

Code, Section III, Class 1, Subsection NB-3000 "Design" und Code Case N-47-22 "Class 1 Components in Elevated Temperature Service" vorgenommen [1, 2]. Ein Nachlaufprogramm wie CASAFE steht im allgemeinen bei den FE-Standard-Programmen nicht zur Verfügung. Die FE-Berechnungen lieferten an jedem Elementknoten 6 Spannungen, nämlich 3 Normalspannungen und 3 Schubspannungen. Für die Absicherung gemäss den Regelwerken mussten diese in den massgebenden Schnitten in einen Membran- (P_m)- und einen Biegeteil (P_b) zerlegt werden, was eine vorgängige Linearisierung der Spannungsverteilung über die Schalendicke notwendig machte.

Die eigentliche Absicherung mit CASAFE erfolgte für die folgenden Spannungs- bzw. Versagensarten:

- Primär- (d. h. nicht selbstlimitierende)spannungen
- Zeitstandsfestigkeit (weil die Wandtemperatur der Komponente über 427 °C (800 °F) lag) (für Austenite)
- Progressive Deformation und kumulatives Versagen (Primär- und Sekundärspannungen), (Ermüdung). Die zulässigen Grenzwerte nach den Regelwerken wurden überall eingehalten, wie dies die nachstehende Zusammenstellung der grössten Werte zeigt:

Tabelle 1

P_m/S	$\frac{P_m + P_b}{S_{zul2}}$	t_v/t_{vm}	Spannungs-Schwingbreite* $\frac{3 S_m}{3}$	U
0.36	0.24	0.01	1.748	0.1616

* K_e -Faktor = 3.33

Die Symbole S_{zul1} und S_{zul2} bezeichnen zulässige Spannungen (Stoffwerte), das Verhältnis von t_v und t_{vm} ein Zeitverhältnis im Hinblick auf Kriechen (Zeitstandsfestigkeit), Spannungs-Schwingbreite/ $3 S_m$ bedeutet ein fiktives Spannungsverhältnis mit Einfluss auf die Ermittlung von U, und U bezeichnet den ermüdungsbedingten Schadenakkumulations-Faktor (U = Usage Factor).

2.2 Datenverarbeitung - zeitliche Projektabwicklung

Um eine direkte Datenübertragung von ANSYS in NASTRAN und weiter zum Postprozessor zu ermöglichen, erfolgten die thermischen und mechanischen Berechnungen mit identisch diskretisierten FE-Modellen.

Die Aufgabe war aus der Sicht der Datenmenge bzw. ihrer Verarbeitung, der Informatik, umfangreich. Man bedenke nur: Mehrere hundert Zeitschritte und Integrationsschritte bei der nichtlinearen Berechnung der instationären Temperaturtransienten, Temperaturen jeweils bei 7600 Knoten. Bei den Spannungsberechnungen waren es wiederum 7600 Knoten à 6 Spannungskomponenten, 3 Hauptspannungen und 3 Verschiebungskomponenten. Bei 27 Grundlastfällen und den daraus erstellten 30 - 40 Lastkombinationen handelte es sich also um Millionen von Daten, die verarbeitet werden mussten. Dies besorgte im wesentlichen das Nachlaufprogramm CASAFE.

Die Datenreduktion erfolgte z. B. dadurch, dass die Verhältnisse bei 150 Durchstosslinien des FE-Grossmodells, auch Schnitte genannt, untersucht wurden. In engere Betrachtung kamen dann die in Membran- und Biegeanteile zerlegten Spannungen entlang der Schalendicke bei diesen 150 Durchstosslinien; und die Schlussresultate, gegeben in Tabelle 1, bestehen eigentlich aus 5 Zahlenwerten. CASAFE ermöglichte u. a. die Erstellung der Lastkombinationen, d. h., es musste dafür nicht ein Postprozessor, z. B. von ANSYS, benutzt werden. Im Klartext heisst das, es musste also nicht ein mit hohen Kosten verbundenes FE-Programmsystem für die Lastkombinationen betätigt werden. Die Lastkombinationen wurden nur für die Knoten bei den uns interessierenden Schnitten erstellt (bei unserem Beispiel 150 Schnitte x 3 bis 4 Knoten ~ 500 Knoten anstatt der Gesamtknotenzahl von 7600 mit einem ANSYS-Postprozessor).

