

# Auslegung der Tragachse eines Raupenbaggers unter Verwendung eines dreidimensionalen FEM-Modells

Harald Berger, Walter Weese

## 1. Einleitung

Im vorliegenden Beitrag wird die Festigkeitsuntersuchung einer Raupentragachse für einen Eimerketten-schwenkbagger, der im VEB Schwermaschinenbau „Georgi-Dimitroff“ konstruiert und gefertigt wird, vorgestellt. Der Eimerkettenbagger, der im Tagebau eingesetzt wird, ist mit einem Raupenfahrwerk ausgerüstet.

Über die Tragachsen werden die Kräfte, die aus dem Baggeraufbau kommen, in die Raupenträger weitergeleitet.

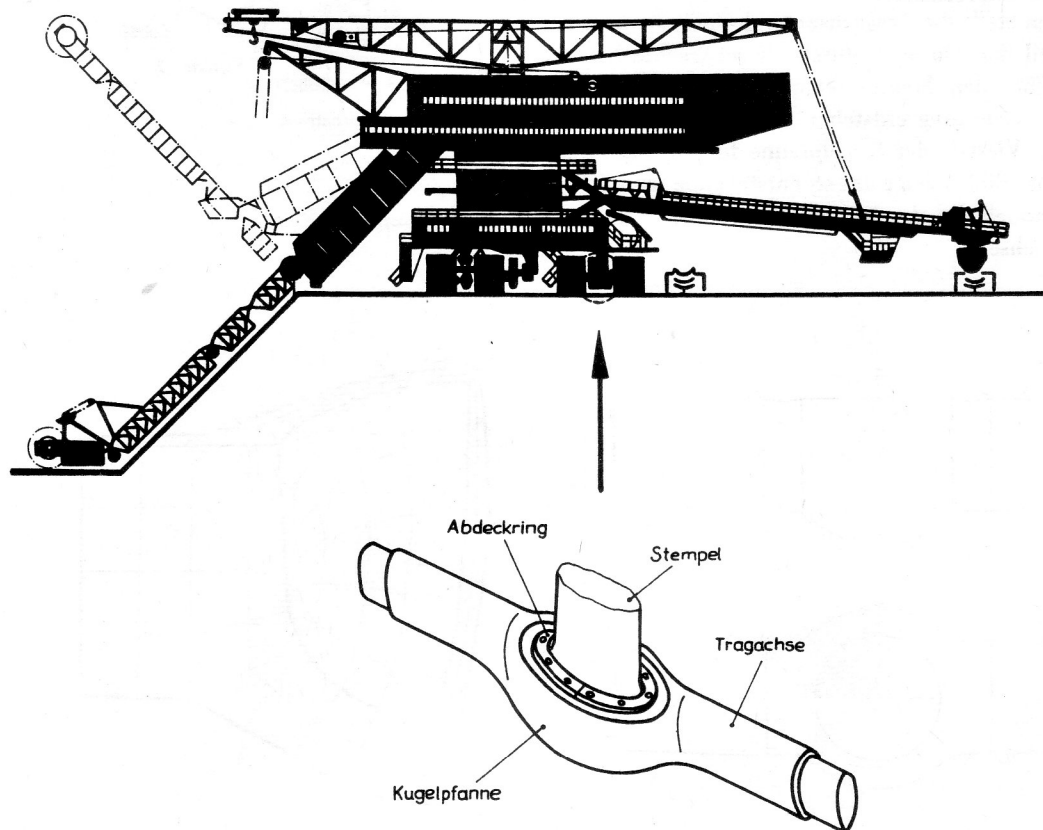
Damit stellt die Raupentragachse eines der wichtigsten Kraftübertragungsglieder am Bagger dar und gehört zu den am meisten beanspruchten Bauteilen.

Um die Manövrierfähigkeit des Fahrzeuges zu gewährleisten, muß die Achse gegenüber dem Baggeraufbau horizontal drehbar sein und eine gewisse vertikale Neigung zum Ausgleichen von Bodenunebenheiten zulassen. Aus

diesem Grund erfolgt die Krafteinleitung in die Achse über einen Stempel mit Kugelkopf, der in eine in die Tragachse eingearbeitete Kugelpfanne mit zylindrischer Öffnung eingreift. Die an den Wellenenden sitzenden Raupenträger nehmen die Kräfte auf und leiten diese über die Ketten in den Boden weiter. Bild 1 zeigt eine Prinzipskizze.

