
- Nr. 76/1980  
D. Klaffke, W.-W. Maennig  
**Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop**
- Nr. 77/1981  
M. Gierloff, M. Maultzsch  
**Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen**
- Nr. 78/1981  
W. Rucker  
**Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund**
- Nr. 79/1981  
V. Neumann  
**Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflußten Kaltrißneigung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch**
- Nr. 80/1981  
A. Plank, W. Struck, M. Tzschätzsch  
**Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten**
- Nr. 81/1981  
J. Schmidt  
**Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik**
- Nr. 82/1982  
R. Helms, H.-J. Kühn, S. Ledworiski  
**Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches (Assesment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test)**
- Nr. 83/1982  
H. Czichos, P. Feinle  
**Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen—Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen**
- Nr. 84/1982  
R. Müller, R. Rudolphi  
**Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)**
- Nr. 85/ISBN 3-88314-231-X/1982  
H. Czichos  
**Technische Materialforschung und -prüfung — Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm "Basic Technological Research"**
- Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/1982  
K. Niesel, P. Schimmelwitz  
**Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale**
- Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/1982  
B. Isecke, W. Stichel  
**Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren**
- Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/1983  
A. Erhard  
**Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall**
- Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/1983  
D. Conrad, S. Diellen  
**Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid**
- Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/1983  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members)**
- Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/1983  
M. Weber  
**Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz**
- Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/1983  
L. Auersch  
**Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden**

- Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/1983  
P. Studt  
**Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen**
- Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/1983  
Xian-Quan Dong  
**Untersuchungen der Störschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen**
- Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/1983  
M. Römer  
**Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten**
- Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/1983  
H. Eifler  
**Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken**
- Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/1983  
G. Fuhrmann, W. Schwarz  
**Typische Bruchflächenausbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung**
- Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/1983  
E. Schnabel  
**Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschinenwaren — Stretch- und Erholungsvermögen**
- Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/1983  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members)**
- Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/1984  
G. Klamrowski, P. Neustupny  
**Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand**
- Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/1984  
P. Reimers, J. Goebels, H. Heidt, P. Weise, K. Wilding  
