

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 Wärmeleitzahl) 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 Rechenauigkeit 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_{u1} , 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

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

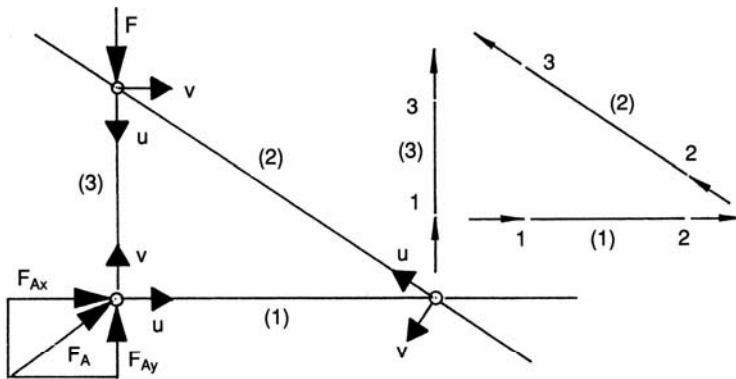


Bild A-1 Ausschnitt aus einer 2D-Struktur

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

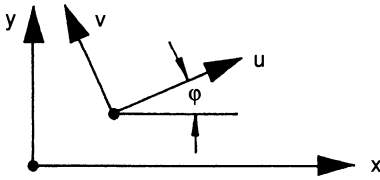
$$f = c v \tag{A-5}$$

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:

$$\text{Knoten 1 von Stab (1): } v_{u1} = v_{x1} \cos \varphi + v_{y1} \sin \varphi \quad \text{und}$$

$$\text{Knoten 2 von Stab (1): } v_{u2} = v_{x2} \cos \varphi + v_{y2} \sin \varphi \tag{A-6}$$

**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:

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

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

$$\begin{aligned} F_{x1} &= F_{u1} \cos\varphi \\ F_{y1} &= F_{u1} \sin\varphi \\ F_{x2} &= F_{u2} \cos\varphi \\ F_{y2} &= F_{u2} \sin\varphi \end{aligned} \quad (\text{A-9})$$

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:

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

\mathcal{C}^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:

$$\mathcal{F} = \mathcal{C}^T c \mathcal{V} \tag{A-12}$$

bzw.

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

mit

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

\mathcal{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 \mathcal{F} und den äußeren Verschiebungen \mathcal{V} herstellen:

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

bzw.

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

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

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

Exakterweise müssten \mathcal{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 $\varphi(2) = 135^\circ$:

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

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

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

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:

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

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 erschwerenden 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:

$$\varepsilon = H V \quad (\text{A-22})$$

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 \mathcal{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 \mathcal{F} zurückgehende Spannungsverteilung σ kann ohne Beweis folgende Beziehung abgeleitet werden:

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

V_E ist das Element-Volumen. \mathcal{H}^T ist nichts anderes als die transponierte Matrix \mathcal{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 \mathcal{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:

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

und folglich

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

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 Integrationssterme), 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 darauf, 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 Gleichungssystem:

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

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:

$$\begin{aligned} a &= \alpha_1 U_1 + \alpha_2 U_2 + \alpha_3 U_3 \\ b &= \beta_1 U_1 + \beta_2 U_2 + \beta_3 U_3 \\ c &= \gamma_1 U_1 + \gamma_2 U_2 + \gamma_3 U_3 \end{aligned} \quad (\text{A-40})$$

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:

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

mit $\frac{A_i}{2A} = \alpha_i, \quad \frac{B_i}{2A} = \beta_i \quad \text{und} \quad \frac{C_i}{2A} = \gamma_i$ 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:

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

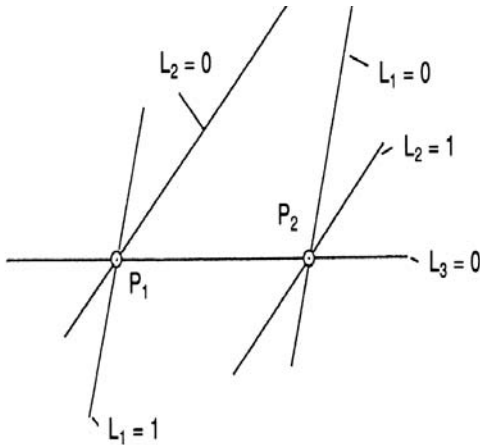


Bild A-3
Dreieckskoordinaten L_i

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. Ableitung: $\partial u / \partial x = (u_{i+1,j} - u_{i,j}) / \Delta x + F_I(\Delta x)$
2. 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 Hilfsgitterpunkte 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-numerischer 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 lösbaren 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:

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

$$m_k^* = \{x_k\}^T [M] \{x_k\}$$

$$c_k^* = \{x_k\}^T [C] \{x_k\}$$

$$F_k^* = \{x_k\}^T \{F(t)\}$$

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 Ladungswechselauslegung. 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-Befrui, 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-Befrui, 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

[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] *Derndinger, H.-O.; Ritter, H.*: Über den Einfluss des Hubbohrungsverhältnisses. In: MTZ 27 (1966), Nr. 8

- [B6] *Schellmann, K.; Gleiter, F.; Steinhauser, D.-G.*: Optimierung der Brennraumgeometrie von Vierventil-Ottomotoren. In: MTZ 50 (1989), Nr. 9
- [B7] *Sivers, R. v.; Pilgrim, R.*: Schwingungstechnisch-akustische Maßnahmen bei der Entwicklung des Porsche-944-Motors. In: ATZ 83 (1981), Nr. 1
- [B8] *Kolbenschmidt AG*: E-gvo-005. Neckarsulm: Kolbenschmidt. – Interner Entwicklungsbericht
- [B9] *Kolbenschmidt AG*: Konstruktion für Ottokolben. Neckarsulm: Kolbenschmidt. – Interne Hausnorm HNK40
- [B10] *Kolbenschmidt AG*: KS-Handbuch: Technisches Handbuch der Kolbenschmidt AG. Band 1, Heft 3, Kap. 2: Gestaltung des Kolbens. Neckarsulm: Kolbenschmidt, 1987
- [B11] *Mahle GmbH*: Mahle Kolbenkunde: Technisches Handbuch. Stuttgart: Mahle, ca. 1984/1985
- [B12] *Bronstein, I. N.; Semendjajew, K. A.*: Taschenbuch der Mathematik. Zürich: Harri Deutsch, 1969
- [B13] *Piech, F.*: 3 Liter/100 km im Jahr 2000? ATZ 94 (1992), Nr. 1

[C.] Pleuel und Kolben

- [C1] *Kolbenschmidt AG*: KS-Handbuch: Technisches Handbuch der Kolbenschmidt AG. Band 2, Heft 5: Gleitlagerwerkstoffe für instationär belastete Lager. Neckarsulm: Kolbenschmidt, 1987
- [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] *Lang, O. R.*: Triebwerke schnell laufender Verbrennungsmotoren: Grundlagen zur Berechnung und Konstruktion. Berlin: Springer, 1966
- [C6] *Indra, F.; Tholl, M.*: Der 3,0 l Opel-Rennmotor für die Internationale Deutsche Tourenwagenmeisterschaft. In: MTZ 52 (1991), Nr. 9
- [C7] *Dubbel*: Taschenbuch für den Maschinenbau. Band 1. 13. Auflage. Berlin: Springer, 1970. – S. 802
- [C8] *Grotewohl, A.*: Auslegung von dauerhaltbaren, gestalt- und kostenoptimierten Pleuellagerverschraubungen. In: Automobil-Industrie 33 (1988), Nr. 3
- [C9] *Urlaub, A.*: Verbrennungsmotoren. Band 3: Konstruktion. Berlin: Springer, 1989
- [C10] *Leipholtz, H.*: Festigkeitslehre für den Konstrukteur. Berlin: Springer, 1969 (*Kollmann, K.* (Hrsg.): Konstruktionsbücher Band 25)
- [C11] *Huber, R.*: Festigkeitsuntersuchungen an Pleuelstangen für einen schnell laufenden Leichtdieselmotor. In: SDP-Technik (1987). – Steyr-Daimler-Puch-Firmenschrift
- [C12] *Seiffert, U.; Scharnhorst, Th.*: Die Bedeutung von Berechnungen und Simulationen für den Automobilbau. Teil 2. In: ATZ 91 (1989), Nr. 5
- [C13] *Peter, W.*: Berechnung im Automobilbau. In: ATZ 90 (1988), Nr. 6
- [C14] *Schönrock, A.; Rulfs, H.; Vötter, M.*: Festigkeitsanalyse der Pleuelstange eines mittelschnell laufenden Dieselmotors. In: MTZ 52 (1991), Nr. 1
- [C15] *Thomala, W.*: Erläuterungen zur Richtlinie VDI 2230 Blatt 1 (1986): Bsp. Pkw-Pleuelverschraubung. In: VDI-Z Band 128 (1986), Nr. 12
- [C16] Norm VDI 2230. Systematische Berechnung hoch beanspruchter Schraubenverbindungen. Berlin: Beuth, 1986
- [C17] *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
- [C18] *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