Die Achse stellt damit im Sinne der Mechanik vereinfacht gesehen einen Balken auf zwei Stützen mit einer mittigen Einzelkraft dar. Mit diesem Modell läßt sich eine Grobdimensionierung der Achse vornehmen.

Im Bereich der Kugelpfanne, wo die Stempelkraft über Flächenpressung eingetragen wird, ergibt sich jedoch ein komplizierter dreidimensionaler Spannungszustand. Hier sind genauere Untersuchungen mit zwei Zielstellungen erforderlichlich.



**Bild 1**  
Prinzipdarstellung der Raupentragachse und Lagekennzeichnung am Bagger

- a) Erfassung der entstehenden räumlichen Spannungsverteilung
- b) Erfassung der Verformung der Kugelpfanne, d. h. der Ovalisierung des kreisförmigen Pfannenquerschnitts.

Der zweite Punkt hat eine wesentliche funktionstechnische Bedeutung. Durch zu große Ovalisierung kann es zum Klemmen des Stempels kommen, womit die erforderliche Beweglichkeit der Achse nicht mehr gewährleistet ist. Hierbei ist außerdem zu beachten, daß auf den oberen Kugelpfannenrand ein Ring aufgeschraubt ist, der ein Herausrutschen des Stempels verhindern soll. Dieser Ring ovalisiert sich ebenfalls, so daß auch ein Klemmen des Stempels im Ring auftreten kann.

Für die Untersuchungen wird das FEM-Programmsystem COSAR, Teilsystem Elastostatik eingesetzt [1].

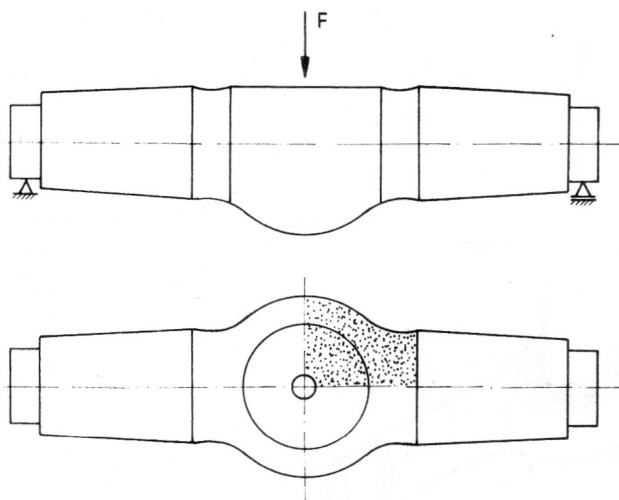
## 2. Modell und Berechnung

### 2.1. Mechanisches Modell und FEM-Modell

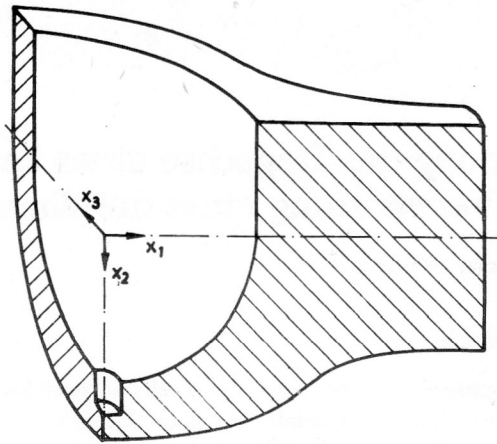
Zur realitätsnahen Ermittlung des Spannungs- und Verformungsverhaltens des Kugelpfannenbereiches der Tragachse ist ein räumliches FEM-Modell erforderlich. Um den Aufwand, der sich mit der dreidimensionalen Analyse ergibt, in vertretbaren Grenzen zu halten, sind Überlegungen für eine sinnvolle Modellgestaltung erforderlich.

Da der Kugelpfannenbereich nur etwa ein Viertel der gesamten Achsenlänge ausmacht, kann mit einem Ausschnittmodell gearbeitet werden. Für die FEM-Rechnung wird deshalb nur der Pfannenbereich mit einer Übergangszone verwendet (Bild 2). Der Anschluß zwischen restlicher Achse und Ausschnittmodell läßt sich durch Eintragen von Schnittgrößen, die aus der Balkentheorie ermittelt werden, realisieren.

