

Anhang

I Anmerkungen zu den Grundlagen der Finite-Element-Methode (FEM)

Mit der FEM steht den Ingenieuren ein mächtiges Hilfsmittel zur Verfügung, mit dem der Schritt von einer letztendlich doch sehr ungenauen rechnerischen Abschätzung zur wirklichkeitsnahen Simulation gelungen ist. Ohne die enorme Entwicklung der Leistungsfähigkeit elektronischer Rechner (Hochintegration der Schaltungen, Speicherplatzdichte, Beschleunigung der Rechenoperationen, Miniaturisierung und Dezentralisierung der Geräte, um nur einiges zu nennen) in Verbindung mit immer leistungsfähigerer Software wäre dieser Fortschritt nicht möglich gewesen. Für die allgemeine Verbreitung der Anwendung der FEM haben schließlich die immer nebensächlicher werdenden Hardware-Kosten und nachwachsende Generationen von Ingenieuren gesorgt, die mit diesem Instrumentarium bereits während des Studiums in Berührung gekommen sind.

Die FEM hat ausgehend von ihrem ursprünglich sehr eng begrenzten Anwendungsgebiet heute alle Disziplinen durchdrungen, deren Grundgesetze in Form von Differenzialgleichungen formuliert sind, die für ein komplexes „Grundgebiet“ Gültigkeit haben, das eine explizite Lösung unmöglich macht. Die Diskretisierung dieses „Grundgebiets“ in „finite“, d. h. endliche Teilgebiete einfacher Geometrie, und die Umformulierung der mathematischen Aufgabenstellung in die Lösung linearer (nicht-linearer) Gleichungssysteme sind kennzeichnend für diese Methode und auf elektronische Rechner geradezu zugeschnitten.

Die FEM ([L1–L5]) wurde nicht von Mathematikern, sondern von Strukturmechanikern entwickelt und zunächst auf die Verformung elastischer Körper angewandt. Dabei wurden die Differenzialgleichungen der Elastomechanik umgangen! Die Berechnung wurde nicht mathematisch, sondern physikalisch abgestützt [L1]. Letzteres bedeutet den direkten Bezug auf das verallgemeinerte Spannungs-Dehnungs-Gesetz von Hooke. Dieser Grundzug, Differenzialgleichungen nach Möglichkeit zu vermeiden, wird bei der FEM in der Strukturmechanik weitgehend beibehalten. Während sich der ebene Spannungszustand elementar formulieren lässt, muss bei dreidimensionalen Aufgabenstellungen dann z. B. auf Integralbeziehungen für die Verformungsenergie zurückgegriffen werden, um die Mängel der elementaren Vorgehensweise auszugleichen [L1].

Die FEM als Verfahren an und für sich muss jedoch losgelöst von der Strukturmechanik betrachtet werden. Sie ist eine Variante des klassischen Verfahrens von Ritz zur Lösung von Variationsaufgaben. Es handelt sich um ein numerisches Verfahren zur Lösung von Differenzialgleichungen, die den stationären Zustand oder zeitlich veränderliche Vorgänge in Verbindung mit technisch-naturwissenschaftlichen Aufgabenstellungen beschreiben. Die Differenzialgleichungen werden dabei in zugehörige Integral-Probleme überführt. Darauf wird an anderer Stelle noch etwas näher eingegangen.

Es ist zwischen linearen und nicht-linearen FE-Modellen/-Systemen zu unterscheiden. Erstere zeichnen sich dadurch aus, dass Nicht-Linearitäten vermieden werden, wie sie z. B. bei großen Verformungen, bestimmtem Werkstoffverhalten (elastisch-plastisch), beim Wärmeübergang (wenn z. B. der Wärmeübergangskoeffizient abhängig von der Oberflächentemperatur ist), beim Wärmetransport (temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit) und in der Strömungsmechanik (Navier-Stokes-Gleichung) auftreten, um nur einige Fälle zu nennen [L6]. Nicht-lineare Modelle/Systeme beanspruchen hohe Rechenleistungen und setzen beim Anwender im Gegensatz zu den linearen, die heute fast einer „black box“ gleich allgemein genutzt werden, hohe Fachkompetenz voraus [L7].

Zur Diskretisierung steht eine Vielzahl von Element-Typen zur Verfügung. Vom einfachen Zug-Druck-Stab über das Balkenelement, das dreieckige/rechteckige 2D-Flächenelement, das dreieckige/rechteckige Platten-/Schalenelement bis hin zum Tetraeder- bzw. Keil- und Quader-Volumenelement gibt es eine Vielzahl von Bausteinen. Die Eckpunkte heißen Knoten. Im Gegensatz zum Fachwerk können die Element- bzw. Strukturknoten (je nachdem, ob das einzelne Element oder die gesamte Struktur angesprochen wird) auch Momente übertragen. Die Auswahl des Element-Typs erfolgt problemspezifisch.

Die Element-Auswahl ist Gegenstand ständiger fachlicher Auseinandersetzungen. Im Sinne der Reduzierung der Modelle ein und derselben Struktur für unterschiedliche Berechnungen hat das Volumenmodell eindeutige Vorteile, jedoch bezüglich des „Handling“ (schneller Aufbau der Struktur, schnelle Änderungen, Modellumfang und damit Rechnerkapazität) doch auch nennenswerte Nachteile. So werden z. B. für akustisch-schwingungstechnische Aufgabenstellungen oft Platten-/Schalen-Modelle der Gesamtstruktur erstellt. Diese sind jedoch im Gegensatz zu einem Volumen-Grobmodell der Gesamtstruktur nicht in der Lage, die notwendigen Randbedingungen für feiner diskretisierte Ausschnitte zu liefern, anhand derer z. B. genaue Spannungsberechnungen durchgeführt werden. Andererseits sind dünnwandige Bereiche, die z. B. aus nur einer Schicht von Volumenelementen gebildet werden, nur unzureichend in der Lage, den Gesetzmäßigkeiten der Biegung zu entsprechen.

An dieser Stelle kann lediglich auf diese Problematik hingewiesen werden, ohne weiter Stellung zu beziehen. Letztlich wird dies in der Praxis über die Kosten entschieden. Das Problem dynamischer Berechnungen ist die Vielzahl der Zeitschritte, die nacheinander berechnet werden müssen. Dies erfordert „handliche“ Modelle, was mit Platten/Schalen leichter zu bewerkstelligen ist.

Mit den Begriffen „Grobmodell“ und „Ausschnitt“ ist das Thema „Diskretisierung“ und damit die Rechengenauigkeit angesprochen. Hier müssen, um die Modelle nicht über alle beherrschbaren Grenzen wachsen zu lassen, wirtschaftliche Kompromisse geschlossen werden. Die Approximationsgenauigkeit eines Elements hängt nicht nur von seiner flächenhaften/räumlichen Erstreckung (Feinheit des Netzes), sondern auch stark von dessen Polynomgrad ab. Dies muss etwas genauer erläutert werden.

Im einfachsten Fall besitzt ein Element nur an seinen Ecken Knoten. Für die Näherungslösung wird ein Polynom verwendet. Wenn nur Eckknoten gegeben sind, ist dieses linear. Das Polynom wird üblicherweise Ansatzfunktion genannt. Aus rein geometrischer Sicht kann eine gekrümmte Kontur in diesem Fall nur mit Hilfe von aneinander gereihten Sekanten-Abschnitten (Geraden/ebene Flächen) modelliert werden.

Ansatzfunktionen höherer Ordnung setzen Zwischenknoten voraus. Ein entsprechendes Element besitzt z. B. zwischen den Eckknoten jeweils noch einen Zwischenknoten. Die zugehörige Ansatzfunktion ist parabolisch. Letztlich hängt die Art des Ansatzes von der Form des Elements und dem zu behandelnden Problem ab. Höhergradige Ansatzfunktionen legen es nahe, auf krummlinige Elemente überzugehen. Mit z. B. drei Punkten je Elementseite/-kante kann eine gekrümmte Kontur mit Parabel-Abschnitten meist hinreichend genau approximiert werden. Entspricht die Ansatzfunktion mathematisch der Transformation krummliniger/-kantiger Elemente in das so genannte Einheitsselement der Seiten-/Kantenlänge 1, so spricht man von isoparametrischen Elementen.

Die in den Knotenpunkten benutzten Funktionswerte und Werte von Ableitungen werden Knotenvariablen des Elements genannt. Mit Hilfe der Knotenvariablen wird die Ansatzfunktion als Linearkombination der so genannten Formfunktionen mit den Knotenvariablen als Koeffizienten dargestellt. Die herkömmliche FEM beschränkt sich auf Elemente mit Eckknoten bzw. einem Zwischenknoten je Elementseite/-kante. Die Begriffe „konstant“ und „linear“ beziehen sich in Verbindung mit den Elementen auf das zugrunde liegende „Deformationsmodell“. Hinsichtlich dieser und weiterer, die gebräuchlichen Element-Typen betreffenden Details muss auf das einschlägige Schrifttum verwiesen werden. Dies schließt die die Eigenschaften teilweise kennzeichnende Namensgebung ebenfalls ein.

Durch Ansätze höherer Ordnung – d. h. mehr als ein Zwischenpunkt – lässt sich die Genauigkeit trotz vergleichsweise grober Diskretisierung steigern [L8]. Die Steigerung des Polynomgrads stellt also eine Alternative zur Verfeinerung des FE-Netzes dar.

Bei der Diskretisierung der Struktur ist neben der Tatsache, dass z. B. die Knotendichte bei der Spannungsberechnung den zu erwartenden Spannungsgradienten anzupassen ist, auch auf physikalische Phänomene zu achten. Beispielhaft sei in diesem Zusammenhang der dispersive Charakter von plattenähnlichen Strukturen in Bezug auf Biegewellen genannt. Bei akustischen Berechnungen ist zu berücksichtigen, dass sich auf biegeweichen Strukturen, wie Ölwannen und Ventildeckel, die Biegewellen mit deutlich geringerer Wellenlänge ausbilden als auf dem steifen Motorblock.

Schließlich sei noch der Freiheitsgrad erwähnt, unter dem, bezogen auf das Element, die jeweilige Bewegungsfreiheit der Knotenpunkte zu verstehen ist. Die Größe eines Modells ist dann durch die Gesamtzahl der Elemente und Freiheitsgrade beschrieben.

Dass die Berechnung in drei Phasen abläuft, ist hinlänglich bekannt. Zur Erstellung des Netzwerks wird der „Preprozessor“ herangezogen. Der FE-Prozessor oder „Solver“ führt die eigentliche numerische Berechnung durch. Der „Postprozessor“ bereitet das Ergebnis auf, wobei die vielen Daten auf aussagefähige Darstellungen reduziert werden.

II Zur Matrizen-Theorie der Statik – Verschiebungsmethode

Bei der Verschiebungsmethode werden die Knotenverschiebungen als Unbekannte eingeführt. Für jedes Element ergibt sich in Verbindung mit den Einheitsverschiebungen seiner Knoten und dem Stoffgesetz die Steifigkeitsmatrix. Mit den Gleichgewichtsbedingungen für alle Knoten folgt das Gleichungssystem zur Bestimmung der unbekanntenen Verschiebungen. Wie dies im Einzelnen zu verstehen ist, soll am folgenden, zwecks Eingängigkeit sehr einfachen, Beispiel erläutert werden, das sich an der Darstellung bei [L4] bzw. [L9] orientiert.

Zunächst wird das *einzelne Element* betrachtet, im einfachsten Fall ein *Stab*. Durch *innere* Krafteinwirkung über die Knotenpunkte wird das Element verzerrt (verformt). Für die Stellen eines Elements, die mit anderen Elementen Knoten bilden, können die *Verschiebungen* in allen drei Koordinatenrichtungen definiert werden. Das benutzte *Koordinatensystem* ist dabei „*Element-fest*“.

Die Kräfte sind als „verallgemeinerte Kräfte“ zu verstehen, d. h., es sind Kräfte und Momente gemeint. Die die Verzerrung des Elements verursachenden „Kräfte“ – wobei im allgemeinen Fall Zug/Druck, Biegung (mit Querkraft) und Torsion zu berücksichtigen sind (je nachdem, wie viel Bewegungsfreiheitsgrade dem jeweiligen Strukturknotenpunkt zugemessen werden) – können *pro Element* in einem Element-Vektor der inneren Kräfte $[f]$ zusammengefasst werden. Die der Verzerrung des Elements entgegenwirkenden Steifigkeiten lassen sich ebenso in einer Steifigkeit-Matrix $[c]$ zusammenfassen und die Knotenpunktverschiebungen entsprechend in einem Verschiebungs-Vektor $[v]$.

Bild A-1 zeigt als Ausschnitt einen Teilbereich einer zweidimensionalen (2D-), „Struktur“ mit

- a)
 - den Stabelementen (1), (2) und (3)
 - dem element-bezogenen Koordinaten-System (u, v)
 - den Verdrehwinkeln $\varphi_{(1)}$, $\varphi_{(2)}$ und $\varphi_{(3)}$ der element-bezogenen Koordinatensysteme
- b)
 - den Strukturknoten 1, 2 und 3,
 - der äußeren Kraft F in y -Richtung am Knoten 3
- c)
 - der Lagerreaktion F_A mit den Komponenten F_{Ax} , F_{Ay} am Knoten 1 (hinsichtlich F_{Ax} werden im nicht dargestellten Bereich des Berechnungsnetzes auch horizontale Belastungskomponenten angenommen)

Weiterhin bedeuten

- c die hier einheitlich angenommene axiale Element-Steifigkeit und
- v_u , v_v die Bewegungsfreiheitsgrade (Verschiebungen) der Strukturknoten, wobei der Übersichtlichkeit wegen hier im Beispiel nur Zug/Druck zugelassen sein soll

Für Element (1) gilt in Bezug auf die an den Enden (Knoten) wirkenden Kräfte und die dadurch verursachte Verschiebung (Verformung):

$$F_{u1} + F_{u2} = 0 \rightarrow F_{u2} = -F_{u1} \quad (\text{A-1})$$

$$\text{und } v_{u1} - v_{u2} = \Delta l_{(1)} \quad (\text{A-2})$$

bzw.

$$|F_{u1}| + |F_{u2}| = c \Delta l_{(1)} \quad (\text{A-3})$$

In Matrizen-Schreibweise lässt sich das wie folgt formulieren:

$$\begin{bmatrix} F_{u1} \\ F_{u2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & -c \\ -c & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{u1} \\ v_{u2} \end{bmatrix}$$

bzw. allgemein

$$[f_{(1)}] = [c_{(1)}] [v_{(1)}] \tag{A-4}$$

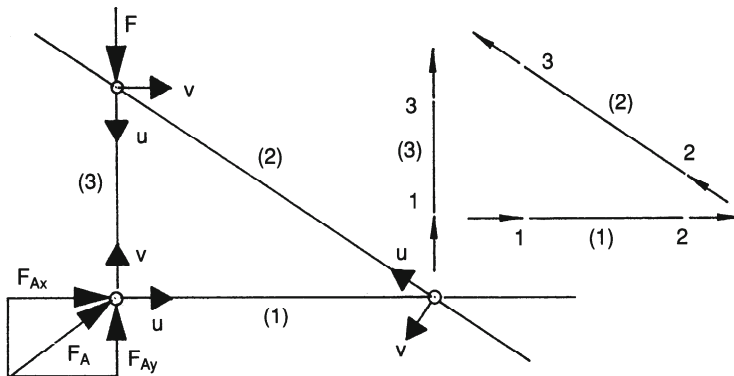


Bild A-1 Ausschnitt aus einer 2D-Struktur

Für alle Elemente der gesamten Struktur gilt bei Vernachlässigung der Kennzeichnung der elementspezifischen Matrizen/Vektoren:

$$\begin{bmatrix} f_{(1)} \\ f_{(2)} \\ f_{(3)} \\ \dots \\ f_{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{(1)} & & & & \\ & c_{(2)} & & & \\ & & c_{(3)} & & \\ & & & \dots & \\ & & & & c_{(n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{(1)} \\ v_{(2)} \\ v_{(3)} \\ \dots \\ v_{(n)} \end{bmatrix}$$

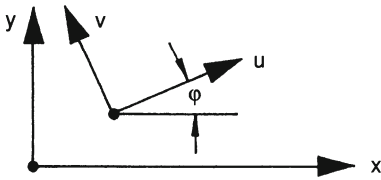
bzw. allgemein

$$f = c v \tag{A-5}$$

Zunächst müssen die Element-Koordinatensysteme mit den Koordinaten (u,v) für den Zusammenbau der Elemente zur Gesamtstruktur in ein einheitliches Struktur-Koordinatensystem (x,y) (bzw. (x,y,z) bei 3D-Strukturen) transformiert werden, wie das in Bild A-2 angedeutet ist.

Die Transformations-Gleichungen für Element (1) lauten bei kleinen Verschiebungen und demnach zulässiger Linearisierung, wobei nur Komponenten in u-Richtung, d. h. in Richtung der Stabachse, auftreten:

$$\begin{aligned} \text{Knoten 1 von Stab (1): } v_{u1} &= v_{x1} \cos \varphi + v_{y1} \sin \varphi \quad \text{und} \\ \text{Knoten 2 von Stab (1): } v_{u2} &= v_{x2} \cos \varphi + v_{y2} \sin \varphi \end{aligned} \tag{A-6}$$

**Bild A-2**

Element-Koordinatensystem (u, v) und
Struktur-Koordinatensystem (x, y)

In Matrizen-Schreibweise folgt analog zu Gl. (A-4) für das betrachtete Element (1):

$$\begin{bmatrix} v_{u1} \\ v_{u2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{x1} \\ v_{y1} \\ v_{x2} \\ v_{y2} \end{bmatrix}$$

bzw. allgemein

$$[v_{(1)}] = [T_{(1)}] [V_{(1)}] \quad (\text{A-7})$$

Werden wiederum die Elemente in ihrer Gesamtzahl betrachtet, so ist analog zu Gl. (A-5) eine verallgemeinerte Schreibweise üblich:

$$v = T V \quad (\text{A-8})$$

T ist die Transformations-Matrix, die die globalen (äußeren) Verschiebungen V in die inneren Verschiebungen v überführt. Entsprechend können die äußeren Kräfte F mit den inneren Kräften f in Zusammenhang gebracht werden. Für das zunächst wiederum betrachtete Element (1) ergeben sich folgende Transformations-Beziehungen:

$$F_{x1} = F_{u1} \cos\varphi$$

$$F_{y1} = F_{u1} \sin\varphi$$

$$F_{x2} = F_{u2} \cos\varphi$$

$$F_{y2} = F_{u2} \sin\varphi$$

(A-9)

Auch Gl. (A-9) lässt sich analog zu Gl. (A-4) in Matrizen-Schreibweise darstellen:

$$\begin{bmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ F_{x2} \\ F_{y2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 \\ \sin\varphi & 0 \\ 0 & \cos\varphi \\ 0 & \sin\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{u1} \\ F_{u2} \end{bmatrix}$$

bzw. allgemein

$$[F_{(1)}] = [T_{(1)}]^T [f_{(1)}] \quad (\text{A-10})$$

Und für die Elemente in ihrer Gesamtzahl ist auch hier die abstrakte Formulierung sinnvoll:

$$F = T^T f \quad (\text{A-11})$$

τ^T ist, wenn das Gleichungssystem (A-10) mit (A-7) verglichen wird, nichts anderes als die an der Hauptdiagonalen gespiegelte Transformations-Matrix, die auch als „transponiert“ bezeichnet wird. Aus den Matrizen-Gleichungen (A-5), (A-8) und (A-11) folgt direkt:

$$f = \tau^T c v \tag{A-12}$$

bzw.

$$F = \tau^T c \tau V \tag{A-13}$$

mit

$$C = \tau^T c \tau \tag{A-14}$$

C ist die transformierte *Element-Steifigkeits-Matrix* c , die in dieser zu den globalen Koordinaten konformen Darstellung als *Struktur-Steifigkeits-Matrix* bezeichnet wird. Mit ihrer Einführung lässt sich der direkte Zusammenhang zwischen der äußeren Kraft F und den äußeren Verschiebungen V herstellen:

$$F = C V \tag{A-15}$$

bzw.

$$V = C^{-1} F \tag{A-16}$$

C^{-1} ist die inverse Struktur-Steifigkeits-Matrix. Die Matrix C wird für das hier betrachtete Beispiel nach folgendem Gesetz gebildet:

$$C = c \begin{bmatrix} \cos^2\varphi & \sin\varphi\cos\varphi & -\cos^2\varphi & -\sin\varphi\cos\varphi \\ \sin\varphi\cos\varphi & \sin^2\varphi & -\sin\varphi\cos\varphi & -\sin^2\varphi \\ -\cos^2\varphi & -\sin\varphi\cos\varphi & \cos^2\varphi & \sin\varphi\cos\varphi \\ -\sin\varphi\cos\varphi & -\sin^2\varphi & \sin\varphi\cos\varphi & \sin^2\varphi \end{bmatrix} \tag{A-17}$$

Exakterweise müssten C , c und φ mit dem Index (i) versehen werden, da sie sich auf das jeweilige Element $E_{(i)}$ beziehen. c ist der Steifigkeitswert des Elements, der sich hier auf die einheitliche axiale Stabsteifigkeit $c = EA/l$ reduziert.

