

Franz Bäumel

Werkstoffgerechte Auslegung und Festig-
keitsnachweis für Verbrennungsmotorkolben
aus Mesophasenkohlenstoff



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme
Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist
bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 2001

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2001

ISBN 3-8316-0062-7

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089/277791-00 – Fax: 089/277791-01

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen.....	3
2.1 Kolben von Verbrennungskraftmaschinen	3
2.1.1 Bauteilbeschreibung	3
2.1.2 Kolbenbauarten	5
2.1.3 Kolbenaußenkontur und Einbauspiel.....	7
2.1.4 Belastungen am Kolben.....	9
2.1.4.1 Gaskraft	10
2.1.4.2 Massenkraft	10
2.1.4.3 Seitenkraft.....	11
2.1.4.4 Temperatur	11
2.1.5 Kolbenwerkstoffe	12
2.1.5.1 Anforderungen an Kolbenwerkstoffe	12
2.1.5.2 Gebräuchliche Kolbenwerkstoffe	13
2.2 Werkstoffkundliche Grundlagen	15
2.2.1 Mesophasenkohlenstoff.....	15
2.2.2 Herstellung von Kolben aus Mesophasenkohlenstoff	15
2.2.2.1 Gewinnung des Ausgangsmaterials.....	16
2.2.2.2 Formgebung.....	17
2.2.2.3 Sintern.....	20
2.2.2.4 Nachbearbeitung.....	21
2.2.3 Mechanische Eigenschaften.....	21
2.2.3.1 Streuung der mechanischen Eigenschaften.....	22
2.2.3.2 Versagenshypothesen	24
2.2.3.3 Versagenswahrscheinlichkeit bei mehrachsiger Beanspruchung	26
2.2.3.4 Lebensdauer bei dynamischer Beanspruchung	27
2.3 Finite Elemente Methode (FEM)	28
2.3.1 Entwicklung und Prinzip der FEM.....	28
2.3.2 Genauigkeit und Risiken von FEM-Analysen.....	29

2.3.3	FEM bei Kolben von Verbrennungsmotoren	29
2.3.4	FEM-Analysen von keramischen Bauteilen	30
2.3.5	Berechnung von Versagenswahrscheinlichkeiten	30
3	Aufgabenstellung und Organigramm.....	32
4	Versuchsdurchführung und Simulation.....	33
4.1	Werkstoffcharakterisierung	34
4.1.1	Mikrostruktur	34
4.1.2	Vierpunkt-Biegeversuch.....	34
4.1.2.1	Versuchsanordnung.....	34
4.1.2.2	Weibullverteilung und Weibullparameter	35
4.1.2.3	Defektcharakterisierung	35
4.1.2.4	Elastizitätsmodul	35
4.1.3	Uniaxialer Druckversuch.....	36
4.1.4	Bruchversuche bei zweiachsigem Spannungszustand.....	38
4.1.4.1	Doppelringversuch	38
4.1.4.2	Scheibenversuch.....	39
4.1.5	Bestimmung der Reißzähigkeit K_{Ic}	40
4.2	Simulation von Kolben im Motorbetrieb	41
4.2.1	Hard- und Software.....	41
4.2.2	Abschätzung der Kolbentemperatur im Motorbetrieb	41
4.2.2.1	Ziel der Abschätzung	41
4.2.2.2	Modellierung	42
4.2.2.3	Randbedingungen.....	42
4.2.3	Parameterstudie: Strukturberechnung an 2-Takt-Otto-Kolben.....	44
4.2.3.1	Ziel der Studie	44
4.2.3.2	Modellierung	45
4.2.3.3	Randbedingungen.....	47
4.2.3.4	Geometrievarianten.....	47
4.2.4	Strukturberechnung an einem 4-Takt-Otto-Kolben	48
4.2.4.1	Ziel der Studie	48
4.2.4.2	Modellierung	49
4.2.4.3	Randbedingungen.....	50

