

## Festigkeitsberechnung eines Bremsträgers mittels der Finite-Elemente-Methode

Armin Korm

### Einleitung

Die Qualität des Fahrkomforts eines Personenkraftwagens und seine Fahrstabilität hängt u. a. mit von den ungefederten Massen seiner Achsen ab. Aus diesem und aus materialökonomischen Gründen wird bei diesen Baugruppen verstärkt extremer Leichtbau angestrebt. Damit wächst das Risiko einer Unterdimensionierung, wobei die ausreichende Lebensdauer dieser für die Verkehrssicherheit wichtigen Aggregate in Frage gestellt ist. Ihr Versagen löst meist tragische Folgen aus.

### Problemstellung

Das Festigkeitsverhalten o. g. Bauteile, zu denen auch der hier zu berechnende Bremsträger einer Scheibenbremse gehört (vgl. Bild 1) ist deshalb von großer Wichtigkeit. Um neben der Haltbarkeit auch eine optimale Beanspruchung „hineinkonstruieren“ zu können, ist die Kenntnis von Deformation und Spannungsverteilung bei Belastung erforderlich.

### Lösungsweg

Für die Lösung dieses Problemes hat sich auch international die computergestützte Festigkeitsberechnung mittels der Finite-Elemente-Methode, später FEM, als dominierend herauskristallisiert. Infolge der kompakten Bauweise des Bremsträgers (relativ dickwandig) bot sich für seine wissenschaftliche Durchdringung das in der Technischen Universität „Otto von Guericke“ Magdeburg entwickelte FEM-Programmsystem, später PS COSAR, an.

Das dafür erforderliche Rechenmodell galt es mit den in diesem PS zur Verfügung stehenden unterschiedlichen Vollkörperelementen in seiner Gestalt möglichst real nachzubilden. Der dabei immense Aufwand für die Datenerstellung sollte durch den Einsatz von automatischen Datengeneratoren, die dieses PS bei bestimmten Substrukturen ebenfalls bereitstellt, auf ein Minimum beschränkt bleiben.

### Rechenmodellerarbeitung

#### Gestalt

Ausgehend von der Einzelteilzeichnung des VEB Brems-hydraulik Limbach/Oberfrohn und der mit dem PS COSAR möglichen Teilstrukturtechnik wurde das Bauteil, wie auf Bild 2 dargestellt, in 9 Substrukturen untergliedert.

Eine wesentliche Voraussetzung um das Rechenmodell zu vereinfachen war die, daß bei allen auftretenden Lastfällen immer nur ein Schenkel des gestaltlich symmetrischen Bauteils belastet wird. Damit konnte der zweite Schenkel, der analog aus den Substrukturen 3; 2; 5; 4; 7; 6; 8 und 9 bestehen würde, voll entfallen. Die Substruktur 1 mußte aber über die Symmetrie-Mittellinie hinaus im Rechenmodell realisiert werden, weil an ihrem Beginn definierte Einspannbedingungen beschrieben werden mußten. Eine in diesem Bereich aus Rechenmodellbelangen leicht von der Wirklichkeit abweichenden Gestalt hat insofern auf das Ergebnis keinen Einfluß, da infolge der Belastung und der Randbedingungen die größten Materialbeanspruchungen im Bereich der Substruktura-

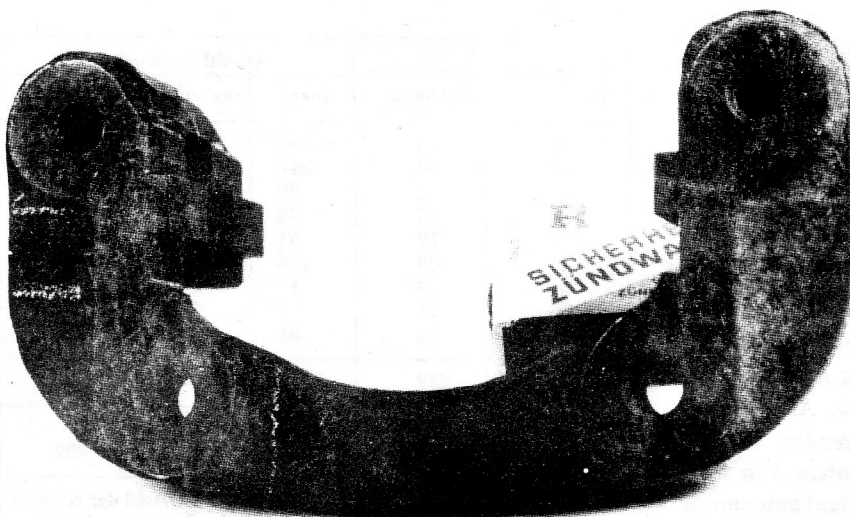
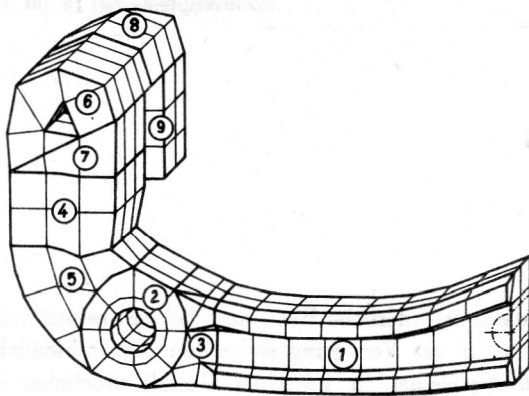