Der mit Gl. (A-15) aufgezeigte Zusammenhang zwischen Kraft und Verschiebung lässt sich auch über eine streng physikalische Betrachtungsweise herleiten, wenn das „Prinzip der virtuellen Arbeit“ zugrunde gelegt wird. Dabei müssen sich äußere und innere Arbeit die Waage halten, d. h.

$$\text{äußere Kräfte} \cdot \text{äußere Verschiebungen} = \text{innere Kräfte} \cdot \text{innere Verschiebungen}$$

Implizit ist damit verbunden, dass im stabilen Gleichgewicht die potenzielle Energie der elastischen Formänderung eines Körpers ein Minimum aufweist (Sätze von Castigliano und Menabrea [L1]). Es wird schon in Abschnitt I des Anhangs darauf hingewiesen, dass bei 3D-Problemen der Strukturmechanik auf Integralbeziehungen für die Verformungsenergie zurückgegriffen werden muss [L1].

Die Matrizen-Gleichung (A-15) kann jetzt mit Hilfe der Gl. (A-17) für jedes der drei betrachteten Stabelemente aufgestellt werden:

Element $E_{(1)}$ mit $c_{(1)}$ und $\varphi_{(1)} = 0^\circ$:

$$x_1 \quad x_2$$

$$\begin{bmatrix} F_{x1} \\ F_{x2} \end{bmatrix} = c(1) \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{x1} \\ v_{x2} \end{bmatrix} \quad (\text{A-18})$$

Element $E(2)$ mit $c(2)$ und $\varphi(2) = 135^\circ$:

$$\begin{bmatrix} F_{x2} \\ F_{y2} \\ F_{x3} \\ F_{y3} \end{bmatrix} = c(2) \begin{matrix} x2 & y2 & x3 & y3 \\ \begin{bmatrix} 0,5 & -0,5 & -0,5 & 0,5 \\ -0,5 & 0,5 & 0,5 & -0,5 \\ -0,5 & 0,5 & 0,5 & -0,5 \\ 0,5 & -0,5 & -0,5 & 0,5 \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{bmatrix} v_{x2} \\ v_{y2} \\ v_{x3} \\ v_{y3} \end{bmatrix} \quad (\text{A-19})$$

Element $E(3)$ mit $c(3)$ und $\varphi(3) = 270^\circ$:

$$\begin{bmatrix} F_{y3} \\ F_{y1} \end{bmatrix} = c(3) \begin{matrix} y3 & y1 \\ \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{bmatrix} v_{y3} \\ v_{y1} \end{bmatrix} \quad (\text{A-20})$$

Schließlich sind die Gleichgewichtsbedingungen für die einzelnen Knoten in x - und y -Richtung (für 3D-Strukturen auch z -Richtung) anzusetzen. Dazu werden die Anteile, die die einzelnen dort gekoppelten Stäbe liefern, addiert. Knoten 1 hat in x -Richtung nur Anteile von Element (1) und in y -Richtung von Element (3). Knoten 2 hat in x -Richtung Anteile der Elemente (1) und (2) und in y -Richtung nur von Element (2). Knoten 3 hat in x -Richtung nur Anteile von Element (2), in y -Richtung dagegen von den Elementen (2) und (3) usw. Auf diese Weise wird das Gleichungssystem mit der *Gesamt-Steifigkeits-Matrix* aufgestellt. Die Unbekannten sind die Verschiebungen v_{xi} , v_{yi} , die von den äußeren, an den Knoten i angreifenden Kräften ΣF_{xi} , ΣF_{yi} hervorgerufen werden. Für das obige Beispiel lautet das Gleichungssystem wie folgt:

$$\begin{bmatrix} \Sigma F_{x1} \\ \Sigma F_{y1} \\ \Sigma F_{x2} \\ \Sigma F_{y2} \\ \Sigma F_{x3} \\ \Sigma F_{y3} \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{matrix} x1 & y1 & x2 & y2 & x3 & y3 & \dots \\ \begin{bmatrix} c(1) & 0 & -c(1) & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & c(3) & 0 & 0 & 0 & -c(3) & \dots \\ -c(1) & 0 & c(1) + \frac{c(2)}{2} & -\frac{c(2)}{2} & -\frac{c(2)}{2} & \frac{c(2)}{2} & \dots \\ 0 & 0 & -\frac{c(2)}{2} & \frac{c(2)}{2} & \frac{c(2)}{2} & -\frac{c(2)}{2} & \dots \\ 0 & 0 & -\frac{c(2)}{2} & \frac{c(2)}{2} & \frac{c(2)}{2} & -\frac{c(2)}{2} & \dots \\ 0 & -c(3) & \frac{c(2)}{2} & -\frac{c(2)}{2} & -\frac{c(2)}{2} & \frac{c(2)}{2} + c(3) & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{bmatrix} v_{x1} \\ v_{y1} \\ v_{x2} \\ v_{y2} \\ v_{x3} \\ v_{y3} \\ \dots \end{bmatrix} \quad (\text{A-21})$$

Zur Lösung des Gleichungssystems werden numerische Verfahren mit Rechnerunterstützung herangezogen. Zuvor sind allerdings noch die Randbedingungen zu beachten. Gemäß der Skizze des Ausschnitts der Struktur sind die Kräfte ΣF_{x1} bzw. ΣF_{y1} die äußere-

ren Kräfte F_{Ax} bzw. F_{Ay} , d. h. die Richtungskomponenten der Lagerreaktionskraft F_A . $\Sigma F_{y3} = -F$ ist eine äußere Kraft, die die Struktur belastet ($\Sigma F_{x3} = 0$, da keine Horizontal-komponente). An Knoten ohne äußere Kräfte gilt $\Sigma F_{xi} = 0$ bzw. $\Sigma F_{yi} = 0$. Ähnlich verhält es sich mit den Verschiebungen. In Verbindung mit der Lagerreaktionskraft F_A gilt dann beispielsweise $v_{x1} = 0$ und $v_{y1} = 0$. Hinzu kommen weitere notwendige Randbedingungen zur Lösung des Gleichungssystems, da bei diesem Beispiel ja nur ein Strukturausschnitt betrachtet wird.

Nach Einsetzen der Randbedingungen ist zu erkennen, dass sich das ursprüngliche Gleichungssystem eigentlich auf zwei Gleichungssysteme reduziert. Das erste Gleichungssystem mit den unbekanntem Verschiebungen und den in Form von Randbedingungen bekannten Kräften wird „modifiziertes Gleichungssystem“ genannt [L4]. Es muss zuerst gelöst werden. Damit sind die Verschiebungen bekannt. Nun können die unbekanntem Kräfte mit Hilfe der einzelnen Gleichungen des zweiten Gleichungssystems bestimmt werden. Die Stabkräfte folgen wiederum aus den oben abgeleiteten Beziehungen.

Zusammenfassend ist stets wie folgt vorzugehen [L4]:

- Aufteilung des Systems in finite Elemente und die zugehörigen Knoten
- Festlegung der Knotenverschiebungen und inneren Knotenkräfte
- Bestimmung der Element-Matrizen
- Aufbau der System-Matrix durch Superposition der Element-Matrizen
- Vervollständigung zum Gleichungssystem durch den Vektor „der rechten Seite“ (hier Kraftvektor)
- Modifizierung des Gleichungssystems mit Hilfe der Randbedingungen
- Lösung des modifizierten Gleichungssystems
- Berechnung der problemspezifischen Größen (hier unbekanntem Kräfte) aus dem Lösungsvektor (Verschiebungen)

Neben der Verformung eines Körpers interessieren primär die in diesem durch äußere Kräfte hervorgerufenen Spannungen. Die weiteren Schritte können hier nur noch sehr formal vollzogen werden. Es wird nicht mehr der zuvor benutzte Stab, sondern sinnvollerweise wieder ein einfaches Element, z. B. ein Dreieck mit drei Eckknoten („Konstant-Element“ = vereinfachende Annahme eines konstanten Verzerrungszustands innerhalb des Elements) betrachtet, dem über die zugeordnete Dicke h ein volumenähnlicher Charakter verliehen wird. Die Beschränkung auf den zweiachsigen Spannungszustand (Beanspruchung in der 2D-Ebene) soll aufrechterhalten werden, da diese Ausführungen ja nur exemplarischer Natur sein sollen und alle die Behandlung des 3D-Falls erschwernenden Fakten auch bis zu dieser Stelle unberücksichtigt bleiben.

Den Zusammenhang zwischen der jetzt bekannten Verzerrung (Verschiebung) V und der Dehnung ε stellt die Transformations-Matrix H her:

$$\varepsilon = H V \tag{A-22}$$

ε und V stellen dabei Spaltenvektoren dar. Bei bekannter Dehnungsverteilung ε in der Struktur kann die Spannungsverteilung σ berechnet werden, wenn die Werkstoff-Steifigkeits-Matrix E aufgestellt wird. Dazu müssen die Elemente mit einem E-Modul E und der zugehörige Querkontraktionszahl μ belegt werden:

$$\sigma = \mathcal{E} \varepsilon \quad (\text{A-23})$$

Für die auf äußere Kräfte f zurückgehende Spannungsverteilung σ kann ohne Beweis folgende Beziehung abgeleitet werden:

$$f = V_E H^T \sigma \quad (\text{A-24})$$

V_E ist das Element-Volumen. H^T ist nichts anderes als die transponierte Matrix H von Gl. (A-22). Wird Gl. (A-22) in Gl. (A-23) sowie das Ergebnis wiederum in Gl. (A-24) eingesetzt, so lässt sich die Transformations-Matrix H unter Zuhilfenahme der Werkstoff-Steifigkeits-Matrix \mathcal{E} in die Struktur-Steifigkeits-Matrix \mathcal{C} – siehe Gl. (A-14) und Gl. (A-15) – überführen:

$$f = V_E (H^T \mathcal{E} H) v = \mathcal{C} v \quad (\text{A-25})$$

und folglich

$$\mathcal{C} = V_E (H^T \mathcal{E} H) \quad (\text{A-26})$$

III Lösung von Differenzialgleichungen mit Hilfe der FEM

In Abschnitt II wird ein „direktes“ Verfahren zur Lösung von Aufgabenstellungen der Strukturmechanik anwendungsnah vorgestellt. Es wird darauf hingewiesen, dass dabei Differenzialgleichungen (DGL) umgangen werden. Auch wenn letztere Vorstellung manchmal mit der FEM verbunden wird, entspricht dies keineswegs den Tatsachen. Allerdings lassen sich in vielen Fällen DGL durch Aufgaben gleicher Lösung ersetzen, bei denen eine Funktion gesucht wird, die einem bestimmten Integral einen Kleinstwert erteilt [L1]. In der Mathematik wird dann von „Variationsaufgaben“ gesprochen. Es darf in diesem Zusammenhang in Erinnerung gerufen werden, dass weite Bereiche der Physik von „Minimal-Prinzipien“ bestimmt werden.

Bezüglich der Lösung von DGL konkurriert die FEM mit anderen Methoden, wie z. B. der FDM (Finite-Differenzen-Methode). Es muss an dieser Stelle der Hinweis genügen, dass die FEM im Gegensatz zur FDM, was das Grundgebiet anbetrifft, auf dem die gesuchte Funktion $u(x,y,z)$ definiert ist, nicht auf ein starres Gitter beschränkt ist, sondern mit einer Vielzahl von Element-Geometrien sehr anpassungsfähig ist. Einige weitere Anmerkungen zur FDM enthält Abschnitt IV.

Die Transformations-Gleichung zwischen der Variationsaufgabe und der DGL ist die Eulersche DGL. Dies kann am folgenden Beispiel verdeutlicht werden:

$$\text{Variationsaufgabe: Integral } I = \int_G F(x, y, z, u_x, u_y, u_z) dV = \text{Minimum} \quad (\text{A-27})$$

F ist der Integrand, $u(x,y,z)$ ist die gesuchte Lösung. Es treten bei diesem Beispiel nur 1. Ableitungen von u nach den Koordinaten x , y und z auf. G ist das Grundgebiet, $dV = dx dy dz$ ein Volumenelement. Die stetige Differenzierbarkeit aller vorkommenden Funktionen und Ableitungen wird vorausgesetzt. Die obige Variationsaufgabe gilt ohne Modifikation (zusätzliche Integrationsterme), wenn die Lösung u auf dem Rand C des Grundgebiets G gegeben ist [L1]. Im Prinzip handelt es sich um so genannte Randwert-

oder Eigenwertprobleme, wenn die DGL homogen ist. Die Eulersche DGL lautet in diesem Fall [L1]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial F}{\partial u_x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial F}{\partial u_y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial F}{\partial u_z} \right) - \frac{\partial F}{\partial u} = 0 \quad (\text{A-28})$$

Für dieses Beispiel soll der Integrand

$$F = u_x^2 + u_y^2 + u_z^2 \quad (\text{A-29})$$

angesetzt werden.

Aus den Gl. (A-28) und (A-29) folgt:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial u} &= 0 \\ \frac{\partial F}{\partial u_x} &= \frac{\partial}{\partial u_x} (u_x^2) = 2u_x; & \frac{\partial}{\partial x} (2u_x) &= 2u_{xx} \\ \frac{\partial F}{\partial u_y} &= \frac{\partial}{\partial u_y} (u_y^2) = 2u_y; & \frac{\partial}{\partial y} (2u_y) &= 2u_{yy} \\ \frac{\partial F}{\partial u_z} &= \frac{\partial}{\partial u_z} (u_z^2) = 2u_z; & \frac{\partial}{\partial z} (2u_z) &= 2u_{zz} \end{aligned} \quad (\text{A-30})$$

Aus den Gl. (A-28) und (A-30) folgt schließlich die bekannte Laplacesche DGL:

$$u_{xx} + u_{yy} + u_{zz} = 0 \quad (\text{A-31})$$

Bei Anwendung der FEM wird die DGL in eine Variationsaufgabe überführt. In allgemeiner Schreibweise heißt dies analog zu oben, wenn zur zu lösenden DGL der zugehörige Integrand F angesetzt wird:

$$I = \int_G F \, dV = \text{Minimum} \quad (\text{A-32})$$

Das Grundgebiet G , auf dem die DGL gilt, wird dann in viele kleine Teilbereiche, die finiten Elemente $E_{(i)}$, aufgeteilt. Die Gesamtzahl der Elemente betrage m . Es wird ja außerdem vorausgesetzt, dass die Lösung u auf dem Rand von G bekannt ist, d. h. ausreichend viele Randbedingungen für u für eine eindeutige Lösung gegeben sind.

Das globale Integral (Gl. [A-32]) kann dann durch eine Summe von einzelnen Integralen, die sich auf die Teilbereiche beziehen, ersetzt werden:

$$I = \sum_{E_{(i)}} \int F \, dV = \text{Minimum} \quad (\text{A-33})$$

Jedes der m finiten Elemente $E_{(i)}$ hat n Knotenpunkte K mit bekannten Koordinaten. Diese werden bei der Erstellung des FE-Netzes eindeutig festgelegt. Für die exakte Lösung u der DGL wird ein Ansatz für die Näherungslösung U gemacht, wobei diese nur stückweise definiert ist. Die Näherungslösung U muss dabei für jedes finite Element angesetzt werden. Je nach Element-Typ kommen Linearfunktionen oder Polynome in Frage (siehe Abschnitt I). Die Stetigkeitsforderung beschränkt sich dabei zunächst dar-

auf, dass zwei finite Elemente, die denselben Knoten teilen, bezüglich der für sie angesetzten Näherungsfunktionen dort wenigstens dieselbe Näherungslösung U haben müssen.

Da sich jedes Vieleck in Dreiecke zerlegen lässt, sind Dreiecke sehr anpassungsfähig. Dreiecke lassen sich darüberhinaus so mit Knoten belegen, dass die Näherungslösung U als Polynom beliebiger Ordnung gewählt werden kann, wobei die Stetigkeit von U auf den Elementrändern erfüllt ist. Für weitere Erläuterungen wird ein einfaches 2D-Dreieck-Element angenommen. Dieses hat drei Eckpunkte (Knoten, TRIM3-Element **[L1]**), so dass für die Näherungslösung U die Linearfunktion der allgemeinen Form

$$U = a + bx + cy \quad (\text{A-34})$$

mit den unbestimmten Koeffizienten a , b und c angesetzt wird.

Wir konzentrieren uns vorübergehend ganz auf das Element $E_{(1)}$ mit den Knoten $K_1(x_1, y_1)$, $K_2(x_2, y_2)$ und $K_3(x_3, y_3)$. Einsetzen der Knoten-Koordinaten führt zu folgendem Gleichungs-System:

$$\begin{aligned} U_1 &= a + bx_1 + cy_1 \\ U_2 &= a + bx_2 + cy_2 \\ U_3 &= a + bx_3 + cy_3 \end{aligned} \quad (\text{A-35})$$

U_1 , U_2 und U_3 sind noch nicht bekannte Näherungslösungen von u an den Knoten K_1 , K_2 und K_3 . Es muss hier eingeschoben werden, dass für dieses Beispiel auf elementspezifische Koordinaten (z. B. lokale Dreiecks-Koordinaten; siehe Anmerkung am Ende des Abschnitts) verzichtet wird, die mittels Transformation in das globale Koordinatensystem überführt werden. Das Gleichungssystem (A-35) kann z. B. mit der Determinanten-Methode gelöst werden:

$$\begin{aligned} \text{Koeffiz.-Det. } D &= x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2) = 2A \\ \text{Determinante } D_1 &= U_1(x_2y_3 - x_3y_2) + U_2(x_3y_1 - x_1y_3) + U_3(x_1y_2 - x_2y_1) \\ \text{Determinante } D_2 &= U_1(y_2 - y_3) + U_2(y_3 - y_1) + U_3(y_1 - y_2) \\ \text{Determinante } D_3 &= U_1(x_3 - x_2) + U_2(x_1 - x_3) + U_3(x_2 - x_1) \end{aligned} \quad (\text{A-36})$$

Die Lösungen folgen mit

$$a = D_1/D, \quad b = D_2/D \quad \text{und} \quad c = D_3/D \quad \text{mit} \quad D = 2A \quad (A \text{ Dreiecksfläche}) \quad (\text{A-37})$$

Mit der Einführung von Zahlenwerten lässt sich etwas mehr Übersichtlichkeit erreichen. Die Element-Knoten werden mit $K_1(0,0)$, $K_2(1,0)$ und $K_3(0,1)$ bezüglich ihrer Lage im Grundgebiet G festgelegt. Die Koeffizienten nehmen dann die Werte

$$a = U_1, \quad b = U_2 - U_1 \quad \text{und} \quad c = U_3 - U_1 \quad \text{an und} \quad (\text{A-38})$$

die Näherungsfunktion für das finite Element $E_{(1)}$ lautet

$$U_{(1)} = U_1 + (U_2 - U_1)x + (U_3 - U_1)y \quad (\text{A-39})$$

Die Koeffizienten werden also durch die Lösungen U_1 , U_2 und U_3 der Näherungsfunktion ausgedrückt. Wird das Element $E_{(1)}$ mit beliebigen Ortskoordinaten in Verbindung gebracht, so haben die Koeffizienten a , b und c folgende allgemeine Form:

$$a = \alpha_1 U_1 + \alpha_2 U_2 + \alpha_3 U_3$$

$$\begin{aligned} b &= \beta_1 U_1 + \beta_2 U_2 + \beta_3 U_3 \\ c &= \gamma_1 U_1 + \gamma_2 U_2 + \gamma_3 U_3 \end{aligned} \tag{A-40}$$

Es wird nun folgender Ansatz auf dem finiten Element $E_{(i)}$ gemacht:

$$U_{(i)} = \sum_{j=1}^n f_{(i)j} U_j \tag{A-41}$$

(i = Element-Zähler, j = Knoten-Zähler des Elements, n = Knoten pro Element, hier $n = 3$). Die Funktionen $f_{(i)j}$ sind dabei Polynome der Ortskoordinaten. Für das hier behandelte Beispiel geht Gl. (A-42) aus Gl. (A-39) unter Berücksichtigung von Gl. (A-40) und Gl. (A-41) hervor:

$$U_{(1)} = (1 - x - y) U_1 + x U_2 + y U_3 \tag{A-42}$$

Gl. (A-42) liefert die so genannten Formfunktionen („Shape Functions“) $f_{(1)j}$ des Elements $E_{(1)}$:

$$f_{(1)1} = 1 - x - y, \quad f_{(1)2} = x \quad \text{und} \quad f_{(1)3} = y \tag{A-43}$$

Werden die Koordinaten eines Knotenpunkts $K_k(x_k, y_k)$ in die Näherungsfunktion eingesetzt, dann ist $U_{(1)} = U_k$, was z. B. für $k = 2$ (Knoten $K_2(1,0)$) leicht zu zeigen ist:

$$U_{(1)} = (1 - 1 - 0) U_1 + 1 \cdot U_2 + 0 \cdot U_3 = U_2 \quad \text{q.e.d.}$$

Für ein beliebiges anderes Element $E_{(p)}$, z. B. mit den Element-Knoten $K_r(x_r, y_r)$, $K_s(x_s, y_s)$ und $K_t(x_t, y_t)$, ergibt sich analog folgende Näherungsfunktion, wobei mit Bezug auf die Gl. (A-36) und (A-37) folgende Schreibweise üblich ist:

$$U_{(p)} = \frac{1}{2A} [(A_r + B_r x + C_r y) U_r + (A_s + B_s x + C_s y) U_s + (A_t + B_t x + C_t y) U_t] \tag{A-44}$$

$$\text{mit } \frac{A_i}{2A} = \alpha_i, \quad \frac{B_i}{2A} = \beta_i \quad \text{und} \quad \frac{C_i}{2A} = \gamma_i \quad \text{nach Gl. (A-40)}$$

Tatsächlich werden zur Vereinfachung der über die Elemente erforderlichen Integration (ganz allgemein aber auch zwecks einheitlicher Behandlung unterschiedlicher Näherungsfunktionen und der entsprechenden Element-Beiträge) Dreieckselemente auf ein Einheitsdreieck abgebildet. Darauf und auf die Durchführung der Integration kann hier nicht näher eingegangen werden.