Die hier besprochenen und in [2] ausführlicher publizierte Berechnungen des dreidimensionalen Behälterstutzens konnten zusammen mit den anderen Aufgaben (Hebeöse) innert Halbjahresfrist abgewickelt werden und bedeuteten Kosten in der

Größenordnung von 10^5 sFr. Wir glauben, dass mit diesem Aufwand ungefähr auch bei anderen ähnlich gelagerten Aufgaben und anderen Berechnern zu rechnen ist. Referenz [5] enthält die Berechnungen eines zweidimensionalen (rotationssymmetrischen) Stutzens mit ADINAT und ADINA, die sich an einem Forschungsinstitut über eine längere Zeitspanne erstrecken konnten und auch mit höheren Kosten verbunden waren. Letztere Resultate bilden selbst beim heutigen Stand erst Referenzwerte für später geplante detaillierte dreidimensionale Berechnungen.

3. BEISPIEL BAUTEILÄHNLICHE SCHEIBE MIT OBERFLÄCHENRISS

Hier stellte sich die Aufgabe, eine bruchmechanische Analyse durchzuführen. Anhand dieses Beispiels soll versucht werden, die Bedeutung der Bruchmechanik in der Festigkeits- oder Sicherheitsanalyse von Bauteilen zu diskutieren [4]. Die Bruchmechanik erweitert die Festigkeitsanalyse für Teile mit Rissen. Risse bedeuten Singularitäten in den Spannungs- und Verschiebungsfeldern. Die Theorie der Bruchmechanik, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann, erlaubt Parameter, wie z. B. den Spannungsintensitätsfaktor K oder das sog. J -Integral zur Charakterisierung des Belastungszustandes von Rissen zu berechnen. Diese werden bei Nachweis der Bruch-sicherheit durch bruchmechanische Analysen benutzt. Auch hierzu gibt es heute Computerprogramme, die die Berechnung von K und J für zahlreiche Risskonfigurationen und Lastfälle erlauben.

Wie diese geschieht, sei anhand von Fig. 4 angedeutet. Für diese Konfiguration kann der Spannungsintensitätsfaktor K numerisch berechnet werden:

$$K = \frac{\sigma \cdot \sqrt{\pi a}}{\Phi} F\left(\frac{a}{c}, \phi, \frac{a}{t}\right) \quad h/W > 1; c/W < 0,25 \quad (1)$$

$$\Phi = \int_0^{\pi/2} \left(\sin^2 \phi + \left(\frac{a}{c}\right)^2 \cos^2 \phi \right)^{1/2} d\phi \quad (2)$$

Die Symbole von Gleichungen (1) und (2) sind mit Hilfe von Fig. 4 zu entschlüsseln. Werte der Korrekturfunktion $F(a/c, \phi, a/t)$ sind nach dreidimensionalen, linear-elastischen FE-Berechnungen von Raju und Newman in Tabelle 2 enthalten. Eine leicht programmierbare zweidimensionale Lagrange-Interpolation (Programm INTERP) liefert die Korrekturfunktion $F(a/c, \phi, a/t)$ auch für alle dazwischenliegenden Fälle, die in Tabelle 2 nicht direkt angegeben sind.

Im speziellen möchte man auf die Praxisrelevanz des halb-elliptischen Oberflächenrisses hinweisen. Der halbelliptische Oberflächenriss kommt in den bruchmechanischen Konzepten überall (z. B. ASME-Code) vor, wo die Sicherheit einer Anlagenkomponente, z. B. gegen Sprödbruch, die Möglichkeiten eines stabilen Risswachstums, z. B. infolge Ermüdung usw., beurteilt werden müssen. Unter Scheibe wird bei diesem Beispiel ein plattenähnlicher Körper verstanden, der durch Kräfte senkrecht zur Dicke beansprucht wird. Selbstverständlich liegen aber ähnliche Resultate auch für biegebeanspruchte Platten mit Oberflächenriss und andere typische Risskonfigurationen der Anlagenkomponenten vor.

Die Ergebnisse können für folgende Aufgaben eingesetzt werden: Bestimmung kritischer Rissgrößen; Berechnung kritischer Belastungen; Ermittlung der erforderlichen Zähigkeiten; Voraussagen des unterkritischen Risswachstums und Aufstellung von Prüfanordnungen.