Bild 1  
Bremsträger einer PKW-Scheibenbremse



**Bild 2**  
Untergliederung des Bremsträgers in Substrukturen

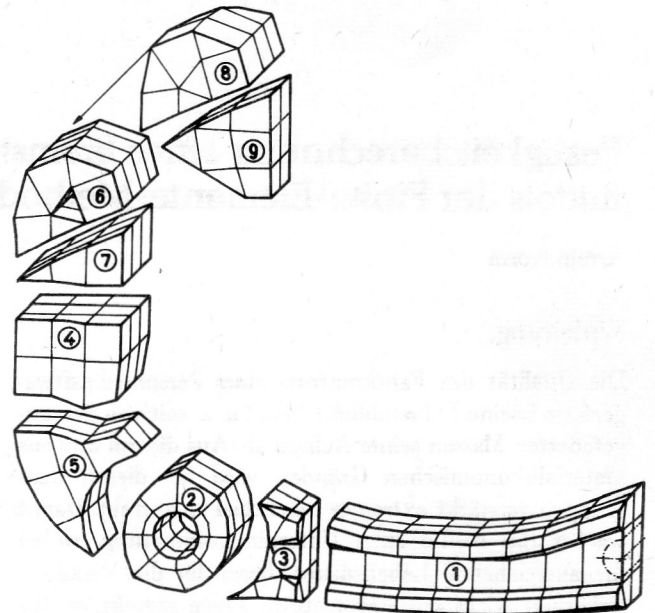
ren 2 und 3 zu erwarten waren. Deshalb wurde auf eine feinere und wirklichkeitsgetreue Vernetzung dieses Bereiches besonderer Wert gelegt, der gleichzeitig die symmetrische Gestalt des in Substruktur 1 von der Realität leicht abweichenden Bereiches mit einschließt.

Bei der maßlichen Aufteilung des verbleibenden Rechenmodells stand die geometrische Gestalt im Vordergrund. Nach Möglichkeit wurde versucht, mit sogenannten „Standardstrukturen“ auszukommen. Da sich diese durch eine bestimmte Regelmäßigkeit der Elementanordnung (Topologie) auszeichnen müssen, können sie mit einer geringeren Datenmenge beschrieben werden. Zur vollständigen geometrischen Beschreibung fast aller praktischen Rechenmodelle wird aber noch eine weitere Gruppe, die „Nichtstandardstrukturen“, benötigt. Sie dienen u. a. zur Verbindung der Standardstrukturen, weil sich diese nicht unbegrenzt an die Realität anpassen lassen. Die regellose Elementanordnung bei den Nichtstandardstrukturen bedingt aber auch eine größere Eingabedatenmenge. Um hierbei im vorliegenden Fall mit der Mindestmenge auszukommen, wurde eine besondere Nichtstandardstruktur verwendet. Bei dieser werden die Koordinaten der Knoten in den Trennflächen zu anderen Substrukturen (externe Knoten) von diesen übernommen. Somit verbleiben bei der Angabe der Knotenkoordinaten nur noch die im Inneren der jeweiligen Substruktur (lokale Knoten).