**Röntgen- und Gammastrahlen-Computer-Tomographie**
- Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/1984  
G. Magiera  
**Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens auf Druckspannungsmessung in Beton**
- Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/1984  
D. Schnitger  
**Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien**
- Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/1984  
M. Gierloff  
**Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen**
- Nr. 105/ISBN 3-88314-345-6/1984  
B. Schulz-Forberg  
**Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen**
- Nr. 106/ISBN 3-88314-360-X/1984  
J. Lehnert  
**Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last**
- Nr. 107/ISBN 3-88314-361-8/1984  
W. Stichel, J. Ehreke  
**Korrosion von Stahlradiatoren**
- Nr. 108/ISBN 3-88314-363-4/1984  
L. Auersch  
**Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen — Ergebnisse von Modellrechnungen**
- Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/1985  
M. Omar  
**Zur Wirkung der Schrumpfbehinderung auf den Schweißbeanspannungszustand und das Sprödbruchverhalten von unterpulvergeschweißten Blechen aus St E 460 N**
- Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/1985  
H. Walde, B. Kropp  
**Wasserstoff als Energieträger**
- Nr. 111/ISBN 3-88314-383-9/1985  
K. Ziegler  
**Über den Einfluß der Initiierung auf die detonative Umsetzung von Anfox-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte**
- Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/1985  
W. Lützwow  
**Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen**
- Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/1985  
R. Helms, H. Henke, G. Oelrich, T. Saito  
**Untersuchungen zum Frequenzeinfluß auf die Schwingungskorrosion von Offshore-Konstruktionen**
- Nr. 114/ISBN 3-88314-419-3/1985  
P. Rose, P. Raabe, W. Daum, A. Szameit  
**Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen**
- Nr. 115/ISBN 3-88314-420-7/1985  
K. Richter  
**Farbempfindungsmerkmal Elementarblau und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld**
- Nr. 116/ISBN 3-88314-460-6/1985  
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi, A. Wagner  
**Theoretische Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenproblematik**
- Nr. 117/ISBN 3-88314-468-1/1985  
H. Czichos, G. Sievers  
**Materials Technologies and Techno-Economic Development — A Study for the German Foundation for International Development (Deutsche Stiftung für Internationale Entwicklung)**
- Nr. 118/ISBN 3-88314-469-X/1985  
H. Treumann, H. Andre, E. Blossfeld, N. Pfeil, M.-M. Zindler  
**Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung — Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen**
- Nr. 119/ISBN 3-88314-472-X/1985  
J. Herter, K. Brandes, E. Limberger  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen — Versuche an Stahlbetonplatten, Teil I (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members — Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part 1)**
- Nr. 120/ISBN 3-88314-514-9/1986  
A. Hecht  
**Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung**
- Nr. 121/ISBN 3-88314-530-0/1986  
P. Feinle, K.-H. Habig  
**Versagenskriterien von Stahlgleitpaarungen unter Mischreibungsbedingungen; Einflüsse von Stahlzusammensetzung und Wärmebehandlung**
- Nr. 122/ISBN 3-88314-521-1/1986  
J. Mischke  
**Entsorgung kerntechnischer Anlagen**  
Sonderkolloquium der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) am 10. 12. 1985 mit Beiträgen von B. Schulz-Forberg, K. E. Wieser und B. Droste
- Nr. 123/ISBN 3-88314-531-9/1986  
D. Rennoch  