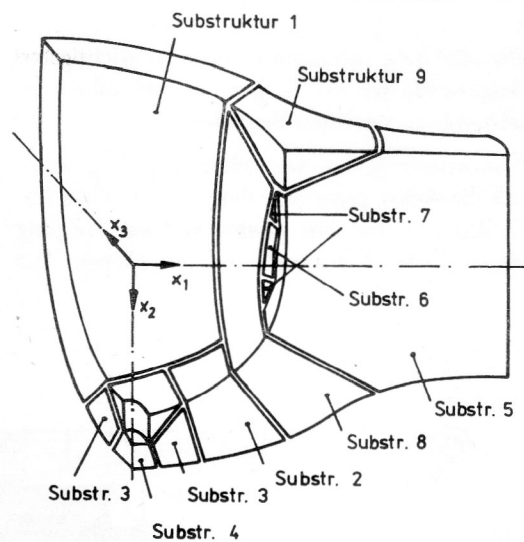
Des weiteren stellt die Tragachse ein doppelt symmetrisches Bauteil dar. Da auch durch die senkrechte Kräfteinleitung über den Stempel keine Unsymmetrien hinsichtlich der Belastung entstehen, reicht die Zugrundelegung eines Viertels der Kugelpfanne für die FEM-Berechnung aus. Bild 3 zeigt das so entstehende räumliche Ausschnittmodell für den zu untersuchenden Teil der Raupentragachse.



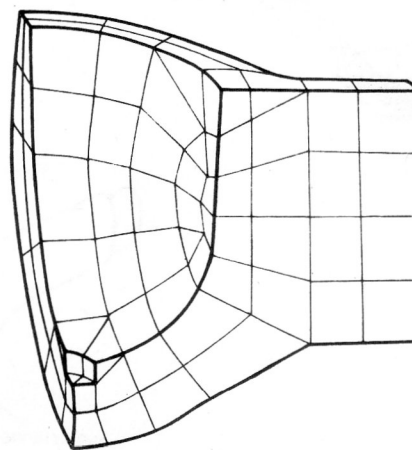
**Bild 2**  
Achse mit Kennzeichnung des Berechnungsausschnittes