- [C19] *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
- [C20] *Grotewohl, A.*: Analyse der Großserienmontage von Schraubenverbindungen. In: *Automobil-Industrie* 35 (1990), Nr. 5
- [C21] *Jende, S.; Knackstedt, R.*: Warum Dehnschrauben? Definition, Wirkungsweise, Aufgaben, Gestaltung. In: *VDI-Z Band 128* (1986), Nr. 12
- [C22] *Yamada, K.*: The Development of One Liter Motor Cycle Engines. In: *SAE Technical Paper Series* 891800
- [C23] *Kolbenschmidt AG*: KS-Handbuch: Technisches Handbuch der Kolbenschmidt AG. Band 1, Heft 3, Kap. 1: Grundlagen. Neckarsulm: Kolbenschmidt, 1987
- [C24] = [B10]
- [C25] = [B11]
- [C26] *Krüger, H.*: Sechszylindermotoren mit kleinem V-Winkel. In: *MTZ* 51 (1990), Nr. 10
- [C27] *Kolbenschmidt AG*: KS-Handbuch: Technisches Handbuch der Kolbenschmidt AG. Band 1, Heft 3, Kap. 3: Kolbenbauarten. Neckarsulm: Kolbenschmidt, 1987
- [C28] *RICARDO Diesel Engine Survey*. Fig. No. 1, Drg. No. IDI, Date: 29 May 1987
- [C29] *Sander, W.; Schoeckle, S.*: Design and Fatigue Life Evaluation of Pistons for High BMEP Diesel Engines. In: *SAE Technical Paper Series* 790 857
- [C30] *Schlaefke, K.*: Zur Berechnung von Kolbenbolzen. In: *MTZ* 1 (1940), Nr. 4
- [C31] *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
- [C32] *Sander, W.; Bordt, M.; Strasser, E.*: Hochbelastbare Kolben für Nutzfahrzeugdieselmotoren. In: *Kolbenschmidt AG: 75 Jahre Kolbenschmidt*. Neckarsulm: Kolbenschmidt, 1985
- [C33] *Sander, W.; Kelm, W.*: Formgedrehte Bohrungen zur Bolzenlagerung hoch belasteter Kolben. In: *MTZ* 42 (1981), Nr. 10
- [C34] *Iguchi, H.*: Weight Reduction of Engine Parts for Motorcycles. In: *SAE Technical Paper Series* 871187
- [C35] *Reipert, P.; Moebus, H.*: Beitrag zur Berechnung der Naben von Kolben. In: *Kolbenschmidt AG: 75 Jahre Kolbenschmidt*. Neckarsulm: Kolbenschmidt, 1985
- [C36] *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
- [C37] *Kolbenschmidt AG*: KS-Handbuch: Technisches Handbuch der Kolbenschmidt AG. Band 1, Heft 8: Werkstoffe für Motorenbauteile. Neckarsulm: Kolbenschmidt, 1987
- [C38] *Mix, W.*: Kolbenbolzensicherungen unter dem Einfluss von Massenkräften. In: *KS-Dienst* Nr. 11/12
- [C39] *Tschöke, H. E.*: Beitrag zur Berechnung der Kolbensekundärbewegung in Verbrennungsmotoren. Stuttgart, Universität, Diss., 1981
- [C40] *Essers, U.*: Messtechnische Untersuchung der Kolbenquerbewegung an Verbrennungsmotoren. Aachen, RWTH Aachen, Habil-Schr., 1969
- [C41] *Chucholowski, C.; Woschni, G.; Zeilinger, K.*: Simulationsrechnung der Kolbensekundärbewegung. In: *MTZ* 48 (1987), Nr. 4
- [C42] *Kolbenschmidt AG*: KS-Handbuch: Technisches Handbuch der Kolbenschmidt AG. Band 1, Heft 9: Kolbenberechnung. Neckarsulm: Kolbenschmidt, 1987
- [C43] *Essig, G.*: KS-Entwicklungs- und Problemlösungskapazitäten“. In: *Kolbenschmidt AG: 75 Jahre Kolbenschmidt*. Neckarsulm: Kolbenschmidt, 1985
- [C44] *Wacker, E.; Streckler, E.; Sarsten, A.; Haaland, E.*: Finite Element-Programme zur Berechnung von Brennraumbauteilen. In: *MTZ* 32 (1971), Nr. 8
- [C45] = [C29]
- [C46] *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)
- [C47] *Keribar, R.; Morel, T.; Blumberg, P. N.*: Coupled Methodology for Thermal Shock Calculations in I.C. Engines. In: *SAE Technical Paper Series* 865038

- [C48] *Basshuysen, R. van ; Steinwart, J.; Stähle, H.; Bauder, A.*: Audi Turbodieselmotor mit Direkteinspritzung. Teil 2. In: MTZ 50 (1989), Nr. 12
- [C49] *Ebel, R.*: Untersuchungen an einem Leichtbaukolben für Pkw-Motoren. In: MTZ 51 (1990), Nr. 1
- [C50] *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)
- [C51] *Woschni, G.*: Die Berechnung der Wandverluste und der thermischen Belastung der Bauteile von Dieselmotoren. In: MTZ 31 (1970), Nr. 12
- [C52] *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] *Goetze AG*: Kolbenring-Handbuch. Burscheid: Goetze. – Drucksache Nr. 893800-08/89 ; heute AE-Goetze)
- [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] = [C10]
- [D10] *Mey, H.*: Unerwünschte plastische Verformung des Kolbenringes. In: MTZ 49 (1988), Nr. 3
- [D11] *Kornprobst, H.; Woschni, G.; Zeilinger, K.*: Simulation des Verhaltens von Kolbenringen im Motorbetrieb. Teil 2. In: MTZ 50 (1989), Nr. 12
- [D12] *Iskra, A.*: Schmierverhältnisse in der Baugruppe Kolbenring-Zylinder bei begrenzter Schmierung der Zylinderwand. In: MTZ 47 (1986), Nr. 7/8
- [D13] *Hannschöck, N.*: Zur Tribologie des Kolbenringes. In: MTZ 46 (1985), Nr. 12
- [D14] *Jakobs, R.*: Zur Reibleistung der Kolbenringe bei Pkw-Ottomotoren. Burscheid: Goetze (Fachschrift K34; heute AE-Goetze). – auch in: MTZ 49 (1988), Nr. 7/8
- [D15] *Gardner, T. P.; Henein, N. A.*: Diesel Starting: A Mathematical Model. In: SAE Technical Paper Series 880426
- [D16] *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
- [D17] *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
- [D18] = [C42]
- [D19] *Seiler, F.*: Entwicklung eines Programmsystems zur Berechnung der Kolbenringbewegung in radialer und axialer Richtung. Karlsruhe, TH, Dipl.-Arb., 1984
- [D20] *Kempf, M.*: Programmsystem zur Berechnung der Kolbenringbewegung. Karlsruhe, TH, Dipl.-Arb., 1986
- [D21] *Morsbach, M.*: Einfluss der axialen Höhe von Kolbenringen auf deren Funktionsverhalten. In: MTZ 43 (1982), Nr. 7/8

- [D22] *Eweis, M.*: Reibungs- und Undichtigkeitsverluste an Kolbenringen. In: VDI Forschungsheft Nr. 371 (1935)
- [D23] *Layer, A.*: Theorie des Gleitlagers bei Vollschröierung. Bern: Verlag „Technische Rundschau“ Hallwag, 1967 (Blaue TR-Reihe Heft 46)
- [D24] *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
- [D25] *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
- [D26] *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] = [C5]
- [E10] *Maaß, H.*: Die Formziffer α und ihre Anwendung bei kombinierter Beanspruchung der Kurbelwelle. In: MTZ 28 (1967), Nr. 2
- [E11] *Lang, O. R.*: Formzahlen von Kurbelwellen. In: MTZ 29 (1968), Nr. 3
- [E12] *Pfender, M.; Amedick, E.; Sonntag, G.*: Einfluss der Formgebung auf die Spannungsverteilung in Kurbelwellenkröpfungen. In: MTZ 27 (1966), Nr. 6
- [E13] *Finkelburg, H. H.*: Spannungszustände in der festgewalzten Oberfläche von Kurbelwellen. In: MTZ 37 (1976), Nr. 9
- [E14] *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
- [E15] *Arai, J.*: The Bending Stress Concentration Factor of Solid Crankshaft. In: Bulletin of ISME No. 31 (1965) Vol. 8
- [E16] *Hoshino, J.; Arai, J.*: Strength Analysis of Diesel Engine Crankshaft. 6. Shipping- and Shipbuilding Conference 1966
- [E17] *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)
- [E18] *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
- [E19] = [C9]
- [E20] *Zenner, H.; Donath, G.*: Dauerfestigkeit von Kurbelwellen: Ein neues Berechnungsverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Baugröße. In: MTZ 38 (1977), Nr. 2

