

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 90 (1972)  
**Heft:** 12

**Artikel:** Die Methode der Finiten Elemente als Konstruktionshilfsmittel im Grossmaschinenbau: Vortrag  
**Autor:** Barp, B.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-85157>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 26.11.2024

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Die Methode der Finiten Elemente als Konstruktionshilfsmittel im Grossmaschinenbau

DK 539.4 : 621.001.2

Von **B. Barp**, Zürich

Vortrag, gehalten am 12. Nov. 1970 an der SIA/FII-Informationstagung «Anwendung der Methode der Finiten Elemente» in Zürich

## Einleitung

Festigkeitsberechnungen nach der Methode der Finiten Elemente benötigen einen grossen Zeitaufwand zur Problemvorbereitung und zur Auswertung der Ergebnisse, so dass der Konstruktionsingenieur nur in den seltensten Fällen solche Berechnungen selbst durchführen kann. Diese Arbeit wird in der Regel von einer aus Berechnungsingenieuren gebildeten Spezialistengruppe durchgeführt. Dadurch entsteht die Gefahr, dass das Wissen, das sich aus diesen Berechnungen ergibt, mindestens teilweise in den Spezialistengruppen hängen bleibt und so der Konstrukteur langsam den Überblick und das konstruktive Gefühl für die nicht von ihm selbst berechneten Komponenten verliert.

Es ist daher wichtig, dass die vom Berechnungsingenieur gelieferten Ergebnisse nicht nur schwer überblickbare Zahlentabellen und graphische Darstellungen enthalten. Es sollte versucht werden, die mit der Elementberechnung gewonnenen Ergebnisse mit Hilfe von bekannten, für den Konstrukteur überblickbaren Formeln zu deuten. Ausserdem müssten die wichtigsten Ergebnisse durch zweckmässige Kombination von bekannten Formeln oder durch Anwendung von Korrekturfaktoren mit genügender Genauigkeit auf herkömmliche Art, einfach und überblickbar zu berechnen sein. Das befähigt dann den Konstrukteur mit seinem eigenen Wissen und ohne weitere Hilfe ähnlich gelagerte Fälle sicher und zweckmässig zu bemessen.

## Praktische Durchführung einer Berechnung

Der Ablauf einer derartigen Berechnung soll am Beispiel eines Gehäuseoberteils einer grossen Pumpenturbine für ein hydraulisches Kraftwerk erörtert werden.

Bild 1 zeigt einen Querschnitt und Grundriss des zu berechnenden Bauteils. Für die Elementberechnung wird nur der im Grundriss gestrichelt dargestellte Ausschnitt betrachtet, an welchem dank der Symmetrie an den radial gerichteten Schnittstellen alle Randbedingungen eindeutig formuliert werden können. Die Belastung geschieht durch hydraulischen Druck auf der Unterseite, welcher durch die Schrauben am äusseren Umfang aufgenommen wird. Die Führungshülsen (a) der Leitschaufeln leisten keinen wesentlichen Beitrag zur Tragfähigkeit der ganzen Konstruktion und werden deshalb weggelassen. Die Bohrungen (b) zur Durchführung der Leitschaufeln verursachen nur eine örtliche Spannungskonzentration, ohne die Tragfähigkeit wesentlich zu beeinträchtigen und werden ebenfalls nicht betrachtet. Schliesslich werden die Schraubenkräfte durch eine ringförmig verteilte Reaktionskraft simuliert.

Diese Stilisierung der Geometrie ist nicht nur zweckmässig zur Verminderung des Rechenaufwandes sondern ist notwendig, damit in der Berechnung die wesentlichen Einflüsse leichter sichtbar werden. Die Wirkung der örtlichen Versteifungen oder Verschwächungen lässt sich oft besser in einer Detailberechnung erfassen.

Das verwendete Computerprogramm EASE arbeitet mit dreieckförmigen Scheiben-, Platten- und Schalenelementen. Der Rechenaufwand zur Lösung des Systems der Knotengleichgewichtsgleichungen ist abhängig von der Bandbreite der Koeffizientenmatrix. Diese ist proportional zu der grössten Differenz in der Numerierung zweier benachbarter Knoten, der sogenannten Knotennummerdifferenz, welche aus programmtechnischen Gründen gegenwärtig auf 35 beschränkt ist.