**Physikalisch-chemische Analyse sowie toxische Beurteilung der beim thermischen Zerfall organisch-chemischer Baustoffe entstehenden Brandgase**
- Nr. 124/ISBN 3-88314-538-6/1986  
H.-M. Thomas  
**Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens in der zerstörungsfreien Materialprüfung**
- Nr. 125/ISBN 3-88314-540-8/1986 (vergriffen)  
B. Droste, U. Probst  
**Untersuchungen zur Wirksamkeit der Brandschutzisolierung von Flüssiggas-Lagertanks**
- Nr. 126/ISBN 3-88314-547-5/1986  
W. Stichel  
**Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen in Schwimmhallen**
- Nr. 127/ISBN 3-88314-564-5/1986 (vergriffen)  
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen — Versuche an Stahlbetonbalken, Teil I (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members — Tests on Reinforced Concrete Beams, Part I)**
- Nr. 128/ISBN 3-88314-568-8/1986 (vergriffen)  
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen — Versuche an Stahlbetonbalken, Teil II (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members — Tests on Reinforced Concrete Beams, Part II)**
- Nr. 129/ISBN 3-88314-569-6/1980 (vergriffen)  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter, K. Berner  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen — Zugversuche an Betonstahl mit erhöhter Dehngeschwindigkeit (Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load — Reinforcing Steel Tension Tests with high strain rates)**
- Nr. 130/ISBN 3-88314-570-X/1986  
W. Struck  
**Einfache Abschätzung der Durchbiegung und der Energieaufnahme von Trägern aus duktilem Material**
- Nr. 131/ISBN 3-88314-585-8/1986  
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen — Versuche an Stahlbetonplatten, Teil II (Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load — Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part II)**
- Nr. 132/ISBN 3-88314-595-5/1987  
Chr. Herold, F.-U. Vogdt  
**Ermittlung der Ursachen von Schäden an bituminösen Dachabdichtungen unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Beanspruchungen**
- Nr. 133/ISBN 3-88314-609-9/1987 (vergriffen)  
M. Woydt, K.-H. Habig  
**Technisch-physikalische Grundlagen zum tribologischen Verhalten keramischer Werkstoffe**
- Nr. 134/ISBN 3-88314-615-3/1987  
G. Andraea, G. Niessen  
**Über den Kernstrahlungseinfluß auf Dehnungsmeßstreifen**
- Nr. 135/ISBN 3-88314-618-8/1987  
J. Ludwig, W.-D. Mischke, A. Ulrich  
**Untersuchungen über das Verhalten von Tankcontainern für unter Druck verflüssigte Gase bei Fallbeanspruchungen**
- Nr. 136/ISBN 3-88314-636-6/1987  
H.-J. Deppe, K. Schmidt  
**Untersuchung zur Beurteilung von Brettschichtverleimungen für den Holzbau**



- Nr. 137/ISBN 3-88314-637-4/1987  
D. Aurich  
**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte auf der Grundlage von Forschungsergebnissen auf dem Gebiete der Komponentensicherheit**
- Nr. 138/ISBN 3-88314-635-8/1987  
M. Dogunke, F. Buchhardt  
**Zur geowissenschaftlichen Einordnung des Gebietes der Bundesrepublik Deutschland und einer sicheren Auslegung technischer Systeme gegen den Lastfall Erdbeben**
- Nr. 139/ISBN 3-88314-658-7/1987  
J. Olschewski, S.-P. Scholz  
**Numerische Untersuchung zum Verhalten des Hochtemperaturwerkstoffes Nimonic PE 16 unter monotoner und zyklischer Belastung bei Verwendung verschiedener plastischer und viskoplastischer Materialmodelle**
- Nr. 140/ISBN 3-88314-643-9/1987  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members)**
- Nr. 141/ISBN 3-88314-694-3/1987  
F. Buchhardt, W. Matthees, G. Magiera, F. Mathiak  
**Zum Einfluß des Sicherheits- und Auslegungserdebens auf die Bemessung von Kernkraftwerken**
- Nr. 142/ISBN 3-88314-695-1/1987  