Sind alle Formfunktionen bestimmt, so werden die in der DGL vorkommenden Ableitungen aus U auf der Basis von Gl. (A-41) gebildet. Die Ableitung U_x lautet dann z. B. wie folgt:

$$U_{(i)x} = \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_{(i)j}}{\partial x} U_j \tag{A-45}$$

Entsprechend können die Ableitungen $U_{(i)y}$ und, wenn sie vorkommen, auch höherer Ordnung sowie nach der z -Koordinate bei einem 3D-Grundgebiet berechnet werden [L1]. So wird der Integrand F für das Element $E_{(i)}$ aufgebaut. Damit das Integral I der

Minimalbedingung genügt, muss $\partial I / \partial U_k$ für jedes unbekannte U_k verschwinden. In allgemeiner Schreibweise lässt sich dies mit Bezug auf Gl. (A-33) wie folgt ausdrücken:

$$\sum \frac{\partial}{\partial U_k} \left(\int_{E(i)} F dV \right) = 0 \quad (\text{A-46})$$

Die Matrix der Koeffizienten des Gleichungssystems

$$\frac{\partial}{\partial U_k} \left(\int_{E(i)} F dV \right) = 0 \quad (\text{A-47})$$

ist die Element-Matrix. Zunächst werden alle Element-Matrizen bestimmt, aus denen dann das Gleichungssystem für das gesamte Grundgebiet zusammengestellt wird. Die Lösung des Gleichungssystems erfolgt mit Hilfe geeigneter numerischer Methoden und Rechnerunterstützung, was in diesem kurzen Abriss nicht weiter verfolgt werden kann. Letztere Aussage bezieht sich insbesondere auf Eigenwertprobleme.

Diese knappe Einführung beschränkt sich auf wesentliche Schritte des Berechnungsablaufs. Dabei werden streng mathematische Kriterien bei der Herleitung der Lösung bewusst weitgehend außer Acht gelassen, um diese Methode transparenter darstellen zu können. Für die praktische Anwendung sind ohnehin weiterführendes Schrifttum und die Handbücher der Software-Hersteller zu Rate zu ziehen.

Es ist noch zu ergänzen, dass nicht für alle Randwertprobleme eine äquivalente Variationsaufgabe existiert, d. h. das auf Ritz zurückgehende Verfahren dann nicht anwendbar ist. In diesen Fällen wird ein Näherungsansatz U für die Lösung gewählt, bei dem nach Einsetzen in die DGL ein Rest oder Residuum verbleibt. Die freien Parameter des Näherungsansatzes U werden nun so bestimmt, dass der Rest im betrachteten Intervall möglichst klein wird. Dazu werden Gewichtsfunktionen W eingeführt. Nach Multiplikation und Integration im betrachteten Intervall wird ein so genannter gewichteter Durchschnitt berechnet, der verschwinden (= 0 sein) soll. Daraus folgen die Bestimmungsgleichungen für die freien Parameter. Je nach Wahl der Gewichtsfunktion hat das Verfahren unterschiedliche Namen. Am bekanntesten ist heute wohl „Galerkin-Prozess“. Aber auch „Methode der gewichteten Residuen“ oder „Restgrößenmethode“ sind gebräuchliche Namen. Dieser Hinweis soll an der Stelle ausreichen.

Abschließend noch die oben angekündigte Anmerkung zu Dreieckskoordinaten. Es handelt sich dabei um die lokalen Koordinaten L_1 , L_2 und L_3 eines Dreiecks. Für die Näherungslösung U gilt: $U = L_1 U_1 + L_2 U_2 + L_3 U_3$. Den Zusammenhang mit den globalen Koordinaten x, y stellen folgende Beziehungen her:

$$x = \sum_{i=1}^3 L_i x_i, \quad y = \sum_{i=1}^3 L_i y_i, \quad \sum_{i=1}^3 L_i = 1 \quad (\text{A-48})$$

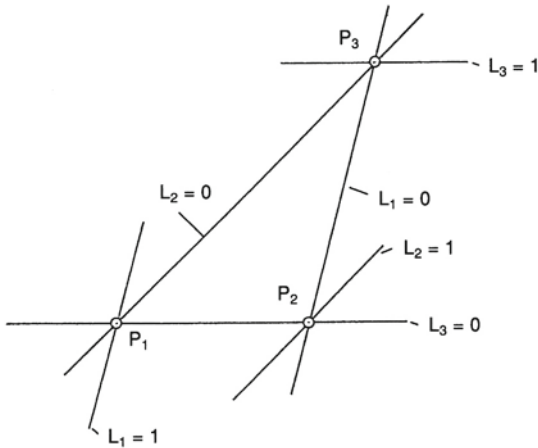


Bild A-3
Dreieckskoordinaten L_i

IV Anmerkungen zur Finite-Differenzen-Methode (FDM)

Es wird eine Differentialgleichung unterstellt, die bestimmte physikalische Zusammenhänge beschreibt und bei vorliegender Aufgabenstellung nicht explizit lösbar ist. Gesucht wird daher eine Näherungslösung U anstelle der exakten Lösung u . Bei der FDM werden alle Ableitungen durch Differenzenquotienten ersetzt. So entsteht aus der Differentialgleichung eine Differenzengleichung. Die Differenzenquotienten werden mit Hilfe von Approximationen z. B. auf folgende Weise gebildet, wobei die Erfüllung der Stetigkeitsbedingungen vorausgesetzt wird:

$$1. \text{ Ableitung: } \partial u / \partial x = (u_{i+1,j} - u_{i,j}) / \Delta x + F_1(\Delta x)$$

$$2. \text{ Ableitung: } \partial^2 u / \partial x^2 = (u_{i+1,j} - 2u_{i,j} + u_{i-1,j}) / 2\Delta x + F_{II}(\Delta x)$$

Entsprechend werden $\partial u / \partial y$ usw. gebildet (Indizierung hier für zweidimensionalen Definitionsbereich).

Der Definitionsbereich der Differenzengleichung reduziert sich auf eine diskrete Punktmenge mit den Abständen Δx , Δy und Δz zwischen den Punkten, wenn ganz allgemein ein dreidimensionales Grundgebiet betrachtet wird. Deshalb wird das Grundgebiet durch ein in den einzelnen Koordinatenrichtungen äquidistantes, achsenparalleles Gitter (Netz) abstrahiert. Die Indizes von u legen den jeweiligen Gitterpunkt eindeutig fest. Zur Reduzierung des Rechenaufwands wird später bei mehrdimensionalem Grundgebiet sinnvollerweise von der Mehrfach- auf eine Einfachindizierung übergegangen, was hier jedoch nicht weiter verfolgt werden kann. Die Abstände Δx , Δy und Δz , bei zeitabhängigen Vorgängen auch Δt , bestimmen die Diskretisierungsfehler F . Durch Anwendung der in allgemeiner Form vorliegenden Differenzengleichungen auf die Gitterpunkte entsteht ein algebraisches Gleichungssystem, das mit mathematischen Algorithmen gelöst werden kann, wenn je nach Aufgabenstellung ausreichend viele Anfangs- oder Randbedingungen

(Gitterpunkte, auf denen die Lösung u bekannt ist, oder zusätzliche Hilfgitterpunkte im Fall der Normalableitung $\partial u/\partial n$) gegeben sind.

Der Diskretisierungsfehler und die Begriffe Konsistenz und Konvergenz spielen bei der FDM eine große Rolle. Leider ist es keine Selbstverständlichkeit, dass mit hinreichend kleiner Schrittweite der Diskretisierungsfehler vernachlässigbar wird. Durch ungeschickte Wahl der Schrittweiten kann dieser dabei über alle Grenzen wachsen. Konsistenz bedeutet, dass der Diskretisierungsfehler der Näherungsbeziehungen zur Approximation von Differenzialquotienten mit hinreichend kleiner Schrittweite vernachlässigbar wird. Konvergenz bedeutet, dass die Näherungslösung U dabei von der exakten Lösung u nur noch vernachlässigbar abweicht.

Hinzu kommt das Problem der numerischen Instabilität. Darunter ist z. B. das oszillierende Aufschaukeln des Diskretisierungsfehlers zu verstehen. An dieser Stelle kann nur auf die Existenz solcher mathematisch-nummerischer Phänomene in Verbindung mit Approximationslösungen hingewiesen werden. Für das weiterführende Studium empfiehlt sich z. B. [L1]. Dort wird auch auf die Lösung großer algebraischer Gleichungssysteme eingegangen.

V Anmerkungen zur Boundary-Element-Methode (BEM)

In bestimmten Anwendungsgebieten kann die BEM heute eine wirtschaftlichere Alternative zur FEM, auf jeden Fall eine Ergänzung der Anwendungsbreite derartiger Methoden darstellen. Die BEM wird auch als Integralgleichungs-Methode bezeichnet. Sie zeigt so eine gewisse Verwandtschaft mit der FEM, bezieht sich jedoch nur auf den Randbereich eines Körpers. Im Gegensatz zur FEM ist die Modellierung der Oberfläche ausreichend, um auch den Zustand im Inneren der Struktur (des Körpers) ermitteln zu können. Es ist daher auch der Begriff „Randelement-Methode“ (REM) gebräuchlich.

Aufgrund dieses Sachverhalts eignet sich die BEM z. B. besonders für die Ermittlung von Kerbspannungen an der Bauteiloberfläche. Hier kann der geringere Aufwand zur Beschreibung der Geometrie und die im Allgemeinen höhere Genauigkeit vorteilhaft genutzt werden. Nachteile können lange Rechenzeiten und großer Speicherbedarf sein. Von wesentlichem Einfluss ist dabei die „Kompaktheit“ der Struktur (des Körpers). Gemeint ist damit das Oberflächen-Volumen-Verhältnis.

Auch zur BEM gibt es mittlerweile ausreichend viel Schrifttum. Stellvertretend sei hier [L10] genannt. Diese Quelle ist selbst stark anwendungsorientiert, enthält jedoch viele Schrifttumhinweise im Hinblick auf die Grundlagen der Methode.

Die Anfänge der BEM lassen sich am elementar lösaren Fall der Durchbiegung y eines Balkens plausibel erklären. Die Lösung der bekannten DGL der Balkenbiegung $y''''(x) = q(x)/EI$ kann in eine Integralgleichung

$$y(x) = \frac{1}{EI} \int_0^l G(x, \xi) q(\xi) d\xi$$

überführt werden. G ist die Greensche Funktion und q die Belastungsfunktion. Die Greensche oder Einflussfunktion erfüllt die DGL und die Randbedingung in Bezug auf

eine Einheitskraft $F(\xi) = 1$ an der Stelle ξ des Balkens. Basierend auf der Kenntnis von G kann für beliebige Lastfunktionen q die Lösung gefunden werden.

Für komplexere Strukturen (Körper) ist die Greensche Funktion, d. h. die an beliebiger Stelle gültige Lösung (hier Verformung) infolge einer an dieser oder einer beliebigen anderen Stelle wirkenden Einheitskraft, in der Regel nicht bekannt. Man behilft sich mit grundsätzlich bekannten Lösungen für Scheiben, Platten, Schalen etc. unendlicher Erstreckung, denen im Körperinneren exakte Gültigkeit unterstellt wird. Es wird einfach angenommen, die Struktur (der Körper) sei aus einem Gebiet unendlicher Erstreckung herausgeschnitten worden. Die für die Oberfläche gültige Lösung folgt durch punktweise Anpassung an die Randbedingungen in einer integralen Form der Grundgleichungen.

Über Betrachtungen zur Äquivalenz der Verformungsarbeit in Verbindung mit der Aufbringung der tatsächlichen Belastung und alternativ der Einheitskraft unter Verwendung des „Satzes von Betti“ lässt sich die Einflussfunktion über Gebiets- und Randintegrale ermitteln, was verständlicherweise hier nicht im Detail nachvollzogen werden kann. Die numerischen Gleichungen entstehen dadurch, dass zum einem in jedem der k Knoten die Einheitskraft aufgebracht und der „Satz von Betti“ angewandt wird, des Weiteren dadurch, dass zusätzlich auch ein Einheitsmoment aufgebracht und identisch verfahren wird. So entstehen $2k$ Gleichungen für $2k$ Unbekannte. Zur numerischen Integration über die Berandung der Struktur (des Körpers) müssen noch Elementfunktionen eingeführt werden.

VI Anmerkungen zum „modalen Modell“ (Modal-Analyse)

Die die Bewegung von Strukturen mit vielen Freiheitsgraden beschreibenden Gleichungen sind zwangsläufig miteinander gekoppelt. Dies erschwert die Lösung der Gleichungen, d. h., dies kostet Rechenzeit und kann auch zu numerischen Ungenauigkeiten führen [L11]. Es besteht allerdings die Möglichkeit, die Gleichungen zu entkoppeln. Auf diese Weise entstehen entkoppelte Gleichungen, von denen jede völlig unabhängig von den anderen gelöst werden kann. Auf dieser Vorgehensweise beruht das „modale Modell“ schwingender Strukturen:

Die Bewegungsgleichung der schwingenden Struktur lautet:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{\dot{x}\} + [C]\{x\} = \{F(t)\}$$

| | | | |
|-------|---------------------|----------------|---------------------------------------|
| $[M]$ | Massen-Matrix | $\{\ddot{x}\}$ | Vektor der Schwingbeschleunigung |
| $[K]$ | Dämpfungs-Matrix | $\{\dot{x}\}$ | Vektor der Schwinggeschwindigkeit |
| $[C]$ | Steifigkeits-Matrix | $\{x\}$ | Vektor der Schwingungsamplituden |
| | | $\{F(t)\}$ | Vektor der äußeren Kräfte (Anregung). |

Es handelt sich dabei um n gekoppelte Gleichungen. Der Zähl-Index ist k .

Die Eigenfrequenzen ω_k des ungedämpften Systems ergeben sich aus folgendem Gleichungssystem:

$$|[C] - \omega^2[M]| = 0$$

Die Eigenvektoren $\{x_k\}$ können dann wie folgt bestimmt werden:

$$([C] - \omega_k^2 [M]) \{x_k\} = 0$$

Die Eigenvektoren $\{x_k\}$ beschreiben die zu den Eigenfrequenzen ω_k gehörenden Eigenschwingungsformen. Sind die Eigenfrequenzen und Eigenvektoren bestimmt, so wird folgende Transformation vorgenommen [L11]:

$$\{x\} = [X]\{y\}, \{\dot{x}\} = [X]\{\dot{y}\}, \{\ddot{x}\} = [X]\{\ddot{y}\}$$

$[X]$ ist die Matrix der Eigenvektoren $\{x_k\}$ ($1 \leq k \leq n$), d. h. eine $n \times n$ -Matrix. Gleichzeitig wird die Dämpfungs-Matrix $[K] = 0$ gesetzt. Die obige Bewegungsgleichung der ungedämpften Struktur lautet dann:

$$[M][X]\{\ddot{y}\} + [C][X]\{\dot{y}\} = \{F(t)\}$$

Multiplikation mit der transponierten Matrix $[X]^T$ liefert schließlich ohne Beweis n entkoppelte Gleichungen

$$[X]^T[M][X]\{\ddot{y}\} + [X]^T[C][X]\{\dot{y}\} = [X]^T\{F(t)\},$$

weil die Produkte $[X]^T[M][X]$ und $[X]^T[C][X]$ „diagonale“ Matrizen sind. Die entkoppelte Gleichung für die Anregung der k -ten Eigenschwingungsform lautet dann:

$$m_k^* \ddot{y}_k + c_k^* \dot{y}_k = F_k^*(t)$$

$$\begin{aligned} m_k^* &= \{x_k\}^T [M] \{x_k\} \\ c_k^* &= \{x_k\}^T [C] \{x_k\} \\ F_k^* &= \{x_k\}^T \{F(t)\} \end{aligned}$$

y_k wird Haupt- oder „modale“ Koordinate genannt. Sie entzieht sich einer direkten kinematischen Deutung. m_k^* ist die generalisierte oder „modale“ Masse, c_k^* die generalisierte oder „modale“ Steifigkeit und F_k^* die generalisierte Kraft, die den „modalen“ Einmassenschwinger zu Schwingungen anregt. Das „modale Modell“ einer schwingenden Struktur interpretiert diese als eine Anzahl voneinander unabhängiger Einmassenschwinger, die mit den Eigenfrequenzen der Struktur schwingen.

Die Dämpfung wurde bisher vernachlässigt. Zwecks Aufrechterhaltung der Entkopplung der Gleichungen muss für die jetzt noch einzuführende Dämpfung beispielsweise folgender Ansatz gemacht werden [L11]:

$$[K] = \alpha [M] + \beta [C]$$

Aus $[X]^T[K][X]$ folgen die Dämpfungs-Konstanten k_k^* und damit die Schwingungsgleichungen mit „modaler“ Dämpfung für die den einzelnen Eigenmoden zugeordneten Resonanzschwingungen:

$$m_k^* \ddot{y}_k + k_k^* \dot{y}_k + c_k^* y_k = F_k^*(t)$$

Division durch m_k^* ermöglicht schließlich noch folgende Umformung:

$$\ddot{y}_k + 2 D_k \omega_k \dot{y}_k + \omega_k^2 y_k = F_k(t)$$

Dabei ist $D_k = k_k^*/(2m_k^*\omega_k)$ der „modale“ Dämpfungsgrad ($2D_k\omega_k = \alpha + \beta\omega_k^2$) und $F_k(t) = F_k^*(t)/m_k^*$. Gemäß der schon erwähnten Transformation kann der Lösungsvektor $\{x(t)\}$ jetzt aus der Matrix der Eigenvektoren $[X]$ und dem nun bekannten Vektor $\{y(t)\}$ berechnet werden. Die Verschiebung eines Strukturpunkts (der Koordinate) $x_i(t)$ wird schließlich nach folgender Vorschrift berechnet:

$$x_i(t) = \sum_{k=1}^n x_{ik} y_k(t)$$

x_{ik} sind die Elemente der Matrix der Eigenvektoren.

Der Vorteil „modaler“ Modelle ist die Tatsache, dass bezüglich der zu Schwingungen angeregten Struktur nur die jeweils innerhalb eines Frequenzbands interessierenden Resonanzschwingungen völlig unabhängig ohne Matrizen-Operationen ziemlich einfach berechnet werden können.