Als Werkstoff für die im Rahmen der Referenzarbeit [4] gemachten Experimente diente der ferritisch-perlitische Feinkornbaustahl BH 43 W (St. E. 43).

4. BEISPIEL DICKWANDIGER BEHAELTER

Hier stellte sich die Aufgabe, eine probabilistische Versagensanalyse durchzuführen. Diese Aufgabe beschäftigt uns im Zusammenhang mit der Versagensanalyse und Versagenswahrscheinlichkeit von Behältern, die für die Lagerung von gefährlichen Stoffen vorgesehen sind [3]. Fig. 5 zeigt die Geometrie des Behälters mit den wichtigsten Abmessungen, Fig. 6 die Nomenklatur

und die Annahmen, die für die probabilistische Analyse getroffen wurden. Als Werkstoff wird Stahlguss GS 40 verwendet.

4.1 Versagenswahrscheinlichkeit infolge Einbeulens

Vorangegangene deterministische Berechnungen bildeten die Grundlage für die probabilistische Analyse. Dabei wurde als zulässiger Druckwert $p_{beul,z} = 400$ bar ermittelt. Die tatsächlich auftretende Belastung wurde als Aussendruck $p = 300$ bar festgelegt. Ein triviales Kriterium des Nichtversagens $p < p_{beul,z}$ wird mit diesen Werten erfüllt.

Bei der probabilistischen Analyse werden mit den Bezeichnungen von Fig. 6 folgende Annahmen getroffen:

$$\begin{aligned} R_0 &= 2000 \text{ bar } (5 \times (p_{beul,z} = 400 \text{ bar})) \\ S_0 &= 220 \text{ bar } (< p = 300 \text{ bar}) \\ \sigma_R &= 220 \text{ bar} \\ \sigma_S &= 50 \text{ bar} \end{aligned} \left. \vphantom{\begin{aligned} R_0 \\ S_0 \\ \sigma_R \\ \sigma_S \end{aligned}} \right] \text{Streuungen von R und S (bzw. } p_{beul,z} \text{ und } p)$$

Die Versagenswahrscheinlichkeit p_f berechnet sich mit der weiteren Annahme von Normalverteilungen und mit Tafelwerten aus einschlägigen Nachschlagewerken zu

$$p_f = \Phi \left(- \frac{R_0 - S_0}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \right) = \Phi (-7,9) = 0,15 \cdot 10^{-14} \quad (3)$$

Formel (3) stammt von den allgemeinen Gleichungen (4) und (5), worin p_f durch ein Faltungsintegral ausgedrückt wird:

$$p_f = F_v(1) = P(R < S) = \int_0^{\infty} F_r(x) \cdot f_s(x) dx \quad (4)$$

$$F_r(x) = P(0 < R < x) = \int_0^x f_r(\xi) d\xi \quad (5)$$

Die Wahrscheinlichkeit des Versagens $F_1(t)$ im Zeitintervall $(0, t)$ ist:

$$F_1(t) = 1 - \left[\int_0^{\infty} \sum_{r=0}^{\infty} p_r(t) \left\{ F_s(x) \right\}^r \cdot f_r(x) dx \right] \quad (6)$$

Mit Vereinfachungen, die in [3] ausführlicher diskutiert werden, wird $F_1(t)$ mit den aus Gleichung (6) herleitbaren einfacheren Gleichungen berechnet:

$$F_1(t) \approx 1 - (1 - p_f)^t \quad (7)$$

$$F_1(t = 1000 \text{ Jahre}) \approx 1,5 \cdot 10^{-12}$$

$$F_1(t) \approx 1 - \exp(-p_f \cdot t) \quad (8)$$

$$F_1(t = 1000 \text{ Jahre}) \approx 1,5 \cdot 10^{-12}$$

Die hier zitierten Resultate werden in Ref. [3] näher erläutert und kommentiert. Aus Umfangsgründen sei hier nur ein Hinweis auf [3] gegeben und die allgemeine Anmerkung gemacht, dass die probabilistische Zuverlässigkeitsanalyse im wesentlichen durch zweierlei Arten von Umständen erschwert wird:

- sie hat verschiedenartige technische Einrichtungen zum Gegenstand, und
- schon eine von diesen Einrichtungen allein ist mehreren verschiedenartigen Einflüssen und Mechanismen bezüglich Versagen (wirkliches oder hypothetisches) ausgesetzt.

