

Einsatzmöglichkeiten der FEM für die Berechnung von Armaturenbauteilen

Clemens Merten, Uwe Krieg, Hans Baumgarten

1. Einleitung

Armaturenbauteile sind aufgrund ihrer komplizierten Geometrie (Bild 1) einer genauen Analyse des Spannungszustandes und Funktionsverhaltens nur schwer zugänglich. Mit dem ständigen Anwachsen der Sicherheitsanforderungen im Bereich der Kraftwerks- und Spezialarmaturen werden detailliertere Kenntnisse über den Beanspruchungszustand der Bauteile notwendig. Die Finite-Elemente-Methode (FEM) bietet die Möglichkeit, die Berechnungsmodelle weitestgehend den realen Geometrie- und Belastungsverhältnissen anzupassen und somit die Zuverlässigkeit der gewonnenen Aussagen zu erhöhen. Aus diesem Grunde gewinnt auch bei der Armaturenauslegung diese Methode zunehmend an Bedeutung [1], [2].

Die Zuverlässigkeit einer Armatur wird im wesentlichen durch die Gewährleistung ihrer Funktion (Dichtheit der

Absperrung) und ihre sichere festigkeitsmäßige Auslegung bestimmt. Im folgenden werden Ergebnisse aus der Nutzung des FEM-Programmsystems COSAR [3] zur Untersuchung dieser Fragestellungen am Beispiel von Rundschiebern mit Keilplatten dargestellt.

2. Verformungs- und Spannungsanalyse der Keilplatte

Die konstruktive Ausbildung des Absperrkörpers ist von wesentlicher Bedeutung für das Dichtheitsverhalten des Schiebers. Bei hohen Anforderungen an die Dichtheit in der Absperrung werden Keilplatten eingesetzt. Die Platten werden in einem Halter beweglich geführt und durch eine Kugel zentral auf den Gehäusesitz geprefst.

2.1. Berechnungsmodell

Für die Vernetzung der Keilplatte wurden ausschließlich Standardstrukturen entsprechend dem COSAR-Strukturkatalog eingesetzt. Das Modell wird aus vier Standardstrukturen des Typs 803 (3D-Profilkörper) und einer Standardstruktur des Typs 307 (Zylinder mit kugelförmig konkav gekrümmter Stirnfläche) gebildet (Bild 2). Das gewählte Modell beschreibt im wesentlichen die reale Plattengeometrie. Geringfügige Idealisierungen wurden am Tellerrand vorgenommen. Der Gehäusesitz wird durch eine Standardstruktur des Typs 204 (schräg abgeschnittener Hohlzylinder) beschrieben und parallel zu den Achsen des globalen Koordinatensystems durch Federn elastisch mit den Knotenpunkten auf der Dichtflächenleiste der Keilplatte gekoppelt.

Eine Analyse des gefertigten Keilplattensortimentes zeigte nur geringe Unterschiede in den Grundformen.

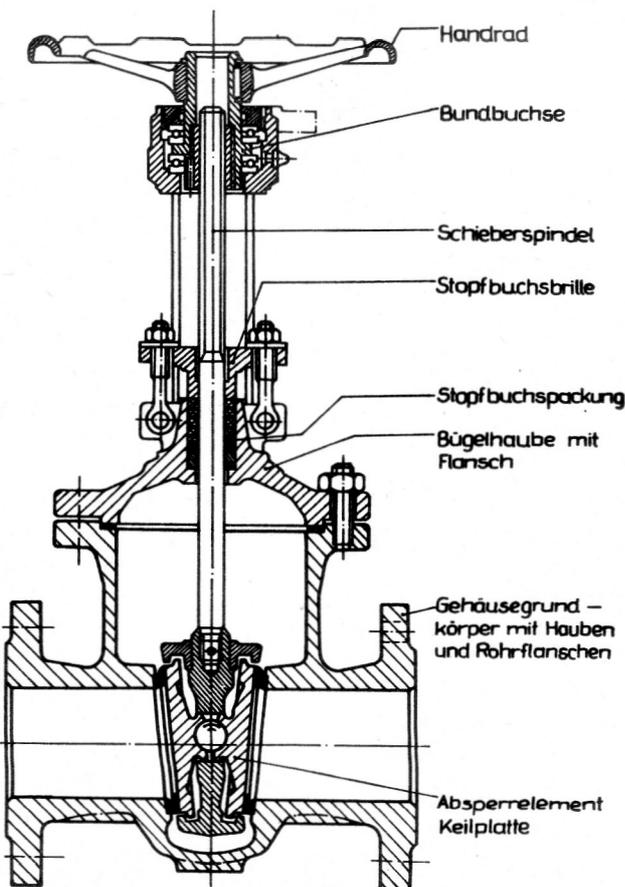


Bild 1
Geometrie eines Absperrschiebers [4]