- [E21] *Zenner, H.*: Studie über den Einfluss der Baugröße auf die Dauerfestigkeit von Kurbelwellen. In: Forschungsbericht der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV) Heft 199 (1976)
- [E22] *Wellinger, K.; Dietmann, K. H.*: Festigkeitsberechnung: Grundlagen und technische Anwendungen. Stuttgart: Körner, 1969
- [E23] *Maaß, H.*: Betrachtungen zur Gestaltfestigkeit von Kurbelwellen. Teil 2: Berechnungsmethoden. In: MTZ 31 (1970), Nr. 7
- [E24] *Petersen, C.*: Die Gestaltfestigkeit von Bauteilen. In: VDI-Z Band 94 (1952)
- [E25] *Maaß, H.*: Betrachtungen zur Gestaltfestigkeit von Kurbelwellen. Teil 3: Berechnungsvorschlag zur Bauteilfestigkeit der Kurbelwelle. In: MTZ 31 (1970), Nr. 12
- [E26] *Maaß, H.*: Betrachtungen zur Gestaltfestigkeit von Kurbelwellen. In: MTZ 31 (1970), Nr. 2
- [E27] *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
- [E28] *Takeuchi, K.; Kubota, K.; Konagai, M. sowie Watanabe, M.; Kihara, R.*: The New Isuzu 2.5 Liter and 2.8 Liter 4-Cylinder Direct Injection Diesel Engine. In: SAE Technical Paper Series 850261
- [E29] *Bartels, M.; Ruschlau, B.*: PROBE Neue p-Version der Finite-Element-Methode. In: ATZ 92 (1990), Nr. 9
- [E30] *Chang, N.; Chung, S. B.*: Computer Program for the Optimal Design of Crankshaft. In: SAE Technical Paper Series 871224
- [E31] *Georgens, G.; Strauss, A.; Willmann, M.*: Der neue Turbodieselmotor mit Direkteinspritzung und 1,9 l Hubraum. In: MTZ 53 (1992), Nr. 3
- [E32] *Payer, E.*: Nichtlineare transiente Spannungsberechnung von Kurbelwellen. In: MTZ 55 (1994), Nr. 2

[F.] Zylinderkurbelgehäuse

- [F1] *Schmillen, K.; Schwaderlapp, M.; Spessert, B.*: Verbesserung des akustischen Verhaltens von Motorblöcken. In: MTZ 53 (1992), Nr. 4
- [F2] *Arai, T.*: Major Engine Components Made by Various Aluminum Casting Techniques. In: Aluminium + Automobil. Düsseldorf: Aluminium Verlag, 1988
- [F3] *Albrecht, K.-H.; Emanuel, H.; Junk, H.*: Moderne Grauguss-Zylinderkurbelgehäuse. In: MTZ 46 (1985), Nr. 10
- [F4] = [C6]
- [F5] = [E31]
- [F6] *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
- [F7] *Maier, K.*: Beschichtung von Zylinderlaufflächen und Kolben. In: VDI Berichte Nr. 866 (1990)
- [F8] *Wacker, E.*: Unbewehrte Aluminium-Zylinder für Verbrennungsmotoren. In: MTZ 34 (1973), Nr. 2
- [F9] *Wacker, E.; Dorsch, H.*: ALUSIL-Zylinder und FERROCOAT-Kolben für den Porsche-Motor 911. In: MTZ 35 (1974), Nr. 2
- [F10] *Hofmann, H.-H.; Schellmann, K.; Wacker, E.*: Aluminium 390 Alloy Engine Blocks: Design and Manufacturing. In: SAE Technical Paper Series 830007
- [F11] *Hofmann, H.; Köhler, E.*: 15 Jahre KS-Erfahrung mit ALUSIL-Motorblöcken. In: *Kolbenschmidt AG: 75 Jahre Kolbenschmidt*. Neckarsulm: Kolbenschmidt, 1985
- [F12] *Köhler, E.; Hofmann, H.; Niehues, J.; Sick, G.*: Kurzbauende, leichte Closed-deck-Aluminium-Kurbelgehäuse für Großserien. In: ATZ/MTZ-Sonderheft Fertigungstechnik '92
- [F13] *Ebisawa, M.; Hara, T.; Hayashi, T.; Ushio, H.*: Production Process of Metal Matrix Composites (MMC) Engine Block. In: SAE Technical Paper Series 910835
- [F14] = [C4]
- [F15] *Anisits, F.; Hiemesch, O.; Kratochwill, H.; Mundorff, F.*: Der neue BMW Sechszylinder-Dieselmotor. Teil 1. In: MTZ 52 (1991), Nr. 10
- [F16] = [B12]

- [F17] *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
- [F18] *Angoy, C. H.; Tunnah, R. J.*: The Use of Finite Element Techniques in the Structural Assessment of a Radically New Small Engine. In: Auto-Tech 89 399/25, 1989 High Tech: New Engine IMechE Seminar Papers
- [F19] *Brandstetter, W.; Finch, J.; Hirsch, W.*: Die neue DOHC-16-Ventil-Motorenbaureihe von Ford. Teil 1: Projektierung Grundmotor. In: MTZ 53 (1992), Nr. 2
- [F20] *Atzorn, H.-H.; Stamerjohanns, P.*: Berechnung des Schwingungs- und Akustikverhaltens eines Dieselmotors. Haus der Technik e.V. (Veranst.): Tagung Verbrennungsmotoren-Akustik (Essen 1993)
- [F21] *Brandstetter, W.; Lawrence, P. J.; Hansen, J.*: Die Dieselmotoren-Familie mit 1,8 l Hubraum von Ford. In: MTZ 52 (1991), Nr. 9
- [F22] *Vorberger, G.; Flierl, R.; Hirschfelder, K.*: Berechnungsmethoden in der Motorenentwicklung. In: Automobil-Industrie 35 (1990), Nr. 6
- [F23] = [C51]
- [F24] = [C9]
- [F25] *Fersen, O. v.*: Schichtwechsel. Moderne Motoren: Rover K-Reihe. In: mot Technik (1989), Nr. 26
- [F26] *Karner, J.*: Die nachziehfremde Zylinderkopf-Verspannung. In: MTZ 41 (1980), Nr. 3
- [F27] *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
- [F28] = [D2]
- [F29] *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
- [F30] = [C2]
- [F31] *Zürner, H. J.; Schibalsky, W.; Müller, H.*: Kavitation und Korrosion an Zylindern von Dieselmotoren. In: MTZ 49 (1988), Nr. 9
- [F32] *Anonym*: La cavitation des chemises humides sur les moteurs Diesel. In: Rev. tech. Diesel (1989) 155D
- [F33] *Bennigsen, G. v.*: Verminderung von Laufbuchsenverzügen an Kolbenmotoren durch Gestaltung der Einfassungsbördel an Flachdichtungen. In: MTZ 29 (1968), Nr. 8
- [F34] *Kunz, A.*: Formelsammlung. Essen: Verlag technisch-wissenschaftliche Schriften, 1981. – Hrsg.: VGB Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V. VGB Kraftwerkstechnik GmbH
- [F35] *Doehler-Jarvis*: Unveröffentlichte Messergebnisse Toledo/Ohio, USA: Doehler-Jarvis
- [F36] *Karl Schmidt GmbH*: KS Technisches Handbuch. Neckarsulm: Karl Schmidt GmbH, 1967. – heute Kolbenschmidt AG
- [F37] *Zürner, H.*: Gestaltung von Zylinderlaufbuchsen und Kolben in Fahrzeugmotoren. In: ATZ 73 (1971), Nr. 4
- [F38] *Holzmann, G.; Meyer, H.; Schumpich, G.*: Technische Mechanik. Teil 3: Festigkeitslehre. Stuttgart: Teubner, 1990
- [F39] = [C10]

[G..] Zylinderkopf

- [G1] = [C4]
- [G2] *Lehner, F.; Walther, G.*: Die konstruktive Auslegung der neuen BMW Vierventilmotoren. In: Automobil-Industrie 35 (1990), Nr. 3
- [G3] *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
- [G4] Auszug aus Konstruktionsunterlagen der KS Aluminium-Technologie AG, Neckarsulm, für einen Vierventil-Zylinderkopf eines 1,4 l Vierzylinder-Ottomotors

- [G5] *Boulouchos, K.; Hannoschöck, N.*: Der Wärmetransport zwischen Arbeitsmedium und Brennraumwand. In: MTZ 47 (1986), Nr. 9
- [G6] *Woschni, G.*: Beitrag zum Problem des Wärmeübergangs im Verbrennungsmotor. In: MTZ 26 (1965), Nr. 4
- [G7] = [C51]
- [G8] *Zapf, H.*: Beitrag zur Untersuchung des Wärmeübergangs während des Ladungswechsels im Viertakt-dieselmotor. In: MTZ 30 (1969), Nr. 12
- [G9] *Woschni, G.*: Experimentelle Untersuchung des Wärmefflusses in Kolben und Zylinderbüchse eines schnell laufenden Dieselmotors. In: MTZ 39 (1978), Nr. 12
- [G10] *Woschni, G.; Fieger, J.*: Auswertung gemessener Temperaturfelder zur Bestimmung örtlicher Wärmeübergangskoeffizienten am Kolben eines schnell laufenden Dieselmotors. In: MTZ 40 (1979), Nr. 4
- [G11] *Fieger, J.*: Experimentelle Untersuchung des Wärmeübergangs beim Ottomotor. München, TU, Diss., 1981
- [G12] *Woschni, G.; Fieger, J.*: Experimentelle Bestimmung des örtlich gemittelten Wärmeübergangskoeffizienten im Ottomotor. In: MTZ 42 (1981), Nr. 6
- [G13] *Woschni, G.*: Wärmeübergang und Brennverlauf im Ottomotor. In: FVV Heft R391 (1980)
- [G14] = [C2]
- [G15] *Woschni, G.*: Wärmeübergang und Brennverlauf im Ottomotor. In: FVV Heft R326 (1978)
- [G16] *Imabepu, S.; Hirano, Y.; Shimonosono, H.*: An Analysis of Heat Release to Coolant in the Cylinder Head. In: JSAE Rev. 11 (1990), Nr. 3
- [G17] *Trapy, J.*: Ansatz für den gasseitigen Wärmeübergangskoeffizienten bei Ottomotoren unter Berücksichtigung klopfender Verbrennung. RWTH Aachen (Veranst.); SLA (Veranst.); VDI-GFT (Veranst.): Tagung Der Fahrzeug-Ottomotor unter neuen europäischen Randbedingungen (Aachen 1985). – Kurzfassung in: MTZ 47 (1986), Nr. 4
- [G18] *Eilts, P.*: Zur Baugrößenabhängigkeit der Wandwärmeverluste von Verbrennungsmotoren. In: MTZ 51 (1990), Nr. 7/8
- [G19] *Pohlmann, H.*: Berechnung der örtlichen und zeitlichen Verteilung der Wärmestromdichte im Kolbenmotor. In: MTZ 50 (1989), Nr. 2
- [G20] *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
- [G21] *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
- [G22] *Nagayoshi, T.; Kodaira, T.*: Analysis of Thermal Fatigue Cracks in Cylinder Heads. In: JSAE Rev. 14 (1993), Nr. 2
- [G23] *Brandstetter, W.; Bostock, Ph.; Hansen, J.*: Die neuen Dieselmotoren mit 2,5 l Hubraum für den Ford Transit. In: MTZ 53 (1992), Nr. 5
- [G24] *Sunayama, N.*: Heat Transfer/Thermal Analysis for Cylinder Head. In: SAE Technical Paper Series 910301
- [G25] *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
- [G26] *Kulkarni, A. V.*: New Generation Small Block V8 Engine. In: SAE Technical Paper Series 920673
- [G27] = [F36]
- [G28] = [C37]
- [G29] *Weiss, F.; Fuchs, H. A.*: Niederdruckgießen von Zylinderköpfen und Zylinderblöcken. In: Gießerei-Praxis (1990), Nr. 8
- [G30] *Chuimert, R.; Garat, M.*: Aluminium Casting Alloy for Highly Stressed Diesel Cylinder Heads. In: Aluminium + Automobil. Düsseldorf: Aluminium Verlag, 1988
- [G31] = [C6]
- [G32] *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)