4.2.4.4	Belastungsfälle.....	50
4.2.4.5	Vergleichsspannung.....	51
4.2.4.6	Versagenswahrscheinlichkeit.....	52
4.2.4.7	Lebensdauer bei zyklischer Belastung.....	52
4.2.5	Auslegung der Kolbenaußenkontur	54
5	Ergebnisse.....	56
5.1	Werkstoffcharakterisierung	56
5.1.1	Mikrostruktur.....	56
5.1.1.1	Gefüge	56
5.1.1.2	Fehlstellen in der Mikrostruktur	59
5.1.2	Elastische Kennwerte	61
5.1.2.1	Querdehnzahl	61
5.1.2.2	Elastizitätsmodul	61
5.1.3	Biegebruchfestigkeit und Weibullverteilung	61
5.1.4	Druckfestigkeit	64
5.1.5	Versagenshypothese und Vergleichsspannung.....	64
5.1.6	Rißzähigkeit K_{Ic}	67
5.2	Simulation von Kolben im Betriebszustand	67
5.2.1	Kolbentemperatur, thermische Verformung und Spannungen.....	67
5.2.2	Strukturberechnung an einem 2-Takt-Otto-Kolben	71
5.2.2.1	Charakteristische Spannungsverteilung.....	71
5.2.2.2	Geometrievarianten.....	73
5.2.3	Strukturberechnung an einem 4-Takt-Otto-Kolben	73
5.2.3.1	Charakteristische Spannungsverteilung.....	73
5.2.3.2	Versagenswahrscheinlichkeit	77
5.2.3.3	Lebensdauer	78
5.2.4	Kolbenaußenkontur	79
6	Diskussion.....	81
6.1	Werkstoffcharakterisierung	81
6.1.1	Problematik der Formgebung	81
6.1.2	Weibullverteilung und Defektcharakterisierung.....	83
6.1.3	Festigkeit und Versagenshypothese.....	84

6.1.4	Elastische Eigenschaften.....	86
6.2	Simulation	87
6.2.1	Kolbentemperatur im Motorbetrieb	87
6.2.2	Analyse der Belastungssituation und Folgerungen für die strukturelle Kolbengestaltung	89
6.2.3	Einbauspiele und Kolbenaußenkontur	92
6.2.4	Versagenswahrscheinlichkeit und Lebensdauer: Folgerungen für Werkstoffentwicklung und Kolbengestaltung	95
6.3	Vergleich des Anforderungsprofils an Kolbenwerkstoffe mit dem Eigenschaftsprofil von Mesophasenkohlenstoff	98
7	Zusammenfassung	101
8	Literatur	103
9	Objective and Summary	109
10	Anhang.....	110
10.1	Mesophasenkohlenstoff – Prüfbericht nach DIN 51110, Teil 3	110
10.2	3D – Darstellungen der untersuchten Kolben	111
10.2.1	2-Takt-Motorsägenkolben	111
10.2.2	4-Takt-Pkw-Kolben	111

1 Einleitung

„Der Kolben ist ein Stück Metall, unbedingt notwendig zum Betrieb eines Verbrennungsmotors, aber auch geeignet, zu verhindern, daß Ingenieure ausgebildet werden.“ /1/

So urteilte Ernst Mahle, der Gründer des Stuttgarter Kolbenherstellers MAHLE angesichts der Komplexität und Vielfalt der Belastungen, die auf den Kolben eines Verbrennungsmotors während des Betriebs wirken. Die wiederkehrende Explosion der Verbrennungsgase erhitzt ihn auf Spitzentemperaturen von oft mehr als 300°C, der sich einstellende Temperaturgradient erzeugt thermische Spannungen. Gleichzeitig verursachen Gasdruck und Massenkräfte hohe mechanische Belastungen im Bauteil. Die Funktionen, die der Kolben zu erfüllen hat, sind vielfältig. Er soll die Gaskräfte über Kolbenbolzen und Pleuelstange an die Kurbelwelle ableiten, für eine Geradföhrung des Triebwerks sorgen und den Brennraum zusammen mit den Kolbenringen gegen den drucklosen Kurbelraum abdichten.