**Bild 3**  
Räumliches Ausschnittmodell



**Bild 4**  
Strukturaufteilung



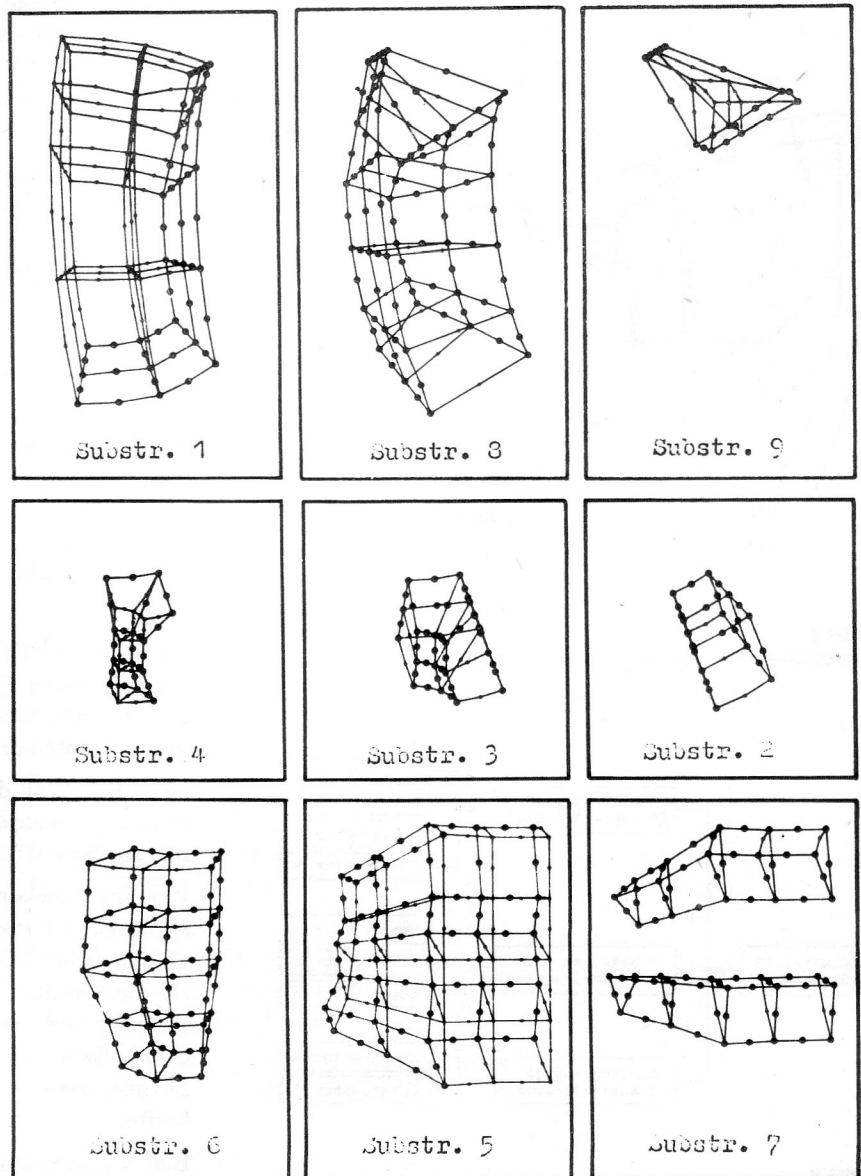
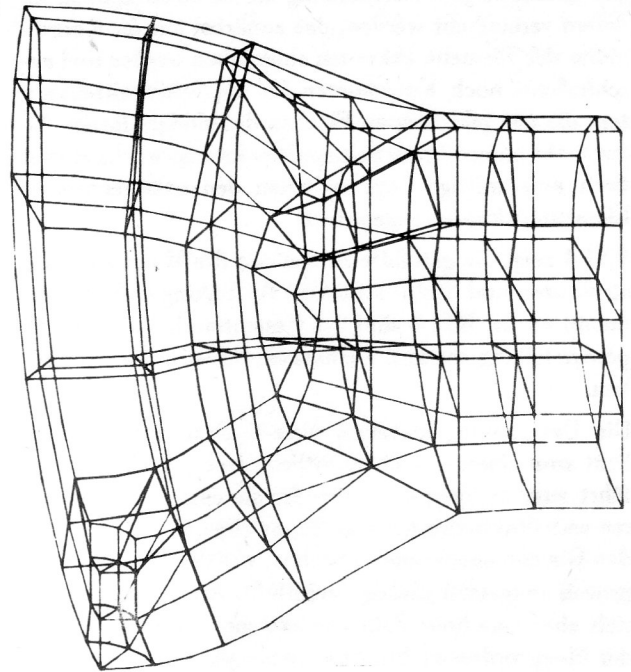
**Bild 5**  
Elementaufteilung

Es sei bemerkt, daß im Betrieb auch zusätzliche Kräfte auftreten, die zu unsymmetrischen Belastungen führen. Diese stellen jedoch Nebenlasten dar und deren Wirkung kann aus elementaren Überlegungen abgeschätzt werden.

## 2.2. FEM-Vernetzung

Das zu untersuchende Ausschnittmodell sieht zwar auf den ersten Blick nicht allzu kompliziert aus, läßt sich jedoch nicht so einfach vernetzen. Das Problem liegt in der Erfassung des Übergangsbereiches zwischen der Kugel- und Zylindergeometrie der Pfanne und der senkrecht dazu liegenden Zylindergeometrie des Achsenansatzes.

Um den Datenaufbereitungsaufwand so gering wie möglich zu halten, ist eine Aufteilung des Modells in Substrukturen unter Beachtung des im Programmsystem COSAR zur Verfügung stehenden Standardstrukturkataloges notwendig [2]. Dabei zeigt sich, daß aufgrund der oben erwähnten Problematik keine Standardgeometrien eingesetzt werden können. Es läßt sich jedoch eine Substrukturaufteilung finden, die zu 70 % die Generierung von Standardtopologien (automatische Zuordnung der Knotennummern zu den Elementen) ermöglicht.