Literaturverzeichnis

(nach Fachgebieten geordnet)

[A..] Einleitung, Abgrenzung Motor-Mechanik und Thermodynamik

- [A1] *Braess, H.-H.*: Berechnung, Konstruktion und Versuch: zunehmende Partnerschaft auch in der Automobiltechnik. VDI-Tagung Berechnung im Automobilbau (Fellbach 1984). In: VDI-Berichte Nr. 537 (1984)
- [A2] *Seifert, H.*: 20 Jahre erfolgreiche Entwicklung des Programmsystems PROMO. In: MTZ 51 (1990), Nr. 11
- [A3] *Stanski, U.; Melcher, Th.; Berthold, J.*: Rechnergestützte Ladungswechselforschung. In: MTZ 46 (1985), Nr. 12
- [A4] *Urlaub, A.*: Verbrennungsmotoren. Band 2: Vefahrenstheorie. Berlin: Springer, 1989
- [A5] *Seifert, H.*: Instationäre Strömungsvorgänge in Rohrleitungen an Verbrennungskraftmaschinen. Berlin: Springer, 1962
- [A6] *Woschni, G.*: Elektronische Berechnung von Verbrennungsmotorkreisprozessen. In: MTZ 26 (1965), Nr. 11
- [A7] *Görg, K. A.; Brüner, Th.; Franzke, E.; Polke, H. R.*: Ladungswechselrechnung im CAE-Konzept. In: MTZ 51 (1990), Nr. 9
- [A8] *Brandstätter, W.; Killmann, I.*: Computersimulation der Strömung, Gemischbildung und Verbrennung in Motoren. In: MTZ 49 (1988), Nr. 5
- [A9] *Amsden, A. A.; Ramshaw, J. D.; O'Rourke, P. J.; Dukowicz, J. K.*: KIVA: A Computer Program for Two- and Three-Dimensional Fluid Flows with Chemical Reactions and Fuel Sprays. In: Los Alamos National Lab. (USA), LA-10245-MS (1985)
- [A10] *Amsden, A. A.; Butler, T. D.; O'Rourke, P. J.; Ramshaw, J. D.*: KIVA: A Comprehensive Model for 2D- and 3D-Engine Simulations. In: SAE Technical Paper Series 850554
- [A11] *Ahmadi-Befru, B.*: Assessment of Variants of the κ - ϵ -Turbulence Model for Engine Flow Applications. Energy Sources Technology Conference and Exhibition (Dallas/Tex. 1987). In: ASME 87-FE-11
- [A12] *Ahmadi-Befru, B.; Brandstätter, W.; Pitcher, G.; Troger, Ch.; Wigley, G.*: Simulationsmodell zur Berechnung der Luftbewegung in Zylindern von Verbrennungsmotoren. In: MTZ 51 (1990), Nr. 10
- [A13] *Fischer, H.; Melcher, Th.*: Mehrdimensionale Verbrennungsrechnung: ein Werkzeug für die Brennraumentwicklung. In: MTZ 50 (1989), Nr. 4
- [A14] *Grill, M.*: Objektorientierte Prozessrechnung von Verbrennungsmotoren. Stuttgart, Universität, Diss., 2006 (http://elib.uni-stuttgart.de/opus/doku/lic_mit_pod.php)
- [A15] *Barba, Ch.*: Erarbeitung von Verbrennungskennwerten aus Indizierdaten zur verbesserten Prognose und rechnerischen Simulation des Verbrennungsablaufs bei Pkw-DE-Dieselmotoren mit Common-Rail-Einspritzung. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), Diss., 2001
- [A16] *Velji, Amin (Hrsg.)*: Der Konflikt zwischen Thermodynamik und Mechanik in der Motorenentwicklung. Renningen: Expert, 2006 (Haus der Technik Fachbuch)
- [A17] *Johansson, R. J.*: Globale Antriebssysteme – Die Strategie von GM. 27. Internationales Wiener Motorsymposium, 27.–28. April 2006. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 12 Nr. 622. Düsseldorf: VDI, 2006

[B.] Kriterien Motorauslegung

- [B1] *Heywood, J. B.*: Internal Combustion Engine Fundamentals. London: McGraw Hill, 1989
- [B2] *Kraemer, O.; Jungbluth, G.*: Bau und Berechnung von Verbrennungsmotoren: Hubkolben- und Rotationskolbenmotoren. Berlin: Springer, 1983
- [B3] *List, H.; Pischinger, A.* (Hrsg.): Die Verbrennungskraftmaschine. Bd. 1 bis 8. Wien: Springer. – Teilweise Neuauflage unter der Bezeichnung „Neue Folge“
- [B4] *Schmidt, F. A. F.*: Verbrennungskraftmaschinen. 4. Auflage. Berlin: Springer, 1967
- [B5] = [I3]
- [B6] *Mollenhauer, K.; Tschöke, H.* (Hrsg.): Handbuch Dieselmotoren. 3. neu bearbeitete Auflage. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2007
- [B7] *Derndinger, H.-O.; Ritter, H.*: Über den Einfluss des Hubbohrungsverhältnisses. In: MTZ 27 (1966), Nr. 8
- [B8] *Schellmann, K.; Gleiter, F.; Steinhauser, D.-G.*: Optimierung der Brennraumgeometrie von Vierventil-Ottomotoren. In: MTZ 50 (1989), Nr. 9
- [B9] *Sivers, R. v.; Pilgrim, R.*: Schwingungstechnisch-akustische Maßnahmen bei der Entwicklung des Porsche-944-Motors. In: ATZ 83 (1981), Nr. 1
- [B10] *Kolbenschmidt AG*: E-gvo-005. Neckarsulm: Kolbenschmidt. – Interner Entwicklungsbericht
- [B11] *Kolbenschmidt AG*: Konstruktion für Ottokolben. Neckarsulm: Kolbenschmidt. – Interne Hausnorm HNK40
- [B12] *Kolbenschmidt AG*: KS-Handbuch: Technisches Handbuch der Kolbenschmidt AG. Band 1, Heft 3, Kap. 2: Gestaltung des Kolbens. Neckarsulm: Kolbenschmidt, 1987
- [B13] *Mahle GmbH*: Mahle Kolbenkunde: Technisches Handbuch. Stuttgart: Mahle, ca. 1984/1985
- [B14] *Bronstein, I. N.; Semendjajew, K. A.*: Taschenbuch der Mathematik. Zürich: Harri Deutsch, 1969
- [B15] *Piech, F.*: 3 Liter/100 km im Jahr 2000? ATZ 94 (1992), Nr. 1

[C.] Pleuel und Kolben

- [C1] KS X20R – Hochbelastbarer bleifreier Stahl-Messing-Verbundwerkstoff mit Sputterlaufschicht für Haupt- und Pleuellager (G-X20R A/IX/f);
KS X20T – Bleifreier Stahl-Messing-Verbundwerkstoff mit Sputterlaufschicht für höchstbelastete Gleitlager (G-X20T A/IX/f);
KS X20 – Hochbelastbarer, bleifreier Stahl-Messing-Verbundwerkstoff für Pleuelbuchsen (G-X20 A/IX/f)
Firmenschriften der KS Gleitlager GmbH, D-68789 St. Leon-Rot
- [C2] *Pischinger, F.*: Verbrennungsmotoren. Band 1. 9. Auflage. Aachen: Lehrstuhl für angewandte Thermodynamik RWTH Aachen, 1988. – Vorlesungsumdruck
- [C3] *Haehnel, M.*: Getrennt mit einem Schlag. Pleuel kontrolliert brechen. In: Ind.-Anz. (1992), Nr. 13
- [C4] *Brox, W.; Fischer, A.; Hofmann, R.; Rech, H.; Schlott, H.; Ziermann, P.*: Die neuen BMW V8-Motoren. In: MTZ 53 (1992), Nr. 5
- [C5] *Depp, J. Ch.; Ilija, E.; Hähnel, M.*: Neue hochfeste Werkstoffe für sintergeschmiedete Pleuelstangen. In: MTZ 66 (2005), Nr. 4
- [C6] *Spangenberg, S. et al.*: Massenreduzierung an Bauteilen des Kurbeltriebs – Pleuel im Fokus. In: MTZ 67 (2006), Nr. 4
- [C7] *Zima, S.*: Kurbeltriebe – Konstruktion, Berechnung und Erprobung von den Anfängen bis heute. Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg, 1998 (ATZ / MTZ-Fachbuch)
- [C8] *Lang, O. R.*: Triebwerke schnell laufender Verbrennungsmotoren: Grundlagen zur Berechnung und Konstruktion. Berlin: Springer, 1966
- [C9] *Indra, F.; Tholl, M.*: Der 3,0 l Opel-Rennmotor für die Internationale Deutsche Tourenwagenmeisterschaft. In: MTZ 52 (1991), Nr. 9

- [C10] *Dubbel*: Taschenbuch für den Maschinenbau. Band 1. 13. Auflage. Berlin: Springer, 1970. – S. 802
- [C11] *Grotewohl, A.*: Auslegung von dauerhaltbaren, gestalt- und kostenoptimierten Pleuellagerverschraubungen. In: *Automobil-Industrie* 33 (1988), Nr. 3
- [C12] *Urlaub, A.*: Verbrennungsmotoren. Band 3: Konstruktion. Berlin: Springer, 1989
- [C13] *Leipholz, H.*: Festigkeitslehre für den Konstrukteur. Berlin: Springer, 1969 (*Kollmann, K.* (Hrsg.): Konstruktionsbücher Band 25)
- [C14] *Huber, R.*: Festigkeitsuntersuchungen an Pleuelstangen für einen schnell laufenden Leichtdieselmotor. In: *SDP-Technik* (1987). – Steyr-Daimler-Puch-Firmenschrift
- [C15] *Knoll, G. et al.*: Ölbedarf von Grund- und Pleuellagern – Simulationstechniken und experimentelle Validierung. In: *MTZ* 67 (2006), Nr. 9
- [C16] *Seiffert, U.*; *Scharnhorst, Th.*: Die Bedeutung von Berechnungen und Simulationen für den Automobilbau. Teil 2. In: *ATZ* 91 (1989), Nr. 5
- [C17] *Peter, W.*: Berechnung im Automobilbau. In: *ATZ* 90 (1988), Nr. 6
- [C18] *Shenoy, P. S.*: Dynamic Load Analysis and Optimization of Connecting Rod. University of Toledo, Ohio (USA), MSc Mech. Eng. Thesis, 2004
- [C19] *Shenoy, P. S.*; *Fatemi, A.*: Connecting Rod Optimization for Weight and Cost Reduction. SAE Technical Papers 2005-01-0987
- [C20] *Schönrock, A.*; *Rulfs, H.*; *Vötter, M.*: Festigkeitsanalyse der Pleuelstange eines mittelschnell laufenden Dieselmotors. In: *MTZ* 52 (1991), Nr. 1
- [C21] *Thomala, W.*: Erläuterungen zur Richtlinie VDI 2230 Blatt 1 (1986): Bsp. Pkw-Pleuelverschraubung. In: *VDI-Z* Band 128 (1986), Nr. 12
- [C22] Norm VDI 2230 (VDI-Richtlinie). Systematische Berechnung hoch beanspruchter Schraubenverbindungen. Berlin: Beuth, 1986, Neufassung vom Februar 2003
- [C23] *Grotewohl, A.*: Auslegung der Schraubenverbindungen im Automobilbau und deren Einfluss auf den Montagevorgang. Teil 1: Zentrische Montage und zentrische Betriebskrafteinleitung in eine Schraubenverbindung. In: *Automobil-Industrie* 30 (1985), Nr. 3
- [C24] *Grotewohl, A.*: Auslegung der Schraubenverbindungen im Automobilbau und deren Einfluss auf den Montagevorgang. Teil 2: Exzentrische Montage und exzentrische Betriebskrafteinleitung in eine Schraubenverbindung. In: *Automobil-Industrie* 30 (1985), Nr. 4
- [C25] *Grotewohl, A.*: Auslegung der Schraubenverbindungen im Automobilbau und deren Einfluss auf den Montagevorgang. Teil 3: Kraftschlüssig belastete Schraubenverbindungen Ausführungsbeispiele des Automobilbaues. In: *Automobil-Industrie* 30 (1985), Nr. 5
- [C26] *Grotewohl, A.*: Analyse der Großserienmontage von Schraubenverbindungen. In: *Automobil-Industrie* 35 (1990), Nr. 5
- [C27] *Jende, S.*; *Knackstedt, R.*: Warum Dehnschrauben? Definition, Wirkungsweise, Aufgaben, Gestaltung. In: *VDI-Z* Band 128 (1986), Nr. 12
- [C28] *Yamada, K.*: The Development of One Liter Motor Cycle Engines. In: SAE Technical Paper Series 891800
- [C29] *Zima, S.*: Motorkolben – Bauarten, Betrieb, Schäden. Wiesbaden: Vieweg, 2005 (ATZ / MTZ-Fachbuch)
- [C30] *Kolbenschmidt AG*: KS-Handbuch: Technisches Handbuch der Kolbenschmidt AG. Band 1, Heft 3, Kap. 1: Grundlagen. Neckarsulm: Kolbenschmidt, 1987
- [C31] = [B12]
- [C32] = [B13]
- [C33] *Krüger, H.*: Sechszylindermotoren mit kleinem V-Winkel. In: *MTZ* 51 (1990), Nr. 10
- [C34] *Kolbenschmidt AG*: KS-Handbuch: Technisches Handbuch der Kolbenschmidt AG. Band 1, Heft 3, Kap. 3: Kolbenbauarten. Neckarsulm: Kolbenschmidt, 1987
- [C35] LiteKS® – Kolbentechnologie für Hochleistungs-Pkw-Ottomotoren. Firmenschrift der KS Kolbenschmidt GmbH, D-74172 Neckarsulm
- [C36] Kolbentechnologie für Pkw-Dieselmotoren – Bestens gekühlt für zukünftige Herausforderungen. Firmenschrift der KS Kolbenschmidt GmbH, D-74172 Neckarsulm
- [C37] *Dörnenburg, T. H. et al.*: Hoch belastete Aluminiumkolben. Werkstoffe. Sonderausgabe von ATZ und MTZ, 01/2007

- [C38] *Ullrich, M.; Scharp, R.*: Nutzfahrzeugkolben für erhöhte mechanische und thermische Belastungen. In: MTZ 68 (2007), Nr. 6
- [C39] *Kortas, J.*: Vom Aluminium- zum Stahlgroßkolben bei Nkw und Schiffen. In: MTZ 66 (2005), Nr. 11
- [C40] *Bach, M. et al.*: Audi 4,0 V8 TDI – Der erste Dieselmotor der neuen Audi-V-Motorenbaureihe, Teil 1: Konstruktion und Mechanik. In: MTZ 64 (2003), Nr. 9
- [C41] *Sander, W.; Schoeckle, S.*: Design and Fatigue Life Evaluation of Pistons for High BMEP Diesel Engines. In: SAE Technical Paper Series 790 857
- [C42] *Schlaefke, K.*: Zur Berechnung von Kolbenbolzen. In: MTZ 1 (1940), Nr. 4
- [C43] *Kuhm, M.*: Das Problem des Kolbenbolzens im Kurbeltrieb. Tl. 1: Anschauung und Berechnungsgrundlagen; Tl. 2: Folgerungen und Kritik. In: MTZ 25 (1964), Nr. 2 ; MTZ 25 (1964), Nr. 6
- [C44] *Sander, W.; Bordt, M.; Strasser, E.*: Hochbelastbare Kolben für Nutzfahrzeugdieselmotoren. In: *Kolbenschmidt AG: 75 Jahre Kolbenschmidt*. Neckarsulm: Kolbenschmidt, 1985
- [C45] *Sander, W.; Kelm, W.*: Formgedrehte Bohrungen zur Bolzenlagerung hoch belasteter Kolben. In: MTZ 42 (1981), Nr. 10
- [C46] *Iguchi, H.*: Weight Reduction of Engine Parts for Motorcycles. In: SAE Technical Paper Series 871187
- [C47] *Reipert, P.; Moebus, H.*: Beitrag zur Berechnung der Naben von Kolben. In: *Kolbenschmidt AG: 75 Jahre Kolbenschmidt*. Neckarsulm: Kolbenschmidt, 1985
- [C48] *Smith, A. V.; Steward, S. G.*: The Design of Lightweight Reciprocating Components for a New Family of High Speed Motorcycle Engines. In: SAE Technical Paper Series 910344
- [C49] *Kolbenschmidt AG*: KS-Handbuch: Technisches Handbuch der Kolbenschmidt AG. Band 1, Heft 8: Werkstoffe für Motorenbauteile. Neckarsulm: Kolbenschmidt, 1987
- [C50] *Mix, W.*: Kolbenbolzensicherungen unter dem Einfluss von Massenkräften. In: KS-Dienst Nr. 11/12
- [C51] *Tschöke, H. E.*: Beitrag zur Berechnung der Kolbensekundärbewegung in Verbrennungsmotoren. Stuttgart, Universität, Diss., 1981
- [C52] *Essers, U.*: Messtechnische Untersuchung der Kolbenquerbewegung an Verbrennungsmotoren. Aachen, RWTH Aachen, Habil-Schr., 1969
- [C53] *Chucholowski, C.; Woschni, G.; Zeilinger, K.*: Simulationsrechnung der Kolbensekundärbewegung. In: MTZ 48 (1987), Nr. 4
- [C54] *Kolbenschmidt AG*: KS-Handbuch: Technisches Handbuch der Kolbenschmidt AG. Band 1, Heft 9: Kolbenberechnung. Neckarsulm: Kolbenschmidt, 1987
- [C55] *Essig, G.*: KS-Entwicklungs- und Problemlösungskapazitäten“. In: *Kolbenschmidt AG: 75 Jahre Kolbenschmidt*. Neckarsulm: Kolbenschmidt, 1985
- [C56] *Wacker, E.; Strecker, E.; Sarsten, A.; Haaland, E.*: Finite Element-Programme zur Berechnung von Brennraumbauteilen. In: MTZ 32 (1971), Nr. 8
- [C57] = [C41]
- [C58] *Reipert, P.; Moebus, H.; Schellmann, K.*: Computer Design of a Steel-Nodular Cast Iron Piston Capable of Withstanding High Loads for Application in Mid-Speed Diesel Engines. 15. CIMAC-Kongress (Paris 1983)
- [C59] *Keribar, R.; Morel, T.; Blumberg, P. N.*: Coupled Methodology for Thermal Shock Calculations in I.C. Engines. In: SAE Technical Paper Series 865038
- [C60] *Basshuysen, R. van ; Steinwart, J.; Stähle, H.; Bauder, A.*: Audi Turbodieselmotor mit Direkteinspritzung. Teil 2. In: MTZ 50 (1989), Nr. 12
- [C61] *Ebel, R.*: Untersuchungen an einem Leichtbaukolben für Pkw-Motoren. In: MTZ 51 (1990), Nr. 1
- [C62] *Link, M.*: Vorausberechnung der thermischen Bauteilbelastung bei geänderten Motorbetriebsbedingungen. FVV-Kolloquium Der heutige Stand der Berechnungsmethoden zum Arbeitsverfahren des Verbrennungsmotors (Frankfurt 1974). In: FVV-Heft R 256 (1974)
- [C63] *Woschni, G.*: Die Berechnung der Wandverluste und der thermischen Belastung der Bauteile von Dieselmotoren. In: MTZ 31 (1970), Nr. 12
- [C64] *Hosokawa, T.; Tsukada, H.; Maeda, Y.; Nakakubo, T.; Nakada, M.*: Development of Computer Aided Engineering for Piston Design. In: SAE Technical Paper Series 890775

[D..] Kolbenringe

- [D1] *Betz, G.; Zellbeck, H.*: Untersuchungen zur Reibleistung der Kolbengruppe. In: MTZ 47 (1986), Nr. 10
- [D2] FEDERAL MOGUL / GOETZE Kolbenringhandbuch. Ausgabe 04/2003. FEDERAL-MOGUL Burscheid GmbH, D-51399 Burscheid
- [D3] *TRW Thompson GmbH*: Handbuch. 6. Auflage. Barsinghausen: TRW Thompson, 1983. – heute SPT
- [D4] *Jakobs, R.*: Ein Beitrag zum Funktionsverhalten von negativ vertwistenden Minutenringen in der 2. Nut von Fahrzeugdieselmotoren. In: *Goetze AG: Goetze Dichtungsentwicklung: 100 Jahre Erfahrung*. Burscheid: Goetze. – Drucksache Nr. 893460-07/87 ; heute AE Goetze
- [D5] *Mierbach, A.*: Die Twistwinkel des L-förmigen Kolbenringes. In: MTZ 36 (1975), Nr. 4
- [D6] *Knoll, G.; Lechtape-Grüter, R.; Peeken, H.*: Berechnung der Reibungskräfte an Kolbenringen und Ringpaketen bei hydrodynamischer Flüssigkeitsreibung und bei Mischreibung unter Berücksichtigung der Kolbenringdynamik. Arbeitsfortschrittsbericht. In: FVV-Heft R 450 (1988)
- [D7] *Furuhama, S.; Hiruma, M.; Tsuzita, M.*: Piston Ring Motion and Its Influence on Engine Tribology. In: SAE Technical Paper Series 790860
- [D8] *Neumann, P.; Rau, N.; Hübner, G.*: Bestimmung der Radialdruckverteilung an Kolbenringen. In: MTZ 48 (1987), Nr. 11
- [D9] = [C13]
- [D10] *Mierbach, A.; Mittler, R.*: Einfluss der Auslegung von Kolbenringen auf das Formfüllvermögen in thermisch und mechanisch hoch beanspruchten Motoren. In: MTZ 67 (2006), Nr. 1
- [D11] *Mey, H.*: Unerwünschte plastische Verformung des Kolbenringes. In: MTZ 49 (1988), Nr. 3
- [D12] *Kornprobst, H.; Woschni, G.; Zeilinger, K.*: Simulation des Verhaltens von Kolbenringen im Motorbetrieb. Teil 2. In: MTZ 50 (1989), Nr. 12
- [D13] *Iskra, A.*: Schmierverhältnisse in der Baugruppe Kolbenring-Zylinder bei begrenzter Schmierung der Zylinderwand. In: MTZ 47 (1986), Nr. 7/8
- [D14] *Hannschöck, N.*: Zur Tribologie des Kolbenringes. In: MTZ 46 (1985), Nr. 12
- [D15] *Jakobs, R.*: Zur Reibleistung der Kolbenringe bei Pkw-Ottomotoren. Burscheid: Goetze (Fachschrift K34; heute AE-Goetze). – auch in: MTZ 49 (1988), Nr. 7/8
- [D16] *Gardner, T. P.; Henein, N. A.*: Diesel Starting: A Mathematical Model. In: SAE Technical Paper Series 880426
- [D17] *Furuhama, S.; Takiguchi, M.; Tomizawa, K.*: Effect of Piston and Piston Ring Designs on the Piston Friction Forces in Diesel Engines. In: SAE Technical Paper Series 810977
- [D18] *Tang-Wei Kuo ; Sellnau, M. C.; Theobald, M. A.; Jones, J. D.*: Calculation of Flow in the Piston-Cylinder-Ring Crevices of a Homogeneous Charge Engine and Comparison with Experiment. In: SAE Technical Paper Series 890838
- [D19] = [C54]
- [D20] *Seiler, F.*: Entwicklung eines Programmsystems zur Berechnung der Kolbenringbewegung in radialer und axialer Richtung. Karlsruhe, TH, Dipl.-Arb., 1984
- [D21] *Kempf, M.*: Programmsystem zur Berechnung der Kolbenringbewegung. Karlsruhe, TH, Dipl.-Arb., 1986
- [D22] *Morsbach, M.*: Einfluss der axialen Höhe von Kolbenringen auf deren Funktionsverhalten. In: MTZ 43 (1982), Nr. 7/8
- [D23] *Eweis, M.*: Reibungs- und Undichtigkeitsverluste an Kolbenringen. In: VDI Forschungsheft Nr. 371 (1935)
- [D24] *Layer, A.*: Theorie des Gleitlagers bei Vollschmierung. Bern: Verlag „Technische Rundschau“ Hallwag, 1967 (Blaue TR-Reihe Heft 46)
- [D25] *Richez, M. F.; Constans, B.; Winquist, K.*: Theoretical and Experimental Study of Ring-Linear Friction. In: Proc. of 9th Leeds-Lyon Symp. on Tribology 1982
- [D26] *Patir, N.; Cheng, H. S.*: An Average Flow Model for Determining Effects of Three Dimensional Roughness and Partial Hydrodynamic Lubrication. In: ASME ... (?) (1978), pp. 12–17
- [D27] *Patir, N.; Cheng, H. S.*: Application of Average Flow Model to Lubrication between Rough Sliding Surfaces. In: ASME ... (?) (1979), pp. 220–229