Der Beschreibung von Schmitt-Thomas zufolge, waren die Schwierigkeiten erheblich, die es in der Geschichte der Kolbenentwicklung zu überwinden galt. Eine Problemlösung konnte nur über das Zusammenwirken von Konstruktion, Fertigung und nicht zuletzt Werkstoffentwicklung erfolgen /2/.

Steigende Arbeitsdrücke und -temperaturen bei schnellaufenden, modernen Verbrennungsmotoren sorgen derzeit dafür, daß die klassischen Aluminium-Kolbenlegierungen an ihre Grenzen gelangen. Die verhältnismässig geringe Warmfestigkeit stellt dabei das zentrale Problem dieser Werkstoffgruppe dar. Die Verwendung von Eisenwerkstoffen im Kolbenbau gehört bei schnellaufenden Motoren dagegen aufgrund der hohen Masse seit langem der Vergangenheit an.

Während in obigem Zitat ausschließlich von metallischen Kolben gesprochen wird, machen bei der Suche nach alternativen Kolbenwerkstoffen seit einiger Zeit isotrope Feinkornkohlenstoffe auf sich aufmerksam /3/. Diese Werkstoffe besitzen in bestimmten Ausprägungen ausreichend hohe Festigkeiten, die sie im gesamten Betriebstemperaturbereich von Verbrennungsmotoren beibehalten. Ihre Dichte liegt mit $1,8 - 1,9 \text{ g/cm}^3$ um 30% unter der von Aluminiumlegierungen /4/, was sich reduzierend auf die im Triebwerk auftretenden Massenkräfte auswirkt. Aufgrund ihrer graphitischen Grundstruktur weisen sie darüber hinaus hervorragende tribologische Eigenschaften auf. Die grundsätzliche funktionelle Eignung dieser Kohlenstoffe als Kolbenwerkstoffe konnte in verschiedenen Forschungsprojekten nachgewiesen werden /5/, /6/.

Derzeit sprechen jedoch auch mehrere Aspekte gegen eine weitere Verbreitung von Kolben aus Kohlenstoff. Hier sind zum einen die hohen Herstellungskosten zu nennen, die ihre Ursache in der umfangreichen mechanischen Bearbeitung der Kolben aus zylindrischen Vollkörpern haben. Sie übersteigen die Kosten für konventionelle Leichtmetallkolben um ein Vielfaches /7/. Einsparungspotentiale bieten in diesem Zusammenhang intelligente, endkunturnahe Herstellungsverfahren, die jedoch meist mit technischen Einschränkungen einhergehen und deshalb eingehend betrachtet werden müssen.

Eine weitere Problematik besteht darin, daß das Versagensverhalten von Struktur-Kohlenstoffen, wie das aller anderen keramischen Werkstoffe statistischen Gesetzmäßigkeiten genügt. Das Bauteilversagen wird durch Fehlstellen im Keramikgefüge ausgelöst, die ihre Ursache entweder im Ausgangsmaterial oder im Formgebungsverfahren der Sintergrünkörper haben. In Abhängigkeit von Art und Gestalt der Fehlstellen kann ein Bruch bei Bauteilbelastungen ausgelöst werden, die deutlich unter der Festigkeit des Werkstoffs liegen. Da gerade in Verbrennungsmotoren extreme Anforderungen an die Bauteilzuverlässigkeit gestellt werden, muß in der Werkstoffentwicklung ein hohes Zuverlässigkeitsniveau angestrebt werden. Entwicklungspotential liegt diesbezüglich vor allem in der Vermeidung bzw. Minimierung von bruchauslösenden Defekten im Werkstoffgefüge.