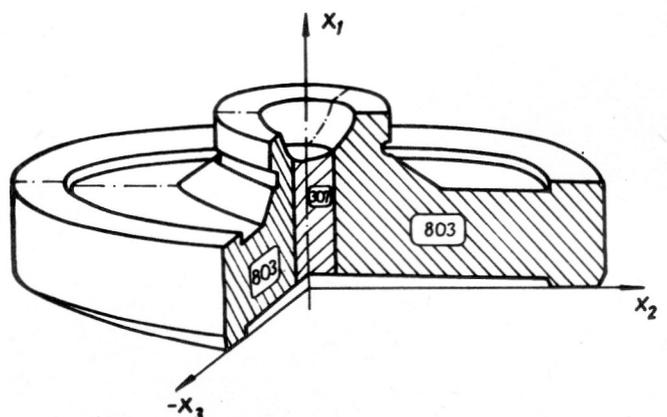


Bild 2
Modell der Keilplatte

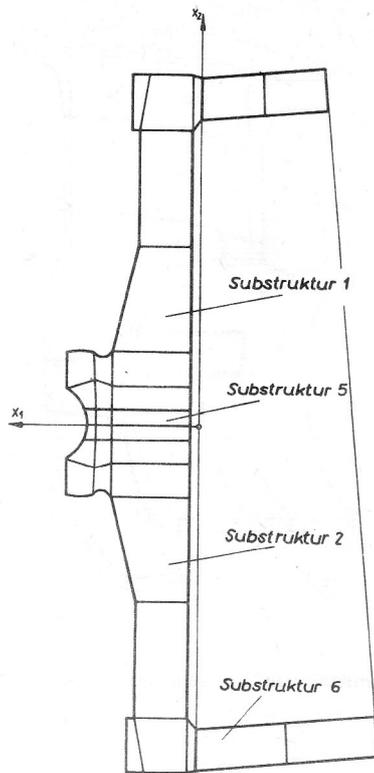


Bild 3
Vernetzung der Keilplattenabsperung

Die dargelegte Vernetzungsstrategie wurde deshalb in einem separaten Datengenerierungsprogramm umgesetzt, mit dem anhand der Konstruktionszeichnung über wenige Eingabewerte der komplette Datensatz für die Topologie- und Koordinatengenerierung im Rahmen einer COSAR-Rechnung erzeugt werden kann.

Bild 3 zeigt das FEM-Modell für die Keilplattenabsperung mit folgenden charakteristischen Daten:

Gesamtelementzahl: 156 HK60-Elemente
36 PK45-Elemente

Gesamtknotenzahl: 1543 (1115 lokale, 428 externe)

Anzahl der Strukturen: 7

Die Belastung des Bauteils wurde entsprechend dem Betriebs- und Einbauzustand analysiert. Es wurden folgende Randbedingungen und Belastungen realisiert (siehe Bild 4):

- Verhinderung der Starrkörperbewegung durch Lagerung in der Substruktur 6 (verhinderte Verschiebungen in Richtung der Achsen des strukturbezogenen Koordinatensystems)
- elastische Koppelung der Substruktur 6 mit der Dichtflächenleiste der Keilplatte
- Berücksichtigung des Innendruckes als Flächenlast p_i
- Berücksichtigung der Keilkraft F_1 als Einzellast
- Berücksichtigung einer Querkraft F_2 als Einzellast, die das Verschieben der Keilplatte auf dem Gehäusesitz simulieren soll

Die Berechnungen wurden unter Annahme eines Elastizitätsmoduls von $E = 210\,000\text{ MPa}$ und einer Querkontraktionszahl $\mu = 0,3$ durchgeführt.

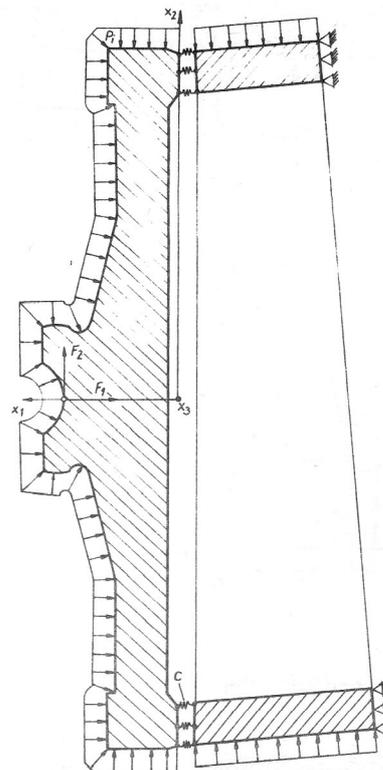


Bild 4
Belastungs- und Lagerungsbedingungen für das Keilplattenmodell

2.2. Ergebnisdarstellung und -auswertung

Die FE-Berechnungen wurden für mehrere Lastfälle durchgeführt. Ein vollständiger Rechnerlauf (komplette Datengenerierung, Verformungs- und Spannungsberechnung) auf einer Rechenanlage ES 1056 benötigt mehrere Stunden CPU-Zeit.