Bei der Elemententeilung des gewählten Berechnungsausschnittes in Scheiben- und Schalenelemente muss besonders auf die Knotennummerdifferenz Rücksicht genommen werden. Ein Kleinstwert dafür kann erreicht werden, wenn die Numerierung auf schiefen Bezugsebenen aufgebaut ist. Ein Beispiel ist in Bild 2 angedeutet. Die Feinheit der Netzeinteilung richtet sich hauptsächlich nach den zylindrischen Schalen. Die sogenannte elastische Einflusslänge einer Zylinderschale sollte, für genügende Genauigkeit der Lösung, in Längsrichtung etwa 2 bis 3 Elemente enthalten.

Der aufwendigste Teil der Arbeit ist die Darstellung der Ergebnisse in übersichtlicher Form. Dieser Aufwand ist unumgänglich, um den für die nachfolgende Auswertung notwendigen Gesamtüberblick zu erhalten. In Bild 3 sind nur einige wenige Spannungsverläufe dargestellt. Bild 4 zeigt einen Teil der sich ergebenden Verformungen.

## Auswertung der Computerberechnung

Der wichtigste Teil der ganzen Berechnungsaufgabe besteht darin, die Ergebnisse in verständlicher Form dem Konstruktionsingenieur weiterzugeben. Dazu ist es notwendig, die Elementberechnung so zu analysieren, dass die wichtigsten Ergebnisse durch Kombination von überblickbaren, dem Konstrukteur verständlichen Formeln nachgebildet werden können. Er ist dann in der Lage, die Zusammenhänge zwischen seinen her-

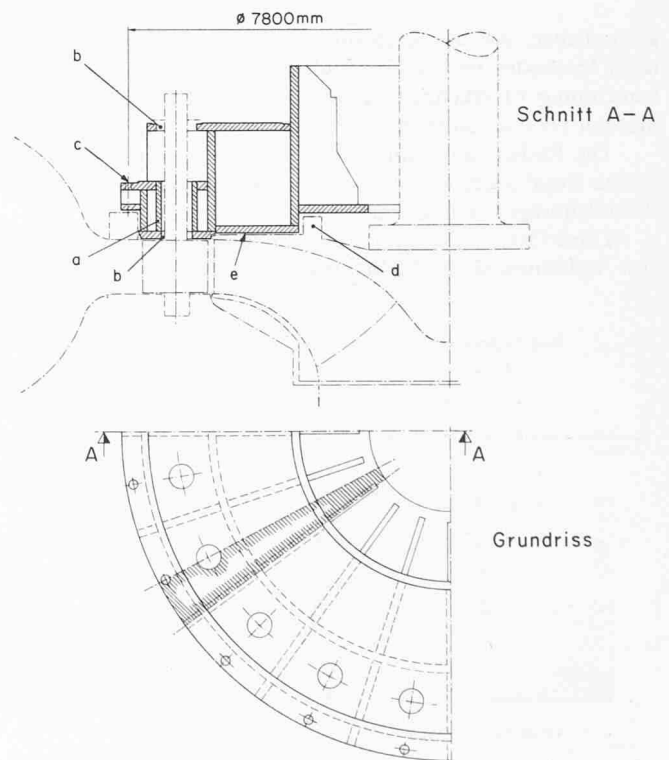
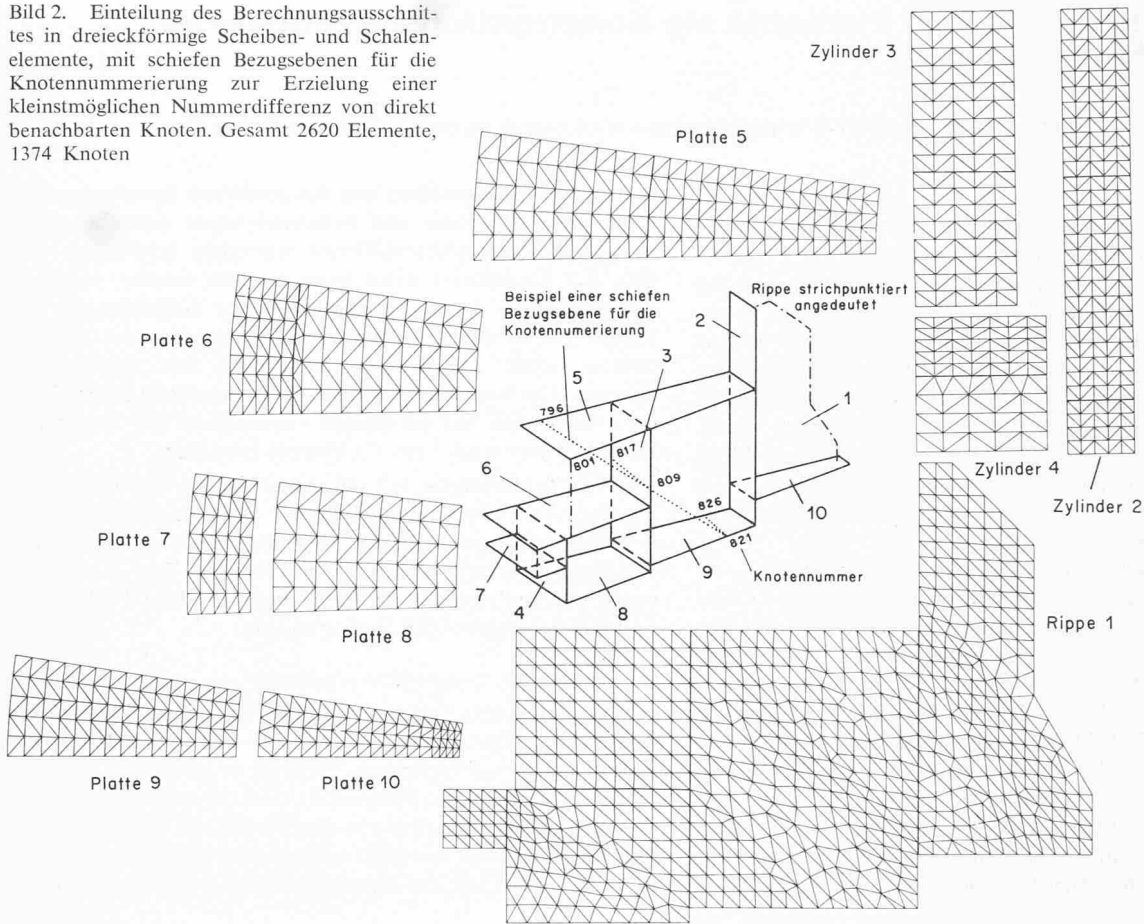