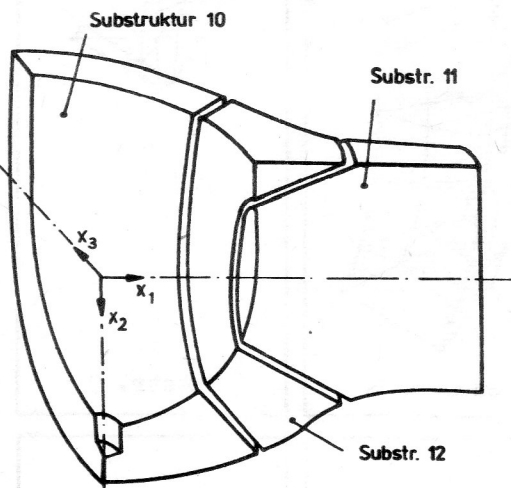


**Bild 6**  
Gesamtmodell und Substruktur  
in Glaskörperdarstellung

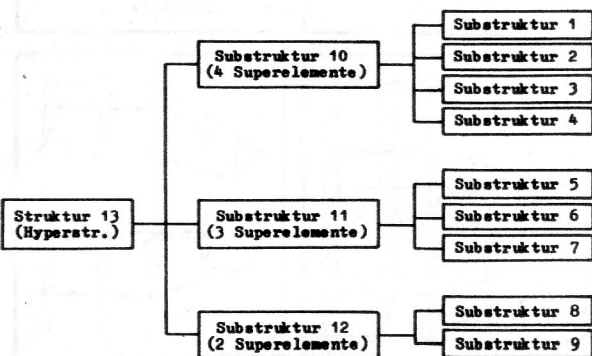
Die geometrische Beschreibung der Strukturen kann insofern vereinfacht werden, daß zunächst nur die Koordinaten der Elementeknoten eingegeben werden und anschließend noch Koordinaten für die Seitenmittenknoten, die auf gekrümmten Flächen des Modells liegen. Allen nicht aufgeführten Seitenmittenknoten wird automatisch eine mittige Lage zwischen den entsprechenden Elementeknoten zugeordnet.

Bild 4 zeigt die gewählte Aufteilung des Modells in Substrukturen und Bild 5 deutet die Aufteilung in finite Elemente an. In Bild 6 sind das Gesamtmodell in Glaskörperdarstellung sowie die einzelnen Substrukturen zu sehen.

Die Unterteilung in relativ viele Substrukturen ermöglicht zum einen eine übersichtliche Netzgenerierung und führt zum anderen dazu, daß für die einzelnen Strukturen verhältnismäßig niedrige Bandweiten für die zu lösenden Gleichungssysteme entstehen, was den Berechnungsprozeß zeitgemäß günstig beeinflusst. Andererseits ergibt sich aber eine hohe Zahl von externen Knoten, was bei der übergeordneten Struktur zu einem System mit vielen Gleichungen und großer Bandweite aufgrund der starken Verzahnung der Substrukturen führt. Deshalb



**Bild 7**  
Darstellung der übergeordneten Strukturen



**Bild 8**  
Strukturhierarchie

**Tabelle 1**  
Zusammenstellung der wesentlichen Parameter für die einzelnen Strukturen

Strukt.	Elem.	lokale Knoten	externe Knoten	Knoten gesamt	Bandweite	Standardstruktur
1	16	88	53	141	99	-100
2	2	3	29	32	6	-100
3	4	6	45	51	12	-100
4	6	25	29	54	39	-1
5	16	74	81	155	72	-100
6	8	13	76	89	24	-100
7	8	4	80	84	6	-1
8	10	15	93	108	15	-100
9	4	16	21	37	42	-1
10	4	48	45	93	135	0
11	3	73	53	126	219	0
12	2	3	98	101	9	0
13 (H)	3	98	-	98	294	0

wird bei dem vorliegenden Modell die in COSAR mögliche mehrstufige Substrukturtechnik angewendet. Dazu werden jeweils mehrere Substrukturen zu übergeordneten neuen Substrukturen zusammengefaßt und diese übergeordneten Substrukturen bilden die Hyperstruktur.

Bild 7 zeigt die Aufteilung in übergeordnete Substrukturen und Bild 8 gibt eine Übersicht über die hierarchische Anordnung der einzelnen Strukturen.

Tabelle 1 enthält die wesentlichen Parameter für die einzelnen Strukturen. Die Elemente der übergeordneten Strukturen 10, 11 und 12 sind sogenannte Superelemente, die aus den Ausgangsstrukturen abgeleitet werden. Die Struktur 13 ist die Hyperstruktur.

Insgesamt besteht das Vernetzungsmodell aus 74 finiten Elementen (Hexaederelemente HK60 und Pentaederelemente PK45) und 466 Knotenpunkten, was einer Gesamtfreiheitsgradzahl von 1398 entspricht.