#### Umfang

Die Benummerung der einzelnen Substrukturen im Bild 2 stellt gleichzeitig die Reihenfolge der Abarbeitung dar. Nr. 1; 2; 4; 6 und 8 sind Standardstrukturen, wobei Nr. 1; 6 und 8 zum Strukturtyp „Profilkörper“, die Nr. 2 zum Strukturtyp „Hohlzylinder“ und die Nr. 4 zum Strukturtyp „Quader“ gehört. Die Nr. 3; 5; 7 und 9 sind Nichtstandardstrukturen.

Die Explosivdarstellung des Rechenmodells im Bild 3 verdeutlicht die einzelnen Trennflächen zwischen den verwendeten Teilstrukturen. Diese wiederum lassen im beschränkten Maße eine Schlußfolgerung auf den kompletten Umfang des Rechenmodelles zu. Alle Linien, auch die nicht zu den Trennflächen gehörenden, sind dabei Elementkanten. An allen Elementkantenecken wurden Elementeckknoten und in jeder Elementkantenmitte nicht eingezeichnete Mittenknoten gebildet. Aus Grün-



**Bild 3**  
Explosivdarstellung des Bremsträger-Rechenmodells

den der Übersichtlichkeit wurden in diesem Bild die unsichtbaren Konturen ausgeblendet.

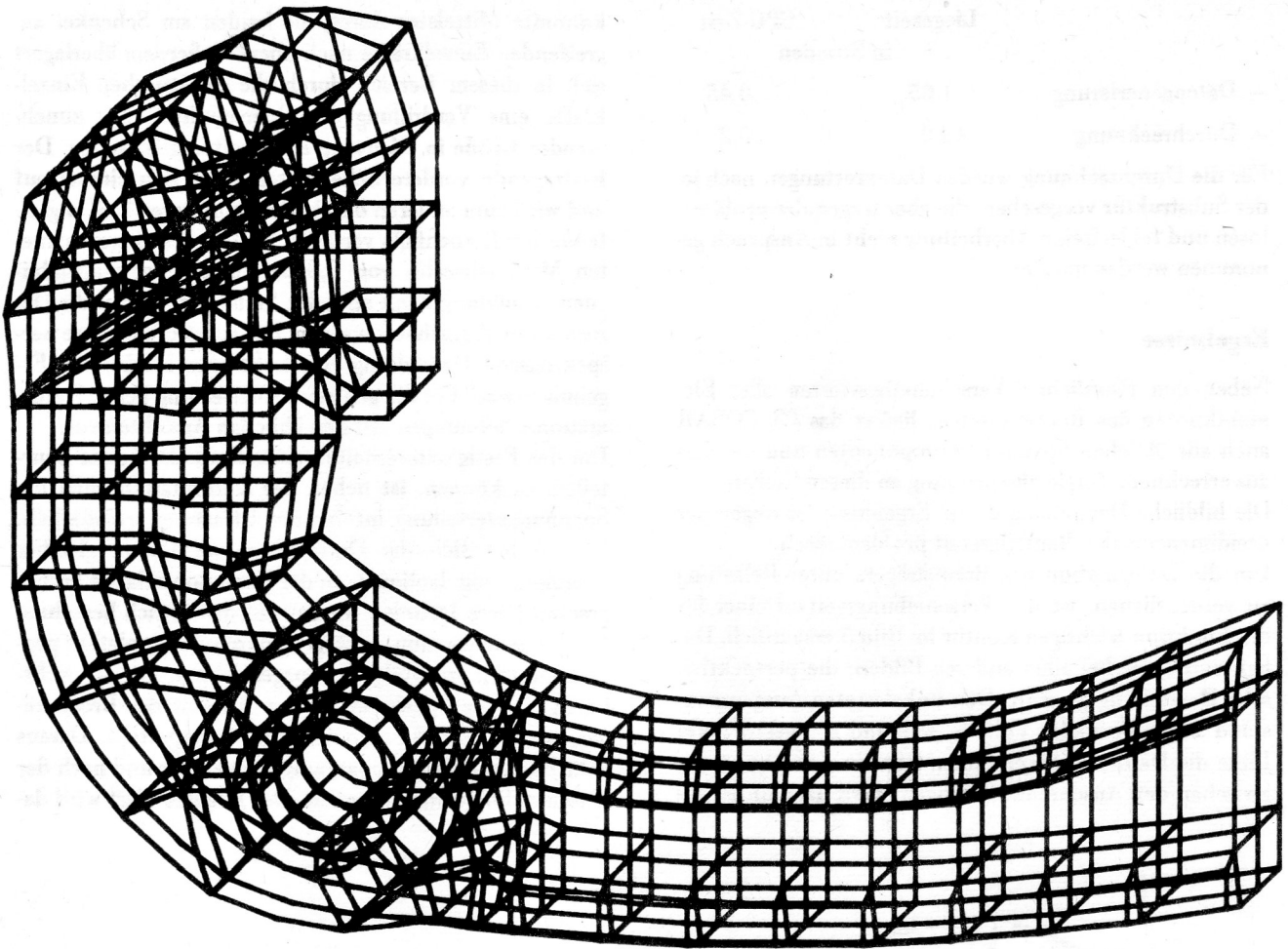
Der Gesamtumfang des Rechenmodells geht aus Bild 4 hervor, das alle Elementkanten in Glaskörperdarstellung beinhaltet. Die einzelnen Strukturen Nr. 1 bis 9 und die alles verbindende Hyperstruktur setzen sich aus der Anzahl Einzelementen und Knoten zusammen, wie sie in der Tabelle aufgeführt sind.

