

**MAHLE**  
**KOLBENKUNDE**





**MAHLE**

KOLBENKUNDE



# **MAHLE**

## **KOLBENKUNDE**

herausgegeben von der MAHLE Komm.-Ges.

Stuttgart-Bad Cannstatt

Nachdruck von Texten oder Textauszügen,  
Tabellen, Diagrammen, Zeichnungen und Bildern  
nur bei vollständiger Quellenangabe gestattet.  
Printed in Germany

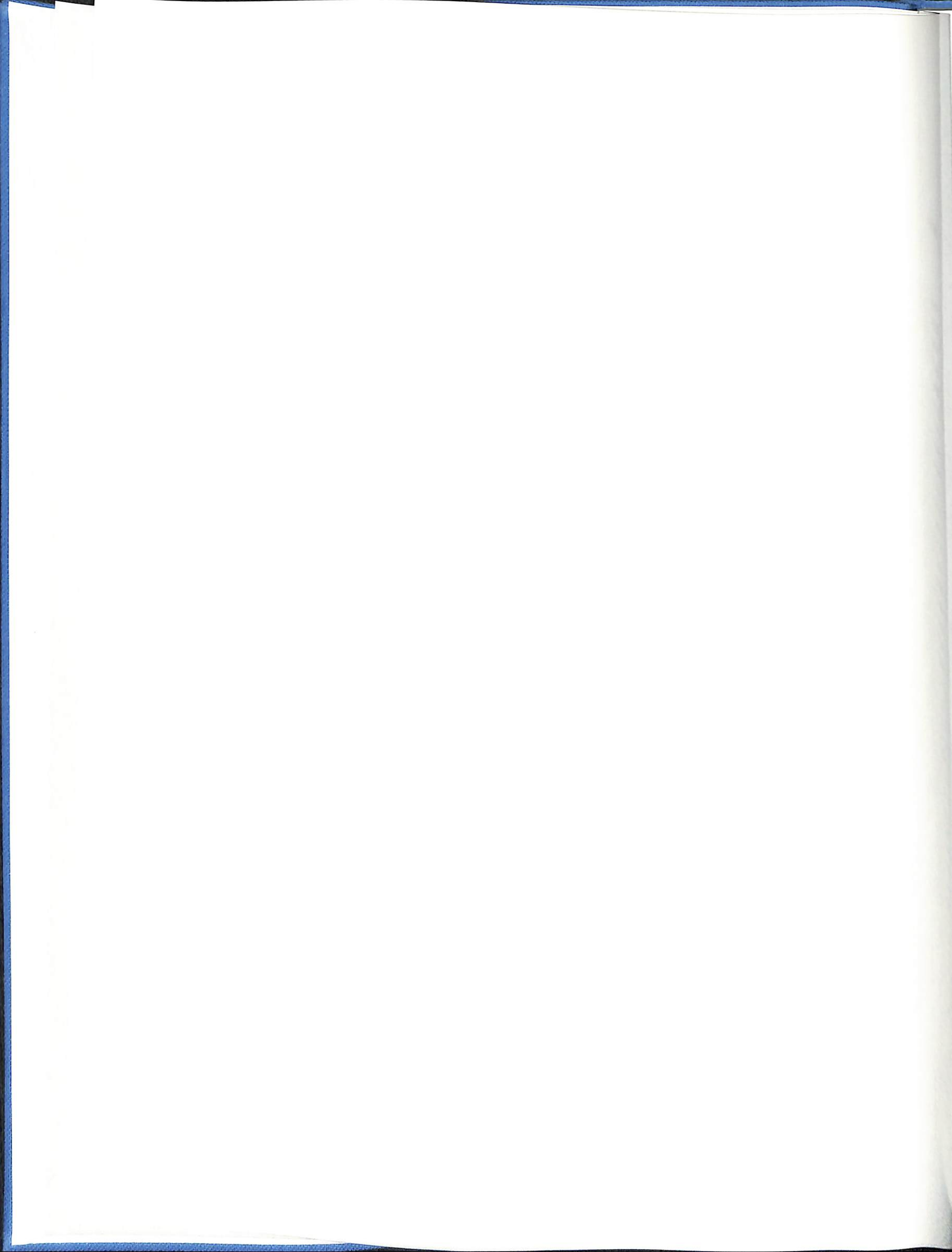
Im Jahre 1954 brachten wir als Zusammenfassung unserer vielen technischen Publikationen erstmals die »MAHLE-Kolbenkunde« heraus. Schon damals wurde sie als Kompendium über den Kolben, das meistbeanspruchte Teil der modernen Verbrennungskraftmaschine, mit erfreulichem Interesse aufgenommen. Inzwischen sind zehn Jahre vergangen und wir übergeben nun, nachdem die Erstauflage längere Zeit vergriffen war, eine zweite, sorgfältig überarbeitete Ausgabe der Öffentlichkeit. Sie berücksichtigt alle in den letzten Jahren eingetretenen Entwicklungen und Fortschritte.