- [G33] *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
- [G34] *Seifert, H.:* 20 Jahre erfolgreiche Entwicklung des Programmsystems PROMO. In: MTZ 51 (1990), Nr. 11
- [G35] = [A3]
- [G36] *Seifert, H.:* Die Berechnung instationärer Strömungsvorgänge in Rohrleitungssystemen von Mehrzylindermotoren. In: MTZ 33 (1972), Nr. 11
- [G37] *Seifert, H.:* Die Analyse instationärer Strömungsvorgänge in Saugrohren von Mehrzylinder-Vergasermotoren. In: MTZ 39 (1978), Nr. 1
- [G38] = [A4]
- [G39] *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)
- [G40] = [F21]
- [G41] *Danckert, H.; Wersching, R.; Schöckle, S.:* 3-dimensionale Berechnung der Wasserströmung in einem Zylinderkopf. In: Automobil-Industrie 35 (1990), Nr. 5

[H..] Zylinderkopfdichtung

- [H1] *Schwenkel, W.:* Ferrolastic 470: ein Werkstoff für nachziehfreie Zylinderkopferspannungen. In: ATZ 82 (1980), Nr. 7/8
- [H2] *Gronle, H.; Wagenplast, D.:* Asbestfreier Dichtungswerkstoff mit neuer Konzeption. In: MTZ 49 (1988), Nr. 5
- [H3] *Karner, J.:* Die nachziehfreie Zylinderkopf-Verspannung. In: MTZ 41 (1980), Nr. 3
- [H4] *Fleischer, E.:* Die Zylinderkopfdichtung in der Patentliteratur. Teil I–III. In: MTZ 48 (1987), Nr. 3 ; MTZ 48 (1987), Nr. 9 ; MTZ 48 (1987), Nr. 12

[I..] Ventil, Ventiltrieb und Kurbeltrieb

- [I1] = [D3]
- [I2] = [C9]
- [I3] *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
- [I4] *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
- [I5] *Lohr, F.:* Die Kraftfahrzeugmotoren der Zukunft. In: Automobil-Industrie 34 (1982), Nr. 2
- [I6] *Moser, F. X.:* Kriterien und Potenzial der Vier-Ventil-Technik bei Nutzfahrzeug-Dieselmotoren. In: MTZ 50 (1989), Nr. 6
- [I7] *Bensinger, W.-D.:* Die Steuerung des Gaswechsels in schnell laufenden Verbrennungsmotoren. Berlin: Springer, 1968 (*Kollmann, K.* (Hrsg.): Konstruktionsbücher Band 16)
- [I8] *Assanis, D. N.; Polishak, M.:* Valve Event Optimization in a Spark Ignition Engine. In: Int. J. of Veh. Des. 10 (1989), Nr. 6
- [I9] *Dresner, Th.; Barkau, Ph.:* A Review and Classification of Variable Valve Timing Mechanisms. In: SAE Technical Paper Series 890674
- [I10] *Gray, C.:* A Review of Variable Engine Valve Timing. In: SAE Technical Paper Series 880386
- [I11] *Maekawa, K.; Ohsawa, N.; Akasaka, A.:* Development of a Valve Timing Control System. In: SAE Technical Paper Series 890680
- [I12] *Gruden, D.:* Vierventilmotoren setzen sich durch. In: Automob. Rev. 82 (1987), Nr. 25

- [I13] *Titolo, A.*: Die variable Ventilsteuerung von Fiat. In: MTZ 47 (1986), Nr. 5
- [I14] *Walzer, P.; Panagiotis, A.; Heinrich, H.; Schumacher, V.*: Variable Steuerzeiten und variable Verdichtung beim Ottomotor. In: MTZ 47 (1986), Nr. 1
- [I15] *Grohn, M.; Wolf, K.*: Variable Steuerzeiten der neuen Mercedes-Benz Vierventilmotoren. In: MTZ 50 (1989), Nr. 7/8
- [I16] *Kazuo, I.; Nagahiro, K.; Ajiki, Y.; Kishi, N.*: A High Power, Wide Torque Range, Efficient Engine with a Newly Developed Variable-Valve-Lift and -Timing Mechanism. In: SAE Technical Paper Series 890675
- [I17] *Chattopadhyay, A.*: Variable Ventilsteuerung als integrierte Lösung im Verbrennungsmotor. In: VDI Berichte Nr. 1009 (1992)
- [I18] *Vo, Q.-H.; Oehlig, K.-H.*: Untersuchungen an hydraulischen variablen Ventilsteuerungen. In: MTZ 52 (1991), Nr. 12.
- [I19] *Atsugi Unisia Corporation*. Atsugi/Japan: Atsugi Unisia Corporation, 1989 – Produktinformation
- [I20] *Assmann, W.; Bauer, K.-H.; Ulrich, J.-G.; Weigend, H.*: Der Porsche 968. In: ATZ 93 (1991), Nr. 10
- [I21] *Wellmann, N.*: Lastregelung bei Ottomotoren. In: FVV Heft 443 (1989)
- [I22] *Heuser, F. P.; Kreuter, P.; Schebitz, M.*: Drosselfreie Laststeuerung mittels variabler Einlassquerschnittsverläufe. 3. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik (Aachen 1991)
- [I23] *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
- [I24] *Fersen, O. v.*: Verwandlungskünstler. Moderne Ventiltechnik: Variable Steuerzeiten. In: mot-Technik (1991), Nr. 2
- [I25] *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
- [I26] *Kurz, D.*: Entwurf und Berechnung ruckfreier Nocken. In: ATZ 56 (1954), Nr. 11
- [I27] *Oppermann, G.; Häntsch, H.; Schubert, R.*: Ventildederauslegung an schnell laufenden Verbrennungsmotoren. In: MTZ 53 (1992), Nr. 12
- [I28] *Straubel, M.*: Beitrag zur Erfassung und Beeinflussung des Schwingungsverhaltens von Nockengetrieben. In: MTZ 27 (1966), Nr. 10
- [I29] *Schrack, P.*: Das dynamische Verhalten von Ventilsteuerungen an Verbrennungsmotoren. In: MTZ 31 (1970), Nr. 2
- [I30] *Derndinger, H.-O.*: Untersuchungen über das dynamische Verhalten der Ventile an Verbrennungsmotoren. In: MTZ 22 (1961), Nr. 7
- [I31] = [C2]
- [I32] = [F19]
- [I33] *Haas, E.; Reichweger, J.*: Messtechnische und rechnerische Untersuchungen am Ventiltrieb von Lkw-Motoren. VDI-Tagung Berechnung im Automobilbau (Fellbach 1984). In: VDI-Berichte Nr. 537 (1984)
- [I34] *Schamel, A.; Meyer, J.; Philips, P.*: Rechnerische Simulation des dynamischen Verhaltens von modernen Ventiltrieben. In: VDI Berichte Nr. 699 (1988)
- [I35] *Lacy, D. J.*: Computers in Analysis Techniques for Reciprocating Engine Design. In: Inst. Mech. Eng. (1987) C14/87
- [I36] *Seidlitz, S.*: Valve Train Dynamics: a Computer Study. In: SAE Technical Paper Series 089620
- [I37] *Paranjpe, R. S.; Gecim, B. A.*: Comparative Friction Assessment of Different Valve-Train Types Using the Flare (Friction and Lubrication Analysis) Code. In: SAE Technical Paper Series 920491
- [I38] *Kaiser, H.-J.; Deges, R.; Schwarz, D.; Meyer, J.*: Investigation on Valve Train Noise in Multi-Valve Engines. In: SAE Technical Paper Series 911 062
- [I39] *Arnold, M.; Roß, J.; Speckens, F.-W.*: Analyse und Optimierung von Ventil- und Steuertrieben in Verbrennungsmotoren. In: MTZ 54 (1993), Nr. 3
- [I40] *Maaß, H.; Klier, H.*: Kräfte, Momente und deren Ausgleich in der Verbrennungskraftmaschine. Wien: Springer, 1982
- [I41] = [C5]