### 2.3. Belastung und Randbedingungen

Die Belastung aus der Stempelkraft wirkt als Flächenpressung auf die untere Hälfte der Kugelpfanne. Für die Lasteintragung wird die Stempelkraft in eine normal wirkende Flächenlast mit sinusförmiger Verteilung umgerechnet und die sich ergebenden Intensitäten werden an den zur belasteten Fläche gehörenden Knoten eingetragen.

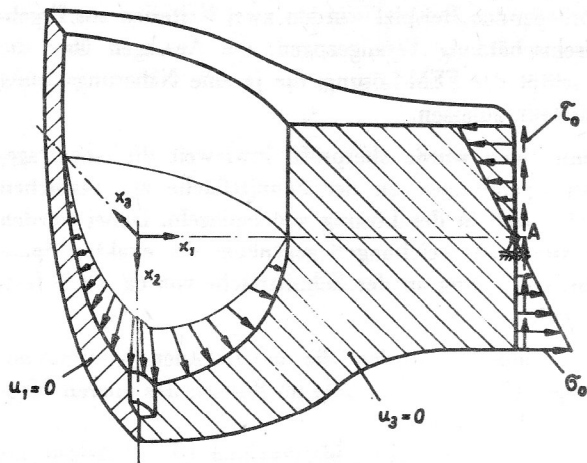
An der Schnittfläche zur restlichen Achse werden die aus der elementaren Biegetheorie ermittelten Schnittkräfte in Flächenbelastungen umgerechnet und die Intensitäten an den Knoten der Schnittfläche eingetragen.

Zur Einhaltung der vorausgesetzten Symmetrie werden in den Symmetrieschnittflächen die Verschiebungen normal zur Schnittfläche verhindert.

Um eine Starrkörperverschiebung in  $x_3$ -Richtung auszuschließen, ist zusätzlich die Verschiebungsverhinderung eines beliebigen Knotens in dieser Richtung erforderlich. Da die Resultierenden in  $x_3$ -Richtung aus der Flächenpressung und der eingetragenen Schubspannung an der Schnittfläche im Gleichgewicht stehen, liefert die zusätzliche verhinderte Verschiebung ohnehin keine Lagerkräfte.

Bild 9 gibt einen Überblick über die eingetragenen Belastungen und Lagerungen.





**Bild 9**  
Belastung und Randbedingungen

#### 2.4. Materialeigenschaften

Die Tragachse besteht aus hochwertigem Stahl und stellt ein Schmiedeteil dar. Das Material ist als homogen zu betrachten, so daß zur Beschreibung der Werkstoffeigenschaften die Angabe eines einheitlichen Elastizitätsmoduls sowie einer einheitlichen Querkontraktionszahl für alle Strukturen ausreicht.

#### 2.5. Durchführung der Rechnung

Die Berechnung erfolgte auf der Rechenanlage ES 1040. Zusätzlich wurden für grafische Ausgaben der Zeichentisch DIGIGRAF sowie zur dialoggeführten Netzkontrolle am Grafikbildschirm der AKT A 6454 genutzt.

Insgesamt gliederte sich die Berechnung in folgende Abschnitte:

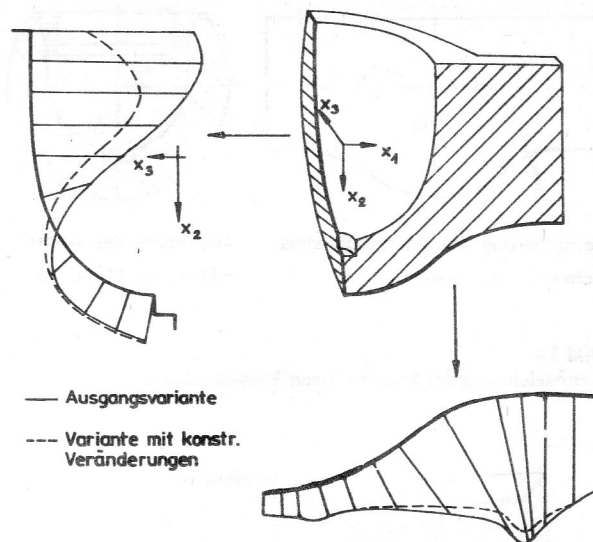
- a) Durchführung der Netzgenerierung und Kontrolle des Netzes am Bildschirm sowie Ausgabe über Zeichentisch
- b) Durchführung der Belastungsgenerierung und Kontrolle der Resultierenden der eingetragenen Flächenlasten
- c) Gesamtgenerierung des Modells
- d) Durchführung der FEM-Rechnung in mehreren Rechnerläufen, wobei in einem Rechnerlauf immer eine bestimmte Anzahl von Substrukturen abgearbeitet wurde.
- e) Ausgabe der Ergebnisse entsprechend einer vorgegebenen Auswahlform.