Auf die Unterteilung der Einzelemente in 6 verschiedene Arten konnte aus Gründen des Umfanges in diesem Artikel nicht eingegangen werden.

Für die Erarbeitung der Eingabedaten mußten schematische Zeichnungen zur strukturspezifischen Knotenbenummerung und maßstäbliche Zeichnungen (M 10 : 1) für die Darstellung der räumlichen Knotenkoordinaten erstellt werden, die auch alle unsichtbaren Bereiche berücksichtigten.

**Tabelle 1**  
Anzahl der Elemente und Knoten des Bremsträger-Rechenmodells

Substruktur-Nr.	Anzahl der Elemente	Anzahl der Knoten		
		lokal	extern	gesamt
1	64	440	39	479
2	48	248	80	328
3	23	80	79	159
4	18	72	80	152
5	18	61	80	141
6	24	104	66	170
7	9	12	73	85
8	21	79	55	134
9	14	83	29	112
<b>Summe</b>	<b>239</b>	<b>1179</b>	<b>—</b>	<b>—</b>
<b>Hyperstruktur</b>	<b>9</b>	<b>287</b>	<b>0</b>	<b>287</b>
		<b>1466 = Gesamtzahl der Knoten des Rechenmodelles</b>		



**Bild 4**  
Glaskörperdarstellung des Bremsträger-Rechenmodells

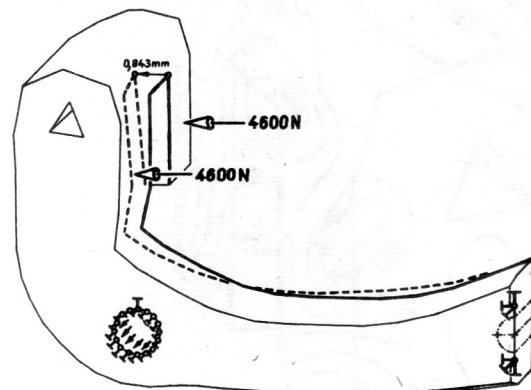
#### *Einspannbedingungen*

Zur Behinderung der Starrkörperbewegung in der Berechnung wurde das Rechenmodell in den beiden Bereichen der Anschraubgewindebohrungen real festgesetzt. So wurden in der Anfangsebene der Substruktur 1 zwei Knoten in allen 3 Koordinatenrichtungen bezüglich Verschiebung behindert. Die zweite Randbedingung wurde am inneren Knotenring der Substruktur 2 so beschrieben, daß dieser nur in Richtung der Bohrungsachse und nur ein Knoten davon zusätzlich in der Anschraubebene festgehalten wurde (siehe hierzu die Symbolik in Bild 5).

#### *Belastung*

Die hauptsächlichste Belastung des Bremsträgers resultiert aus dem Radbremsmoment, das seine Kräfte über die beiden Bremsklötzer mit je 4600 N auf die Substrukturen 4 und 9 des Schenkels abstützt (siehe hierzu Bild 5). Diese Kräfte wurden auf mehrere umliegende Knoten verteilt.

Da weiterhin der Spannungsverlauf im Bereich der Substruktur 2 von besonderem Interesse war, wurde die in der Anschraubbohrung wirkende Gewindeanzugskraft von 4500 N auf alle Innenknoten der Ebenen 2; 3 und 4 real (ungleich abfallend) verteilt.