[E..] Kurbelwelle

- [E1] *Maaß, H.*: Gesichtspunkte zur Berechnung von Kurbelwellen. In: MTZ 30 (1969), Nr. 4
- [E2] *Kritzer, R.*: Mechanik, Beanspruchungen und Dauerbruchsicherheit der Kurbelwellen schnell laufender Dieselmotoren. In: Konstruktion 13 (1961), Nr. 11 und 12
- [E3] *Maaß, H.*: Die Gestaltfestigkeit von Kurbelwellen, insbesondere nach den Forderungen der Klassifikationsgesellschaften. In: MTZ 25 (1964), Nr. 10
- [E4] *Kritzer, R.*: Die dynamische Festigkeitsberechnung der Kurbelwelle. In: Konstruktion 10 (1958), Nr. 7
- [E5] *Donath, G.*: Vorschlag einer Auslegungsvorschrift für Kurbelwellen. Tl. 1. In: MTZ 45 (1984), Nr. 9 – Bericht aus einer Arbeit des CIMAC
- [E6] *Donath, G.; Seidemann, H.*: Auslegung von Dieselmotoren-Kurbelwellen.: Vergleich gemessener und gerechneter Spannungen. Teil 2. In: MTZ 48 (1987), Nr. 11
- [E7] *Hafner, K. E.*: Zur Berechnung der Torsion von Kurbelwellen von Kolbenmaschinen mit Hilfe elektronischer Rechenanlagen. In: MTZ 25 (1964), Nr. 10
- [E8] *Naundorf, H.; Rothe, V.; Ziese, J.*: Einflüsse auf die Festigkeit von Stahlkurbelwellen für Personewagenmotoren. In: MTZ 37 (1976), Nr. 5
- [E9] = [C8]
- [E10] = [B6]
- [E11] = [I3]
- [E12] *Maaß, H.*: Die Formziffer α und ihre Anwendung bei kombinierter Beanspruchung der Kurbelwelle. In: MTZ 28 (1967), Nr. 2
- [E13] *Lang, O. R.*: Formzahlen von Kurbelwellen. In: MTZ 29 (1968), Nr. 3
- [E14] *Pfender, M.; Amedick, E.; Sonntag, G.*: Einfluss der Formgebung auf die Spannungsverteilung in Kurbelwellenkröpfungen. In: MTZ 27 (1966), Nr. 6
- [E15] *Finkelburg, H. H.*: Spannungszustände in der festgewalzten Oberfläche von Kurbelwellen. In: MTZ 37 (1976), Nr. 9
- [E16] *Kritzer, R.*: Zur Berechnung der Formzahlen von Kurbelwellen. In: MTZ 23 (1962), Nr. 12. – Interpretation von: *Lejkin, A. S.*: Stress Concentration in Crankshaft Fillets. In: Russian Engineering Journal (1960), Nr. 5
- [E17] *Arai, J.*: The Bending Stress Concentration Factor of Solid Crankshaft. In: Bulletin of ISME No. 31 (1965) Vol. 8
- [E18] *Hoshino, J.; Arai, J.*: Strength Analysis of Diesel Engine Crankshaft. 6. Shipping- and Shipbuilding Conference 1966
- [E19] *Eberhard, A.*: Einfluss der Formgebung auf die Spannungsverteilung von Kurbelkröpfungen, insbesondere von solchen mit Längsbohrungen. In: Forschungsbericht der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V. (FVV) Heft 130 (1972)
- [E20] *Eberhard, A.*: Einfluss der Formgebung auf die Spannungsverteilung von Kurbelkröpfungen mit Längsbohrungen. Teil 1 ; Teil 2. In: MTZ 34 (1973), Nr. 7 ; MTZ 34 (1973), Nr. 9
- [E21] = [C12]
- [E22] IACS (International Association of Classifications Societies) (1986): M53 Calculation of Crankshafts of I.C. Engines. IACS Requirements
- [E23] *Zenner, H.; Donath, G.*: Dauerfestigkeit von Kurbelwellen: Ein neues Berechnungsverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Baugröße. In: MTZ 38 (1977), Nr. 2
- [E24] *Zenner, H.*: Studie über den Einfluss der Baugröße auf die Dauerfestigkeit von Kurbelwellen. In: Forschungsbericht der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV) Heft 199 (1976)
- [E25] *Wellinger, K.; Dietmann, K. H.*: Festigkeitsberechnung: Grundlagen und technische Anwendungen. Stuttgart: Körner, 1969
- [E26] *Maaß, H.*: Betrachtungen zur Gestaltfestigkeit von Kurbelwellen. Teil 2: Berechnungsmethoden. In: MTZ 31 (1970), Nr. 7
- [E27] *Petersen, C.*: Die Gestaltfestigkeit von Bauteilen. In: VDI-Z Band 94 (1952)

- [E28] *Maaß, H.*: Betrachtungen zur Gestaltfestigkeit von Kurbelwellen. Teil 3: Berechnungsvorschlag zur Bauteilfestigkeit der Kurbelwelle. In: MTZ 31 (1970), Nr. 12
- [E29] *Maaß, H.*: Betrachtungen zur Gestaltfestigkeit von Kurbelwellen. In: MTZ 31 (1970), Nr. 2
- [E30] *Albrecht, K.-H.; Emanuel H.; Junk, H.*: Optimierung von Kurbelwellen aus Gusseisen mit Kugelgraphit. In: MTZ 47 (1986), Nr. 7/8
- [E31] *Svoboda, M.; Bauer, W.*: Berechnung von Spannungen in den Hohlkehlen von Pkw-Kurbelwellen mit der Boundary-Element-Methode (BEM). In: MTZ 47 (1986), Nr. 3
- [E32] *Bartels, M.; Ruschlau, B.*: PROBE Neue p-Version der Finite-Element-Methode. In: ATZ 92 (1990), Nr. 9
- [E33] *Chang, N.; Chung, S. B.*: Computer Program for the Optimal Design of Crankshaft. In: SAE Technical Paper Series 871224
- [E34] *Georgens, G.; Strauss, A.; Willmann, M.*: Der neue Turbodieselmotor mit Direkteinspritzung und 1,9 l Hubraum. In: MTZ 53 (1992), Nr. 3
- [E35] *Payer, E.*: Nichtlineare transiente Spannungsberechnung von Kurbelwellen. In: MTZ 55 (1994), Nr. 2
- [E36] *Fiedler, A. G.; Gschweil, E.*: Neues Berechnungsverfahren zeigt vorhandene Reserven bei der Kurbelwellenfestigkeit. In: MTZ 59 (1998), Nr. 3
- [E37] *Rasser, W.; Resch, T.; Priebisch, H. H.*: Berechnung der gekoppelten Axial-, Biege- und Torsionsschwingungen von Kurbelwellen und der auftretenden Spannungen. In: MTZ 61 (2000), Nr. 10
- [E38] *Resch, T. et al.*: Verwendung von Mehrkörperdynamik zur Kurbelwellenauslegung in der Konzeptphase. In: MTZ 65 (2004), Nr. 11
- [E39] *Ortjohann, T.; Rebbert, M.; Maasen, F.; Robers, M.*: Kurbelwellensimulation. In: MTZ 67 (2006), Nr. 5
- [E40] *Ilzhöfer, B.; Kuchar, P.; Wersching, R.*: Schnittlasten aus der dynamischen 3D-Kurbelwellenberechnung. In: MTZ 68 (2007), Nr. 07/08
- [E41] = [I56]
- [E42] *Träbing, C.*: Optimierung transienter Berechnungen der Motordynamik durch Interfacemoden und modale Spannungen. Kassel, Universität, Diss., 2003
- [E43] *Gaier, C.; Dannbauer, H.*: Ein effizientes kritisches Schmittebenenverfahren für duktile, semi-duktiler und spröde Werkstoffe. (http://www.femfat.com/ftp/papers/2006/01_Planneralm.pdf)

[F..] Zylinderkurbelgehäuse

- [F1] *Flierl, R., (Hrsg.)*: Konzeption, werkstoffgerechte Gestaltung und Festigkeitsnachweis für ein Magnesium-Hybrid-Zylinderkurbelgehäuse. Diss. Joachim Doerr, Kaiserslautern 2005
- [F2] *Arai, T.*: Major Engine Components Made by Various Aluminium Casting Techniques. In: Aluminium + Automobil. Düsseldorf: Aluminium Verlag, 1998
- [F3] *Köhler, E.*: Umdruck zur Vorlesung „Konstruktion und Berechnung von Kolbenmaschinen“, IMS, Lehrstuhl für Kolbenmaschinen, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- [F4] *Flierl, R.*: Patent Nr. DE 10112132.6
- [F5] BMW AG München: BMW 6-Zylinder-Ottomotor mit VALVETRONIC – Magnesium-Aluminium-Verbund-Kurbelgehäuse, Presseabteilung 06/2004
- [F6] *Schmillen, K.; Schwaderlapp, M.; Spessert, B.*: Verbesserung des akustischen Verhaltens von Motorblöcken. In: MTZ 53 (1992), Nr. 4
- [F7] *Flierl, R.*: Umdruck zur Vorlesung Verbrennungsmotoren, Technische Universität Kaiserslautern
- [F8] *Albrecht, K.-H.; Emanuel, H.; Junk, H.*: Moderne Grauguss-Zylinderkurbelgehäuse. In: MTZ 46 (1985), Nr. 10
- [F9] = [C9]
- [F10] = [E34]
- [F11] *Fischer, A.; Gaede, G.; Göschel, B.; Schlott, H.; Tischer, J.*: Der neue BMW-12-Zylinder-Motor mit 5 l Hubraum, Teil 1. In: MTZ 48 (1987), Nr. 9

- [F12] *Hadler, J. et al.*: Der neue 5-Zylinder 2,5l-TDI Pumpedüse-Dieselmotor von Volkswagen. Aachener Kolloquium „Fahrzeug- und Motorentechnik“, 07.–09. Oktober, 2002, Aachen
- [F13] *Maier, K.*: Beschichtung von Zylinderlaufflächen und Kolben. In: VDI-Berichte Nr. 866 (1990)
- [F14] *Wacker, E.*: Unbewehrte Aluminium-Zylinder für Verbrennungsmotoren. In MTZ 34 (1973), Nr. 2
- [F15] *Wacker, E.; Dorsch, H.*: ALUSIL-Zylinder und FERROCOAT-Kolben für den Porsche-Motor 911. In: MTZ 35 (1974), Nr. 2
- [F16] *Hofmann, H.-H.; Schellmann, K.; Wacker, E.*: Aluminium 390 Alloy Engine Blocks: Design and Manufacturing. In: SAE Technical Paper Series 830007
- [F17] *Hofmann, H.; Köhler, E.*: 15 Jahre KS-Erfahrung mit ALUSIL-Motorblöcken. In: Kolbenschmidt AG: 75 Jahre Kolbenschmidt. Neckarsulm: Kolbenschmidt, 1985
- [F18] *Köhler, E.; Hofmann, K.; Niehues, J.; Sick, G.*: Kurzbauende, leichte Closed-deck-Aluminium-Kurbelgehäuse für Großserien. In: ATZ/MTZ-Sonderheft Fertigungstechnik '92
- [F19] *Ebisawa, M.; Hara, T.; Hayashi, T.; Ushio, H.*: Production Process of Metal Matrix Composites (MMC) Engine Block. In: SAE Technical Paper Series 910835
- [F20] = [C4]
- [F21] *Anisits, F.; Hiemesch, O.; Kratochwill, H.; Mundorff, F.*: Der neue BMW Sechszylinder-Dieselmotor. Teil 1. In: MTZ 52 (1991), Nr. 10
- [F22] = [B15]
- [F23] *Seungkuh, L.; Kikuchi, N.*: Model Analysis of a Diesel Engine Cylinder Block Using HEXA8 Finite Elements: Analysis and Experiment. In: SAE Technical Paper Series 881853
- [F24] *Angoy, C. H.; Tunnah, R. J.*: The Use of Finite Element Techniques in Structural Assessment of a Radically New Small Engine. In: Auto-Tech 89 399/25, 1989 High Tech: New Engine IMechE Seminar Papers
- [F25] *Brandstetter, W.; Finch, J.; Hirsch, W.*: Die neue DOHC-16-Ventil-Motorenbaureihe von Ford. Teil 1: Projektierung Grundmotor. In: MTZ 53 (1992), Nr. 2
- [F26] *Atzorn, H.-H.; Stamerjohanns, P.*: Berechnung des Schwingungs- und Akustikverhaltens eines Dieselmotors. Haus der Technik e.V. (Veranst.): Tagung Verbrennungsmotoren-Akustik (Essen 1993)
- [F27] *Brandstetter, W.; Lawrence, P. J.; Hansen, J.*: Die Dieselmotoren-Familie mit 1,8 l Hubraum von Ford. In: MTZ 52 (1991), Nr. 9, S. 434 f.
- [F28] *Vorberger, G.; Flierl, R.; Hirschfelder, K.*: Berechnungsmethoden in der Motorenentwicklung. In: Automobil-Industrie 35 (1990), Nr. 6
- [F29] = [C63]
- [F30] = [C12]
- [F31] *Fersen, O. v.*: Schichtwechsel. Moderne Motoren: Rover K-Reihe. In: mot Technik (1989), Nr. 26
- [F32] *Karner, J.*: Die nachziehfreie Zylinderkopf-Verspannung. In: MTZ 41 (1980), Nr. 3
- [F33] *Lönne, K.*: Das Goetze-Zylinderverzugsmesssystem und Möglichkeiten zur Reduzierung der Zylinderverzüge. In: Goetze AG: Goetze Dichtungsentwicklung: 100 Jahre Erfahrung. Burscheid: Goetze. – Drucksache Nr. 893460-07/87; heute AE-Goetze
- [F34] = [D2]
- [F35] *Banks, T. J.; Lacy, D. J.*: The Application of Analysis to Piston Ring Performance. IMechE-Paper C375/003 1989 Combustion Engine: Reduction of Friction and Wear, IMechE Conf. Proc. 1989-9
- [F36] = [C2]
- [F37] *Zürner, H.-J.; Schibalski, W.; Müller, H.*: Kavitation und Korrosion an Zylindern von Dieselmotoren. In: MTZ 49 (1988), Nr. 9
- [F38] *Anonym*: La cavitation des chemises humides sur les moteurs Diesel. In: Rev. Tech. Diesel (1989) 155D
- [F39] *Bennigsen, G. v.*: Verminderung von Laufbuchsenverzügen an Kolbenmotoren durch Gestaltung der Einfassungsbördel an Flachdichtungen. In: MTZ 29 (1968), Nr. 8
- [F40] *Kunz, A.*: Formelsammlung. Essen: Verlag technisch-wissenschaftliche Schriften, 1981. – Hrsg.: VGB Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V. VGB Kraftwerkstechnik GmbH
- [F41] *Doehler-Jarvis*: Unveröffentlichte Messergebnisse Toledo/Ohio, USA: Doehler-Jarvis

- [F42] Karl Schmidt GmbH: KS Technisches Handbuch. Neckarsulm: Karl Schmidt GmbH, 1967. – heute Kolbenschmidt Pierburg AG
- [F43] *Zirner, H.*: Gestaltung von Zylinderlaufbuchsen und Kolben in Fahrzeugmotoren. In: ATZ 73 (1971), Nr. 4
- [F44] *Holzmann, G.; Meyer, H.; Schumpich, G.*: Technische Mechanik. Teil 3: Festigkeitslehre. Stuttgart: Teubner, 1990
- [F45] = [C13]

[G..] Zylinderkopf

- [G1] = [C4]
- [G2] = [I3]
- [G3] *Lehner, F.; Walther, G.*: Die konstruktive Auslegung der neuen BMW Vierventilmotoren. In: Automobil-Industrie 35 (1990), Nr. 3
- [G4] *Lückert, P. et al.*: Power Pack. ATZ- / MTZ-Sonderausgabe DaimlerChrysler SLK-Klasse – Motoren
- [G5] *Knirsch, S.; Ambos, E.; Todte, M.*: Werkstoff- und Verfahrensentwicklung für Zylinderköpfe von hochbelasteten Verbrennungsmotoren. In: MTZ 65 (2004), Nr. 4
- [G6] *James, E. F.; Jacques, R. L.; Marsh, R. A.; Brooks, P. J.*: The Northstar DOHC V-8 Engine for Cadillac. In: SAE Technical Paper Series 920671
- [G7] Auszug aus Konstruktionsunterlagen der KS Aluminium-Technologie AG, Neckarsulm, für einen Vierventil-Zylinderkopf eines 1,4 l Vierzylinder-Ottomotors
- [G8] *Boulouchos, K.; Hannoschöck, N.*: Der Wärmetransport zwischen Arbeitsmedium und Brennraumwand. In: MTZ 47 (1986), Nr. 9
- [G9] *Woschni, G.*: Beitrag zum Problem des Wärmeübergangs im Verbrennungsmotor. In: MTZ 26 (1965), Nr. 4
- [G10] = [C63]
- [G11] *Zapf, H.*: Beitrag zur Untersuchung des Wärmeübergangs während des Ladungswechsels im Viertakt-dieselmotor. In: MTZ 30 (1969), Nr. 12
- [G12] *Woschni, G.*: Experimentelle Untersuchung des Wärmeflusses in Kolben und Zylinderbüchse eines schnell laufenden Dieselmotors. In: MTZ 39 (1978), Nr. 12
- [G13] *Woschni, G.; Fieger, J.*: Auswertung gemessener Temperaturfelder zur Bestimmung örtlicher Wärmeübergangskoeffizienten am Kolben eines schnell laufenden Dieselmotors. In: MTZ 40 (1979), Nr. 4
- [G14] *Fieger, J.*: Experimentelle Untersuchung des Wärmeübergangs beim Ottomotor. München, TU, Diss., 1981
- [G15] *Woschni, G.; Fieger, J.*: Experimentelle Bestimmung des örtlich gemittelten Wärmeübergangskoeffizienten im Ottomotor. In: MTZ 42 (1981), Nr. 6
- [G16] *Woschni, G.*: Wärmeübergang und Brennverlauf im Ottomotor. In: FVV Heft R391 (1980)
- [G17] = [C2]
- [G18] *Woschni, G.*: Wärmeübergang und Brennverlauf im Ottomotor. In: FVV Heft R326 (1978)
- [G19] *Basshuysen, R. van; Schäfer, F.*: <http://www.Motorlexikon.de>, „Einlasskanal Dieselmotor“ → „Drallzahl“
- [G20] *Imabeppu, S.; Hirano, Y.; Shimonosono, H.*: An Analysis of Heat Release to Coolant in the Cylinder Head. In: JSAE Rev. 11 (1990), Nr. 3
- [G21] *Pivec, R.; Sams, Th.; Wimmer, A.*: Wärmeübergang im Ein- und Auslasssystem. In: MTZ 59 (1998), Nr. 10
- [G22] *Trapy, J.*: Ansatz für den gaseitigen Wärmeübergangskoeffizienten bei Ottomotoren unter Berücksichtigung klopfender Verbrennung. RWTH Aachen (Veranst.); SIA (Veranst.); VDI-GFT (Veranst.): Tagung Der Fahrzeug-Ottomotor unter neuen europäischen Randbedingungen (Aachen 1985). – Kurzfassung in: MTZ 47 (1986), Nr. 4
- [G23] *Eilts, P.*: Zur Baugrößenabhängigkeit der Wandwärmeverluste von Verbrennungsmotoren. In: MTZ 51 (1990), Nr. 7/8