Als Ergebnis der Rechnung liegen für alle Knotenpunkte Verschiebungs- und Spannungswerte vor, die beispielsweise mittels Grafiksoftware in Form von Verformungs- oder Isospannungsplots ausgewertet werden können. Bei dem Modell Keilplatte stand das Verformungsverhalten und somit die Funktionsweise des Absperrorgans im Vordergrund des Interesses.

Als Beispiel wird in Bild 5 der Verformungszustand der Substrukturen 1 und 6 bei Belastung der Keilplatte durch Keilkraft und Querkraft gezeigt. Die unverformten Strukturen wurden hierbei mit Strichlinien gezeichnet. Die Verformung ist 500fach vergrößert dargestellt. Die Verformungen in der Kontaktzone zeigen, daß am Außenradius der Dichtleiste für das entsprechende Knotenpaar Zugkräfte ermittelt wurden, was einem Abheben bzw. Trennen der Dichtflächen entspricht. In einem weiteren Rechnerlauf wurden derartig reagierende Bindungen gelöst.

Ein Vergleich der Berechnungsergebnisse mit experimentellen Untersuchungen [6] bestätigt, daß das Verformungsverhalten der Absperung mit der durchgeführten FE-Analyse im wesentlichen richtig wiedergegeben wird.

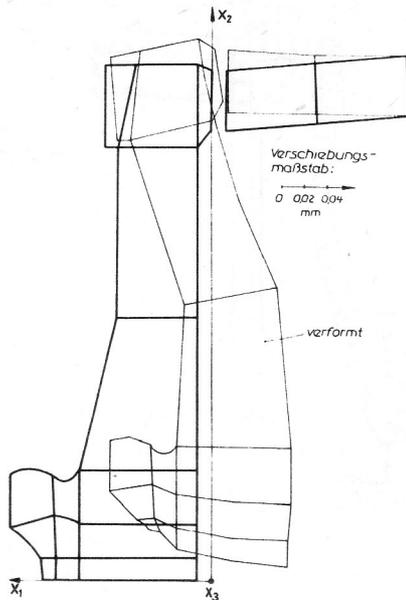


Bild 5
Verformung der Keilplattenabsperung

3. Festigkeitsberechnung des Gehäuses

Die Geometrie der Rundschiebergehäuse wird durch die Anschlußflansche, den Haubenflansch und die Durchdringung mit dem Dichtungsbereich für das Absperrelement bestimmt. Während die Flansche (bei Vernachlässigung der Schraubenlöcher) rotationssymmetrisch sind, besitzt der Durchdringungsbereich eine geometrisch komplizierte Gestalt. Für die wesentlichen Belastungsfälle gestattet die doppelte Symmetrie des Gehäusekörpers eine Reduktion des Berechnungsmodells auf ein Bauteilviertel. Diese Vereinfachung wurde auch bei den hier vorgestellten Berechnungen verwendet.

3.1. Geometrisches Modell

Im Bild 6 ist die Zerlegung des Rundschiebergehäuses in Teilstrukturen dargestellt. Für die Vernetzung der Flansche können die Standardstrukturtypen 803 und 105 des COSAR-Strukturkatalogs genutzt werden. Zur Modellierung des Durchdringungsbereiches lagen jedoch keine Standardstrukturen vor. Die Beschreibung dieses Bereiches mit Nichtstandardstrukturen erfordert vom Bearbeiter einen relativ hohen Arbeitszeitaufwand und ist aufgrund der großen Datenmenge fehleranfällig.

Zur Berechnung unterschiedlicher Nenngrößen der Rundschiebergehäuse bot es sich daher an, schieber-spezifische Standardstrukturen neu zu entwickeln. Im Rahmen dieser Entwicklung entstanden sieben weitere Strukturtypen, die nach einer Testphase in eine spezielle Verkaufsversion des Programmbausteins COSAR/Elastostatik eingegliedert wurden. Eine entsprechende Eingabevorschrift liegt in Form eines Strukturkataloges [7] vor.