Aus dem nichtnuklearen Behälterbau wurden noch in der Originalarbeit einige verfügbare Schadens- bzw. Versagensstatistiken zu Vergleichszwecken mit den theoretischen Resultaten der probabilistischen Analyse aufgeführt.

5. DISKUSSION

Nachdem einige Fragmente des Problemkomplexes Auslegung von Anlagenkomponenten diskutiert worden sind, sei versucht, auf gewisse Querverbindungen zwischen diesen Fragmenten hinzuweisen.

Obwohl der vorliegende Beitrag nur auf einige Teilaspekte - Darstellung von Einzelbeispielen - ausgerichtet ist, vermag er auch allgemein Lösungsansätze für die Analyse komplexer Bauteil- und Belastungskonfigurationen zu liefern.

Nicht zu verkennen ist, dass es sich nicht bloss um Teilprobleme handelt, sondern um ganzheitliche und interdisziplinäre Aufgabenstellungen.

In der Praxis stellt sich oft die Problematik, dass sich ein vorher im fehlerfreien Zustand berechnetes Bauteil nach der Fertigung als fehlerbehaftet erweist. Nehmen wir das Beispiel Behälterstützen und stellen wir uns vor, dass dort ein Riss von halbelliptischer Form der Art von Beispiel Scheibe vorliegt. Ist jetzt unsere mit grossem Aufwand berechnete Spannungsanalyse wertlos? Müssen wir reparieren - oder die Komponente als Ausschuss betrachten?

Lösungsvariante: Die Spannungsanalyse ist nicht wertlos, nur nicht mehr allein aussagefähig. Sie muss mit der Bruchmechanik kombiniert werden. Aber die sogenannten Einfluss-(Korrektur-)Funktionen, die zur Berechnung der zusätzlich notwendig gewordenen bruchmechanischen Parameter wie K oder J erforderlich sind, sind komplexer als bei der relativ einfachen Konfiguration "Scheibe". Auch die Werkstoffaspekte müssen bezüglich K und J erweitert werden.

Hierzu sehen wir grundsätzlich zwei Möglichkeiten:

1. Ingenieurmässige Handrechnungen mit Diagramm- und Tabellenwerten aus bruchmechanischen Handbüchern, Regelwerken und sonstigen Referenzen
2. Durchführung von neuen Berechnungen der relevanten bruchmechanischen Parameter wie J und K mit kostspieligen Computerprogrammen, d. h. eine quasi Neuberechnung der zuerst nur spannungsmässig berechneten Komponenten.

Gewisse Unsicherheit besteht in der Anwendung von den Erkenntnissen. In der Praxis herrscht im allgemeinen das Ge-

fühl, dass Reparieren besser ist als Belassen von kleinen Fehlern.

Eine andere Art von Querverbindung wäre diejenige zwischen der bruchmechanischen (Beispiel Scheibe) und der probabilistischen Analyse (Beispiel dickwandiger Behälter). Die zusätzliche Fragestellung würde in diesem Fall lauten: Wie geht man mit der probabilistischen Analyse des dickwandigen Behälters vor, wenn in der Behälterwand ein Riss vorliegt? Zur Lösung dieser Aufgabe ist die sogenannte probabilistische Bruchmechanik, entstanden aus der Zuverlässigkeitsanalyse und der deterministischen Bruchmechanik, heranzuziehen.

LITERATUR

- [1] CASAFE (Component Analysis Stress and Fatigue Evaluation) Benutzer-Handbuch des von Motor-Columbus in Zusammenarbeit mit dem FIDES-Rechenzentrum entwickelten Nachprozessors für Spannungsanalysen.
Baden und Zürich, 1985
- [2] Huber, A./Jaussi, N./van Waveren, N. K.:
Nonlinear Thermal Analysis, Stress Analysis and Code Verification of SNR-300 Heat Exchanger Nozzle and Suspension Structure. Proceedings 8th SMIRT Conference, Paper E 1/5, Brussels, 1985
- [3] Prodan, M.:
Failure and Non-Failure Probability of a Buried Thick-Walled Vesel. Proceedings 8th SMIRT Conference, Paper M1J 1/5, Brussels, 1985
- [4] Prodan, M.:
Ein bruchmechanisch abgestütztes Verfahren zur Bestimmung des Ermüdungsverhaltens bauteilähnlicher Scheiben
EMPA-Bericht Nr. 213, Dübendorf, 1983
- [5] HDR-Stutzen A2, Temperaturverlauf und Thermospannungen für rotations-symmetrisches Modell. EIR-Mitteilungen Nr. TM-32-83-39 und -84-19, Würenlingen, 1983 und 1984
HDR-Sicherheitsprogramm, Gemeinschaftsbericht Nr. 3, Stutzen A2, Temperatur- und Spannungsverläufe infolge Thermoschock, Würenlingen, April 1985 (Motor-Columbus beteiligt)