- [G24] *Pohlmann, H.*: Berechnung der örtlichen und zeitlichen Verteilung der Wärmestromdichte im Kolbenmotor. In: MTZ 50 (1989), Nr. 2
- [G25] *Yang, J.; Pierce, P.; Martin, J. K.; Foster, D. E.*: Heat Transfer Predictions and Experiments in a Motored Engine. In: SAE Technical Paper Series 881314
- [G26] *Morel, T.; Rackmil, C. I.; Keribar, R.; Jennings, M. J.*: Model for Heat Transfer and Combustion in Spark Ignited Engines and its Comparison with Experiments. In: SAE Technical Paper Series 880198
- [G27] *Petutschnig, H. et al.*: Rechnerische Abbildung des Temperaturfelds in Zylinderköpfen moderner Dieselmotoren. In: MTZ 63 (2002), Nr. 12
- [G28] *Steinparzer, F. et al.*: Neuer Vierzylinder-Dieselmotor von BMW mit Common-Rail-Einspritzung. In: MTZ 62 (2001), Nr. 11
- [G29] *Nagayoshi, T.; Kodaira, T.*: Analysis of Thermal Fatigue Cracks in Cylinder Heads. In: JSAE Rev. 14 (1993), Nr. 2
- [G30] *Brandstetter, W.; Bostock, Ph.; Hansen, J.*: Die neuen Dieselmotoren mit 2,5 l Hubraum für den Ford Transit. In: MTZ 53 (1992), Nr. 5
- [G31] *Hüttner, Th.; Duckworth, R.*: Der präzisionsgekühlte Zylinderkopf von Cosworth. In: MTZ 57 (1996), Nr. 11
- [G32] *Sunayama, N.*: Heat Transfer/Thermal Analysis for Cylinder Head. In: SAE Technical Paper Series 910301
- [G33] *Iwashita, Y.; Kanda, M.; Kartagiri, H.; Yokoi, Y.*: Improvement of Coolant Flow for Reducing Knock. In: Auto-Tech 89 C399/6, 1989 Engine Cooling Technology IMechE Seminar Papers
- [G34] *Kulkarni, A. V.*: New Generation Small Block V8 Engine. In: SAE Technical Paper Series 920673
- [G35] *Dorenkamp, R. et al.*: Die Dieselmotoren im neuen Passat: Hoher Komfort – geringe Emissionen. VW Passat. Sonderausgabe von ATZ und MTZ, 04/2005
- [G36] = [F42]
- [G37] = [C49]
- [G38] *Weiss, F.; Fuchs, H. A.*: Niederdruckgießen von Zylinderköpfen und Zylinderblöcken. In: Gießerei-Praxis (1990), Nr. 8
- [G39] *Chuimert, R.; Garat, M.*: Aluminium Casting Alloy for Highly Stressed Diesel Cylinder Heads. In: Aluminium + Automobil. Düsseldorf: Aluminium Verlag, 1988
- [G40] = [C9]
- [G41] *Endres, H.; Wurms, R.; Neusser, H. J.*: Verbrauchs- und Emissionsminderung bei Mehrventil-Ottomotoren durch Anwendung von Drall und „Tumble“. 3. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen 1991
- [G42] *Gebhard, P. et al.*: Neue Generation der kleinen Ottomotoren-Baureihe für Opel Corsa, Agila und Astra. In: MTZ 65 (2004), Nr. 3
- [G43] *Lückert, P. et al.*: Der neue V6-Ottomotor M272 von Mercedes-Benz. In: MTZ 65 (2004), Nr. 6
- [G44] *Brandstetter, W.; Wallbrück, B.; Sweet, T.; Hansen, J.*: Der 2,0 l 16V Motor für den neuen Ford Escort RS 2000. In: MTZ 52 (1991), Nr. 10
- [G45] *Bauder, R. et al.*: Audi 4,0 V8-TDI – Der erste Dieselmotor der neuen Audi-V-Motorenbaureihe, Teil 2 : Thermodynamik und Applikation. MTZ 64 (2003) Nr. 10
- [G46] *Bach, M. et al.*: Der neue V8-TDI-Motor von Audi – Teil I: Vorentwicklung und Berechnung. ATZ-/MTZ-Sonderausgabe 10 Jahre TDI / Der neue V8 TDI
- [G47] *Eidenböck et al.*: Zylinderkopf in Vierventiltechnik für den BMW DI-Dieselmotor. In: MTZ 59 (1998), Nr. 6
- [G48] *Lawrence, P. et al.*: Die neuen Duratorq-Dieselmotoren mit Direkteinspritzung im Ford Transit. In: MTZ 61 (2000), Nr. 1
- [G49] Interdisciplinary Engine Development from the Initial Concept through Production Release. Firmenschrift der FEV Motorentechnik GmbH & Co. KG, D-52078 Aachen
- [G50] *Seifert, H.*: 20 Jahre erfolgreiche Entwicklung des Programmsystems PROMO. In: MTZ 51 (1990), Nr. 11
- [G51] = [A3]

- [G52] *Seifert, H.*: Die Berechnung instationärer Strömungsvorgänge in Rohrleitungssystemen von Mehrzylindermotoren. In: MTZ 33 (1972), Nr. 11
- [G53] *Seifert, H.*: Die Analyse instationärer Strömungsvorgänge in Saugrohren von Mehrzylinder-Vergasermotoren. In: MTZ 39 (1978), Nr. 1
- [G54] = [A4]
- [G55] *Stromberg, H. J.*: Berechnung von Ladungswechsel und Kreisprozess eines Verbrennungsmotors unter Berücksichtigung der instationären Strömungsvorgänge in den angeschlossenen Rohrleitungen. FVV-Kolloquium Der heutige Stand der Berechnungsmethoden zum Arbeitsverfahren des Verbrennungsmotors (1974). In: FVV Heft R256 (1974)
- [G56] = [F27]
- [G57] *Danckert, H.; Wersching, R.; Schöckle, S.*: 3-dimensionale Berechnung der Wasserströmung in einem Zylinderkopf. In: Automobil-Industrie 35 (1990), Nr. 5
- [G58] *Riedler, M.; Minichmayr, R.; Eichlleder, W.*: Thermomechanische Ermüdung am Zylinderkopf. Thermische Einflüsse auf Werkstoffe, 5. Juli 2005, Burg Oberkapfenberg (A) (http://www.sfg.at/termine/docs/1460_Vortrag_Riedler.pdf)
- [G59] *Winter, G. et al.*: Cast Iron versus Aluminium Cylinder Head Materials: Their Properties Concerning Thermo-Mechanical Fatigue. 22nd DANUBIA-ADRIA Symposium on Experimental Methods in Solid Mechanics, September 28 - October 1, 2005, Monticelli Terme / Parma, Italy
- [G60] FEMFAT NEWSLETTER – FEMFAT HEAT Sehitoglu. Spring Edition 2006, S. 2–3
- [G61] *Niemann, G.; Winter, H.; Höhn, B.-R.*: Maschinenelemente – Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern und Wellen. 4. Auflage, Berlin: Springer, 2005
- [G62] *Trampert, S. et al.*: Reduzierte Entwicklungszeiten durch Anwendung programmgesteuerter Strukturoptimierung bei der Simulation von Verbrennungsmotoren. Schrift der FEV Motorentechnik GmbH bzw. FE-Design GmbH. www.fe-design.de/.../publikationen/publikationen2006/06-09-25_VPC_Strukturopt_Verbrennungsmot_FEV-FED.pdf

[H..] Zylinderkopfdichtung

- [H1] *Fleischer, E.*: Die Zylinderkopfdichtung in der Patentliteratur. Teil I - III. In: MTZ 48 (1987), Nr. 3, Nr. 9 und Nr. 12
- [H2] *Schwenkel, W.*: Ferrolastik 470: ein Werkstoff für nachziehfreie Zylinderkopfverspannungen. In: ATZ 82 (1980), Nr. 7/8
- [H3] *Gronle, H.; Wagenplast, D.*: Asbestfreier Dichtungswerkstoff mit neuer Konzeption. In: MTZ 49 (1988), Nr. 5
- [H4] = [F32]
- [H5] *Golombek, Ch.*: Zylinderkopfdichtung mit Breitstopper verringert Kontaktpressung. In: MTZ 64 (2003), Nr. 11
- [H6] *Ludwig, J. et al.*: Die neue Technologie für Mehrlagen-Stahl-Zylinderkopfdichtungen. In: MTZ 62 (2001), Nr. 10
- [H7] *Weiß, A.*: REINZ-Retall MLS-Zylinderkopfdichtungen für höchste Verbrennungsdrücke. In: Sonderausgabe von MTZ: 60 Jahre MTZ
- [H8] *Eifler, G.*: Neue Zylinderkopfdichtung mit integrierter Dichtspaltsensorik. In: MTZ 60 (1999), Nr. 3
- [H9] *Popielas, F.*: FEM als Tool zur Auslegung von Mehrlagenstahl (MLS)-Dichtungen. In: Sonderausgabe von ATZ und MTZ: System Partners 98 (1998), S. 94 f.
- [H10] *Popielas, F.; Quick, L.; Weiß, A.*: Optimierung funktionsrelevanter Eigenschaften von Mehrlagen-Stahl-Zylinderkopfdichtungen für neue Motorkonstruktionen. In: MTZ 60 (1999), Nr. 3
- [H11] *Cierocki, K.; Ermert, Th.*: Topografischer Stopper für Zylinderkopfdichtungen. In: MTZ 64 (2003), Nr. 1
- [H12] Titelthema: Dichtungstechnik – Neue Dichtungstechnik für neue Motoren (Elring Klinger GmbH, D-72575 Dettingen). In: MTZ 59 (1998), Nr. 5
- [H13] *Cierocki, K. et al.*: Neuartige Einlagen-Stahl-Zylinderkopfdichtung. In: MTZ 59 (1998), Nr. 5

- [H14] *Hirsch, V.; Schneider, E.; Weiß, R.*: Numerische Berechnungen für Dichtungen und Bauteile. In: MTZ 65 (2004), Nr. 10
- [H15] *Cierocki, K.; Hilgert, Ch.*: Dichtung mit nur einer Lage. In: Automobil-Entwicklung, Mai 1998
- [H16] *Gasch, M.; Schwarzer, R.; Heilig, M.*: Neues Zylinderkopfdichtungskonzept für den Sechszylinder-Twin-Turbo-Ottomotor von BMW. In: MTZ 68 (2007), Nr. 1
- [H17] *Ludwig, J. et al.*: Zylinderkopfdichtungen für neue Al-Mg-Kombibauweise von BMW-Ottomotoren. In: MTZ 65 (2004), Nr. 12
- [H18] *Schneider, J. et al.*: Funktionserweiterung von Zylinderkopfdichtungen – Weiterentwicklungen beim Wellenstopper. In: MTZ 64 (2003), Nr. 10
- [H19] *Eckert, D.*: Dichtungstechnologie – kreative und innovative Entwicklungsleistungen für Meilensteine im Motorenbau. In: Sonderausgabe von MTZ: 60 Jahre MTZ

[I.] Ventil, Ventiltrieb und Kurbeltrieb

- [I1] *Flierl, R.*: Verbrennungsmotoren. Vorlesungsumdruck TU Kaiserslautern
- [I2] *Walzer, P.; Panagiotis, A.; Heinrich, H; Schumacher, V.*: Variable Steuerzeiten und variable Verdichtung beim Ottomotor. In: MTZ 47 (1986), Nr. 1
- [I3] *Basshuysen, R. van; Schäfer, F. (Hrsg.)*: Handbuch Verbrennungsmotoren; Vieweg Verlag, 1. Auflage, Braunschweig/Wiesbaden 2002
- [I4] *Pöhls, A.*: Untersuchung eines Verfahrens zur gesteuerten Abgasrückführung bei Ottomotoren. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 12 Nr. 458. Düsseldorf: VDI Verlag 2001
- [I5] *Hosaka, T.; Hamazaki, M.*: Development of the Variable Valve timing and Lift (VTEC) Engine for the Honda NSX. In: SAE Technical Paper Series 910 008
- [I6] *Kronich, A.*: Methodik zur Entwicklung eines vollvariablen Ventiltriebs. Dissertation Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern 2005
- [I7] *Spicher, U.*: Verbrennungsmotoren A und B. Vorlesungsumdrucke TH Karlsruhe
- [I8] *Bach, E.*: Thermodynamische Modellierung realer Prozesse von Verbrennungsmotoren. Vorlesungsumdruck Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH)
- [I9] *Seifert, H.*: Instationäre Strömungsvorgänge in Rohrleitungen an Verbrennungskraftmaschinen. Berlin: Springer Verlag, 1962
- [I10] *Vibe, I. I.*: Brennverlauf und Kreisprozess von Verbrennungsmotoren. Berlin: VEB Verlag Technik, 1970
- [I11] *Pischinger, R.; Kraßnig, G.; Taucar, G.; Sams, Th.*: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine. Wien: Springer Verlag, 1989
- [I12] *Urlaub, A.*: Verbrennungsmotoren. Berlin: Springer Verlag, 2. Auflage, 1994
- [I13] *Bensinger, W.-D.*: Die Steuerung des Gaswechsels in schnelllaufenden Verbrennungsmotoren. Berlin: Springer, 1968 (*Kollmann, K. (Hrsg.)*): Konstruktionsbücher Band 16
- [I14] *Aoi, K.; Nomura, K.; Matsuzaka, H.*: Optimization of Multi-Valve, Four Cycle Engine Design: The Benefit of Five-Valve Technology. In: SAE: Technical Paper Series 860032
- [I15] *Lohr, F.*: Die Kraftfahrzeugmotoren der Zukunft. In: Automobil-Industrie 34 (1982), Nr. 2
- [I16] *Moser, F. X.*: Kriterien und Potential der Vier-Ventil-Technik bei Nutzfahrzeug-Dieselmotoren. In: MTZ 50 (1989), Nr. 6
- [I17] *Pischinger, F.*: Verbrennungsmotoren, Band 1. 9. Auflage. Aachen: Lehrstuhl für angewandte Thermodynamik RWTH Aachen, 1988. – Vorlesungsumdruck
- [I18] *TRW Thompson GmbH*: Handbuch. 6. Auflage. Barsinghausen: TRW Thompson, 1983. – heute SPT
- [I19] *Kawasaki, M; Takase, K.; Kato, S.; Nakagawa, M.; Mori, M.*: Development of Engine Valve Seats Directly Deposited onto Aluminum Cylinder Head by Laser Cladding Process. In: SAE Technical Paper Serie 920571
- [I20] [C12]
- [I21] *Kurz, D.*: Entwurf und Berechnung ruckfreier Nocken. In: ATZ 56 (1954), Nr. 11

- [122] *Oppermann, G.; Häntsch, H.; Schubert, R.*: Ventildfederauslegung an schnellaufenden Verbrennungsmotoren. In: MTZ 53 (1992), Nr. 12
- [123] *Atsugi Unisia Corporation. Atsugi/Japan*: Atsugi Unisia Corporation, 1989. - Produktinformation
- [124] *Maekawa, K.; Ohsawa, N.; Akasaka, A.*: Development of a Valve Timing Control System. In: SAE Technical Paper Series 890680
- [125] *Grohn, M.; Wolf, K.*: Variable Steuerzeiten der neuen Mercedes-Benz Vierventilmotoren. In: MTZ 50 (1989), Nr. 7/8
- [126] *Gray, C.*: A Review of Variable Engine Valve Timing. In: SAE Technical Paper Series 880386
- [127] *Hannibal, W.; Knecht, A.; Stephan, W.*: Nockenwellenverstellungen für Ottomotoren. Die Bibliothek der Technik, Band 247 (2002). Landsberg am Lech: verlag moderne industrie.
- [128] *Römmer, A.; Ihlemann A.; Haas, M.; Solfrank, P.; Jäckel, M.; Bretting, W.; Geiger, U.*: Ventiltriebssysteme für Verbrennungsmotoren. Die Bibliothek der Technik, Band 249 (2003). Landsberg am Lech: verlag moderne industrie.
- [129] *Lancefield, T. M.; Gayler, R. J.; Chattopadhyay, A.*: The Practical Application and Effects of a Variable Event Valve Timing System. In: SAE Technical Paper Series 930825
- [130] *Fersen, O. v.*: Verwandlungskünstler. Moderne Ventiltechnik: Variable Steuerzeiten. In: mot-Technik (1991), Nr. 2
- [131] *Hannibal, W.; Flierl, R.; Stiegler, L.; Meyer, R.*: Overview of current continuously variable valve lift systems for four-stroke spark-ignition engines and the criteria for their design ratings. SAE Paper 2004-01-1263, Detroit 2004
- [132] *Unger, H.*: VALVETRONIC. Bibliothek der Technik, Band 263 (2004). Landsberg am Lech: verlag moderne industrie.
- [133] *Grebe, U.*: Weiterentwicklung des Ottomotors, Vorlesung TU Wien, Wien 2005
- [134] *Maerky, C.; Nicole, E.; Dulac A.*: JCAE SVA Electromagnetic Valve Actuation. In: *Pischinger, S. (Hrsg.): Variable Ventilsteuerung – Ein Verfahren zur Reduzierung von Kraftstoffverbrauch und Emissionen.* Renningen: expert Verlag 2002
- [135] *Koch, A.; Kramer W.; Warnecke, V.*: Die Systemkomponenten eines elektromechanischen Ventiltriebs. 20. Internationales Wiener Motorensymposium. Wien 1999
- [136] *Haas, E.; Reichweger, J.*: Messtechnische und rechnerische Untersuchung am Ventiltrieb von Lkw-Motoren. VDI-Tagung Berechnung im Automobilbau, Fellbach 1984. In: VDI-Berichte Nr. 537 (1984)
- [137] *Schamel, A.; Meyer, J.; Philips, P.*: Rechnerische Simulation des dynamischen Verhaltens von modernen Ventiltrieben. In: VDI Berichte Nr. 699 (1988)
- [138] *Lacy, D. J.*: Computers in Analysis Techniques for Reciprocating Engine Design. In: Inst. Mech. Eng. (1987) C14/87
- [139] *Seidlitz, S.*: Valve Train Dynamics : a Computer Study. In: SAE Technical Paper Series 089620
- [140] *Brandstetter, W.; Finch, J.; Hirsch, W.*: Die neue DOHC-16Ventil-Motorenbaureihe von Ford. Teil 1: Projektierung Grundmotor. In: MTZ 53 (1992), Nr. 2
- [141] *Arnold, M.; Roß, J.; Speckens, F.-W.*: Analyse und Optimierung von Ventil- und Steuertrieben in Verbrennungsmotoren. In: MTZ 54 (1993), Nr. 3
- [142] *Mohr, M.*: Dynamische Optimierung eines mechanisch vollvariablen Ventiltriebs mittels Mehrkörper-simulation. Diplomarbeit Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern 2005
- [143] *Budack, R.; Kuhl, R.; Trost, W.; Poida, R.*: Vorteile auslassseitiger Ventiltriebsvariabilitäten beim Turbomotor. Tagung: Variable Ventilsteuerung, Haus der Technik, Essen 2009
- [144] *Flierl, R.; Schmitt, S.; Kleinert, G.; Esch, Hans-Joachim; Dison, H.*: UniValve – ein vollvariables mechanisches Ventiltriebssystem für zukünftige Ottomotoren. In MTZ:
- [145] Internetquelle, Pressestelle BMW.
- [146] *Kuhlbach, K.; Mehring, J.; Borrmann, D.; Friedfeld, R.*: Zylinderkopf mit integriertem Abgaskrümmter für Downsizing-Konzepte. In: MTZ 04 2009
- [147] *Flierl, R.; Schmitt, S.; Paulov, M.; Hannibal, W.; Kleinert, G.*: Comparative Investigation of Throttle-free Load Control on a 2.0 l Four Cylinder Turbocharged Gasoline Engine with Port and Direct Fuel Injection. International SAE World Congress, 2010, Detroit