Außer bei meinen Mitarbeitern möchte ich mich vor allem bei der Motorenindustrie, unseren wichtigsten Abnehmern, bedanken. Sie hat unser Bemühen um immer weitere Vervollkommnung des Kolbens durch enge Zusammenarbeit mit unseren Ingenieuren wertvoll unterstützt und damit gleichfalls zum Gelingen des vorliegenden Werks beigetragen.

Möge auch diese jüngste Auflage der »MAHLE-Kolbenkunde« überall gute Dienste leisten, wo gründliches Wissen um den Kolben, das »Herz des Motors«, der eigenen Arbeit förderlich sein kann.



Im Frühjahr 1964





# Inhaltsverzeichnis

## **Vorwort**

**Einleitung** 5

**Vorgeschichte** 7

**Der Werkstoff Aluminium** 17

**Kolbenwerkstoffe** 18

Zusammensetzung und Eigenschaften  
der Werkstoffe von MAHLE-Kolben 31

**Herstellungsverfahren für Rohkolben** 32

**Kolbenbearbeitung** 33

Schaftlaufläche 33

Kolbenbolzenlöcher 34

Kolbenringnuten 36

Strahlung der Ringzone 36

**Laufflächenschutz** 37

**Richtlinien für die konstruktive Gestaltung  
des Kolbens** 40

Einbau- und Laufspiele 42