Mit der Anwendung der entwickelten Strukturtypen ist die automatische Erzeugung des Berechnungsmodells mit einer wesentlich geringeren Zahl von Eingabedaten möglich, so daß die Gesamtbearbeitungszeit spürbar verkürzt werden kann. Auf diese Weise sind Variantenrechnungen

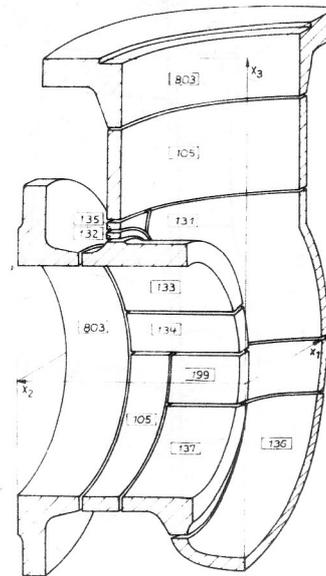


Bild 6
Teilstrukturierung für ein Rundschiebergehäuse

zur Bestimmung des Einflusses geometrischer Parameter auf das Beanspruchungsverhalten der Schiebergehäuse leichter realisierbar, und es ergibt sich die Möglichkeit, die Leistungsfähigkeit des Programmsystems bei der Festigkeitsanalyse derartiger Bauteile zu erhöhen.

Gegenwärtig erfolgt die Untersuchung der Gehäusegrößen PN16 DN100, PN40 DN100 und PN40 DN200 der Schieberbaureihe. Im Bild 7 ist die Vernetzung für die Nenngröße PN40 DN100 als Glaskörpermodell dargestellt [9]. Die dafür verwendeten Vernetzungsparameter sind in der Tabelle 1 enthalten. Insgesamt besteht das abgebildete Modell aus 307 Elementen mit 2199 Knotenpunkten. Aufgrund bisheriger Erkenntnisse kann dieses Berechnungsmodell als geeigneter Kompromiß zwischen der gewünschten Genauigkeit der Ergebnisse und dem Rechenzeitaufwand angesehen werden.

Tabelle 1
Vernetzungsparameter für das Gehäuse PN40 DN 100

Struktur-Nr.	Struktur-typ	Anzahl der Elemente	lokale Knoten	externe Knoten
1	803	56	364	23
2	803	24	175	46
3	135	1	2	18
4	131	12	69	53
5	132	4	8	48
6	133	14	88	58
7	134	14	56	90
8	199	4	8	48
9	99	7	12	60
10	136	15	90	58
11	137	12	84	38
12	105	8	36	53
13	803	40	262	86
14	803	40	158	190
15	803	56	297	147
16	0	15	490	—