**Bild 5**  
Randbedingungen, Belastungen und Deformation des Bremsträgers

#### *Material*

Als Werkstoffkenngrößen wurden für Stahlguß ein E-Modul von  $1,75 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$  und eine Querkontraktionszahl von 0,3 angenommen, die für das gesamte Rechenmodell gelten.

#### *Rechentechnische Abarbeitung*

Die Berechnung erfolgte auf einer Anlage ROBOTRON ES 1055. Dabei wurden die folgenden Rechenzeiten benötigt:

	Liegezeit in Stunden	CPU-Zeit
- Datengenerierung	1,65	0,45
- Durchrechnung	13,2	5,2

Für die Durchrechnung wurden Datenrettungen nach jeder Substruktur vorgesehen, die aber wegen der problemlosen und fehlerfreien Abarbeitung nicht in Anspruch genommen werden mußten.

### Ergebnisse

Neben den räumlichen Verschiebungswerten aller Elementknoten des Rechenmodells liefert das PS COSAR auch alle üblichen Spannungskomponenten und die daraus errechnete Vergleichsspannung an diesen Stellen.

Die bildliche Darstellung dieser Ergebnisse ist wegen der dreidimensionalen Bauteilgestalt problematisch.

Um die Deformation des Bremsträgers unter Belastung zu verdeutlichen, ist der Verschiebungsverlauf einer für die Funktion wichtigen Kontur im Bild 5 ersichtlich. Dabei wurde wie bei allen anderen Bildern die perspektivische Darstellung gewählt. Den unbelasteten Ausgangszustand zeigt die dicke Volllinie während die gestrichelte Linie die Deformation erkennen läßt. So streckt sich der zwischen den Anschraubbohrungen leicht nach unten ge-

krümmte Mittelsteg durch die beiden am Schenkel angreifenden Einzelkräfte nach oben. Außerdem überlagert sich in diesem Bereich durch die exzentrischen Einzelkräfte eine Verdrillung des Querschnittes, mit zunehmender Größe in Richtung der Kraftangriffsstellen. Der freitragende vordere Schenkelteil biegt sich einmal auf und wird zum anderen durch die am hinteren Teil angreifende Kraft ebenfalls verdrillt. Mittels des eingezeichneten Maximalwertes von 0,843 mm und der maßstäblichen Abbildung kann an jeder Stelle der Kontur die Deformation abgeschätzt werden. Die sonst brauchbare perspektivische Darstellung verfälscht aber hierbei das Ergebnis etwas! Für die genauere Auswertung liegen Deformationszeichnungen mit den üblichen Ansichten vor.

Um das Festigkeitsverhalten eines Bauteiles besser beurteilen zu können, ist neben der Deformation auch die Spannungsverteilung infolge der Belastung erforderlich. Hierbei hat sich die Darstellung von Linien gleicher Spannung, sog. Isolinien, an der Bauteiloberfläche durchgesetzt. Diese Isolinien werden aus den örtlich berechneten Vergleichsspannungswerten durch Interpolation programmintern ermittelt und ausgezeichnet. Für den sichtbaren Teil der perspektivischen Ansicht des Bremsträgers sind diese Isolinien im Bild 6 dargestellt. Daraus geht hervor, daß sich Spannungsspitzen vor und nach der Anschraubbohrung aufbauen. Der höchste Wert wird da-