Kolben mit versetzter Bolzenachse 43

**Kolbenbauarten** 45

Graugußkolben 46

Zweimetallkolben 47

Leichtmetallkolben 49

Schlitzmantelkolben 50

Röhren (MEC)-Kolben 52

Kolben für Zweitaktmotoren 52

Isostatik-Kolben 54

Leichtmetallkolben mit ringförmigen Stahleinlagen 55

Leichtmetallkolben mit dehnungshemmenden  
Traversen 55

Autothermik-Kolben 56

Vollschaft-Autothermik-Kolben 56

Autothermatik-Kolben 56

Vollschaftkolben gegossen und geschmiedet 58

Ringträgerkolben 59

Verbundguß-Kolben 60

Großkolben 62

Gekühlte und gebaute Kolben 65

**Kolbenzubehör** 68

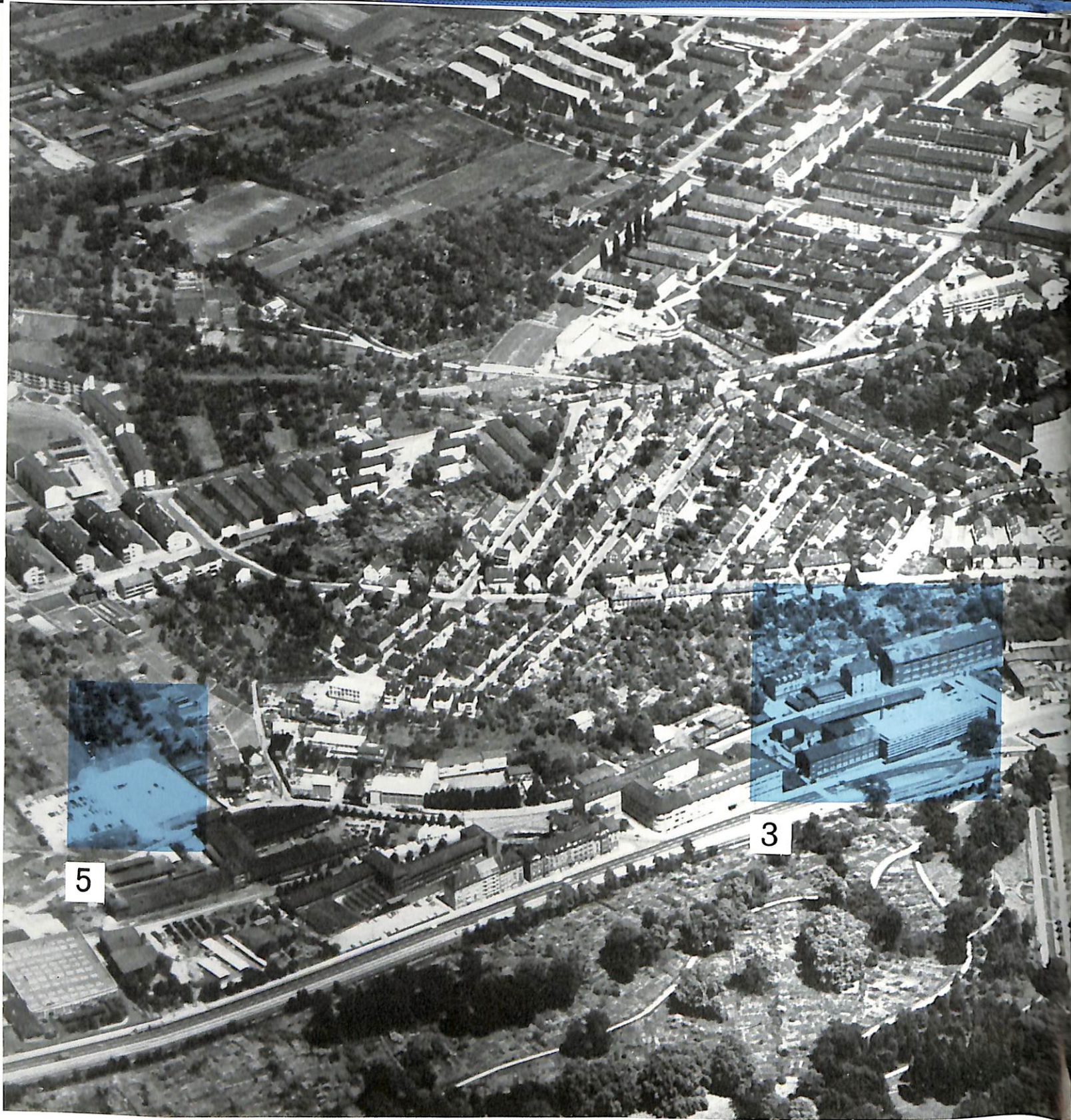
Kolbenringe 68

Kolbenbolzen 78

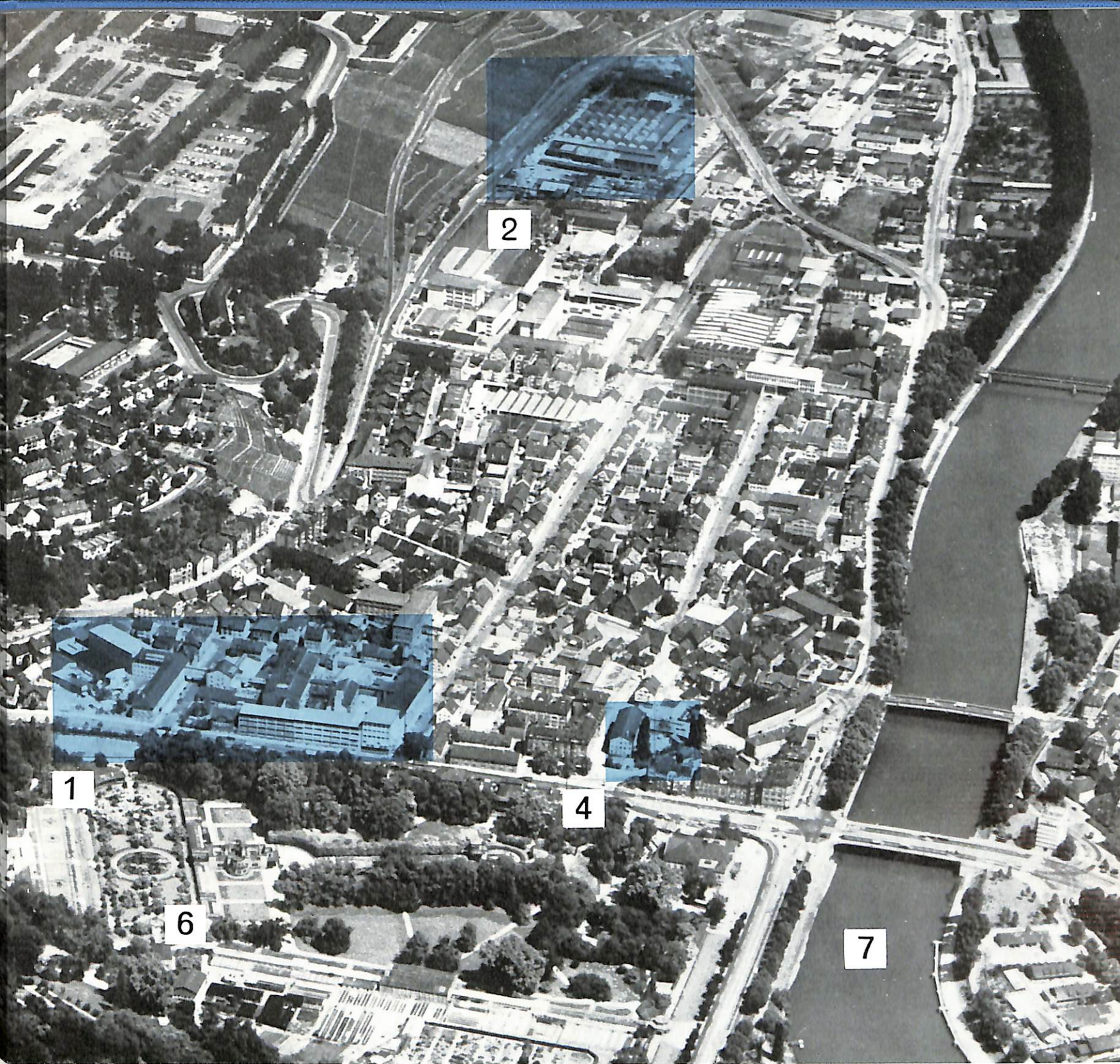
**Kolben-Einbauregeln** 83

**Patente** 86

MAHLE-Schrifttum über Kolben und Zylinder 88



- 1 Werk I  
Stammwerk mit Hauptverwaltung
- 2 Werk II  
Großserienfertigung, Schmelzwerk, Graugießerei
- 3 Werk III Konstruktionsabteilungen, Fertigungskolben-  
lager, Versandabteilungen, Lehrlingsabteilung
- 4 Werk IV  
Entwicklungs- und Versuchsabteilungen