Bild 1. Gehäuseoberteil einer Pumpenturbine für ein hydraulisches Kraftwerk. Die Elementberechnung wird an einem Berechnungsausschnitt (schraffierte Fläche im Grundriss) mit eindeutig bestimmbaren Randbedingungen durchgeführt

- a Siehe Text
- b Siehe Text
- c Schraubenteilkreis
- d Dichtung
- e Stelle, welche durch hydraulischen Druck belastet wird

Bild 2. Einteilung des Berechnungsausschnittes in dreieckförmige Scheiben- und Schalenelemente, mit schiefen Bezugsebenen für die Knotennummerierung zur Erzielung einer kleinstmöglichen Nummerdifferenz von direkt benachbarten Knoten. Gesamt 2620 Elemente, 1374 Knoten



kömmlichen, auf die Betrachtung von Einzelteilen ausgerichteten Methoden und der integralen Betrachtung der Elementberechnung zu erkennen. Im vorliegenden Beispiel lässt sich dies gut veranschaulichen.

Die Radial- und Längsdeformationen sind hier die wichtigsten Ergebnisse, weil die Spielveränderungen an den Labyrinthdichtungen sehr genau bekannt sein müssen.

Diese Deformationen lassen sich durch Überlagerung von drei verhältnismässig leicht erfassbaren Einzelberechnungen

zusammensetzen (Bild 5). Die wichtigste ist eine Berechnung auf Stülpung ohne Verzerrung des Querschnittes. In dieser Berechnung kommt der Ringcharakter der Konstruktion zum Ausdruck. Es ergeben sich daraus ein für den ganzen Querschnitt konstanter Stülpwinkel, Ringspannungen und eine Radialbiegemomentenverteilung.