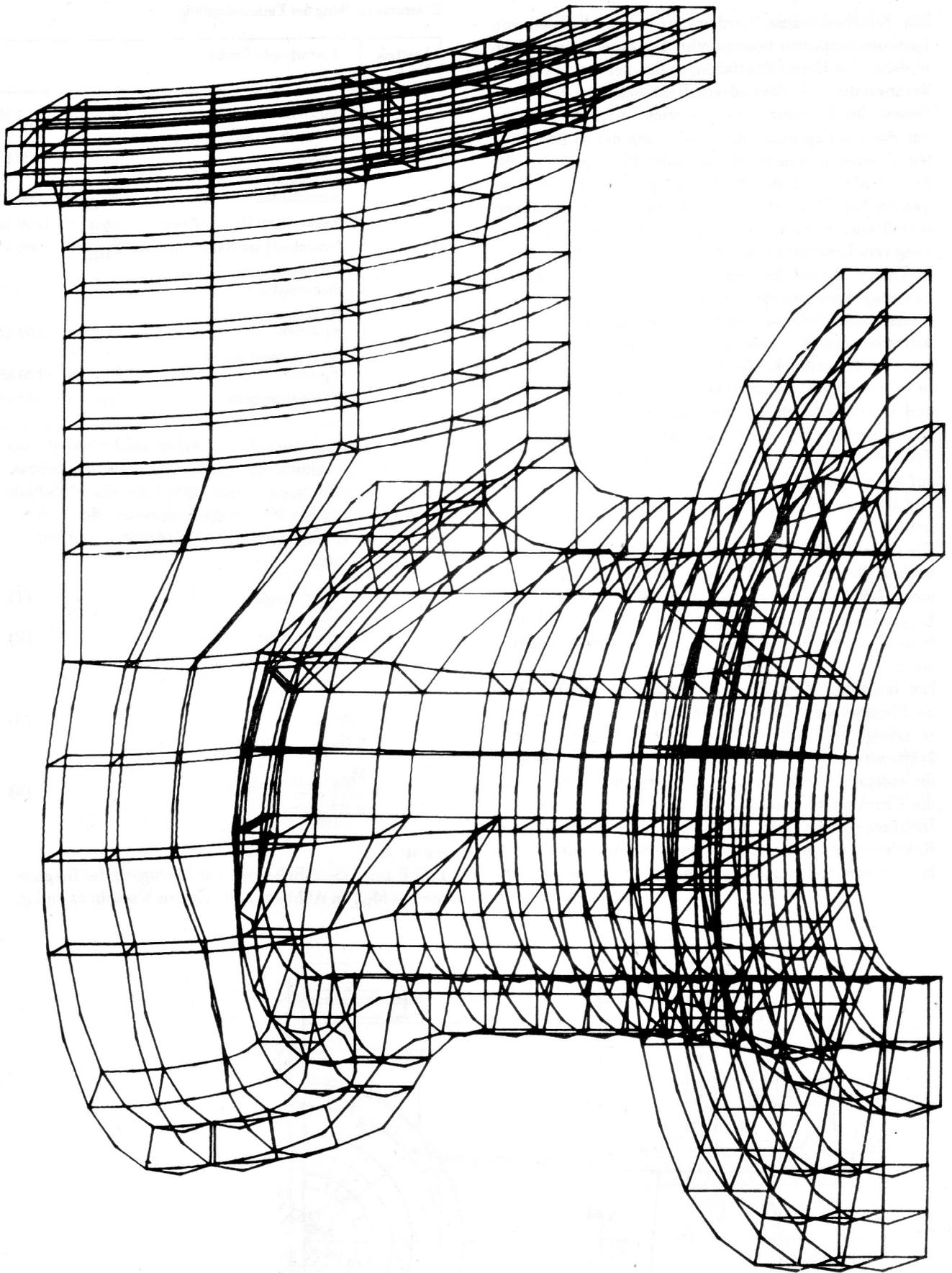


Bild 7
Glaskörpermodell des Gehäuseviertels

3.2. Mechanisches Modell

Die Schiebergehäuse werden durch eine Vielzahl von Lastkombinationen beansprucht. Die Berechnung erfolgte daher mit Einheitslastfällen, so daß bei Voraussetzung linear-elastischen Materialverhaltens beliebige Kombinationen durch Superposition erreicht werden konnten. Für die Überlagerung und Auswertung der so berechneten Ergebnisse wurde ein spezielles Programm erstellt, das ebenfalls auf der Rechenanlage ES 1056 genutzt werden kann. Damit besteht die Möglichkeit, Aussagen zum Beanspruchungsverhalten des Bauteiles bei der Wirkung verschiedener praxisrelevanter Lasten zu erhalten. In Tabelle 2 sind die Grundlastfälle für die Gehäuseberechnung zusammengefaßt. Sie ergaben sich aus einer umfassenden Analyse der Einsatzbedingungen von Absperrschiebern. Als wesentliche mechanische Lasten wirken der Innendruck, die Flächenpressung im Keildichtungsbereich im geschlossenen Zustand, die Schrauben- und Dichtungskräfte an den Flanschen sowie die Rohrlasten (axiale Zug- und Druckkräfte, Biegemomente, Torsionsmomente), die über die Rohrleitungsflansche auf das Schiebergehäuse übertragen werden. Dynamische und thermische Belastungen blieben zunächst unberücksichtigt.

Die Grundlastfälle 1 – 7 stellen für das Gehäuse Symmetrielastfälle dar; sie wurden in einem Rechnerlauf zusammengefaßt. Im Bild 8 sind hierfür die entsprechenden Lagerungsbedingungen eingetragen, wobei im Gehäuseboden zusätzlich die Starrkörperbewegung verhindert wurde.

Der Innendruck und die Pressung im Keilbereich wirken als Flächenlasten. Die Einleitung der Kräfte und Momente erfolgt in Form von Linienlasten. Die axialen Zugkräfte an den Flanschen (Lastfälle 2 und 4) werden über die entsprechenden Schraubenlochkreisdurchmesser und die Druckkräfte (Lastfälle 3 und 5) über die mittleren Dichtungsdurchmesser aufgebracht. Die Zugkräfte am Rohrleitungsflansch dienen beispielsweise zur Modellierung von Schrauben-, Innendruck- und Rohrkräften.

Tabelle 2
Zusammenstellung der Einheitslastfälle

Lastfall-Nr.	Lastart- und Größe
1	Innendruck $P_i = 1 \text{ MPa}$
2	Zugkraft am Rohrleitungsflansch $F_{ZRI} = 1000 \text{ kN}$
3	Druckkraft am Rohrleitungsflansch $F_{DRI} = 1000 \text{ kN}$
4	Zugkraft am Haubenflansch $F_{ZH} = 1000 \text{ kN}$
5	Druckkraft am Haubenflansch $F_{DH} = 1000 \text{ kN}$
6	Flächenpressung im Keildichtungsbereich $P_{SP} = 10 \text{ MPa}$
7	Biegemoment um die x_1 -Achse $M_{Bx} = 100 \text{ kNm}$
8	Biegemoment um die x_3 -Achse $M_{Bz} = 100 \text{ kNm}$
9	Torsionsmoment $M_T = 100 \text{ kNm}$