- 5 Werk VI Materialläger
- 6 Wilhelma-Parkanlagen mit Tiergarten
- 7 Neckar



## Einleitung

Das MAHLE-Stammwerk in Stuttgart-Bad Cannstatt steht auf historisch interessantem Boden. Schon in eiszeitlichen Tagen war der Cannstatter Talgrund belebt. Aus der Stein-, Bronze- und Eisenzeit berichten wertvolle Funde. Den römischen Legionen war Cannstatt ein wichtiger Stützpunkt, den Alemannen diente es als herzogliche Residenz. Mit vielen großen Namen wie Rudolf von Habsburg, Karl V., Leibniz, Goethe, Schiller

und Napoleon ist seine Geschichte verbunden. Heute ein Vorort der baden-württembergischen Hauptstadt Stuttgart, war Bad Cannstatt einst eine der ersten Poststationen des Reichs und ausgangs des letzten Jahrhunderts ein Badeort von internationalem Rang. Gottlieb Daimler, Wilhelm Maybach (sein Wohnhaus in der Pragstraße gehört jetzt zum ausgedehnten Komplex der MAHLE-Werke), Vater und Söhne Hirth u. a. legten den Grundstock zu der blühenden Fahrzeug- und Motorenindustrie, die sich in den letzten Jahrzehnten hier entwickelte.