- [I48] *Szengel, R.; Middendorf, H.; Voeltz, S.; Laumann, A.; Tilchner, L.; Theobald, J.; Etzrod, T.; Krebs, R.*: Der TSI-Motor mit 90kW – Erweiterung der verbrauchsgünstigen Ottomotoren-Baureihe von Volkswagen. In: MTZ 07-08 2007
- [I49] Volkswagen AG: Selbststudienprogramm 405 – der 1,4l-90kW-TSI Motor mit Turboaufladung
- [I50] *Lückert, P.; Kreitmann, F.; Rehberger, A.; Bruchner, K.; Schwedler, K.; Ottenbacher, H.*: Der neue 1,8l-Vierzylinder-Ottomotor von Mercedes-Benz. In: MTZ 2009-06
- [I51] *Krebs, R.; Szengel, R.; Middendorf, H.; Fließ, M.; Laumann, A.; Voeltz, S.*: Neuer Ottomotor mit Direkteinspritzung und Doppelaufladung von Volkswagen. In: MTZ 2005-11
- [I52] *Flierl, R.; Paulov, M.; Schmitt, S.; Hannibal, W.; Spicher, U.; Sarikoc, F.*: Potentiale des mechanisch voll variablen Ventiltriebs am aufgeladenen Ottomotor mit innerer und äußerer Gemischbildung. In: MTZ 2011-07
- [I53] *Flierl, R.; Schmitt, S.; Fuchs, T.*: Kreisprozesssimulation von Ottomotoren mit drosselfreier Laststeuerung durch mechanisch vollvariablen Ventiltrieb. In: Simulation und Aufladung von Verbrennungsmotoren, Lechmann, A. (Hrsg.), Berlin: Springer, 2008
- [I54] *Klauer, N.; Klütting, M.; Steinparzer, F.; Kretschmer, J.*: Innovative Aufladung, Variable Ventiltriebe und 8-Gang Getriebe – eine neue Generation von Antrieben.18. AachenerKolloquiumFahrzeug- und Motorentechnik, 2009
- [I55] *Mastrangelo, G.; Micelli, D.; Sacco, D.*: Extremes Downsizing durch den Zweizylinder-Ottomotor von Fiat. In: MTZ 2011-0
- [I56] *Maaß, H.; Klier, H.*: Kräfte, Momente und deren Ausgleich in der Verbrennungskraftmaschine. Wien: Springer, 1982
- [I57] = [C8]
- [I58] *Wyczalek, F. A.*: Generalized Balance of Inline, Vee and Opposed Pistons Engines. In: SAE Technical Paper Series 880418
- [I59] *Dubbel*, Taschenbuch für den Maschinenbau. 14. Auflage. Herausgeber: *Beitz, W.* und *Küttner, K.-H.* Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 1981.
- [I60] = [C9]
- [I61] = [J22]
- [I62] *Krüger, H.*: Massenausgleich durch Pleuelgegenmassen. In: MTZ 53 (1992), Nr. 12
- [I63] = [C12]
- [I64] *Burow, G.*: Ein Beitrag zum Massenausgleich von V-Maschinen mit niedrigen Zylinderzahlen. In: Dieselmotor-Nachrichten (1987), Nr. 1/2
- [I65] *Freyther, H. G.*: Massenkräfte und Massenmomente bei V-Motoren in Abhängigkeit vom V-Winkel. In: MTZ 22 (1961), Nr. 12
- [I66] *Breitwieser, K.; Kemmann, H.; Weidner, H.; Zickwolff, E.*: Der neue Opel-V6-Motor. In: MTZ 54 (1993), Nr. 3
- [I67] *Bayer, B.*: Good Vibrations – Motorschwingungen. In: PS Motorrad-Zeitung (1988), Heft 1
- [I68] *Zima, S.*: Kurbeltriebe: Konstruktion, Berechnung und Erprobung von den Anfängen bis heute. Braunschweig; Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn / Bertelsmann Fachinformation (ATZ-MTZ-Fachbuch), 1989
- [I69] = [B15]
- [I70] *Thieman, W.; Finkbeiner, H.; Brüggemann, H.*: Der neue Common-Rail-Dieselmotor mit Direkteinspritzung für den smart – Teil I: Motorkonstruktion und mechanischer Aufbau. In: MTZ 60 (1999), Nr. 11
- [I71] *Hauk, F.; Dommes, W.*: Der erste serienmäßige Reihen-Fünfzylinder-Ottomotor für Personenwagen: Eine Entwicklung der AUDI NSU. In: MTZ 78 (1976), Nr. 10
- [I72] *Schmidt, G.; Niggemeyer, H.*: Sechszylinder in Reihen- oder V-Bauart – die optimale Motorisierung? In: MTZ 56 (1995), Nr. 5
- [I73] *Fersen, O. v.*: Moderne Motoren: Honda V6. In: mot-Technik (1986), Heft 24
- [I74] *Kollmann, K.; Fortnagel, M.; Thom, R.; Wagner, W.-D.*: Die neue V-Motorenbaureihe von Mercedes-Benz mit Dreiventiltechnik und Doppelzündung. In: MTZ 58 (1997), Nr. 6

- [175] *Bach, M.; Bauder, R.; Mikulic, L.; Pözl, H.-W.; Stähle, H.*: Der neue V6-TDI-Motor von Audi mit Ventililtechnik – Teil 1: Konstruktion. In: MTZ 58 (1997), Nr. 7/8
- [176] Porsche Boxermotor-Kurbelwelle des 911 Carrera; Bild: Maschinenfabrik ALFING Kessler GmbH, 73413 Aalen-Wasseralfingen
- [177] = [C33]
- [178] *Aschoff, G.; Ebel, B.; Eissing, S.; Metzner, F.Th.*: Der neue V6-Vierventilmotor von Volkswagen. In: MTZ 60 (1999), Nr. 11
- [179] *Ebel, B.; Kirsch, U.; Metzner, F.Th.*: Der neue Fünfzylindermotor von Volkswagen – Teil 1: Konstruktion und Motormechanik. In: MTZ 59 (1998), Nr. 1
- [180] *Nefischer, P.; Steinparzer, F.; Stütz, W.*: Der Ladungswechsel des neuen BMW V8 Dieselmotors. In: 8. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 1999
- [181] *Marquard, R.; Helfried, S.*: AVL Spectros – Ein Motorenkonzept für Leichtbau und Modulbauweise. In: MTZ 61 (2000), Nr.2
- [182] Entwicklungsgeschichte Zwölfzylinder BMW 750. Sonderdruck aus auto motor und sport, Heft 15/1987
- [183] *Flierl, R.; Jooß, R.*: Ausgleichswellensystem für den BMW-Vierzylindermotor im neuen 316i und 318i. In: MTZ 60 (1999), Nr. 5
- [184] *Heuser, G.; Hügen, S.; Brohmer, A.; Warren, G. A.; Menne, R.J.*: Der neue Ford 2,3-l-Motor mit Ausgleichswellen. In: MTZ 58 (1997), Nr. 1
- [185] = [C2]
- [186] *Hofer, K.; Schedl, H.; Boom, J. v. d.*: Die Akustik des neuen V6-TDI-Motors im Audi A8. In: ATZ 99 (1997), Nr. 7/8
- [187] *Heuser, G.; Gerlach, S.; Graham, D.; Meurer, J.; Metz, H.*: Der 4,0-i-SOHC-Motor für den Ford Explorer. In: MTZ 58 (1997) Nr. 5
- [188] *Hafner, K. E.; Maaß, H.*: Die Verbrennungskraftmaschine. Bd. 4: Torsionsschwingungen in der Verbrennungskraftmaschine. Wien: Springer, 1985
- [189] *Benz, W.*: Die Erregung der Längsschwingungen von Kurbelwellen. In: MTZ 21 (1960), Nr. 8
- [190] *Biezeno, L.; Grammel, R.*: Technische Dynamik. 2. Auflage. Berlin: Springer, 1953
- [191] *Benz, W.*: Biegeschwingungen von Kurbelwellen, insbesondere bei schweren Schwungrädern. In: ATZ 37 (1935), Nr. 16
- [192] *Benz, W.*: Biegeschwingungen von mit einer Masse besetzten Wellen. In: MTZ 11 (1950), Nr. 3
- [193] *Kritzer, R.*: Die Biegeschwingungen der Kurbelwelle von Kolbenmaschinen mit Berücksichtigung der Kreiselwirkung des Schwungrads. In: MWM Nachrichten (1957), Nr. 1
- [194] = [J45]
- [195] = [E38]
- [196] = [E37]

[J..] Motorgeräusch

- [J1] *Essers, U.; Horch, E.-J.; Köhler, E.*: Geräusche von Kraftfahrzeugen: Stand 1985 und Zukunftsaussichten“. In: Technischer Fortschritt sichert die Zukunft. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1985
- [J2] Norm *ISO-Recommendation R362*. – Ref. No.: ISO/R362-1964 (E)
- [J3] *Flotho, A.; Spessert, B.*: Geräuschminderung an direkteinspritzenden Dieselmotoren. 1. Teil. In: Automobil-Industrie 33 (1988), Nr. 3
- [J4] *Liedl, W.; Hommel, R.; Kiessig, H.; Fischer, J.; Hühn, W.*: Entwicklung eines lärmarmen Baustellen-Lastkraftwagens. In: UBA-Forschungsbericht Nr. 105 05 118/01, Mai 1983
- [J5] *Brandl, F.*: Maßnahmen im Rahmen der Motor- und Fahrzeugakustik. In: *AVL: Proceedings Motor und Umwelt*. AVL, 1989

- [J6] Köhler, E.: Beitrag zur Erklärung des Reifenabrollgeräusches bei Nässe. Stuttgart, Universität, Diss., 1983
- [J7] Nachbar, K.; Tautenhahn, W.: Der neue Volkswagen Transporter / Caravelle. Teil 2. In: ATZ 92 (1990), Nr. 11
- [J8] Thien, G. E.: Geräuschquellen am Dieselmotor. In: VDI-Berichte 499 (1983)
- [J9] Herrmann, R.: Entstehung und Zusammensetzung des Motorgeräusches. In: Automobil-Industrie 32 (1987), Nr. 3
- [J10] Mahr, B.; Essers, U.: Einfluss der Verbrennung auf das Geräusch des direkteinspritzenden Dieselmotors. In: VDI Fortschrittsberichte Reihe 12 Nr. 140 (1989)
- [J11] Ziegler, G. u. a.: Reduzierung des Motorgeräusches von Kraftfahrzeugen durch maschinenakustische Maßnahmen. Band 3: Geräuschminderung an einem Pkw-Ottomotor. – Forschungsbericht TV 8052/9 (1983) des BMFT
- [J12] Föller, D.: Geräuscharme Maschinenteile: Untersuchung der Anregung von Körperschall in Maschinen und der Möglichkeit für eine primäre Lärmbekämpfung. In: Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. Heft 15 (1972)
- [J13] Bendat, J. S.; Piersol, A. G.: Random Data: Analysis and Measurement Procedures. New York: Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, 1971
- [J14] Bendat, J. S.; Piersol, A. G.: Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis. New York: Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, 1980
- [J15] Cooley, J. W.; Tuckey, J. W.: An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. In: Math. Comp. 19 April 1965
- [J16] Heckl, M.; Müller, H. A.: Taschenbuch der Technischen Akustik. Berlin: Springer, 1975
- [J17] Ueberschär, D.; Grundmann, W.: Verminderung des Verbrennungsgeräusches durch Heißkühlung und Abgasrückführung. In: Automobil-Industrie 29 (1984), Nr. 3
- [J18] Croker, M. D.: Summary Report of Experimental Work on the RICARDO Crankcase Simulation Rigs. Part 1. In: DP 87/716
- [J19] Anderton, D.: Some Reflections on Automotive Engine Noise, Cooling and Turbocharging. Seminar (Stuttgart-Vaihingen 1984). In: Essers, U. (Hrsg.): Berichte aus den Instituten FKFS, ISVR und IVK, 1985
- [J20] Aistleitner, K.; Anisits, F.: Möglichkeiten der Geräuschreduktion bei Pkw-Dieselmotoren. In: VDI-Berichte Nr. 714 (1988)
- [J21] Köhler, E.: Überblick über die Forschungsarbeiten des FKFS auf dem Gebiet der Kfz-Geräuschbekämpfung. Seminar (Stuttgart-Vaihingen 1984). In: Essers, U. (Hrsg.): Berichte aus den Instituten FKFS, ISVR und IVK, 1985
- [J22] Ebbinghaus, W.; Müller, E.; Neyer, D.: Der neue 1,9-Liter-Dieselmotor von VW. In: MTZ 50 (1989), Nr. 12
- [J23] Okino, M.; Okada, K.; Abe, M.: ISUZU New 8.4 L Diesel Engine. In: SAE Technical Paper Series 850258
- [J24] Gaede, G.: Akustische Entwicklung des BMW-12-Zylinder-Motors. In: Automobil-Industrie 32 (1987), Nr. 6
- [J25] Kuroda, O.; Fujii, Y.: An Approach to Improve Engine Sound Quality. In: SAE Technical Paper Series 880083
- [J26] Anonym: Rigid Design Quiets 2.4-L Engine. In: Machine Design 61 (1989) No. 8
- [J27] Usuba, Y.; Kuzuoka, H.; Kamiya, N.: Low Noise Design for the Main Structural Parts of V6 Engines. In: Int. J. of Veh. Des. 10 (1989) No. 1
- [J28] Ide, S.; Uchida, T.; Ozawa, K.: Improvement of Engine Sound Quality by Use of a Flexible Flywheel. In: JSAE Review 10 (1989) No. 3
- [J29] = [E28]
- [J30] Kochanowski, H. A.; Haller, H.: Geräuschemission luftgekühlter Fahrzeug-Dieselmotoren. FISITA (Veranst.): XVIII. Intern. Kongress (Hamburg 1980)
- [J31] = [16]

- [J32] *Schaberg, P. W.; Priede, T.; Dutkiewicz, R. K.*: Effects of a Rapid Pressure Rise on Engine Vibration and Noise. SAE Technical Paper Series 900013
- [J33] *Davey, P.*: Combining High Tech Performance and Refinement in Gasoline Engines. In: Auto-Tech 89C399/7, 1989 Combustion, Emissions and Performance IMechE Seminar Papers
- [J34] *Affenzeller, J.; Priebsch, H. H.; Rainer, G.*: Einflüsse von Anbauteilen auf die dynamischen Kenngrößen von Motorblöcken. In: MTZ 45 (1984), Nr. 1
- [J35] = [F1]
- [J36] *W. Schirmer u. a.*: Lärmbekämpfung: Physikalische Grundlagen und praktische Maßnahmen der Lärmbekämpfung an Maschinen und in Produktionsanlagen. Berlin: Verlag Tribüne Berlin, 1984
- [J37] *Oberg, H. J.; Punkt, D.; Fachbach, M. A.*: Decoupled Engine for Exterior Noise Reduction in a Lower-Mid-Class Front-Wheel-Drive Passenger Car. In: SAE Technical Paper Series 870633
- [J38] *Baker, J. M.*: Bearing Impacts and Noise and Finite Element Modeling. Seminar (Stuttgart-Vaihingen 1984). In: *Essers, U.* (Hrsg.): Berichte aus den Instituten FKFS, ISVR und IVK, 1985
- [J39] *Flotho, A.; Spessert, B.*: Geräuschminderung an direkteinspritzenden Dieselmotoren. Teil 2. In: Automobil-Industrie 33 (1988), Nr. 5
- [J40] *Cremer, L.; Heckl, M.*: Körperschall: Physikalische Grundlagen und Technische Anwendungen. Berlin: Springer, 1967
- [J41] *Rainer, G. Ph.; Gschweidl, E.; Hübl, H. P.*: Einfluss von Konstruktionsvarianten auf das akustische Verhalten von Motoren. *Haus der Technik* (Veranst.): Tagung Verbrennungsmotorenakustik (Essen 1993)
- [J42] *Essers, U.; Gutzmer, P.; Philipp, U.*: Körperschallanregung in den Kurbelwellengrundlagern eines Verbrennungsmotors. In: FVV-Heft R424, 1982 ; FVV-Heft R428, 1983
- [J43] *Essers, U.; Gutzmer, P.; Kuipers, G.*: Geräuschregung durch die Bewegung der Kurbelwelle in den Hauptlagern eines Ottomotors. – FISITA-Beitrag Nr. 845049 (1984)
- [J44] *Brandl, F. K.; Affenzeller, J.; Thien, G. E.*: Some Strategies to Meet Future Noise Regulations for Truck Engines. In: SAE Technical Paper Series 870950
- [J45] *Priebsch, H.-H.; Affenzeller, J.; Gran, S.*: Prediction Techniques for Stress and Vibration of Nonlinear Supported, Rotating Crankshafts. In: ASME, Development in Off-Highway-Engines, ICE Volume 18, Oct. 1992
- [J46] *Shibuya, H.; Ishihama, M.; Kubozuka, T.*: Improved Passenger Compartment Sound Quality of a Shell Shaped Power Plant Structure: an Analytical Study with Experimental and Vehicle Verification. In: IMechE Paper C420/034 1990 Quiet Revolutions: Powertrain and Vehicle Noise Refinements IMechE Conf. Proc
- [J47] *Aoki, H.; Ishihama, M.; Kinoshita, A.*: Effects of a Powerplant Vibration on Sound Quality in the Passenger Compartment during Acceleration. In: SAE Technical Paper Series 870955
- [J48] *Raasch, I.*: Schallabstrahlung von schwingenden Strukturen: Möglichkeiten der theoretischen Vorhersage der abgestrahlten Schalleistung. FEM-Kongress IKOSS, Baden-Baden 1982
- [J49] *Dürr, W.*: Körperschallminderung durch Einsatz der Finite-Element-Methode. In: VDI-Berichte Nr. 537 (1984)
- [J50] = [F20]
- [J51] *Priede, T.; Ghazy, M. R.*: Die Charakteristiken der erregenden Kräfte in Turboladernmotoren und ihr Einfluss auf Motorschwingungen und Geräusch. Seminar (Stuttgart-Vaihingen 1984). In: *Essers, U.* (Hrsg.): Berichte aus den Instituten FKFS, ISVR und IVK, 1985
- [J52] *Schelkle, E.*: Einsatz nichtlinearer Finite-Element-Methoden im Automobilbau. In: VDI-Berichte Nr. 537 (1984)
- [J53] *Radaj, D.; Butenschön, H.-J.; Hempel, H.; Wiest H.*: Finite Berechnungsverfahren für neue Fahrzeugtriebwerke. In: MTZ 52 (1991), Nr. 2
- [J54] *Dieu, F.*: Structural Optimization of a Vehicle Using Finite Element Techniques. In: SAE Technical Paper Series 885135

[K..] Zusammenfassung und Ausblick

- [K1] *Mamai, K.; Goto, T.; Masuda, T.; Arai T.*: Present status and future direction of engine tribology at Nissan. In: Proceedings of the 17th Leeds-Lyon Symp. on Tribology 1991, Tribology Series Vol. 18

[L..] Anhang: FEM, FDM, BEM, Modal-Analyse

- [L1] *Marsal, D.*: Die numerische Lösung partieller Differenzialgleichungen in Wissenschaft und Technik. Mannheim: Bibliographisches Institut/B.I.-Wissenschaftsverlag, 1976
- [L2] *Zienkiewicz, O. C.*: The Finite Element Method in Engineering Science. London: McGraw-Hill, 1971. – 2. erw. und überarb. Aufl. von The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics
- [L3] *Bathe, K. J.*: Finite Element Procedures in Engineering Analysis. Prentice-Hall, 1982
- [L4] *Kämmel, G.; Franek, H.; Recke, H.-G.*: Einführung in die Methode der finiten Elemente. 2. Auflage. München: Carl Hauser, 1990 (Studienbücher der technischen Wissenschaften)
- [L5] *Schwarz, H. R.*: Methode der finiten Elemente. 3. Auflage. Stuttgart: Teubner, 1991 (Teubner Studienbücher Mathematik)
- [L6] = [J52]
- [L7] = [J53]
- [L8] = [E32]
- [L9] = [F38]
- [L10] *Möhrmann, W.*: DBETSY: die Boundary Element Methode in der industriellen Berechnung. In: VDI-Berichte Nr. 537 (1984)
- [L11] *Krämer, E.*: Maschinendynamik. Berlin: Springer, 1984

Sachwortverzeichnis

A

Abstrahlgrad 483 ff., 494, 496
 Abstrahlmaß 474
 Anregung 230 f.
 – Impuls- 469 f.
 – Kraft- 469 f.
 Antwortspektrum 495
 Arbeit 10, 18, 41
 Aufsetzimpuls 343
 Auslassspreizung 333, 356
 Auslasssteuerzeit 389
 Auslasstrakt 325
 Ausschnitt (FEM) 504
 Ausströmfunktion 303

B

Bankversatz 30
 Basissicherheitsfaktor 111
 Bauhöhe 306
 Beanspruchung
 – Kolben 129, 133
 – Kolbenbolzen 116
 – mechanische 78, 133
 – Pleuelauge 49
 – Pleuelkopf 48
 – Pleuelschaft 49
 – Pleuelschrauben 49
 – thermische 78, 129, 133
 bedplate 207, 472
 Belastungsfunktion 518
 BEM 59, 518
 Berechnung
 – Biegemomentverlauf 55
 – Blow-by 157
 – Bolzennabe (FEM) 135
 – Formzahl 179
 – Kolben (FEM) 126
 – Kolbenbolzen 96 ff., 112, 135
 – Kolbenmasse 118
 – Kühlmittelkreislauf 206
 – Ladungswechsel 300
 – Pleuel 59
 – Pleuelverschraubung 62
 – Schraube 73
 – Spannungs- (ZKG) 238
 – Temperaturfeld 236