Das Biegemoment um die x_1 -Achse wird oberhalb der Mittellinie als veränderliche Linienlast über dem Schraubenlochkreisdurchmesser und unterhalb der Mittellinie über dem mittleren Dichtungsdurchmesser des Rohrleitungsflansches eingeleitet. Die Intensitäten wurden aus den Beziehungen

$$\bar{q}_{Bx1} = \bar{q}_{Bx1} \cdot \cos \omega \quad (1)$$

$$\bar{q}_{Bx2} = \bar{q}_{Bx2} \cdot \cos \varphi \quad (2)$$

mit

$$\bar{q}_{Bx1} = \frac{M_{Bx}}{\pi R_{SRI}^2} \quad (3)$$

$$\bar{q}_{Bx2} = \frac{M_{Bx}}{\pi R_{DRI}^2} \quad (4)$$

ermittelt.

Bild 8 zeigt diese Belastung zur Erzeugung des Biegemomentes M_{Bx} in Abhängigkeit von den Winkeln ω und φ .

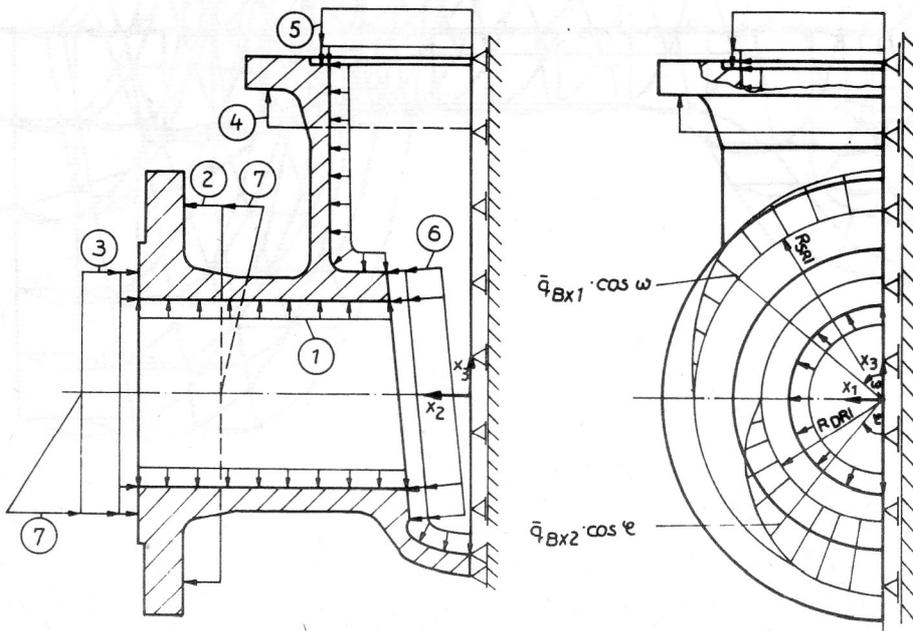


Bild 8
Lastfälle 1 – 7

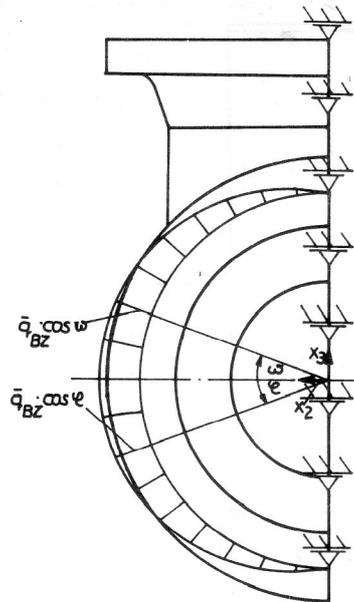
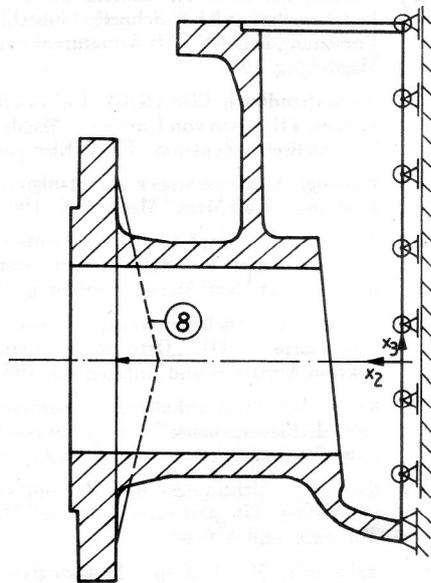