- [142] *Wyczalek, F. A.*: Generalized Balance of Inline, Vee and Opposed Pistons Engines. In: SAE Technical Paper Series 880418
- [143] *Dubbel*, Taschenbuch für den Maschinenbau. 14. Auflage. Herausgeber: Beitz, W. und Küttner, K.-H. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 1981.
- [144] = [C6]
- [145] = [J22]
- [146] *Krüger, H.*: Massenausgleich durch Pleuelgegenmassen. In: MTZ 53 (1992), Nr. 12
- [147] = [C9]
- [148] *Burow, G.*: Ein Beitrag zum Massenausgleich von V-Maschinen mit niedrigen Zylinderzahlen. In: Dieselmotor-Nachrichten (1987), Nr. 1/2
- [149] *Freyther, H. G.*: Massenkräfte und Massenmomente bei V-Motoren in Abhängigkeit vom V-Winkel. In: MTZ 22 (1961), Nr. 12
- [150] *Breitwieser, K.; Kemmann, H.; Weidner, H.; Zickwolff, E.*: Der neue Opel-V6-Motor. In: MTZ 54 (1993), Nr. 3
- [151] *Bayer, B.*: Good Vibrations – Motorschwingungen. In: PS Motorrad-Zeitung (1988), Heft 1
- [152] *Zima, S.*: Kurbeltriebe: Konstruktion, Berechnung und Erprobung von den Anfängen bis heute. Braunschweig; Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn / Bertelsmann Fachinformation (ATZ-MTZ-Fachbuch), 1989
- [153] = [B13]
- [154] *Thiemann, 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
- [155] *Hauk, F.; Dommès, W.*: Der erste serienmäßige Reihen-Fünfzylinder-Ottomotor für Personenwagen: Eine Entwicklung der AUDI NSU. In: MTZ 78 (1976), Nr. 10
- [156] *Schmidt, G.; Niggemeyer, H.*: Sechszylinder in Reihen- oder V-Bauart – die optimale Motorisierung? In: MTZ 56 (1995), Nr. 5
- [157] *Fersen, O. v.*: Moderne Motoren: Honda V6. In: mot-Technik (1986), Heft 24
- [158] *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
- [159] *Bach, M.; Bauder, R.; Mikulic, L.; Pölzl, H.-W.; Stähle, H.*: Der neue V6-TDI-Motor von Audi mit Vierventiltechnik – Teil I: Konstruktion. In: MTZ 58 (1997), Nr. 7/8
- [160] Porsche Boxermotor-Kurbelwelle des 911 Carrera; Bild: Maschinenfabrik ALFING Kessler GmbH, 73413 Aalen-Wasseralfingen
- [161] = [C26]
- [162] *Aschoff, G.; Ebel, B.; Eissing, S.; Metzner, F.Th.*: Der neue V6-Viertentilmotor von Volkswagen. In: MTZ 60 (1999), Nr. 11
- [163] *Ebel, B.; Kirsch, U.; Metzner, F.Th.*: Der neue Fünfzylindermotor von Volkswagen – Teil I: Konstruktion und Motormechnik. In: MTZ 59 (1998), Nr. 1
- [164] *Nefischer, P.; Steinparzer, F.; Stütz, W.*: Der Ladungswechsel des neuen BMW V8 Dieselmotors. In: 8. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 1999
- [165] *Marquard, R.; Helfried, S.*: AVL Spectros – Ein Motorenkonzept für Leichtbau und Modulbauweise. In: MTZ 61 (2000), Nr.2
- [166] Entwicklungsgeschichte Zwölfzylinder BMW 750. Sonderdruck aus auto motor und sport, Heft 15/1987
- [167] *Flierl, R.; Joß, R.*: Ausgleichswellensystem für den BMW-Vierzylindermotor im neuen 316i und 318i. In: MTZ 60 (1999), Nr. 5
- [168] *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
- [169] = [C2]
- [170] *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

- [171] *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
- [172] *Unger, H.*: VALVETRONIC. Bibliothek der Technik, Band 263 (2004). Verlag moderne Industrie.
- [173] *Grebe U.*: Weiterentwicklung des Ottomotors; Vorlesung TU Wien; Kapitel 2; Wien 2005
- [174] *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 2002
- [175] *Koch, A.; Kramer W.; Warnecke, V.*: Die Systemkomponenten eines elektromechanischen Ventiltriebs; 20. Internationales Wiener Motorensymposium; Wien 1999
- [176] *Schwaderlapp, M.; u. a.*: Die elektromechanische Ventilsteuerung – Mehr als ein Verbrauchskonzept: 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2000; Band 2; Aachen 2000
- [177] *Leiber, T.; Leiber H.*: Ein neuer Aktuator für die elektromechanische Ventilsteuerung: Grundlagen der Auslegung, Ansätze zur Lösung offener Problemstellungen der elektromechanischen Ventilsteuerung; Variable Ventilsteuerung, Haus der Technik Fachbund Band 16, Pischinger et al.
- [178] *Duesmann, M; Salber, W.; Schwaderlapp, M.*: Der intelligente Ladungswechsel – Vom Ventilabschalter bis zum variablen elektromechanischen Ventiltrieb: 11. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2002; Band 2; Aachen 2002
- [179] *Flierl, R.; Kairies, D.; Hannibal, W.; Knecht, A.*: Initial experimental results with unthrottled load control using a mechanical fully variable valve lift system for high-speed operation: SAE 2004-01-1394; Detroit 2004
- [180] *BMW*: Die Bibliothek der Technik: Band 263 Valvetronic: Landsberg am Lech; Moderne Industrie Verlag: 2004
- [181] *Salber, W.; Kemper, H.; van der Staay, F., Esch, T.*: Der elektromechanische Ventiltrieb – Systembaustein für zukünftige Antriebskonzepte: Teil 2: Motortechnische Zeitschrift 62: 2001
- [182] *Kronich, A.*: Methodik zur Entwicklung eines vollvariablen Ventiltriebs: Technische Universität Kaiserslautern: 2005
- [183] *Mohr, M.*: Dynamische Optimierung eines mechanisch vollvariablen Ventiltriebs mittels Mehrkörper-simulation; Technische Universität Kaiserslautern: 2005
- [184] *Benedikt, K.; Drexler, G.; Eder, T.; Eisenkölbl, M.; Luttermann, C.; Schleusener, M.*: Weiterentwicklung der vollvariablen Ventilsteuerung, MTZ 06/2005, S. 650ff
- [185] *Kausch, C. D.*: Ermittlung der Potentiale eines Motors mit variabler Verdichtung und drosselfreier Laststeuerung; Technische Universität Kaiserslautern: 2003
- [186] *van Basshuysen, R.; Schäfer, F. (Hrsg.)*: Handbuch Verbrennungsmotoren; Vieweg Verlag, 1. Auflage, Braunschweig/Wiesbaden 2002
- [187] *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
- [188] *Pöhls, A.*: Untersuchung eines Verfahrens zur gesteuerten Abgasrückführung bei Ottomotoren; Fortschr.-Ber. VDI Reihe 12 Nr. 458. Düsseldorf: VDI Verlag 2001
- [189] *Auto Motor Sport* Ausgabe 10/2003
- [190] *Spicher, U.*: Verbrennungsmotoren A und B, Vorlesungsumdrucke TH Karlsruhe
- [191] *Bach, E.*: Thermodynamische Modellierung realer Prozesse von Verbrennungsmotoren, Vorlesungsumdruck Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH)
- [192] *Seifert, H.*: Instationäre Strömungsvorgänge in Rohrleitungen an Verbrennungskraftmaschinen; Springer-Verlag, Berlin, 1962
- [193] *Urlaub, A.*: Verbrennungsmotoren; Springer-Verlag, Berlin, 2. Auflage, 1994
- [194] *Pischinger, R.; Kraßnig, G.; Taucaer, G.; Sams, Th.*: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine, Springer-Verlag Wien, 1989
- [195] *Vibe, I. I.*: Brennverlauf und Kreisprozess von Verbrennungsmotoren, VEB Verlag Technik Berlin, 1970
- [196] *Hafner, K. E.; Maaß, H.*: Die Verbrennungskraftmaschine. Bd. 4: Torsionsschwingungen in der Verbrennungskraftmaschine. Wien: Springer, 1985

- [I97] *Benz, W.:* Die Erregung der Längsschwingungen von Kurbelwellen. In: MTZ 21 (1960), Nr. 8
- [I98] *Biezeno, L.; Grammel, R.:* Technische Dynamik. 2. Auflage. Berlin: Springer, 1953
- [I99] *Benz, W.:* Biegeschwingungen von Kurbelwellen, insbesondere bei schweren Schwungrädern. In: ATZ 37 (1935), Nr. 16
- [I100] *Benz, W.:* Biegeschwingungen von mit einer Masse besetzten Wellen. In: MTZ 11 (1950), Nr. 3
- [I101] *Kritzer, R.:* Die Biegeschwingungen der Kurbelwelle von Kolbenmaschinen mit Berücksichtigung der Kreiselwirkung des Schwungrads. In: MWM Nachrichten (1957), Nr. 1
- [I102] = [J44]
- [I103] *Resch, T. et al.:* Verwendung von Mehrkörperdynamik zur Kurbelwellenauslegung in der Konzeptphase. MTZ 65 (2004), Nr. 11
- [I104] *Rasser, W.; Resch, T.; Priebisch, H. H.:* Berechnung der gekoppelten Axial-, Biege- und Torsionschwingungen von Kurbelwellen und der auftretenden Spannungen. MTZ 61 (2000), Nr. 10