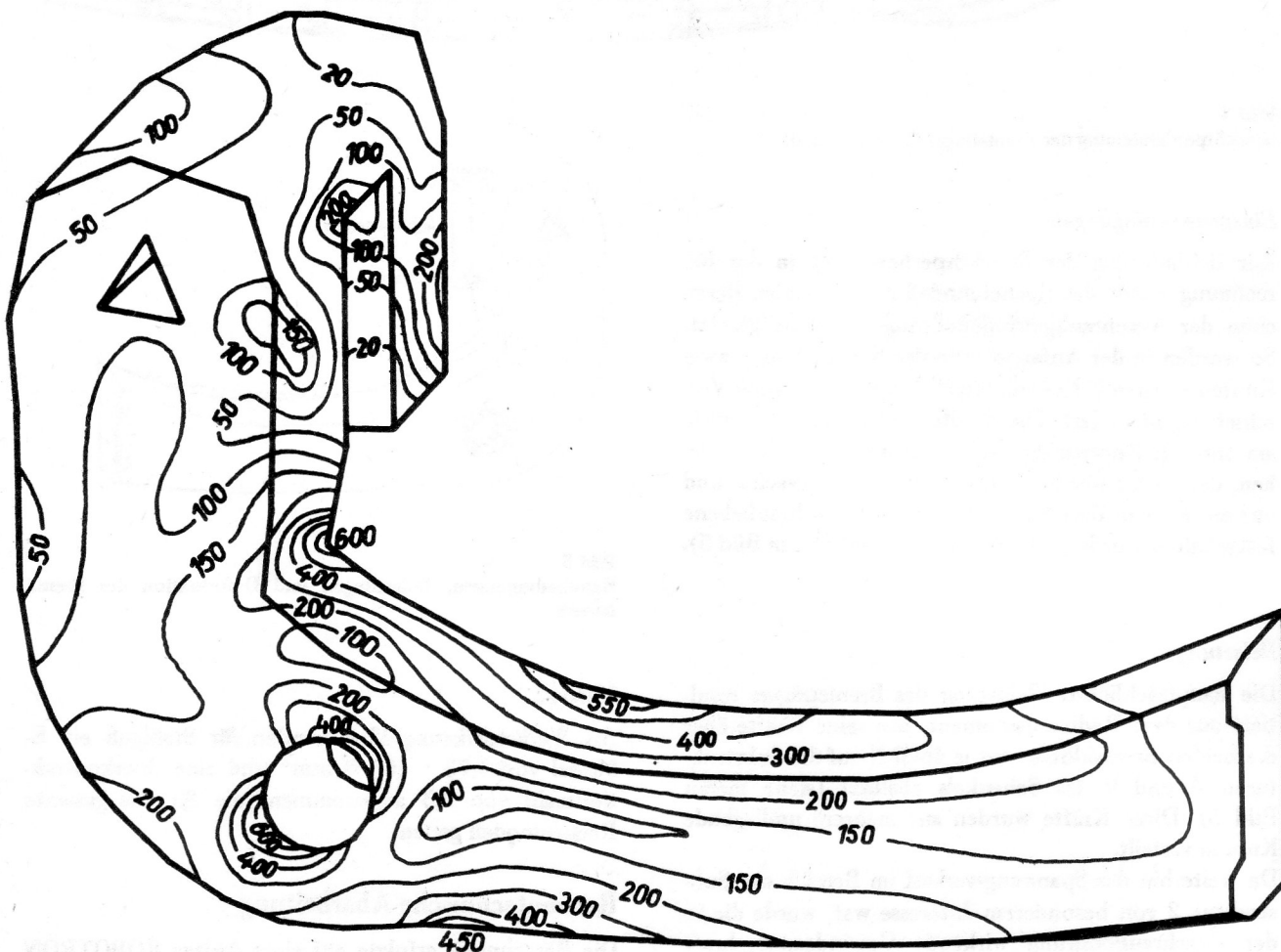


Bild 6  
Spannungsverteilung in  $N/mm^2$  im Bremsträger

bei mit über  $600 \text{ N/mm}^2$  im inneren Übergang der Substrukturen 4 und 5 registriert. Bemerkenswert hohe Spannungen mit über  $550 \text{ N/mm}^2$  treten noch im Bereich der Substruktur 3 auf. Die hohen Spannungswerte in der Anschraubbohrung sind dagegen nicht so kritisch zu bewerten, da hier die Randbedingungen FEM-verfahrensbedingt einen unrealen Einfluß ausüben.

Die absolute Höhe aller Spannungswerte erscheint für den vorliegenden Lastfall bei Berücksichtigung der FEM-Problematik ertragbar. Das niedrige Spannungsniveau im Schenkel ließ sich aus gußtechnischen Gründen noch nicht optimieren.

### **Zusammenfassung**

Aus dem Vorstehenden kann geschlußfolgert werden, daß die Finite-Elemente-Methode, vertreten durch das Programmsystem COSAR, ein gutes Hilfsmittel dar-

stellt, eine festigkeitsgerechte und materialoptimierte Konstruktion entstehen zu lassen. Die gegenwärtige Version erfordert aber bezüglich Rechenmodellauflbereitung und Ergebnisauswertung noch einen erheblichen manuellen Aufwand mit Spezialkenntnissen.

Um im Konstruktionsbereich Breitenwirksamkeit erzielen zu können, sind künftig neben einer abgestimmten Rechentechnik (Hardware) noch entsprechend nutzerfreundliche Pre- und Postprozessoren (Software) erforderlich.