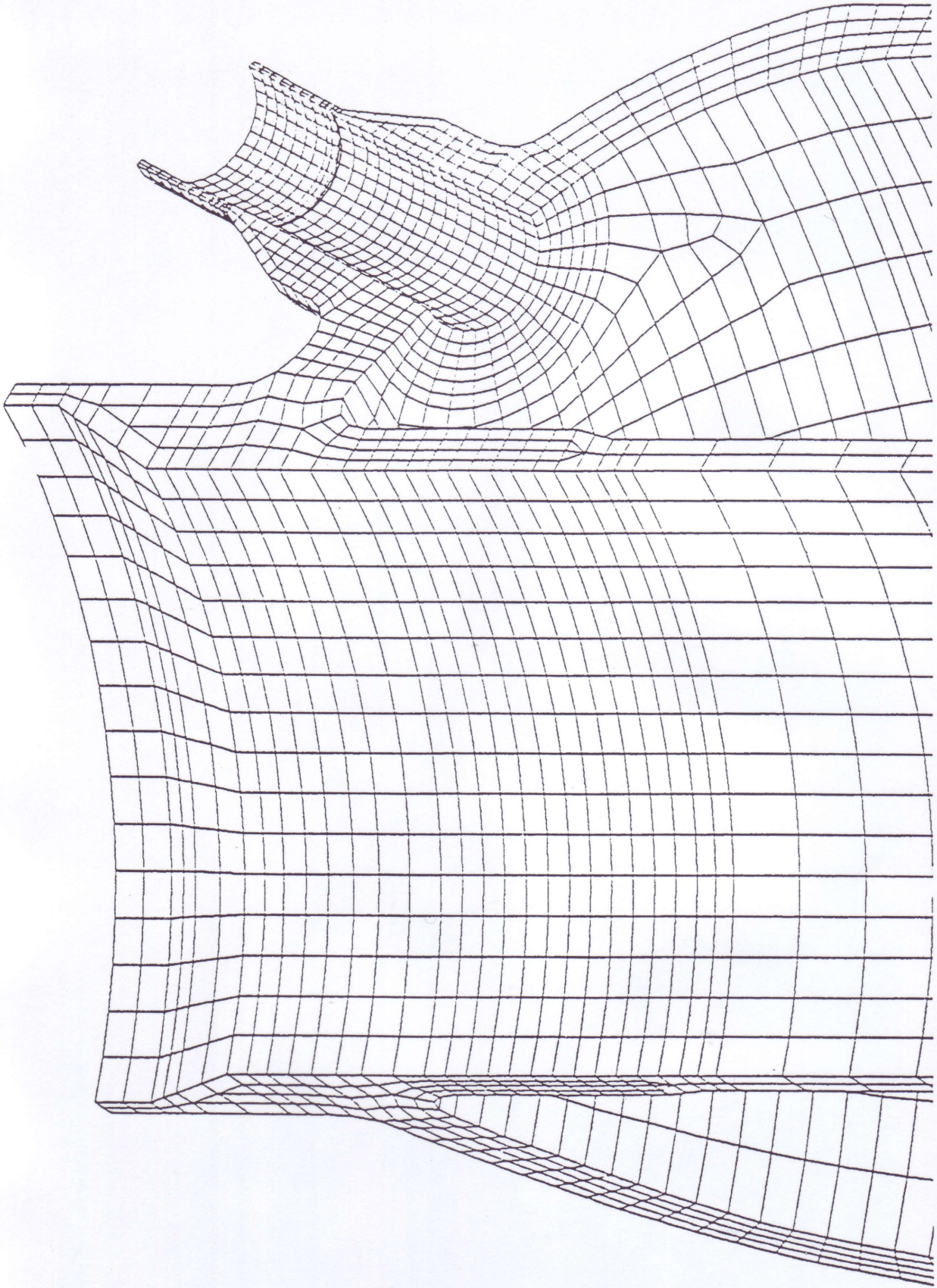


Fig. 1: Ausschnitt aus dem FE-Modell

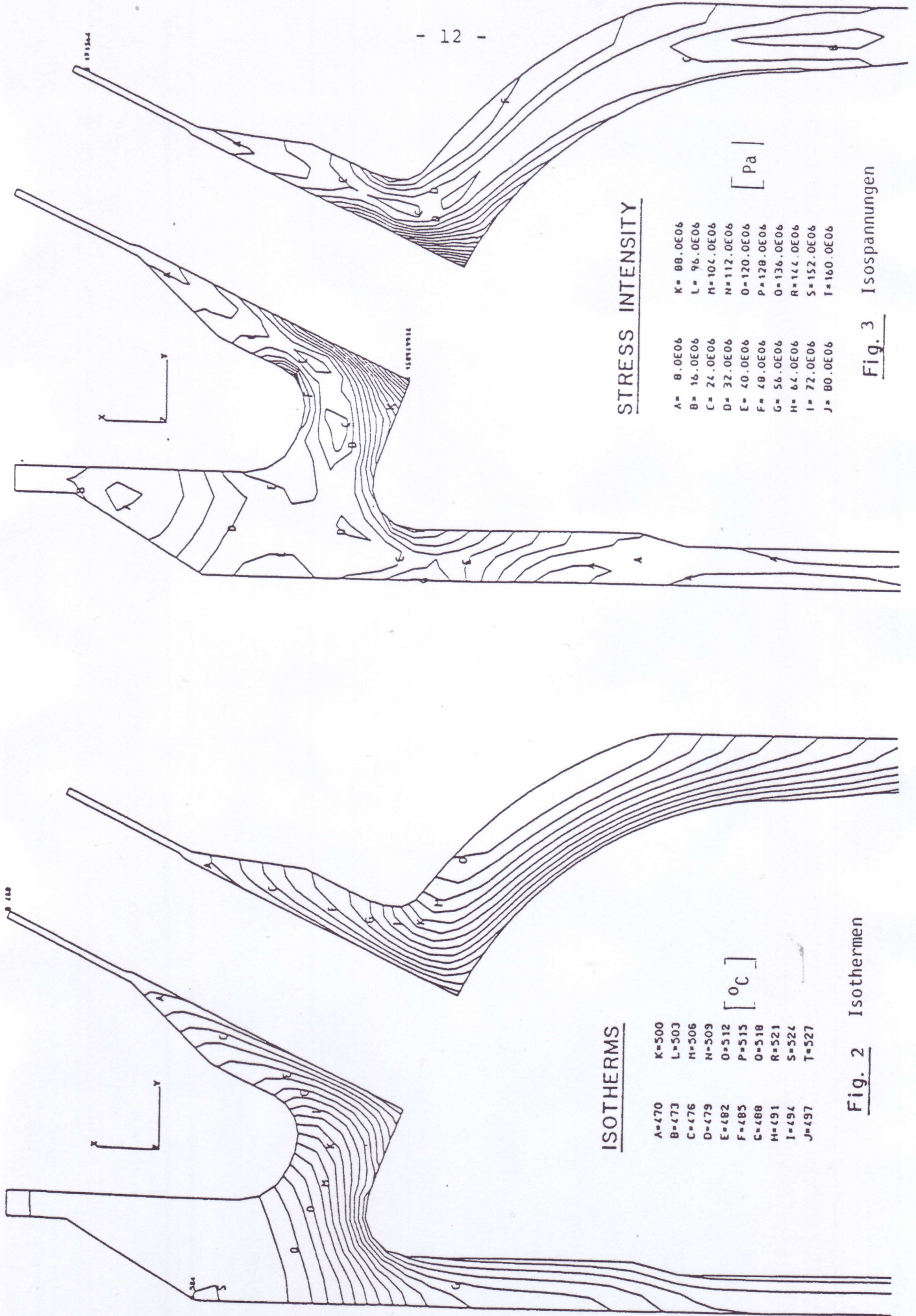


Fig. 2 Isothermen

Fig. 3 Isospannungen

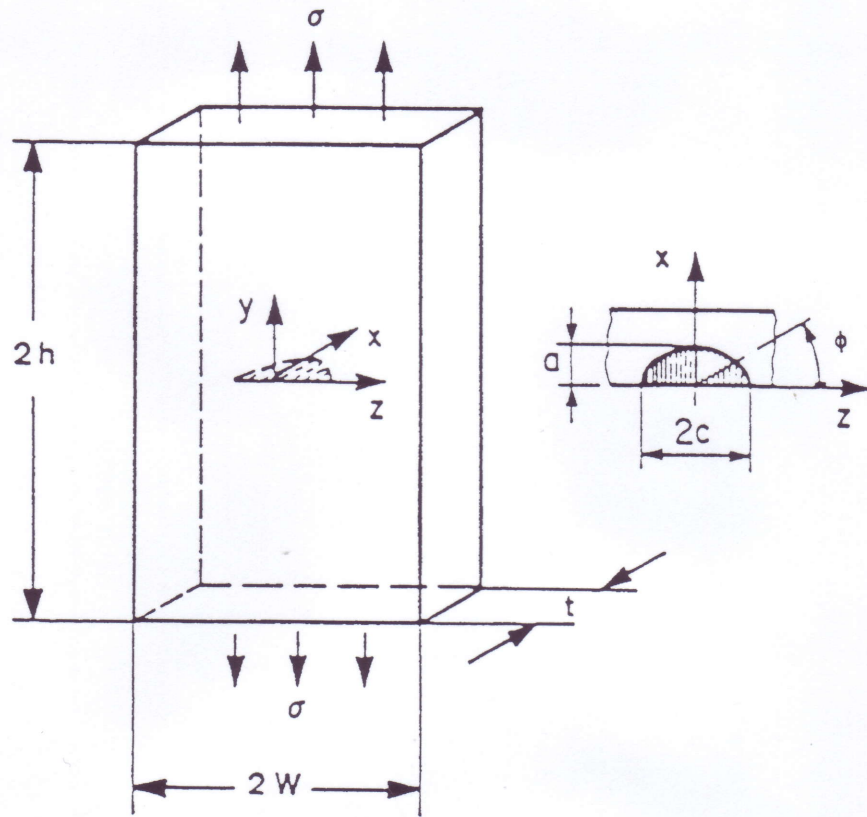


Fig. 4: Halbelliptischer Oberflächenriss in einer auf Zug beanspruchten Scheibe

A/C	A/T	PHI [°]									
		0.00	11.25	22.50	33.75	45.00	56.25	67.50	78.75	90.00	
.20	.20	.617	.650	.754	.832	.990	1.072	1.128	1.161	1.173	I
.40	.20	.767	.781	.842	.923	.998	1.058	1.103	1.129	1.138	I
.60	.20	.916	.919	.942	.982	1.024	1.059	1.087	1.104	1.110	I