Die zweite ist eine Berechnung auf Schub, indem ein Gehäuseabschnitt als Balken betrachtet wird. Diese beiden Berechnungen zusammen ergeben schon eine recht gute Über-

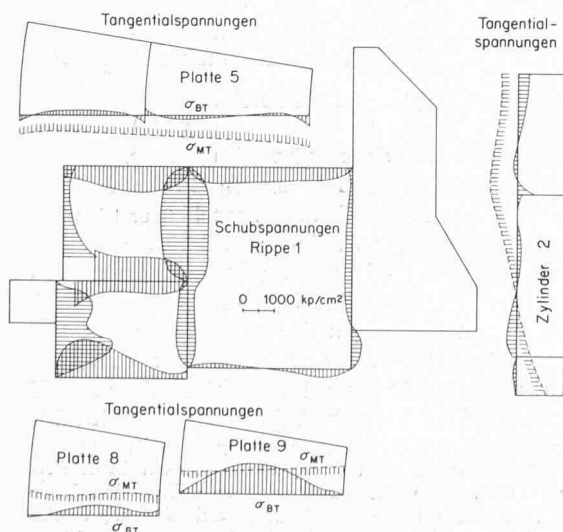


Bild 3. Beispiele von Spannungsverteilungen entlang den Rändern einiger Einzelteile unter Belastung durch hydraulischen Druck

$\sigma_{MT}$  = Mittlere Tangentialspannungen  
 $\sigma_{BT}$  = Biegespannungen in tangentialer Richtung

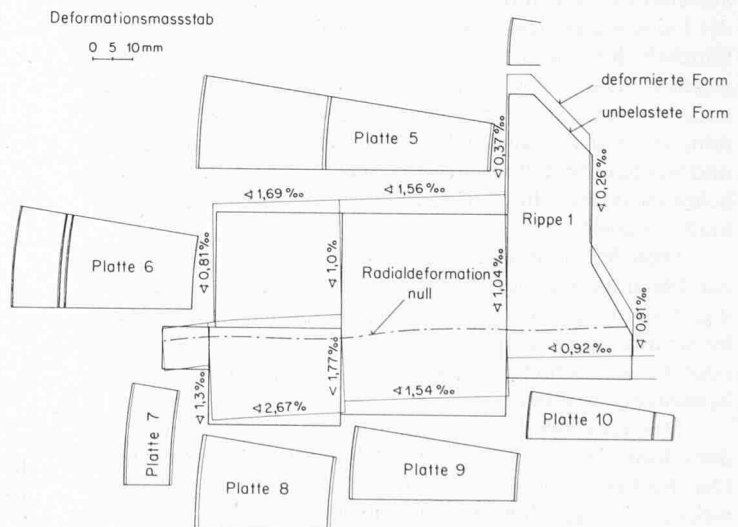
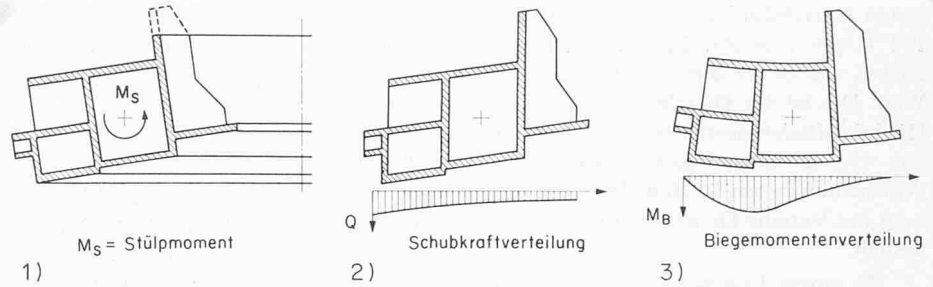


Bild 4. Radial- und Axialdeformationen unter Belastung durch hydraulischen Druck

Bild 5. Prinzipieller Aufbau einer Näherungsberechnung für die Radial- und Axialdeformation

- 1 Stülpung ohne Querschnittsverzerrung
- 2 Schubdeformation. Ringausschnitt als Balken betrachtet
- 3 Biegung. Ringausschnitt als Balken betrachtet



einstimmung mit der komplizierten Elementberechnung. Für weitere Verfeinerung der Ergebnisse kann noch die Biegedeformation hinzugenommen werden. Hier wird ebenfalls ein Gehäuseabschnitt als Balken betrachtet. Die auf diese Art durchgeführte Berechnung ergibt Radialdeformationen, Axialdeformationen und Neigungen, welche an jedem wichtigen Punkt des Querschnittes nicht mehr als 10% von den Ergebnissen der Elementmethode abweichen. Die Biegeeinflüsse der einzelnen Konstruktionsteile (Platten usw.) kann der Konstrukteur in einer Detailberechnung sehr leicht erfassen.