[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] *Brandl, F.:* Maßnahmen im Rahmen der Motor- und Fahrzeugakustik. In: *AVL: Proceedings Motor und Umwelt.* AVL,, 1989
- [J5] *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
- [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] *Föllner, 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] *Crocker, 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] = [I6]
- [J32] *Davey, P.*: Combining High Tech Performance and Refinement in Gasoline Engines. In: Auto-Tech 89C399/7, 1989 Combustion, Emissions and Performance IMechE Seminar Papers
- [J33] *Affenzeller, J.; Priebisch, H. H.; Rainer, G.*: Einflüsse von Anbauteilen auf die dynamischen Kenngrößen von Motorblöcken. In: MTZ 45 (1984), Nr. 1
- [J34] = [F1]
- [J35] *W. Schirmer u. a.*: Lärmbekämpfung: Physikalische Grundlagen und praktische Maßnahmen der Lärmbekämpfung an Maschinen und in Produktionsanlagen. Berlin: Verlag Tribüne Berlin, 1984
- [J36] *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
- [J37] *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
- [J38] *Flotho, A.; Spessert, B.*: Geräuschminderung an direkteinspritzenden Dieselmotoren. Teil 2. In: Automobil-Industrie 33 (1988), Nr. 5
- [J39] *Cremer, L.; Heckl, M.*: Körperschall: Physikalische Grundlagen und Technische Anwendungen. Berlin: Springer, 1967
- [J40] *Rainer, G. Ph.; Gschweil, E.; Hübl, H. P.*: Einfluss von Konstruktionsvarianten auf das akustische Verhalten von Motoren. *Haus der Technik* (Veranst.): Tagung Verbrennungsmotorenakustik (Essen 1993)
- [J41] *Essers, U.; Gutzmer, P.; Philipp, U.*: Körperschallanregung in den Kurbelwellengrundlagern eines Verbrennungsmotors. In: FVV-Heft R424, 1982 ; FVV-Heft R428, 1983
- [J42] *Essers, U.; Gutzmer, P.; Kuipers, G.*: Geräuschregung durch die Bewegung der Kurbelwelle in den Hauptlagern eines Ottomotors. – FISITA-Beitrag Nr. 845049 (1984)
- [J43] *Brandl, F. K.; Affenzeller, J.; Thien, G. E.*: Some Strategies to Meet Future Noise Regulations for Truck Engines. In: SAE Technical Paper Series 870950
- [J44] *Priebisch, 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

- [J45] *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
- [J46] *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
- [J47] *Raasch, I.*: Schallabstrahlung von schwingenden Strukturen: Möglichkeiten der theoretischen Vorhersage der abgestrahlten Schalleistung. FEM-Kongress IKOSS (Baden-Baden 1982)
- [J48] *Dürr, W.*: Körperschallminderung durch Einsatz der Finite-Element-Methode. In: VDI-Berichte Nr. 537 (1984)
- [J49] = [F20]
- [J50] *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
- [J51] *Schelkle, E.*: Einsatz nichtlinearer Finite-Element-Methoden im Automobilbau. In: VDI-Berichte Nr. 537 (1984)
- [J52] *Radaj, D.; Butenschön, H.-J.; Hempel, H.; Wiest H.*: Finite Berechnungsverfahren für neue Fahrzeugtriebwerke. In: MTZ 52 (1991), Nr. 2
- [J53] *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] = [J51]
- [L7] = [J52]
- [L8] = [E29]
- [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

Stichwortverzeichnis

A

Abstrahlgrad 418 ff., 429, 431
 Abstrahlmaß 409 f.
 Anregung 198, 200
 – Impuls- 405
 – Kraft- 405
 Antwortspektrum 430
 Arbeit 8, 16, 38
 Aufsetzimpuls 293
 Ausgleichswelle 351, 357 f., 362,
 368, 386 ff.
 Auslassspreizung 283, 306
 Auslasstrakt 275
 Ausschnitt (FEM) 438
 Ausströmfunktion 261

B

Bankversatz 27
 Basissicherheitsfaktor 98
 Bauhöhe 264
 Beanspruchung
 – Kolben 116, 119
 – Kolbenbolzen 103
 – mechanische 69, 119
 – Pleuelauge 42
 – Pleuelkopf 41
 – Pleuelschaft 42
 – Pleuelschrauben 42
 – thermische 69, 116, 119
 – Thermoschock- 247
 bedplate 178, 421
 Belastungsfunktion 452
 BEM 52, 113, 165, 452
 Berechnung
 – Biegemomentverlauf 48
 – Blow-by 140
 – Bolzennabe (FEM) 120
 – Formzahl 160
 – Kolben (FEM) 113
 – Kolbenbolzen 85, 98, 120
 – Kolbenmasse 104
 – Kühlmittelkreislauf 177
 – Ladungswechsel 258
 – Pleuel 52
 – Pleuelverschraubung 54

– Schraube 65
 – Spannungs- (ZKG) 206
 – Temperaturfeld 204
 – Verformung 122, 205
 – ZKG (FEM) 200
 Beschleunigung
 – Kolben 75, 137
 – Kolbenring 137
 Biegemoment 48, 54, 65, 101, 151, 158
 Biegesteifigkeit 198
 Biegewechselfestigkeit 198
 Biegewellen 418
 Bimetall-Effekt 80
 Blaurauchen 129
 Blechmantelbildung 183
 Blechventile 295
 Blockhöhe 29
 Blow-by 124, 136, 139, 140
 Bolzenlagerung 99
 Bolzennabe 88, 120
 Bolzenspiel 90
 Boundary-Element-Methode *s. BEM*
 Brennraum 204, 240
 Brennraumgeometrie 264
 Brennraumkalotte 32
 Brille 421
 Büchse 221 f.
 – Mid-stop- 219
 – Montagezustand 225
 – nasse 24, 170, 219, 271
 – Pressung 226
 – Slip-fit- 224
 – trockene 170, 224
 – Überdeckung 226

C

Closed-deck 171
 Cold Slap 20 f., 76

D

Dämpfung 431
 DAS 252, 253
 Dauerbruch 164
 Dauerfestigkeit 65
 Dehnung 445

- Dentritenarmabstand *s. DAS*
 Desachsierung 75 ff.
 Determinantenmethode 448
 Direkteinspritzung 82
 Diskretisierung 438
 Diskretisierungsfehler 451
 Drehmoment 8, 72
 – Schraubenanzugs- 64
 Drehmomentverlauf 307, 327
 Drehschwingungsresonanz 165
 Drehzahlfestigkeit 289
 Dreieckskoordinaten 450
 Drosselquerschnitt 140
 Drosselstelle 282
 Druckanstieg 413
 Druckanstiegsgeschwindigkeit 413
 Druckschwingung 276
 Druckseite 76
 Druckstoß 277
 Durchblasemenge *s. Blow-by*
 Durchflussfunktion (isentropie) 141
 Durchflussgleichung 281
 Durchflusszahl 258, 262
 Durchlässigkeit 423
- E**
- Eigenfrequenzen 180, 198, 416 f., 454
 Eigenschwingungsformen 454
 Einlasskanal 274
 Einlassschluss 307
 Einlassspreizung 283, 306, 316
 Einlaufverschleiß 183
 Einmassenschwinger 304, 413
 Einmetallkolben 80
 Einström-Gradient 257
 Element
 – Auswahl 438
 – isoparametrisches 201, 439
 – Konstant- 201, 445
 – Linear- 201
 – Matrix 450
 – TRIM3- 448
 – Typen 201, 438
 – Volumen- 446
 Emission 177
 EMVT 322 f.
 Energiebilanz 243
 Energieerhaltung 280
- Ersatzmodell
 – Balken-Masse- 167, 168
 – Ladungswechsel 259
 – Pleuel 45
 Ersatznachgiebigkeit 210
 Exzenterwelle 318
 Exzentrität 77
- F**
- Fahrgeräusch 403
 Fahrwiderstand 196
 Fase 87
 Faserverstärkung 249
 Fast Fourier Transform 409
 FDM 117
 Federsteifigkeit 55
 FEM 52, 94, 165
 – Entwicklung 437
 Feuersteg 14, 71
 Feuerstegspiel 129
 FFT 409
 Finite-Fourier-Transformation 408
 Finite-Element-Methode *s. FEM*
 Flächenpressung 88
 Flankenradius 298
 Flankenwinkel 297
 Formfunktionen 449
 Formzahl 156, 158, 160, 162
 Fracture-Splitting 40
 Freigang 18
 Frischgas 273, 276, 305
 Fugenpressung 233
 Füllung 277
 Futterbohrung 233
- G**
- Galerkin-Prozess 450
 Gasdynamik 260
 Gasschwingung 276
 Gegendruckseite 76
 Gegengewicht 329, 333 ff., 342 ff., 351 ff.
 Gegengewichtsradius 18, 20
 Gemischheizwert 37
 Gemischmasse 274
 Geräuschreduzierung 401, 412
 Gestaltänderungshypothese 64, 95,
 103, 156
 Gestaltfestigkeit 68
 Gewichtsfunktion 450