1 Hermann Mahle



2 Dr.-Ing. E. h. Ernst Mahle

Unweit der denkwürdigen Wirkungsstätte Gottlieb Daimlers, der hier vor über 75 Jahren sein erstes Motorrad, Motorboot und Automobil gebaut hatte, liegt das Stammwerk des MAHLE-Kolbenbaus. Hier entstand im Jahre 1920 der erste seriengefertigte, einbaureife Leichtmetallkolben auf dem Kontinent. Hier wurden erstmals die Vorteile verwirklicht, die der Leichtmetallkolben gegenüber dem bis dahin ausschließlich verwendeten Graugußkolben versprach.

Hermann und Ernst Mahle sind die Väter des modernen Leichtbaukolbens. Hermann Mahle, der weitblickende, rechnende Kaufmann, Ernst Mahle, der erfinderische, planende Ingenieur. Es war kein kleines Ziel, dem sich die Brüder Mahle vor über 4 Jahrzehnten verschrieben hatten: es hieß, eines der meistgequälten Motorteile aus weitgehend unerforschten Materialien zu bauen und mit Eigenschaften auszustatten, deren Vereinigung fast ein Hexenwerk bedeutet: hohe Festigkeit und kleinstes Gewicht, ausreichende Härte und geringe Sprödigkeit, niedrige Wärmedehnung und hervorragende Wärmeleitfähigkeit, komplizierte Bauformen und preisgünstige Herstellbarkeit. Die Mehrzahl dieser Probleme wurde erstmals im MAHLE-Kolbenbau gelöst und damit ein neues Spezialgebiet der Technik begründet.

Rund 1200 Kolbentypen, bei Berücksichtigung der durchschnittlich notwendigen 4 Übermaße für Ersatzbedarf etwa 6000 verschiedene Fertigungsausführun-

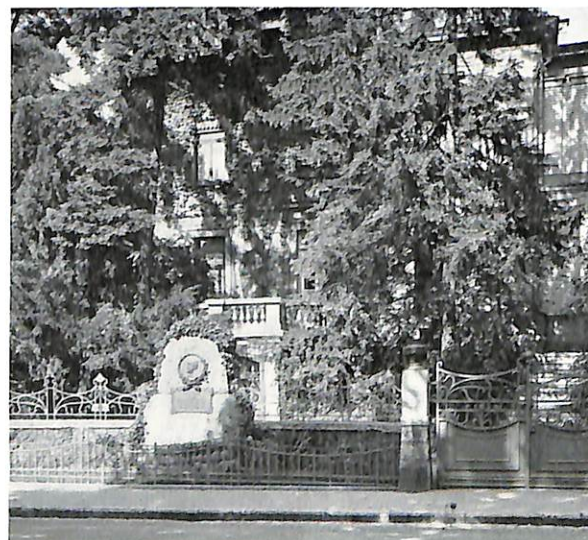
gen werden heute in den 4 großen MAHLE-Kolbenwerken mit über 3000 Beschäftigten hergestellt. In mehr als 100 Ländern der Erde gibt es MAHLE-Vertretungen und MAHLE-Auslieferungslager. In 9 Ländern in Europa und Übersee werden MAHLE-Kolben in Lizenz gefertigt. Weit über 150 Millionen MAHLE-Kolben und über 1,5 Millionen Aluminiumzylinder sind seit der Werksgründung bis 1964 in alle Welt gegangen und haben mit dazu beigetragen, schwäbischen Erfindergeist und Fleiß berühmt zu machen. Im Eis der Arktis und im Sand der Wüste, auf Straßen, Schienen, zu Wasser und in der Luft haben MAHLE-Kolben ihre Tüchtigkeit bewiesen, und viele hervorragende Rennerfolge und Rekorde wurden mit Mahle-Kolben errungen.