### 3. Ergebnisse

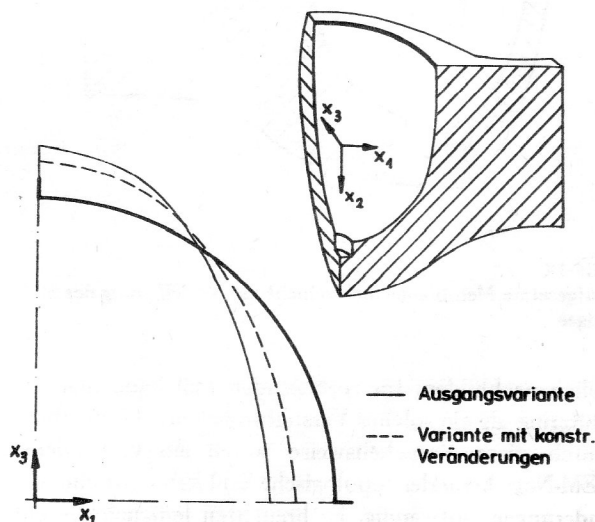
#### 3.1. Ergebnisbewertung und Modellmodifikation

Im Ergebnis der Spannungsauswertung ergaben sich zwei kritische Bereiche. Das waren zum einen zu große Druckspannungen am Pfannenrand im Schnitt  $x_1 = 0$  und zu große Zugspannungen an der Unterseite des Übergangsbereiches zwischen Kugelpfanne und Achse (vgl. Bild 10). Gleichzeitig führte die Ovalisierung des oberen Pfannenrandes zu kritischen Werten (vgl. Bild 11).

Zur Reduzierung der von der Achse aufzunehmenden Druckspannungen am oberen Pfannenrand wurde der dort aufgeschraubte Abdeckring als Stützring ausgebildet (Bild 12).



**Bild 10**  
Spannungen für ausgewählte Linien

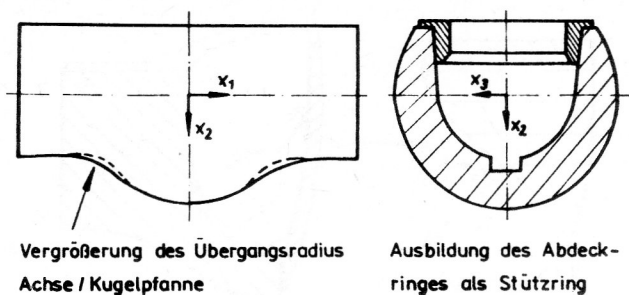


**Bild 11**  
Verformung des oberen Pfannenrandes

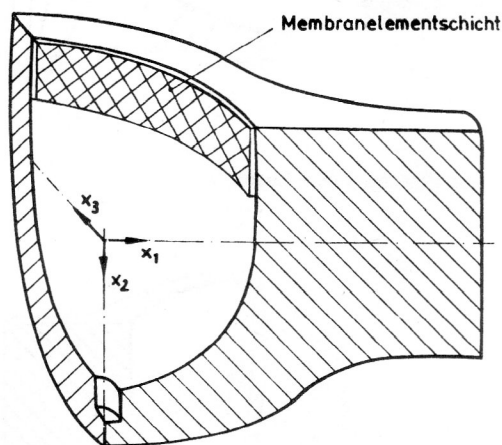
Um den hohen Zugspannungen am Übergangsbereich Kugelpfanne – Achse zu begegnen, wurde der Übergangsradius vergrößert.

Zur Ermittlung des veränderten Spannungs- und Verformungszustandes mußte eine wiederholte FEM-Rechnung mit einem modifizierten Modell, das die konstruktiven Veränderungen berücksichtigt, durchgeführt werden. Während die Modifikation des Übergangsradius relativ einfach durch Koordinatenkorrekturen möglich war, hätte die Aufnahme neuer räumlicher Elemente zur Modellierung des Stützringes zu erheblichen Änderungen in mehreren Substrukturen geführt.