H. Treumann, G. Krüger, N. Pfeil, S. von Zahn-Ullmann  
**Sicherheitstechnische Kenndaten und Gefahrzahlen binärer Mischungen aus oxidierenden und verbrennlichen Substanzen**
- Nr. 143/ISBN 3-88314-701-X/1987  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen — Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen bei Stoßbelastung (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members — Experimental and numerical Investigations concerning Load Bearing Behaviour of Reinforced Concrete Members under Impact Load)**
- Nr. 144/ISBN 3-88314-702-8/1987  
F. Buchhardt, G. Magiera, W. Matthees, M. Weber, J. Altes  
**Nichtlineare dynamische Berechnungen zum Penetrationsverhalten des AVR-Reaktorgebäudes**
- Nr. 145/ISBN 3-88314-711-7/1987  
U. Holzlöhner  
**Untersuchung selbstähnlicher Systeme zur Bestimmung von Materialeigenschaften von Reibungsböden**
- Nr. 146/ISBN 3-88314-714-1/1987  
W. Schon, M. Mallon  
**Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wasserberieselungseinrichtungen als Brandschutzmaßnahme für Flüssiggas-Lagertanks**
- Nr. 147/ISBN 3-88314-720-6/1987  
H.-D. Kleinschrodt  
**Lösung dynamischer Biege- und Torsionsprobleme von Stabsystemen aus dünnwandigen elastischen Stäben mit offenem Querschnitt mittels frequenzabhängiger Ansatzfunktionen**
- Nr. 148/ISBN 3-88314-774-5/1988  
W. Müller  
**Theoretische Untersuchung von Variationsprinzipien für elastoplastisches Materialverhalten sowie Entwicklung und numerische Erprobung von Finite-Element-Verfahren für den ebenen Spannungszustand**
- Nr. 149/ISBN 3-88314-775-3/1988  
U. Holzlöhner  
**Bestimmung baugrunddynamischer Kenngrößen aus der Untersuchung von Bodenproben**
- Nr. 150/ISBN 3-88314-776-1/1988  
M. Weber  
**VG3D — Zeichenprogramm für vektographische Darstellung dreidimensionaler Strukturen**
- Nr. 151/ISBN 3-88314-785-0/1988  
L. Auersch-Saworski  
**Wechselwirkung starrer und flexibler Strukturen mit dem Baugrund, insbesondere bei Anregung durch Bodenerschütterungen**
- Nr. 152/ISBN 3-88314-796-6/1988  
G. Plauk, G. Kretschmann, R.-G. Rohrmann  
**Untersuchung des baulichen Zustandes und der Tragfähigkeit vorgespannter Riegel von Verkehrszeichenbrücken der Berliner Stadtautobahn**
- Nr. 153/ISBN 3-88314-797-4/1988  
H. Sander, W.-W. Maennig  
**Magnetisches Verhalten von Eisenproben bei mechanischer Wechselbeanspruchung**
- Nr. 154/ISBN 3-88314-822-9/1988  
K. Breitkreutz, P.-J. Uttech, K. Haedecke  
**Druckgesinterte Stähle als zertifiziertes Referenzmaterial für die Spektrometrie**
- Nr. 155/ISBN 3-88314-825-3/1988  
L. Auersch  
**Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrserschütterungen: Theoretische Untersuchungen und Messungen am Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental**
- Nr. 156/ISBN 3-88314-887-3/1989  
G. Klamrowski, P. Neustupny, H.-J. Deppe, K. Schmidt, J. Hundt  
**Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Faserzementen**
- Nr. 157/ISBN 3-88314-888-1/1989  
E. Limberger, K. Brandes  
**Versuche zum Verhalten von Stahlbetonbalken mit Übergreifungsstößen der Zugbewehrung unter stoßartiger Belastung**
- Nr. 158/ISBN 3-88314-889-X/1989  
R. Wäsche, K.-H. Habig  
**Physikalisch-chemische Grundlagen der Feststoffschmierung — Literaturübersicht**
- Nr. 159/ISBN 3-88314-890-3/1989  
R. Müller, R. Rudolphi  
**Berechnung des Wärmedurchlaßwiderstandes und der Temperaturverteilung im Querschnitt von Hausschornsteinen nach DIN 18160 Teil 6**
- Nr. 160/ISBN 3-88314-917-9/1989  
W. Matthees  
**Entwicklung eines Makroelementes durch Kondensation am Beispiel der Lastfälle Flugzeugabsturz und Erdbeben bei Boden-Bauwerk-Wechselwirkung mit biegeweichen Fundamenten**
- Nr. 161/ISBN 3-88314-920-9/1989  