1.00	.20	1.174	1.145	1.105	1.082	1.067	1.058	1.053	1.050	1.049	I
2.00	.20	.821	.749	.740	.692	.646	.599	.552	.512	.495	I
.20	.40	.724	.775	.883	1.009	1.122	1.222	1.297	1.344	1.359	I
.40	.40	.896	.902	.946	1.010	1.075	1.136	1.184	1.214	1.225	I
.60	.40	1.015	1.004	1.009	1.033	1.062	1.093	1.121	1.139	1.145	I
1.00	.40	1.229	1.206	1.157	1.126	1.104	1.088	1.075	1.066	1.062	I
2.00	.40	.848	.818	.759	.708	.659	.609	.560	.519	.501	I
.20	.60	.899	.953	1.080	1.237	1.384	1.501	1.581	1.627	1.642	I
.40	.60	1.080	1.075	1.113	1.179	1.247	1.302	1.341	1.363	1.370	I
.60	.60	1.172	1.149	1.142	1.160	1.182	1.202	1.218	1.227	1.230	I
1.00	.60	1.355	1.321	1.256	1.214	1.181	1.153	1.129	1.113	1.107	I
2.00	.60	.866	.833	.771	.716	.664	.610	.560	.519	.501	I
.20	.80	1.190	1.217	1.345	1.504	1.657	1.759	1.824	1.846	1.851	I
.40	.80	1.318	1.285	1.297	1.327	1.374	1.408	1.437	1.446	1.447	I
.60	.80	1.353	1.304	1.265	1.240	1.243	1.245	1.260	1.264	1.264	I
1.00	.80	1.464	1.410	1.314	1.234	1.193	1.150	1.134	1.118	1.112	I
2.00	.80	.876	.839	.775	.717	.661	.607	.554	.513	.496	I