Keramiken unterscheiden sich in ihren spezifischen Eigenschaften deutlich von metallischen Werkstoffen. Sie reagieren empfindlich auf Zugbelastungen und sind nicht in der Lage Spannungsspitzen durch plastische Verformung abzubauen. Es muß deshalb eine konstruktive Gestaltung für Kolben aus Kohlenstoff angestrebt werden, die diese Gesichtspunkte berücksichtigt. Zur Analyse der Betriebsbelastungen am Kolben und zur Optimierung der Bauteilgeometrie in Richtung einer werkstoffgerechten Gestaltung stellen Simulationsmethoden, wie die Finite Elemente Methode (FEM), hervorragende Hilfsmittel dar.

Die Standzeiten solcher Dichtungspackungen waren gering. Als mit der Zeit Dampfdruck und Kolbengeschwindigkeit zunahmen, wurden 1797 von Edmund Cartwright erstmals Ganzmetallkolben eingesetzt /11/. Eine entscheidende Innovation gelang John Ramsbottom 1854 mit einem einteiligen, selbstspannenden Kolbenring. Dieser gestattete ein sicheres Abdichten gegen hohe Arbeitsdrücke. Zudem konnten die Kolben einteilig ausgeführt werden. Die Kolbenringe wurden in eingedrehte Nuten eingelegt, eine Konstruktion, die bis heute im Kolbenmaschinenbau Anwendung findet /12/ (vgl. Bild 2).

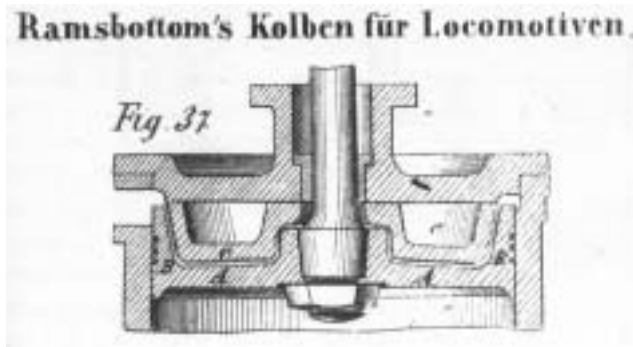


Bild 2: Lokomotivkolben nach John Ramsbottom aus dem Jahr 1854 /13/

In der zeitgenössischen Fachliteratur über Dampfmaschinen gibt es kaum Hinweise darauf, daß bei Kolben besondere Schwierigkeiten aufgetreten wären. Ungleich ungünstiger stellt sich die Situation bei Kolben in Verbrennungsmotoren dar. Anstatt mit Dampf von bestenfalls 350°C ist der Kolben dort Verbrennungsgasen von wesentlich höheren Temperaturen und deren aggressiven Verbrennungsprodukten ausgesetzt.

In den Anfängen des Gasmotorenbaus im ausgehenden 19. Jahrhundert griff man auf den Entwicklungsstand der Dampfmaschinenkolben zurück. Es wurden vor allem einteilige Grauguß- und Stahlkolben mit eingestochenen Nuten für einteilige, selbstspannende Kolbenringe verwendet. Während die Geradföhrung des Triebwerks bei Dampfmaschinen in der Regel durch Kreuzkopfkonstruktionen gewährleistet wurde, übernahm bei den schneller laufenden Verbrennungsmotoren der Kolben diese Funktion. Er mußte dazu eine ausreichende Länge aufweisen, die mindestens seinem Durchmesser entsprach. Da die Arbeitsdrücke beim Verbrennungsmotor deutlich höher lagen, wurde zur Abdichtung des Brennraums eine größere Anzahl von Kolbenringen eingesetzt.