G. Mellmann, M. Maultzsch  
**Untersuchung zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Flachglas für bauliche Anlagen**
- Nr. 162/ISBN 3-88314-921-7/1989  
W. Brünner  
**Untersuchungen zur Tragfähigkeit großer Glasscheiben**
- Nr. 163/ISBN 3-88314-922-5/1989  
W. Brünner, G. Mellmann, W. Struck  
**Biegefestigkeit und Tragfähigkeit von Scheiben aus Flachglas für bauliche Anlagen**
- Nr. 164/ISBN 3-88314-934-9/1989  
R. Helms, B. Jaenicke, H. Wolter, C.-P. Bork  
**Zur Schwingfestigkeit großer geschweißter Stahlträger**
- Nr. 165/ISBN 3-88314-935-7/1989  
P. Göbel, L. Meckel, W. Schiller  
**Untersuchung zur Erarbeitung von Kennwerten bei Einrichtungsmaterialien (Holzwerkstoffen, Möbeln und Textilien) hinsichtlich der Formaldehyd-Emission — Teil B: Textilien**
- Nr. 166/ISBN 3-88314-936-5/1989  
K. Breitkreutz  
**Modelle für Stereologische Analysen**
- Nr. 167/ISBN 3-88314-937-3/1989  
A. Mitakidis, W. Rucker  
**Erschütterungsausbreitung im elastischen Halbraum bei transienten Belastungsvorgängen**
- Nr. 168/ISBN 3-88314-958-6/1990  
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi  
**Numerische Untersuchung geometriebedingter Wärmebrücken (Winkel und Ecken) unter Einsatz hochauflösender Farbgraphik bei Berücksichtigung der Tauwasserproblematik und des Mindestluftwechsels**
- Nr. 169/ISBN 3-88314-959-4/1990  
Chr. Kohl, W. Rucker  
**Integration der Untergrunddynamik in das Programmsystem MEDYNA, dargestellt am Beispiel des Intercity Experimental (ICE)**
- Nr. 170/ISBN 3-88314-960-8/1990  
P. Studt, W. Kerner, Tin Win  
**Untersuchung der mikrobiologischen Schädigung wassergemischter Kühlschmierstoffe mit dem Ziel der Verbesserung der Arbeitshygiene, der Minderung der Geruchsbelastung und der Menge zu entsorgender Emulsionen**
- Nr. 171/ISBN 3-88314-997-7/1990  
F. Buchhardt  
**Ein Operator zur Koppelung beliebig benachbarter dynamischer Systeme am Beispiel der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung**
- Nr. 172/ISBN 3-88314-998-5/1990  
J. Vielhaber, G. Plauk  
**Grenztragfähigkeit großer Verbundprofilstützen**
- Nr. 173/ISBN 3-88314-999-3/1990  
B. Droste, J. Ludwig, B. Schulz-Forberg  
**Höherwertige Transporttechnik und ihre Konsequenzen für die Beförderung gefährlicher Güter**
- Nr. 174/ISBN 3-88429-021-8/1990  
D. Aurich  
**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte**
- Nr. 175/ISBN 3-88429-022-6/1990  
W. Brocks, D. Klingbeil, J. Olschewski  
**Lösung der HRR-Feld-Gleichungen der elastisch-plastischen Bruchmechanik**
- Nr. 176/ISBN 3-88429-035-6/1990  
W. Matthees, G. Magiera  
**Iterative Dekonvolution der seismischen Basiserregung für den Zeitraum**
- Nr. 177/ISBN 3-89429-090-0/1991  
G. Schickert, M. Krause, H. Wiggerhauser  
**Studie zur Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren bei Ingenieurbauwerken**
- Nr. 178/ISBN 3-89429-429-9/1991  
G. Andreae, J. Knapp, G. Niessen  
**Entwicklung und Untersuchung eines kapazitiven Hochtemperatur-Dehnungsaufnehmers für Einsatztemperaturen bis ca. 1000 °C**
- Nr. 179/ISBN 3-89429-100-1/1991  
H. Eifler  
**Die Drehfähigkeit plastischer Gelenke in Stahlbeton-Plattenbalken, bewehrt mit naturhartem Betonstahl BSt 500 S im Bereich negativer Biegemomente**
- Nr. 180/ISBN 3-89429-101-X/1991  
E. Klement, G. Wieser  
**Zur numerischen Übertragbarkeit von Prüfungsergebnissen an Hausschornsteinen auf Schornsteine mit anderen lichten Querschnitten**
- Nr. 181/ISBN 3-89429-105-2/1991  
H. Czichos, R. Helms, J. Lexow  