Deshalb wurde zur Modellierung des Stützringes ein anderer Weg gewählt. Im Bereich des Stützringes wurden auf die dort vorhandenen räumlichen Elemente die in COSAR verfügbaren Membranelemente aufgelegt. Mit diesen Elementen lassen sich durch Zuordnung entsprechender Eigenschaften sehr gut Versteifungen in 3D-Mo-



**Bild 12**  
Kennzeichnung der konstruktiven Veränderungen



**Bild 13**  
Aufgesetzte Membranelementschicht zur Modellierung des Stützringes

dellen nachbilden. Im vorliegenden Fall kann man den Stützring als ein solches Versteifungselement betrachten. Durch diese Vorgehensweise waren am vorhandenen FEM-Netz keinerlei topologische und geometrische Veränderungen notwendig. Es brauchten lediglich die entsprechenden Oberflächen der betreffenden 3D-Elemente definiert werden, die mit Membranelementen zu belegen sind. Im Bild 13 sind die aufgelegten Membranelemente angedeutet.

Unter Berücksichtigung der angeführten Veränderungen wurde die FEM-Rechnung wiederholt. Gegenüber der Ausgangsvariante ergaben sich in den kritischen Bereichen deutlich günstigere Ergebnisse. Die Bilder 10 und 11 zeigen die Verbesserung der Spannungs- und Verformungswerte für das veränderte Modell.

### 3.2. Bemerkungen zur Genauigkeit der Ergebnisse

Die Genauigkeit der Ergebnisse einer FEM-Rechnung hängt wesentlich vom gewählten Diskretisierungsgrad, d. h. von der Feinheit der Vernetzung ab. Da die Festlegung der Vernetzungsdichte bei praktischen Aufgaben immer einen Kompromiß zwischen erforderlicher Ergebnisgenauigkeit und Berechnungsaufwand darstellt, sind nachträgliche Abschätzungen der erreichten Ergebnisgüte von besonderer Bedeutung. Das gilt insbesondere für 3D-Modelle, wo der Spielraum für Modifikationen aufgrund des hohen Berechnungsaufwandes eng begrenzt ist. Im

vorliegenden Beispiel wurden zwei Kriterien zur Ergebniseinschätzung herangezogen, die Aussagen über die Qualität der FEM-Lösung, die ja eine Näherungslösung darstellt, zulassen.

Zum einen wurde überprüft, inwieweit die eingetragenen Spannungen an der Schnittfläche zur restlichen Achse sich in der Lösung widerspiegeln. Dabei wurden maximale Abweichungen gegenüber der exakten Spannungsverteilung an der Schnittfläche von ca. 12 % festgestellt.

Zum anderen wurden die auftretenden Knotenspannungsdifferenzen (vgl. [2]) im Bereich des oberen Pfannenrandes untersucht.

Hieraus wurden Fehler bis maximal 18 % bezogen auf die vorhandenen maximalen Spannungen ermittelt. Diese Größenordnung stellt für praktische Berechnungsaufgaben eine akzeptable Lösung dar.

## 4. Zusammenfassung

Das vorgestellte Beispiel zeigt einerseits die Einsatzmöglichkeiten des Programmsystems COSAR und macht andererseits deutlich, daß durch gründliche Überlegungen und geschickte Modellwahl gute Ergebnisse mit vertretbarem Aufwand erzielt werden können.

3D-Modelle werden aufgrund des damit verbundenen Datenaufbereitungs- und Berechnungsaufwandes auch weiterhin eher die Ausnahme als die Regel sein. Aus diesem Blickwinkel zeigt die 3D-FEM-Untersuchung des Tragachsenmittelstückes besonders deutlich, wie wichtig eine gründlich durchdachte Herangehensweise ist.

Weiterhin wird ein Weg aufgezeigt, wie mit der geschickten Nutzung der in COSAR gebotenen Möglichkeiten Modellmodifikationen ohne wesentlichen Mehraufwand realisiert werden können.

## LITERATUR

- [ 1 ] Gabbert, U.; Berger, H.; Zehn, M.; Fels, D.: Universelles Programmsystem COSAR – Übersicht über den nachnutzbaren Leistungsumfang. Maschinenbautechnik, 34 (1985), H. 8, 352 – 356.
- [ 2 ] COSAR-Nutzerhandbuch: Teil I – Grundlagen, Teil II – Eingabevorschrift. TH Magdeburg, WB Festkörpermechanik, Methodisch-Diagnostisches Zentrum „Finite Elemente“, 1985.