- Gewindereibung 65
 Gießverfahren 188 f., 197, 253
 Gleichungen (entkoppelte) 453
 Gleichungssystem (modifiziertes) 445
 Greensche Funktion 452
 Grenzdrehzahl 100, 102
 Grenzfrequenz 198
 – Platte 419
 Grobmodell 203, 438
 Großkolben 85
 Grundgebiet 446, 451
- H**
- Halbsegment 204
 Hauptkoordinate 454
 Hauptlager 206
 Hauptölkanal 191
 HC-Emission 71
 Headland-Ring 71
 Heizwert 37
 Heli-Coil 207
 Honung (Plateau-) 183
 Honwinkel 182
 Hubraum 8
 – Steuerformel 34
 Hubraumgewicht 34
 Hubverlängerung 10
 Hubzapfen 27
- I**
- Impedanz
 – Eingangs- 409
 – Schall- 410
 – Schallkenn- 410
 – Übertragungs- 409, 425
 Impulserhaltung 280
 Impulsverlust 280, 282
 Innenkonusbolzen 90 f.
 Instabilität (numerische) 452
 Integralgleichungsmethode *s. BEM*
- K**
- Kanalgeometrie 254
 Kavitation 220
 Kerbempfindlichkeitsziffer 162
 Kerbwirkungsfaktor (innerer) 164
 Kerbwirkungszahl 162
 Kettenversteller 308
- k*-Faktor 12 ff., 29
 Kipphebel 288
 Kippmoment 351, 353 ff., 359, 366
 Kleinkolben 85
 Klemmlänge 55, 57, 58
 Klemmlängenverhältnis 54
 Klemmpleuel 103
 Knotenvariablen 439
 Kolben
 – Bauarten 69, 80
 – Einbauspiel 106
 – Einmetall- 69
 – Einsatzgrenzen 80
 – gepresster 82
 – Glattschaft- 82
 – Kasten- 82
 – Laufspiel 106
 – Pendelschaft- 69
 – Regel- 69
 – Schmiede- 82
 – Slipper- 82
 – Tragbildkorrektur 106
 – Wärmeströme 118
 Kolbenauslegung 96, 111, 122
 Kolbenaußenkontur 106
 Kolbenboden 71
 Kolbenbolzen 88
 – Durchbiegung 91
 – Lagerung 85
 – Ovalverformung 90
 Kolbenbolzendurchmesser 18
 Kolbenbolzensicherung 99
 Kolbendurchmesser 29
 Kolbengeschwindigkeit 75
 – mittlere 11, 16
 Kolbenkompressionshöhe 11
 Kolbenkühlung 118, 193
 Kolbenring 234
 – Einbauspannung 134
 – Formfüllungsvermögen 134
 – Hydrodynamik/-mechanik 143
 – Reibung 143
 – Torsionsmoment 138
 – Überstreifspannung 134
 Kolbenringbewegung 129, 137
 Kolbenringparameter 133
 Kolbenringtorsion 135
 Kolbenschaft 71
 – Austauschmaß 16

- Elastizität 109
- Tragbildbreite 109
- Kolbenschaftgeräusch 76
- Kolbentemperatur 116
- Kolbenüberstand 11
- Kolbenweg 75
- Kompaktheit 26
- Kompressionshöhe 16, 29
- Kompressionsvolumen 13, 35, 275
- Konsistenz 452
- Konvergenz 452
- Kopfreibung 65
- Kopfrückfall 106
- Körperschalleitweg
 - äußerer 405
 - innerer 405, 421
- Kraft
 - Abstütz- 46
 - Anpress- 137
 - Auftriebs- 145
 - Betriebs- 49, 210
 - Gas- 70, 222
 - generalisierte 454
 - Hauptlager- 73
 - Klemm- 210
 - Kolben- 72, 98
 - Kolbenseiten- 72
 - Lager- 206
 - Massen- *s. Massenkraft*
 - Mindestklemm- 60
 - Pleuellager- 73
 - Pleuelstangen- 72
 - Radial- 72
 - Reib- 145
 - Schraubenzusatz- 210 f.
 - Tangential- 72, 132 f.
 - Vorspann- *s. Vorspannkraft*
- Kräftegleichgewicht 112
- Kraftverhältnis 61
- Kreisbogennocken 296
- Kühlkanalkolben 83 f.
- Kühlmittelführung 250
- Kühlmittelkreislauf 177
- Kühlmittelstrom 205
- Kurbelgehäuse 169
- Kurbelkröpfung 154
- Kurbelraum 191
 - Entlüftung 194

- Kurbeltrieb
 - geschränkter 76
 - Kräfte 72
- Kurbelwange (Druckspannung) 159
- Kurbelwelle
 - Balkenmodell 148
 - Dauerfestigkeit 158
 - Einkröpfungsmodell 150 f.
 - Gegengewichte 17
 - Hauptabmessungen 147
 - Hohlkehlen 158
 - Sicherheitsbeiwert 162
 - Spannungszustand 158
 - Torsionsmoment 151
- k-ε*-Modell 244

L

- Labyrinth-Theorie 139
- Ladeluftkühlung 83 f.
- Ladungswechsel 258, 259, 273 ff., 305, 311
- Ladungswechselarbeit 273, 279, 315 f.
- Ladungswechselschleife 315
- Lagergasse 191
- Lagerstuhl 195
- Lagertraverse 178
- Längskraft 333 ff.
- Längsmoment 330, 350 ff.
- Lastenheft 8
- Laststeuerung 317
- Lauffläche (Verschleißfestigkeit) 183
- Laval-Düse 262
- law of the wall 245
- Leistung
 - effektive 8, 16
 - Kolbenflächen- 34
 - spezifische *s. L., effektive*
- Leistungsdichte 430
- Leistungsgewicht 34
- Leiterrahmen 181, 421
- Liefergrad 37, 254, 279
- Low Cycle Fatigue 247

M

- Mach-Zahl 261
- Magnesium 200
- Masse
 - generalisierte 454
 - Kolben 12, 29
 - Kolbenbolzen 29

- Kolbenring 29
- Pleuel 29
- Massenausgleich 342 ff.
- Massenbilanz 263
- Massenerhaltung 280
- Massenkraft 71
 - Kurbelwelle 154
 - oszillierende 29
- Massenkraftentlastung 74, 98
- Massenmoment 350 ff.
- Massenreduzierung 199
 - ZKG 196
- Massenstrom 261
- Massenumlaufmoment 384 ff.
- Maulweite 133
- Mehrkörpersimulation 328
- Metal Matrix Composites 170
- Mikroporosität 252
- MMC 170
- Momentengleichgewicht 112
- Motorblock *s. ZKG*
- Motorscheibe 203

N

- Nabenspaltriss 70
- Nabenwanddicke 71
- Nachgiebigkeit (elastische) 55
- Nachziehfreiheit (ZK) 214
- Nebenpleuel 347 ff.
- Niresist-Ringträger 83
- Nocken 295
 - harmonischer 298
 - Kreisbogen- 295
 - ruckfreier 295, 298, 300
- Nockenform 295
- Nockenhub 296, 298
- Nockenwelle 305
- Nockenwelle („gebaute“) 305
- Normalkomponente 429
- Notlaufeigenschaften 183
- Nulllastflattern 129
- Nußelt-Zahl 244

O

- Öffnungszeit 277
- Öloxidation 194
- Ölreißer 129
- Ölstandsabsenkung 194
- Ölverschäumung 194

- Open-deck 171
- Optimierungsrechnung 29
- Ordnungsanalyse 215
- Ovalität
 - doppelt negative 107
 - doppelt positive 107
 - Feuersteg 129
 - Kolben 106, 107
 - Kolbenschaft 109

P

- Partikelemission 287
- Perlit 183
- Phasenverstellung 311
- Phosphatieren 183
- Phosphidnetz 183
- Pleuel
 - Ersatzmassen 41
 - Festigkeitsberechnung 51
 - Hauptabmessungen 40
 - Klemm- 86, 89
 - Lastverteilung 46
 - Versagen 46
- Pleuelauge 39, 43
- Pleuelbelastung 43
- Pleuelbreite 27
- Pleuelfuß 50
- Pleuelgeige 23
- Pleuelkopf 39, 43, 50
 - Klemmlängenbereich 55, 57
 - Nachgiebigkeit 55
 - schräg geteilter 50
 - Trennfuge 48
- Pleuelkopfverschraubung 49
 - Verspannungsschaubild 58
- Pleuellänge 18, 29
- Pleuelschaft 42
- Pleuelschaftquerschnitt 40
- Pleuelschwerpunkt 41
- Postprozessor 439
- Preprozessor 439
- Pressung 226
 - radiale 132
- Pressungsverteilung 46
- Pressure Balancing 127
- Primärdurchströmung 250
- PROMO 258
- p-V-Diagramm 278

Q

Querdurchströmung 250
 Querkraft 332 ff.
 Querstromprinzip 237
 Quetschfläche 10

R

Randelementmethode 452
 Reaktionsmoment 72
 Regelkolben 80
 Relaxationsmethode 117
 REM 452
 Residuen 450
 Resonanz 304
 Restkraft 337 ff., 390
 Restgas 277, 278 f.
 Restgasanteil 305
 Restgrößenmethode 450
 Restmoment 353 ff., 361
 Reverse-torsion-Ring 135
 Reynolds-Analogie 244
 Reynolds-Modell (Low-) 245
 Reynolds-Zahl 244
 Ringflattern 129
 Ringnutverschleiß 83
 Ringtwist 126, 131, 135 f.
 Riss 248
 Rollenschlepphebel 290
 Rollenstoßel 299
 Rollmoment 391 ff.