**Industrial and Materials Technologies Research and Development Trends and Needs**

- Nr. 182/ISBN 3-89429-145-1/1992  
M. Weber  
**Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten im Bereich geometriebedingter Wärmebrücken**
- Nr. 183/ISBN 3-89429-163-X/1992  
F. Buchhardt  
**Zur Dekonvolution im Zeitbereich**
- Nr. 184/ISBN 3-89429-164-8/1992  
M. Maultzsch, W. Stichel, E.-M. Vater  
**Feldversuche zur Einwirkung von Auftaumitteln auf Verkehrsbauwerke (im Rahmen des Großversuchs "Umweltfreundlicheres Streusalz")**
- Nr. 185/ISBN 3-89429-165-6/1992  
Renate Müller  
**Ein numerisches Verfahren zur simultanen Bestimmung thermischer Stoffeigenschaften oder Größen aus Versuchen — Anwendung auf das Heißdraht-Parallelverfahren und auf Versuche an Hausschornsteinen**
- Nr. 186/ISBN 3-89429-211-3/1992  
B. Löffelbein, M. Woydt, K.-H. Habig  
**Reibungs- und Verschleißuntersuchungen an Gleitpaarungen aus Ingenieurkeramischen Werkstoffen in wässrigen Lösungen**
- Nr. 187/ISBN 3-89429-216-4/1992  
Th. Schneider, E. Santner  
**Mikrotribologie: Stand der Forschung und Anwendungsmöglichkeiten — Literaturübersicht**
- Nr. 188/ISBN 3-89429-243-1/1992  
K. Mallwitz  
**Verfahren zur Vorausermittlung der Setzung von Fundamenten auf geständerten Strecken infolge zyklischer Beanspruchung**
- Nr. 189/ISBN 3-89429-244-X/1992  
W. Matthees, G. Magiera  
**Impedanzeigenschaften von Finiten-Elemente-Modellen bei Integration im Zeitraum**
- Nr. 190/ISBN 3-89429-245-8/1992  
G. Zachariev  
**Untersuchung des Versagens thermoplastischer Kunststoffe im Kurzzeit-Zugversuch und Retardations-Zugversuch**
- Nr. 191/ISBN 3-89429-246-6/1992  
H.-M. Bock, S. Erbay, J. With  
**Kritische Stahltemperatur als charakteristischer Kennwert für die Feuerwiderstandsdauer von Bauwerkssystemen aus Stahl**
- Nr. 192/ISBN 3-89429-329-2/1993  
D. Aurich  
**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte — Lokales Rißwachstum, Ermittlung des Rißwiderstandsverhaltens aus der Kerbschlagarbeit**
- Nr. 193/3-89429-291-1/1993  
W. Gerisch, Th. Fritz, S. Steinborn  
**Statistical Consulting in the Frame of VAMAS. The Role of the Technical Working Arfea/Advisory Group. Statistical Techniques for Interlaboratory Studies and Related Projects (VAMAS Report No. 13)**
- Nr. 194/ISBN 3-89429-330-6/1993  
U. Krause  
**Ein Beitrag zur mathematischen Modellierung des Ablaufs von Explosionen**
- Nr. 195/ISBN 3-89429-331-4/1993  
U. Schmidtchen, G. Würsig  
**Lagerung und Seetransport großer Mengen flüssigen Wasserstoffs am Beispiel des "Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Projekts. Überblick über die in Deutschland anzuwendenden Gesetze, Verordnungen und technischen Regeln**
- Nr. 196/ISBN 3-89429-362-4/1993  
D. Lietze  
**Untersuchungen über das Anlaufen von Detonationen im Innern geschlossener Systeme**
- Nr. 197/ISBN 3-89429-400-0/1993  
A. Skopp  
**Tribologisches Verhalten von Siliziumnitridwerkstoffen bei Festkörpergleitreibung zwischen 22 °C und 1000 °C**
- Nr. 198/ISBN 3-89429-421-3/1994  
St. Meretz  
**Ein Beitrag zur Mikromechanik der Interphase in polymeren Faserverbundwerkstoffen**
- Nr. 199/ISBN 3-89429-422-1/1994  
W. F. Rücker, S. Said  
**Erschütterungsübertragung zwischen U-Bahntunneln und dicht benachbarten Gebäuden**
- Nr. 200/ISBN 3-89429-423-X/1994  
D. Arndt, K. Borchardt, P. Croy, E. Geyer, J. Henschen, C. Maierhofer, M. Niedack-Nad, M. Rudolph, D. Schaurich, F. Weise, H. Wiggenhauser  
**Anwendung und Kombination zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Bestimmung der Mauerwerksfeuchte im Deutschen Dom**
- Nr. 201/ISBN 3-89429-475-2/1994  
U. Holzlöhner, H. August, T. Meggyes, M. Brune  