Tabelle 2: Werte der Korrekturfunktion F (a/c, ϕ , a/t) nach den dreidimensionalen FE-Berechnungen von Raju und Newman für den Oberflächenriss in zugbeanspruchter Scheibe

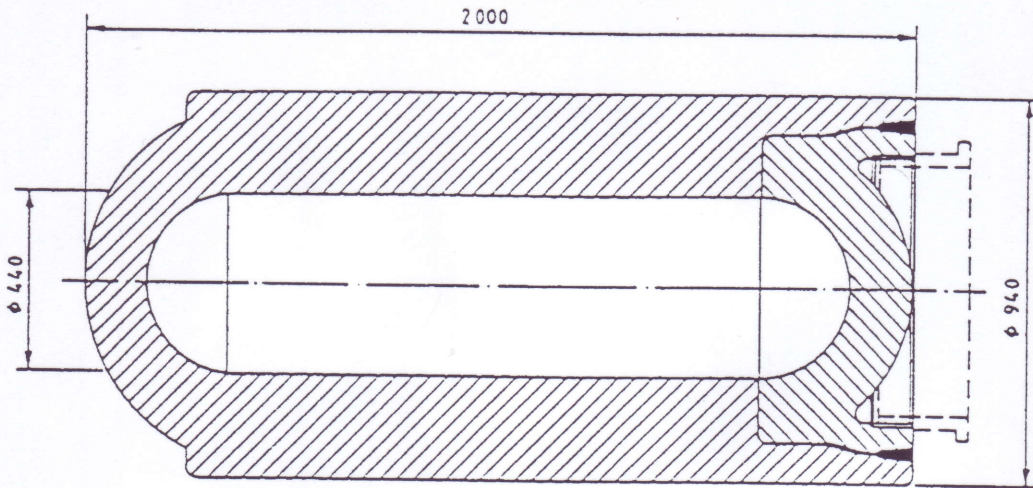
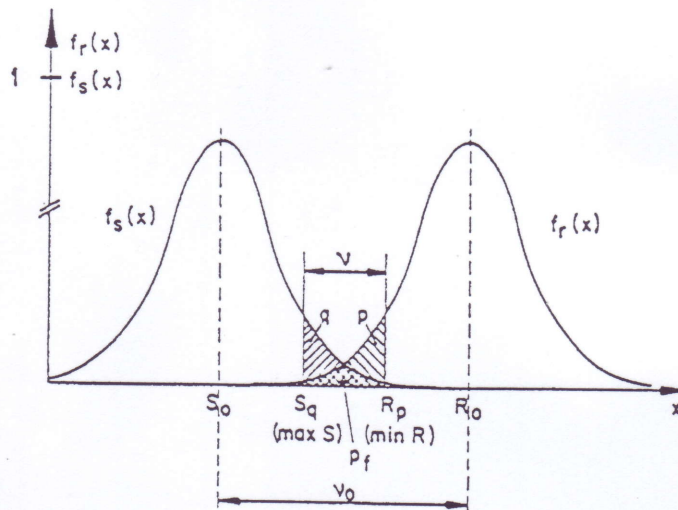


Fig. 5: Der dickwandige Behälter



- S_0 - Mittelwert der Last, z. B. Aussendruck
- R_0 - Mittelwert der Festigkeit, z. B. Druck b. Einbeulen
- S_q - "maximale" Last
- R_p - "minimale" Festigkeit
- p, q - Fraktilien
- $v_0 = R_0/S_0$ - zentraler Sicherheitsfaktor
- $v = R_p/S_q$ - Sicherheitsfaktor
- P_f - Versagenswahrscheinlichkeit
- $f_s(x)$ - Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Last
- $f_r(x)$ - Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Festigkeit

Fig. 6: Darstellung der Versagenswahrscheinlichkeit mit dazugehörigen Bezeichnungen