– Verformung 136, 237
 – ZKG (FEM) 232
 Beschleunigung
 – Kolben 84, 154
 – Kolbenring 154
 Betriebsfestigkeitsberechnung 310 f.
 Biegemoment 56, 62, 73, 115, 170, 177
 Biegesteifigkeit 230
 Biegeweichselfestigkeit 230
 Biegewellen 482
 Bimetall-Effekt 89
 Blaurauchen 145
 Blechmantelbildung 214
 Blechventile 345
 Blockhöhe 32
 Blow-by 138, 152, 156 f.
 Bolzenlagerung 113
 Bolzennabe 100, 135
 Bolzenspiel 101
 Boundary-Element-Methode *s. BEM*
 Brennraum 236, 275
 Brennraumgeometrie 305
 Brennraumkalotte 35
 Brille 486
 Bruchtrennpleuel 46
 Büchse 253, 254
 – Mid-stop- 251
 – Montagezustand 257
 – nasse 26, 251
 – Pressung 258
 – Slip-fit- 256
 – trockene 256
 – Überdeckung 258

C

Closed-deck 200
 Cold Slap 22, 23, 85

D

Dämpfung 496
 Dauerbruch 183
 Dauerfestigkeit 73
 Dehnung 511
 Dendritenarmabstand 289
 Desachsierung 84 ff.
 Determinantenmethode 514

Direkteinspritzung 92
 Diskretisierung 504
 Diskretisierungsfehler 517
 Drall 295 f., 299
 Drallkanal 298 f.
 Drallklappen 298
 Drehmoment 10, 81
 – Schraubenanzugs- 72
 Drehmomentverlauf 357, 377
 Drehzahlfestigkeit 339
 Dreieckskoordinaten 516
 Drosselquerschnitt 157
 Drosselstelle 332
 Druckanstieg 478
 Druckanstiegsgeschwindigkeit 478
 Druckschwingung 326
 Druckseite 85
 Druckstoß 327
 Durchblasemenge *s. Blow-by*
 Durchflussfunktion (isentrop) 158
 Durchflussgleichung 331
 Durchflusszahl 299, 303 f.
 Durchlässigkeit 488

E

Eigenfrequenzen 209, 230,
 481 f., 520
 Eigenschwingungsformen 520
 Einlasskanal 324
 Einlassschluss 357
 Einlassspreizung 333, 356, 366, 382
 Einlaufverschleiß 214
 Einmassenschwinger 354, 477
 Einmetallkolben 90
 Einström-Gradient 296
 Element
 – Auswahl 504
 – isoparametrisches 232, 505
 – Konstant- 232, 511
 – Linear- 232
 – TRIM3- 514
 – Typen 233, 504
 – Volumen- 512
 Element-Matrix 516
 Emission 206
 EMVT 372, 373
 Energiebilanz 279
 Energieerhaltung 330
 Ersatzmodell
 – Ladungswechsel 301
 – Pleuel 52
 Ersatznachgiebigkeit 242

Exzenterwelle 368
 Exzentrizität 86

F

Fahrgeräusch 467
 Fahrwiderstand 227
 Fase 99
 Faserverstärkung 284
 Fast Fourier Transform *s. FFT*
 FDM 130, 517
 Federsteifigkeit 63
 FEM 59, 106
 – Grundlagen 503 ff.
 Feuersteg 16, 80
 Feuerstegspiel 145
 FFT 472
 Finite-Differenzen-Methode *s. FDM*
 Finite-Element-Methode *s. FEM*
 Flächenpressung 100
 Flankenradius 348
 Flankenwinkel 347
 Formfunktionen 515
 Formzahl 176, 177, 179, 181
 Fracture-Splitting 47
 Freigang 20
 Frischgas 323, 326, 355
 Frischgasaufwand 41
 Fugenpressung 265
 Füllkanal 298
 Füllung 327
 Futterbohrung 265

G

Galerkin-Prozess 516
 Gasdynamik 302
 Gasschwingung 326
 Gegendruckseite 85
 Gegengewichtsradius 20, 22, 425
 Gemischheizwert 40
 Gemischmasse 324
 Geräuschreduzierung 475
 Gestaltänderungshypothese 72, 107, 116, 175
 Gestaltfestigkeit 76
 Gewichtsfunktion 516
 Gewindereibung 73
 Gießverfahren 218, 220, 229, 290
 Gleichungen, entkoppelte 519
 Gleichungssystem, modifiziertes 511
 Greensche Funktion 518
 Grenzdrehzahl 114 f.
 Grenzfrequenz 229 f.
 – Platte 484

Grobmodell 235, 504
 Großkolben 96 f.
 Grundgebiet 512, 517

H

Halbsegment 235
 Hauptkoordinate 520
 Hauptlager 238
 Hauptölkanal 225
 HC-Emission 80
 Headland-Ring 80
 Heizwert 40
 Heli-Coil 239
 Honung (Plateau-) 214
 Honwinkel 213
 Hubraum 10
 – Steuerformel 37
 Hubraumgewicht 37
 Hubverlängerung 12
 Hubzapfen 30, 164 f., 171 ff., 406,
 415, 439

I

Impedanz
 – Eingangs- 474
 – Schall- 474
 – Übertragungs- 474, 489
 Impulserhaltung 330
 Impulsverlust 330, 332
 Innenkonusbolzen 102 f.
 Instabilität, numerische 518

K

Kanalabschaltung 294
 Kanalgeometrie 293
 Kavitation 252
 Kerbempfindlichkeitsziffer 181
 Kerbwirkungsfaktor, innerer 183
 Kerbwirkungszahl 181
 Kettenversteller 358
 k-Faktor 14 ff., 32
 Kipphebel 338
 Kleinkolben 97
 Klemmlänge 63, 65 f.
 Klemmlängenverhältnis 62
 Klemmpleuel 116
 Knotenvariablen 491
 Kolben
 – Bauarten 89
 – Einbauspiel 119
 – Einsatzgrenzen 89
 – gepresster 91

– Glattschaft- 91
 – Kasten- 91
 – Laufspiel 119
 – Schmiede- 91
 – Slipper- 92
 – Tragbildkorrektur 119
 – Wärmeströme 131
 Kolbenauslegung 109, 124, 137
 Kolbenaußenkontur 119
 Kolbenbolzen 100
 – Durchbiegung 103
 – Lagerung 97
 – Ovalverformung 102
 Kolbenbolzendurchmesser 20, 100, 102
 Kolbenbolzensicherung 113
 Kolbendurchmesser 32
 Kolbengeschwindigkeit 84
 – mittlere 13, 18
 Kolbenkompressionshöhe 13, 18, 32, 80,
 119, 130 f.
 Kolbenkühlung 130, 225
 Kolbenring 266
 – Einbauspannung 150
 – Formfüllungsvermögen 149
 – Hydrodynamik/-mechanik 160
 – Reibung 160
 – Torsionsmoment 155
 – Überstreifspannung 150
 Kolbenringbewegung 143, 154
 Kolbenringparameter 148
 Kolbenringtorsion 151
 Kolbenschaft 80
 – Austauschmaß 18
 – Elastizität 122
 – Tragbildbreite 122
 Kolbenschaftgeräusch 85
 Kolbentemperatur 129
 Kolbenüberstand 13
 Kolbenweg 84
 Kompaktheit 29
 Kompressionshöhe *s. Kolben-*
kompressionshöhe
 Kompressionsvolumen 15, 38, 325
 Konsistenz 518
 Konvergenz 518
 Kopfreibung 73
 Kopfrückfall 119
 Körperschallleitweg
 – äußerer 469
 – innerer 486, 469
 Kraft
 – Abstütz- 53

- Anpress- 154
- Auftriebs- 162
- Betriebs- 56, 242
- Gas- 78, 254
- generalisierte 520
- Hauptlager- 83
- Klemm- 242
- Kolben- 81, 112
- Kolbenseiten- 81
- Lager- 238
- Massen- *s. Massenkraft*
- Mindestklemm- 68
- Pleuellager- 82
- Pleuelstangen- 81
- Radial- 81
- Reib- 162
- Schraubenzusatz- 242 f.
- Tangential- 81, 147 f.
- Vorspann- *s. Vorspannkraft*
- Kräftegleichgewicht 125
- Kraftstoffverbrauch, spezifischer 42 f.
- Kraftverhältnis 69
- Kreisbogennocken 346
- k-ε*-Modell 280
- Kühlkanalkolben 92, 95
- Kühlmittelführung 285
- Kühlmittelkreislauf 206
- Kühlmittelstrom 237
- Kurbelgehäuse 193
- Kurbelkröpfung 172
- Kurbelraum 222
 - Entlüftung 225
- Kurbeltrieb
 - geschränkter 86
 - Kräfte 81
- Kurbelwange, Druckspannung 178
- Kurbelwelle
 - Balkenmodell 167
 - Einkröpfungmodell 167, 170
 - Gegengewichte 19, 396 ff., 405 f., 416, 425, 452 f.
 - Hauptabmessungen 164
 - Hohlkehlen 177
 - Spannungszustand 177
 - Torsionsmoment 170
- L**
- Labyrinth-Theorie 156
- Ladeluftkühlung 92, 95
- Ladungswechsel 300 f., 323 f., 329, 333, 355, 361, 378 ff.
- Ladungswechselarbeit 323, 329, 365 f.
- Ladungswechselfleife 365
- Lagergasse 222
- Lagerstuhl 226
- Lagertraverse 207
- Lastenheft 10
- Lastkollektive 310
- Laststeuerung 367
- Lauffläche (Verschleißfestigkeit) 214
- Laval-Düse 303
- law of the wall 280
- Leistung
 - effektive 10, 18
 - Kolbenflächen- 37
 - spezifische *s. Leistung, effektive*
- Leistungsdichte 495
- Leistungsgewicht 37
- Leiterrahmen 209, 486
- Liefergrad 41, 292, 329
- Luftaufwand 41
- M**
- Mach-Zahl 302
- Magnesium 232
- Masse
 - generalisierte 520
 - Kolben 14, 32, 78 ff., 95, 118 f.
 - Kolbenbolzen 32, 112 ff.
 - Kolbenring 32
 - Pleuel 32, 47 ff.
- Massenbilanz 304
- Massenerhaltung 330
- Massenkraft 79
 - Kurbelwelle 172
 - oszillierende 32, 47 f., 166
- Massenkraftentlastung 84, 112
- Massenreduzierung 230
 - ZKG 227
- Massenstrom 302
- Maulweite 148
- Mehrkörpersimulation 378
- Momentengleichgewicht 125
- Motorblock *s. ZKG*
- Motorscheibe 235
- N**
- Nabenspaltriss 78
- Nabenwanddicke 79
- Nachgiebigkeit, elastische 63
- Nachziehfreiheit (ZK) 246
- Niresist-Ringträger 92
- Nocken 345
 - harmonischer 348

- Kreisbogen- 345
- ruckfreier 345, 348
- Nockenform 345
- Nockenhub 346, 348
- Nockenwelle 355
- Normalkomponente 494
- Notlaufeigenschaften 214
- NO_x 299
 - Emission 295
- Nußelt-Zahl 279

O

- Öffnungszeit 327
- Öloxidation 225
- Ölreißen 145
- Ölstandsabsenkung 225
- Ölverschäumung 225
- Open-deck 200
- Optimierungsrechnung 32
- Ordnungsanalyse 247
- Ovalität
 - doppelt negative 120
 - doppelt positive 120
 - Feuersteg 145
 - Kolben 119, 121
 - Kolbenschaft 122

P

- Partikelemission 337
- Perlit 214
- Phasenverstellung 361
- Phosphatieren 214
- Phosphidnetz 214
- Pleuel
 - Ersatzmassen 48
 - Festigkeitsberechnung 58
 - Klemm- 97, 101
 - Lastverteilung 53
 - Versagen 53
- Pleuelauge 47, 50
- Pleuelbelastung 50
- Pleuelbreite 30
- Pleuelfuß 56
- Pleuelgeige 25
- Pleuelkopf 47, 50, 56
 - Klemmlängenbereich 63, 65
 - Nachgiebigkeit 63
 - schräg geteilt 57
 - Trennfuge 56
- Pleuelkopfverschraubung 56
 - Spannungsschaubild 66
- Pleuellänge 20, 32

- Pleuelschaft 49
- Pleuelschaftquerschnitt 47
- Pleuelschwerpunkt 48
- Postprozessor 505
- Preprozessor 505
- Pressung 258
 - radiale 147
- Pressungsverteilung 53
- Pressure Balancing 143
- Primärdurchströmung 286
- PROMO 299
- p-V-Diagramm 328

Q

- Querdurchströmung 286
- Querstromprinzip 271
- Quetschfläche 12

R

- Randelement-Methode *s. REM*
- Reaktionsmoment 82
- Regelkolben 89
- REM 518
- Residuen 516
- Resonanz 354
- Restgas 327, 328 f.
- Restgasanteil 355
- Restgrößenmethode 516
- Reverse-torsion-Ring 151
- Reynolds-Analogie 280
- Reynolds-Modell (Low-) 280
- Reynolds-Zahl 279
- Ringflattern 145
- Ringnutverschleiß 92
- Ring-Twist 141, 145, 151
- Riss 284
- Rollenschlepphebel 340
- Rollenstößel 349
- ruckfreier Nocken 345, 350

S

- Schafthausparungsradius 20, 22
- Schafteinfall 25, 120, 122
- Schafthlänge 20
- Schafthlappen 21, 23, 25
- Schafthumfangswinkel 120
- Schallabstrahlung 229
- Schallgeschwindigkeit 302
- Schallleistung 475, 494
- Schallschnelle 495 f.
- Schichtladung 6
- Schlepphebel 338, 351

- Schleppmoment 340
 Schmiedekolben 91
 Schmierölversorgungssystem 224
 Schmierspalt 160, 163
 Schnittkräfte 55
 Schnittmomente 55
 Schränkung 87 f.
 Schraube
 – Anziehverfahren 71
 – Dauerfestigkeit 73
 – Dehn- 63
 – Dimensionierung 71
 – Drehwinkel 73
 – Torsionsbeanspruchung 72
 – Vorspannung 74
 – Zugbeanspruchung 72
 Schraubenlängung 241
 Schraubenpfeifen (ZK) 239
 Schraubenverbindung, Nachgiebigkeit 63
 Schrumpfmaß 260
 Schürze 209
 Schwenkmotoren 360
 Schwenkmotorversteller 360
 Schwinghebel 338
 semi-permanent mould *s. SPM*
 Setzbetrag 245
 Shaker-Wirkung 342
 Shape Functions 515
 Signalabtastung 472
 Solver 505
 Spannung
 – Biege- 64, 105 f., 175
 – Büchse 257
 – Büchsenwand 265
 – Druck- 178
 – Eigen- 211, 238
 – Mittel- 59
 – Nenn- 170, 173
 – Normal- 64
 – Ober- 59, 175
 – Schrumpf- 116
 – Unter- 59, 175
 – Vergleichs- 72, 116, 175, 258, 264
 – Wärme- 129, 273, 282
 Spannungsverteilung 512
 Spiralkanal 299
 Spitzenradius 348
 Spitzenwinkel 347
 SPM 220
 Sprengringdurchmesser 113
 Squeeze-Effekt 160
 Stahl-Kühlkanalkolben 95
 Steadit 214
 Stegriss 282
 Steifigkeit 520
 Steifigkeits-Matrix 506
 – Element- 509
 – Gesamt- 510
 – Struktur- 509, 512
 – Werkstoff- 511
 Steuerdiagramm 333, 334, 364
 Steuerzeiten, starre 370
 Stickoxide 5 ff., 295, 299
 Stößelerhebung 349
 Stößelhubfunktion 350
 Stößelmasse 352
 Stoßstangen 339
 Strahlablösung 331
 Strahlungswiderstand 474
 Strömungsbeeinflussung 293
 Strömungsfeld 279
 Strömungsgeschwindigkeit 302
 Stützziffer 183
 Summenpegel 467
 Swirl 294

T
 Tangentialkanal 299
 Tassenstößel 338, 351
 Teillast 328, 358
 Temperaturfeld 129, 236
 Temperaturgradient 257, 262
 Titanaluminid 344
 Titanventile 345
 Totpunkte 87
 Trägheitsmoment (Ersatzflächen-)
 65
 Trapeznabe 92
 Trapezpleuel 92
 Triebwerksauslegung 35
 Tumble 295 f.
 Turbomotoren, Ladungswechsel 378 ff.
 Turbulenzmodell 205, 279

U
 Überdeckung 258
 Überschneidung 333
 Überschneidungsphase 328
 Übertragungsfaktor 107, 111
 Übertragungsfunktion 471, 474, 491
 Übertragungs-Mobilität 489
 UniValve-System 369, 370
 Unterdruckwelle 329
 Unterteil 207

V

VALVETRONIC 367, 369

Variable Timing and Lift Electronic
Control 362

Variocam 362

Ventilbeschleunigung 351

Ventilbewegung 344

Ventildrehvorrichtung 342

Ventildurchmesser 335

Ventilerhebung 348, 352

Ventilfeder 342, 352 f.

Ventilfederschwingung 373

Ventilfläche 335 f.

Ventilführung 341

Ventilgeschwindigkeit 351

Ventilhub 351

– variabler 364

Ventilhubfunktion 350

Ventilhubkurven 334, 372

Ventilhubumschaltung 361

Ventilkegel 344

Ventilöffnungsfläche 335 f.

Ventilquerschnittsfläche 334

Ventilschaft 342

Ventilsitze 341

Ventilsitzringe 342 f.

Ventilsitzwinkel 333

Ventilspielausgleich 341

Ventilsteuerung, variable 358

Ventilsteuerzeiten, variable 357

Ventilteller 341, 352

Ventiltrieb

– elektromechanischer 364 f., 371 f.

– mechanischer 365

– mechanisch variabler 366

– starrer 379 ff.

– vollvariabler 384 ff.

Ventiltriebsdynamik 378

Ventiltriebsgeräusch 376

Ventiltriebsreibung 376

Ventilüberschneidung 325, 357

Ventilwinkel 12, 37, 305

Verbrauch 38 f.

Verbrennungsverlauf 337

Verdichtungsverhältnis 38

Verdrängungsströmung 160

Verformung

– Kolbenbolzen 136

– Kolbenring 150

– Kolbenschaft 122

– plastische 150

– Schraube 74

– ZKG 237

Verluste

– Drossel- 299

– Wandwärme- 279

Verlustfaktor 229

Vermicular-Graphit 228

Verschiebung 511

Verschraubung

– Hauptlager- 238

– ZK bzw. Zylinderkopf 239, 243

Verspannungsschaubild 62, 66

Versteifung 482, 485 f.

Verzerrung 511

Vierventiltechnik 337

Volllast 324 ff., 358

Vorspannkraft 68, 71, 73, 240, 242

– minimale 71

– Prüfung 72

– Schrauben- 254

– Schraubentyp 245

– verbleibende 245

– Verlust 64, 70

V-Raum 226

VTEC-Systems 362

VTEC-Ventilsteuerung 363

W

Wachstum 211

Wandfunktion 280

Wandreibung 330

Warmaushärtung 288

Wärmeabführung 236

Wärmeaufnahme 236

Wärmeausdehnungskoeffizient 262

Wärmebehandlung 288

Wärmedurchgangszahl 281

Wärmeleitfähigkeit 256

Wärmeleitung 203

– Grenzflächen 236

Wärmespannung, Zylinderwand 261

Wärmestrahlung, Flamme 279

Wärmestromdichte 256

Wärmeübergang 275, 277

Wärmeübergangskoeffizient 129, 205, 236

– mittlerer 130

Wärmeübergangszahl 279

Wärmeübertragung, Bauteilwand 280

Warmspiel 231

Wassermantel 203, 205

Wasserraumdeck 205, 222

- Wasserstoff 7
 Wechselspannungsamplitude 58
 Werkstoff
 – Bruchsicherheit 176
 – Eigenschaften 229
 – Kolbenbolzen 104
 – Kurbelwelle 182
 – Verbund- 217
 – Wechselfestigkeit 176
 – ZKG 211
 Widerstandsmoment 105
 Winkelkanal 225
 Wirkungsgrad 40, 42, *s. a. Liefergrad*
 Wöhler-Linien 134, 310 f.
- Z**
- Zapfenüberschneidung 178
 ZK
 – Block- 268
 – Einheits- 268
 – Einzel- 268
 – gebauter 271
 – Mehrventil- 272
 – Steifigkeit 285
 – Wende- 272
 ZKD 237
 – Abdichtung 244
 ZKG 26 f., 193
 – Abdichtprobleme 203
 – Außenflächen 227
 – Entwicklungstrend 219
 – Konzept 196, 219
 – monolithisches 219
 – Schürzenbauweise 206
 – Wassermanteltiefe 205
 – zweiteilige Bauweise 206
 Zünddruck 112, 264, 478
 – Auslegungs- 108
 Zwangsdurchströmung 286
 Zweipunktversteller 358
 Zwickelverschleiß 266
 Zwischenringdruck 143
 Zwischenteil 207
 Zwischenwange 30
 Zylinder
 – Formabweichung 247
 – Massenbilanz 304
 – Nummerierung 227
 – Wasserdurchtritt 203
 – Wassermantel 203
 Zylinderblock 193, 222
 Zylinderbohrung 246
 Zylinderdeck 222
 Zylinderdruck 10
 Zylinderdurchmesser 17
 Zylinderkopf *s. ZK*
 Zylinderkopfdichtung *s. ZKD*
 Zylinderkurbelgehäuse *s. ZKG*
 Zylinderlaufflächen 212
 Zylinderverzug 266
 – mathematische Beschreibung 246
 – Ordnungsanalyse 247