**Deponieabdichtungssysteme — Statusbericht**
- Nr. 202/ISBN 3-89429-481-7/1994  
J. Schmidt  
**Über eine Verteilungsfunktion mit Parametern für Median, Spannweite, Schiefe und Wölbung — Konzept und Anwendung**
- Nr. 203/ISBN 3-8701-193-X/1998  
B. Schulz-Forberg, J. Ludwig  
**Sicherheitsniveaus von Transporttanks für Gefahrgut**
- Nr. 204/ISBN 3-89429-484-1/1994  
W. Struck, E. Limberger  
**Der Glaskugelsack als Prüfkörper für Beanspruchungen durch weichen Stoß — eine erweiterte Modellvorstellung**
- Nr. 205/ISBN 3-89429-516-3/1995  
P. Rose  
**Bestimmung charakteristischer Fehlermerkmale zur rechnergestützten Bildauswertung von Schweißnahtradiographien**
- Nr. 206/ISBN 3-89429-517-1/1995  
D. Lietze  
**Grenze der Flammendurchschlagsicherheit von Sperrschichten aus Bandsicherungen bei Deflagrationen und bei einem Nachbrand**
- Nr. 207/ISBN 3-89429-593-7/1997  
W. Daum  
**Zur objektiven Beurteilung der Bildqualität industrieller Radioskopiesysteme**
- Nr. 208/ISBN 3-89429-557-0/1995  
G. Kalinka  
**Ein Beitrag zur Kristallisation gefüllter und ungefüllter Thermoplaste**
- Nr. 209/ISBN 3-89429-594-5/1995  
D. Hoffmann, K. Niesel  
**Zur Quantifizierung des Effekts von Luftverunreinigungen auf Putzmörtel**
- Nr. 210/ISBN 3-89429-595-3/1995  
F. Buchhardt, W. Matthees, G. Magiera  
**Zur Erfassung der hysteretischen Dämpfung im Zeitraum**
- Nr. 211/ISBN 3-89429-973-8/1997  
G. Meier zu Köcker, K.-H. Habig  
**Steigerung der Lebensdauer und der Prozeßsicherheit durch beschichtungsgerechte Fertigung von Werkzeugen und Bauteilen**
- Nr. 212/ISBN 3-89429-974-6/1996  
S. Dähne  
**Analytische Grundlagenuntersuchungen zur Laserimpulsfluorometrie im ultravioletten Spektralbereich**
- Nr. 213/ISBN 3-89429-975-4/1995  
J. Kelm  
**High Resolution NMR Spectroscopy for the Determination of Elastomers, Blends and Thermoplastic Elastomers — Carbon and Proton NMR Spectra Catalogue**
- Nr. 214/ISBN 3-89429-976-2/1995  
J. Moll  
**Exciton-Dynamics in J-Aggregates of an Organic Dye**
- Nr. 215/ISBN 3-89429-950-9/1995  
W. Müller u. a.  
**Modellhafte Untersuchungen zu Umweltschädigungen in Innenräumen anhand des Grünen Gebäudes**
- Nr. 216/ISBN 3-89429-774-3/1997  
C.-P. Bork, J. Hünecke, M. Golmann  
**Neue Stähle mit hoher statischer, dynamischer und Dauerfestigkeit für den Automobilbau**
- Nr. 217/ISBN 3-89429-775-1/1997  
W. Müller, M. Torge, D. Kruschke, K. Adam  
**Sicherung, Konservierung und Restaurierung historischer Glasmalereien**
- Nr. 218/ISBN 3-89429-776-X/1997  
S. Steinborn  
**Analyse von Verformung und Rißbildung bei Straßenbelägen durch Finite-Elemente-Methoden**
- Nr. 219/ISBN 3-89429-777-8/1997  
G. Fuhrmann, J. Bohse, H.-V. Rudolph  
**Schwingfestigkeit von Thermoplasten und Verbundwerkstoffen bei Umlaufbiegung**
- Nr. 220/ISBN 3-89429-778-6/1997  
D. Lietze  
**Grenze der Flammendurchschlagsicherheit von Sperrschichten aus Sintermetall**
- Nr. 221/ISBN 3-89701-036-4/1997  
R. Wäsche, F. Köse  
**Einfluß der Verfahrensparameter beim Gelcasting auf die Entstehung bruchauslösender Gefügefeler in hochreinen Aluminiumoxidkeramiken**
- Nr. 222/ISBN 3-89701-037-2/1997  
H. Frenz  
**Gesetzmäßigkeiten für die werkstoffmechanische Beschreibung der einkristallinen Nickelbasislegierung SC 16 unter ein- und mehrachsiger Beanspruchung**
- Nr. 223/ISBN 3-89701-038-0/1998  
K. Furack, U. Resch-Genger  
**Design, Synthese und Charakterisierung von Fluoreszenzstandards und Fluoreszenzmarkern für die zeitaufgelöste Fluorometrie**
- Nr. 224/ISBN 3-89701-159-X/1998  
M. Weber  
**Strukturspannungsberechnung bei zylindrischen Behältern mit Aufdachungen unter Innendruck**