S

Schaftaussparungsradius 18, 20
 Schaft einfall 23, 107, 109
 Schaftlänge 18
 Schaftlappen 19, 21, 23
 Schaftumfangswinkel 108
 Schallabstrahlung 198
 Schallgeschwindigkeit 261
 Schalleistung 410, 429
 Schallschnelle 430 f.
 Schaltsaugrohr 257
 Schlepphebel 288, 301
 Schlepmmoment 290
 Schmiedekolben 82
 Schmierölversorgungssystem 191
 Schmierspalt 143, 145
 Schnittkräfte 47

Schnittmomente 48
 Schränkung 78 f.
 Schraube
 – Anziehverfahren 63
 – Dauerfestigkeit 65
 – Dehn- 55
 – Dimensionierung 63
 – Drehwinkel 65
 – Torsionsbeanspruchung 64
 – Vorspannung 66
 – Zugbeanspruchung 64
 Schraubenlänge 209
 Schraubenpfeifen (ZK) 208
 Schraubenverbindung (Nachgiebigkeit) 55
 Schrumpfmaß 228
 Schürze 180
 Schwenkmotoren 310
 Schwenkmotorversteller 310
 Schwinghebel 288
 Setzbetrag 213
 Shaker-Wirkung 292
 Shape Functions 449
 Signalabtastung 409
 Solver 439
 Spannung
 – Biege- 56, 93 f., 156
 – Büchse 225
 – Büchsenwand 233
 – Druck- 159
 – Eigen- 182, 206
 – Mittel- 51
 – Nenn- 151, 155
 – Normal- 56
 – Ober- 51, 156
 – Schrumpf- 104
 – Unter- 51, 156
 – Vergleichs- 64, 103, 156, 226, 232
 – Wärme- 116, 238, 247
 Spannungsspitzen 166
 Spannungsverteilung 446
 Spitzenradius 298
 Spitzenwinkel 297
 SPM 189
 Sprengringdurchmesser 100
 Squeeze Effekt 143
 Stahl-Kühlkanalkolben 84
 Steadit 183
 Stegriss 247, 251

Steifigkeit 454
Steifigkeits-Matrix 440
– Element- 443
– Gesamt- 444
– Struktur- 443, 446
– Werkstoff- 445
Steuerdiagramm 283 f., 314
Steuerzeiten (starre) 320
Stößelerhebung 299
Stößelhubfunktion 300
Stößelmasse 302
Stoßstangen 289
Strahlablösung 281
Strahlungswiderstand 410
Strömungsbeeinflussung 254
Strömungsfeld 244
Strömungsgeschwindigkeit 261
Stützziffer 164
Summenpegel 403
Swirl 256

T

Tangentialdruck 394
Tassenstößel 288, 301
Teillast 278, 308
Temperaturfeld 116, 204
Temperaturgradient 225, 230
Thermoschock 247, 252
Titanaluminid 294
Titanventile 295
Totpunkte 79
Trägheitsmoment (Ersatzflächen-) 57
Trapeznabe 82
Triebwerksauslegung 32
Tumble 256
Turbulenzmodell 176, 244

U

Überdeckung 226
Überschneidung 283
Überschneidungsphase 278
Übertragungsfaktor 95, 98
Übertragungsfunktion 406, 409, 427
Übertragungs-Mobilität 425
UniValve-System 319 f.
Unterdruckwelle 279
Unterteil 178

V

VALVETRONIC 317, 319
Variable Timing and Lift Electronic Control 312
Variocam 312
Ventilbeschleunigung 301
Ventilbewegung 294
Ventildrehvorrichtung 292
Ventildurchmesser 285
Ventilerhebung 298, 302
Ventilfeder 292, 302 f.
Ventilfederschwingung 323
Ventilfläche 285 f.
Ventilführung 291
Ventilgeschwindigkeit 301
Ventilhub 301
Ventilhub (variabler) 314
Ventilhubfunktion 300
Ventilhubkurven 284, 322
Ventilhubumschaltung 311
Ventilkegel 294
Ventilöffnungsfläche 285 f.
Ventilquerschnittsfläche 284
Ventilschaft 292
Ventilsitze 291
Ventilsitzringe 292 f.
Ventilsitzwinkel 283
Ventilspielausgleich 291
Ventilsteuerung (variable) 308
Ventilsteuerzeiten (variable) 307
Ventilteller 291, 302
Ventiltrieb (elektromechanischer) 314 f., 321 f.
Ventiltrieb (mechanischer) 315
Ventiltrieb (mechanisch variabler) 316
Ventiltriebsdynamik 328
Ventiltriebsgeräusch 326
Ventiltriebsreibung 326
Ventilüberschneidung 275, 307
Ventilwinkel 10, 34, 264
Verbrauch 35, 36
Verbrennungsverlauf 287
Verdichtungsverhältnis 35
Verdrängungsströmung 143
Verformung
– Kolbenbolzen 122
– Kolbenring 134
– Kolbenschaft 109
– plastische 134

- Schraube 66
 - ZKG 205
 - Verluste
 - Drossel- 258
 - Wandwärme- 244
 - Verlustfaktor 197
 - Vermicular-Graphit 197
 - Verschiebung 445
 - Verschraubung
 - Hauptlager- 206
 - ZK 211
 - Zylinderkopf 207
 - Verspannungsschaubild 54, 58
 - Versteifung 418, 420, 421, 422
 - Verzerrung 445
 - Vierventiltechnik 287
 - Volllast 274 ff., 308
 - Volumenmodell 167 f.
 - Vorspannkraft 60, 63, 65, 208, 210
 - minimale 63
 - Prüfung 64
 - Schrauben- 222
 - Schraubentyp 213
 - verbleibende 213
 - Verlust 56, 62
 - V-Raum 195
 - VTEC-System 312
 - VTEC-Ventilsteuerung 313
- W**
- Wachstum 182
 - Wandfunktion 245
 - Wandreibung 280
 - Warmaushärtung 251
 - Wärmeabführung 204
 - Wärmeaufnahme 204
 - Wärmeausdehnungskoeffizient 230
 - Wärmebehandlung 182, 251
 - Wärmedurchgangszahl 245
 - Wärmeleitfähigkeit 224
 - Wärmeleitung 173
 - Grenzflächen 204
 - Wärmespannung
 - Zylinderwand 229
 - Wärmestrahlung (Flamme) 244
 - Wärmestromdichte 224
 - Wärmeübergang 240, 242
 - Wärmeübergangskoeffizient 116, 176, 204
 - mittlerer 117
 - Wärmeübergangszahl 244
 - Wärmeübertragung (Bauteilwand) 245
 - Warmspiel 200
 - Wassermantel 171, 173, 176
 - Wasserraum 236
 - Wasserraumdeck 176, 191
 - Wasserspiele 266
 - Wechselspannungsamplitude 51
 - Werkstoff
 - Anforderungen (ZK) 252
 - Bruchsicherheit 157
 - Eigenschaften 197
 - Kolbenbolzen 92
 - Kurbelwelle 163
 - Verbund- 187
 - Wechselfestigkeit 157
 - Zielkonflikt (ZK) 252
 - ZKG 181
 - Widerstandsmoment 93
 - Winkelkanal 192
 - Wirkungsgrad 37 f., *s. auch Liefergrad*
- Z**
- Zapfenüberschneidung 159
 - ZK
 - Block- 235
 - Einheits- 236
 - Einzel- 236, 271
 - gebauter 237
 - Mehrventil- 237
 - Oberseite 236
 - Steifigkeit 249
 - Temperatur 240
 - Wende- 238
 - ZKD 205
 - Abdichtung 212
 - Bauarten 269
 - Gleitschichten 271
 - Verformbarkeit 269
 - Weichstoff-Metall- 269
 - ZKG 24, 25, 169
 - Abdichtprobleme 173
 - Aluminium 24 ff.
 - Außenflächen 195
 - Entlüftung 236
 - Entwicklungstrend 188
 - Konzept 169, 188
 - monolithisches 190
 - Schürzenbauweise 177

- Wassermanteltiefe 176
- zweiteilige Bauweise 177
- Zünddruck 98, 232, 413
- Auslegungs- 96
- Zwangsdurchströmung 250
- Zweipunktversteller 308
- Zwickelverschleiß 234
- Zwischenringdruck 127
- Zwischenteil 178
- Zwischenwange 27
- Zylinder
 - Formabweichung 215
 - Massenbilanz 263
 - Nummerierung 195
 - Wasserdurchtritt 173
 - Wassermantel 173
- Zylinderblock 169, 191
- Zylinderbohrung 214
- Zylinderdeck 191
- Zylinderdruck 8
- Zylinderdurchmesser 15
- Zylinderkopf *s. ZK*
- Zylinderkopfdichtung *s. ZKD*
- Zylinderkurbelgehäuse *s. ZKG*
- Zylinderlaufflächen 182
- Zylinderverzug 234
- mathematische Beschreibung 214
- Ordnungsanalyse 215