Bild 9
Lastfall 8 – Biegemoment
um die x_3 -Achse

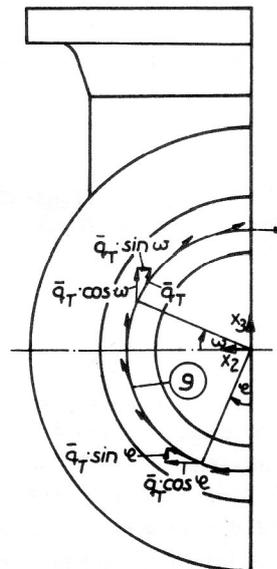
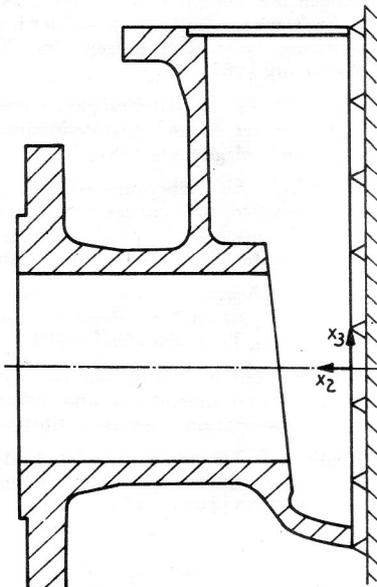


Bild 10
Lastfall 9 – Torsion

Die Grundlastfälle 8 und 9 wurden in jeweils getrennten Rechnerläufen abgearbeitet, da unterschiedliche Randbedingungen vereinbart werden mußten (Bild 9 bzw. 10). Die Wirkungslinie des Torsionsmomentes befindet sich über dem mittleren Dichtungsdurchmesser des Rohrleitungsflansches.

Die tangential wirkende Linienlast \bar{q}_T wurde nach der Beziehung

$$\bar{q}_T = \frac{M_T}{2\pi R_{DRI}^2} \quad (5)$$

berechnet.

3.3. Berechnungsergebnisse

Zur Ermittlung des Verformungs- und Spannungszustandes in Armaturengehäusen mit Hilfe der vorgestellten

dreidimensionalen Finite-Elemente-Modelle waren mehrere Stunden CPU-Zeit erforderlich. Die Ergebnisauswertung für die genannten Einheitslastfälle erfolgte unter Nutzung der COSAR-Prozessoren FEGRAF und FE-CURV.

Im Bild 11 ist als Beispiel die Verformung einer Symmetrieschnittfläche des Gehäuses dargestellt. Als Belastungsgrößen wurden hierbei der Innendruck mit 4 MPa, eine axiale Druckkraft am Rohrleitungsflansch von 100 kN sowie die erforderlichen Dichtungs- und Schraubenkräfte aufgebracht. Aus dem abgebildeten Verformungsverhalten können Rückschlüsse auf die Dichtigkeit der Armatur gezogen werden.

Die ermittelten Spannungen überschreiten nur im Durchdringungsbereich den zulässigen Wert von 134 MPa ([8]). Diese Spannungen stellen jedoch lokale Spitzenwerte dar, die nicht zum Versagen des Bauteiles führen werden.

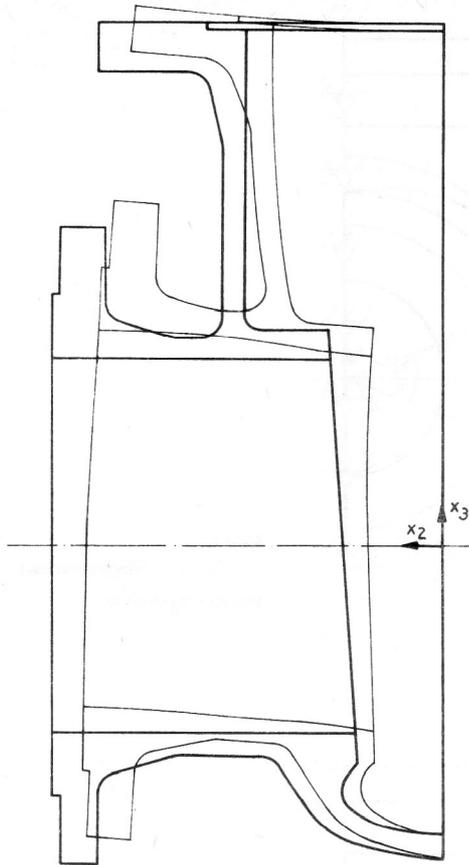


Bild 11
Verformung des Gehäuses unter Wirkung des Innendrucks, Druckkräften am Rohrleitungsflansch sowie Dichtungs- und Schraubenkräften