#### Schlussbemerkung

Mit dieser Art der Auswertung einer Elementberechnung ist eine Brücke geschaffen zwischen der modernen Berechnungstechnik und der Denkweise des konstruierenden Inge-

nieurs. Der Konstruktionsingenieur ist nun in der Lage, die Ergebnisse der Elementberechnung zu überblicken und ähnliche Konstruktionen selbständig mit den ihm verständlichen Näherungsschritten selbst zu bemessen. Er kann dadurch mit seinen bekannten Methoden arbeiten, hat jedoch einen besseren Einblick in die festigkeitsmässigen Zusammenhänge seiner Konstruktionen.

Dieses Beispiel ist nur eines von vielen, welches zeigt, dass die Anwendung von Elementberechnungen mit nachfolgender genauer Analyse und umfassender Auswertung trotz des gewaltigen Zeitaufwandes ein wertvolles, im Endeffekt personal- und kostensparendes Konstruktionshilfsmittel sein kann.

Adresse des Verfassers: B. Barp, dipl. Ing., in Fa. Escher Wyss AG, Abt. FO-Technische Dienste, 8023 Zürich, Escher-Wyss-Platz

## 75 Jahre Dieselmotoren

DK 621.436 (091)

Im physikalischen Kabinett der Industrieschule in Augsburg entdeckte ein Vierzehnjähriger namens *Rudolf Diesel* 1872 ein «pneumatisches Feuerzeug». Hiermit konnte man durch kräftiges Niederdrücken des Kolbens im Glaszylinder die Luft so stark erhitzen, dass ein Zuckerstück dabei zu glimmen anfang. Für Diesels Zukunft hatte dieses Experiment grösste Bedeutung: Zwanzig Jahre später, am 28. Februar 1892, meldete der für Lindes Eismaschinen in Berlin tätige Kälteingenieur Diesel das erste deutsche Hauptpatent Nr. 67 207 auf «Arbeitsverfahren und Ausführungsart für Verbrennungskraftmaschinen» an. Diesel versuchte nun mehrere deutsche Firmen für den Bau seines neuartigen Motors zu gewinnen und erhielt im April 1892 von Direktor Buz, Maschinenfabrik Augsburg, eine vorläufige Zusage.

Im Januar 1893 veröffentlichte Diesel das Buch «Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmemotors», um die Öffentlichkeit auf seine Erfindung aufmerksam zu machen. Dieses Buch schickte er auch an Friedrich Alfred Krupp nach Essen und schrieb dazu am 19. Januar 1893: «Da es sich bei meinem Motor um bedeutende Druckwirkungen handelt, so ist für den Cylinder die Anwendung von Stahl geboten; um andererseits grosse Geschwindigkeiten zu erzielen, sind leichte Triebwerke, also wiederum Stahl als Material notwendig; mein ganzer Motor muss prinzipiell aus Stahl gebaut werden und es dürfte derselbe auch in dieser Hinsicht vielleicht von Interesse für Sie sein.»

Seine Bemühungen hatten Erfolg: Im Frühjahr 1893 schlossen die Maschinenfabrik Augsburg und die Friedrich Krupp, Essen, mit Rudolf Diesel getrennte Verträge ab, in denen sich beide Firmen verpflichteten, nach seinen Plänen den Bau eines Versuchsmotors zu übernehmen. Dafür erhielten sie ein bevorzugtes Verkaufs- und Lizenzrecht nach Fertigstellung des Motors. Diesen Verträgen folgte am 25. April 1893 ein Konsortiumsvertrag Augsburg-Krupp,

der die Interessen beider Unternehmen vereinigte, um Diesels Erfindung gemeinsam zu verwerten.

Nach vierjähriger gemeinsamer Versuchsarbeit, am 17. Februar 1897, fand im Augsburger Laboratorium unter der Leitung von Prof. Moritz Schröter von der Technischen Hochschule München die offizielle Abnahmeprüfung am

Erster von Krupp gebauter betriebsfähiger Dieselmotor (November 1897). Von 1906 bis 1918 diente er als Versuchsmotor. Die Leistung betrug 20 PS bei 170 U/min