Steigende Drehzahlen bei Fahrzeug- und Flugzeugmotoren föhrten zum Zwang, die Kolbenmasse zu verringern. Man ging auf Werkstoffe geringerer Dichte über /14/, /15/. Leichtmetall-Legierungen auf Aluminium- und Magnesium-Basis zeigten schnell ihre Überlegenheit gegenüber den Stahl- und Gußeisenwerkstoffen /16/, /17/, /18/. Diese Überlegenheit ist in ihrer geringen Dichte und ihrer ausgezeichneten Wärmeleitfähigkeit begründet. Nachteilig wirken sich allerdings der annähernd doppelt so große Wärmeausdehnungskoeffizient und die niedrige Warmfestigkeit aus. Bei Magnesium-Legierungen sind ausgeprägte Verschleißempfindlichkeit und geringe Korro-

sionsbeständigkeit zu nennen /19/. Durch die Weiterentwicklung der Werkstoffe und Konstruktionen, die auf die speziellen Bedürfnisse der jeweiligen Motoren zugeschnitten waren, versuchte man, diese Nachteile auszugleichen /13/. Als derzeitiger Stand der Technik bei schnell- und mittelschnellaufenden Verbrennungsmotoren sind Leichtmetallkolben aus Aluminium-Legierungen anzusehen. Bild 3 zeigt beispielhaft einen modernen Leichtmetallkolben und bezeichnet die wichtigsten Begriffe.

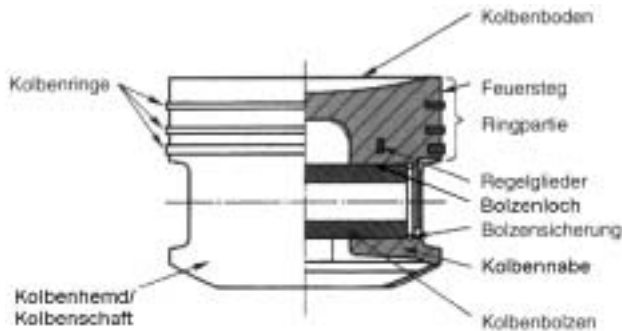


Bild 3: Moderner Leichtmetallkolben, nach /1/

Oft ist im Zusammenhang mit Kolben von Druck- und Gegendruckseite die Rede. Als Druckseite (DS) bezeichnet man die Seite des Kolbens, mit der er bei wirkendem Verbrennungsdruck durch die Schrägstellung des Pleuels an die Zylinderwand gedrückt wird. Die Gegendruckseite (GDS) liegt diametral gegenüber.

2.1.2 Kolbenbauarten

Die Anforderungen, die unterschiedliche Verbrennungsmotoren an die Kolben stellen, haben zur Entwicklung einer Vielzahl von Kolbenbauformen geführt. Maßgebend sind heute vor allem die Forderungen nach geringerem Kraftstoffverbrauch und reduzierten Abgasemissionen. Da diese Forderungen meist mit erhöhten Arbeitsdrücken und Arbeitstemperaturen einhergehen, verlangen sie nach höheren Festigkeiten, möglichst bei einer gleichzeitigen Reduzierung der Kolbenmasse. Grundsätzlich unterscheidet man folgende Kolbenbauformen:

Einmetallkolben ohne und mit Eingußteilen

Einmetallkolben aus Aluminiumlegierungen ohne Eingußteile kommen vor allem in niedriger belasteten Ottomotoren zum Einsatz. Werden sie mit Graugußmotorblöcken oder -buchsen verwendet, sind wegen der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten größere Einbauspiele für den Kolben erforderlich. Diese können sich negativ auf Geräuschentwicklung und Abgasemissionen auswirken. In Verbindung mit Aluminiumzylindern tritt diese Problematik nicht im gleichen Maß auf. Da Aluminium auf Aluminium jedoch kein gutes Gleitverhalten gewährleistet, muß einer der beiden Reibpartner mit einer Oberflächenbeschichtung versehen werden /1/.

Die Herstellung von Einmetallkolben kann über Gieß- oder Schmiedeverfahren erfolgen. Aufgrund der Gestaltung des einteiligen Preßstempels sind die Formgebungsmöglichkeiten der Innenkontur beim Schmiedeverfahren eingeschränkt. Es können