4. Zusammenfassung

Das Finite-Elemente-Programmsystem COSAR wurde sowohl für die Verformungsberechnung von Absperrorganen als auch für die Festigkeitsanalyse komplizierter Schiebergehäusegeometrien eingesetzt. Wenn für die Erfassung des geometrischen Modells Standardstrukturen verwendet werden können, ist der Aufwand zur Erstellung des Eingabemodells auch bei umfangreichen 3D-Modellen vertretbar. Aus diesem Grunde wurde für Durchdringungszonen zwischen Gehäusegrundkörper und Flanschansätzen ein spezieller Standardstrukturkatalog entwickelt, der den COSAR-Strukturkatalog bei der Anwendung auf armaturenspezifische Geometrien ergänzt.

Für die Bereitstellung der Eingabedaten derartiger Sonderstrukturen und für die Weiterverarbeitung der COSAR-Berechnungsergebnisse (z. B. Lastfallüberlagerungen u. a.) außerhalb des COSAR-Rechnerlaufes wurden spezielle Prozessoren entwickelt, die den Arbeitszeitaufwand bei der komplexen Untersuchung räumlicher Finite-Elemente-Modelle wesentlich reduzieren.

LITERATUR

- [1] Gikadi, T.; Heep, C.: Hohe Sicherheit und optimale Ausnutzung bei der Auslegung der drucktragenden Bauteile von Kraftwerksarmaturen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode. 3R international 25 (1986), Heft 9, S. 464 – 472.

- [2] Merten, W.; Nitz, T.; Merten, C.; Reinhardt, M.: Festigkeitsberechnung KKW-Schnellschlußschieber PN64 DN450. Forschungsbericht, VEB Armaturenkombinat „Karl Marx“ Magdeburg, 1987.
- [3] Nutzerhandbuch COSAR/84. Universelles FE-Programmsystem, TH „Otto von Guericke“ Magdeburg, Methodisch-Diagnostisches Zentrum „Finite Elemente“, 1985.
- [4] Katalog: Absperrschieber aus Stahlguß. VEB Armaturenkombinat „Karl Marx“ Magdeburg, 1985.
- [5] Merten, C.: Genplat: Dialogorientiertes Datengenerierungsprogramm für Keilschieberplatten. VEB Armaturenkombinat „Karl Marx“ Magdeburg, 1987.
- [6] Richter, U.: Dichtheitsverhalten von Absperrschiebern. Diplomarbeit, TH „Otto von Guericke“ Magdeburg, Sektion Apparate- und Anlagenbau, 1982.
- [7] Krieg, U.: Strukturkatalog Armaturen; 1. Teilkatalog: „Rundschiebergehäuse“. TU „Otto von Guericke“ Magdeburg, Sektion Apparate- und Anlagenbau, 1987.
- [8] Krieg, U.: Belastungs- und Beanspruchungsanalyse. Diplomarbeit, TH „Otto von Guericke“ Magdeburg, Sektion Apparate- und Anlagenbau, 1985.
- [9] Reinhardt, M.: Beanspruchungsanalyse von Schiebergehäusen mit der Finite-Elemente-Methode. Diplomarbeit TU „Otto von Guericke“ Magdeburg, Sektion Apparate- und Anlagenbau, 1987.
- [10] Krieg, U.; Lewin, G.: Zur Anwendung und Leistungsfähigkeit der Finite-Elemente-Methode für Bauteilberechnungen mit komplizierten Geometrien und Belastungen. 7. Fachtagung „Fortschritte bei der Konstruktion und Berechnung von Ausrüstungen des Chemieanlagenbaus“. Magdeburg 1987.
- [11] Krieg, U.; Lewin, G.: Festigkeitsberechnung von Armaturen mit der Finite-Elemente-Methode. 12. Fachtagung Armaturen, Magdeburg 1987.
- [12] Steimel, J.: Ein Näherungsverfahren zur Berechnung der Verformungen, Spannungen und Dehnungen in Rohr- und Apparateflanschen, entwickelt mit der Methode der Finiten Elemente. Dissertation, TH Darmstadt 1980.
- [13] Taqi, S.: Theoretische und experimentelle Untersuchung zur konstruktiven Gestaltung von Armaturengehäusen. Dissertation, TU Berlin (West) 1981.
- [14] Rost, M.: Zur Beanspruchung von senkrechten Abzweigungen durch Innendruck und äußere Kräfte und Momente. Dissertation, Universität Stuttgart 1976.
- [15] Theilig, M.: Dreidimensionale Analyse rechtwinkliger Rohrverzweigungen mit finiten Elementen. Maschinenbautechnik 33 (1984), Heft 2, S. 69 – 73.