Der Inhalt dieses Buches, zusammengetragen aus über 40jähriger praktischer und wissenschaftlicher Erfahrung, mag allen interessant und nützlich sein, die sich als Lehrer und Lernende an Hoch-, Ingenieur- und Fachschulen, als Konstrukteure, als Praktiker in Industrie und Handwerk, als Sachverständige und Fachautoren mit motorischen Problemen zu befassen haben. In der Vermittlung aller wesentlichen Erkenntnisse des modernen Kolbenbaus als einem der interessantesten Gebiete der Motortechnik sehen wir den besten Weg, das Vertrauen zu rechtfertigen und zu festigen, das unsere Freunde in der Motorenindustrie und im Instandsetzungsgewerbe und Millionen Fahrer in den Namen MAHLE setzen.

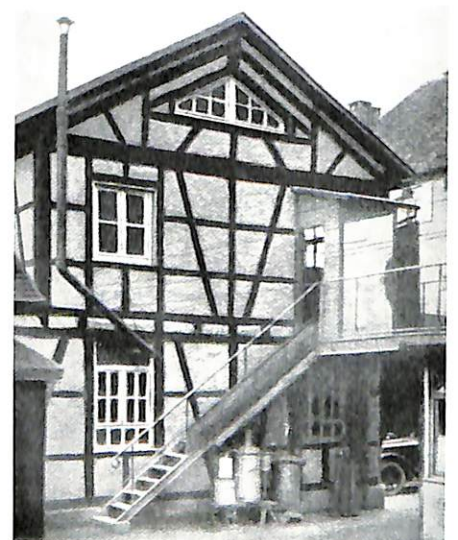
3 Das Maybachhaus ein MAHLE-Bürogebäude



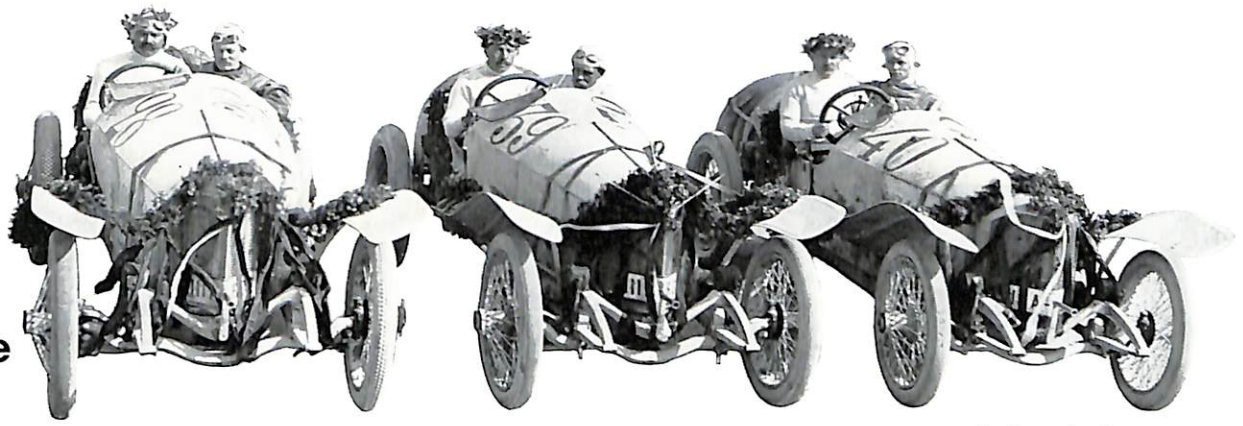
4 Die Daimler-Gedächtnisstätte in Bad Cannstatt



5 Die Keimzelle der MAHLE-Werke



## Vorgeschichte



11 Mercedes-Rennwagen mit in Sandguß gefertigten Aluminiumkolben 1914

Lenoir, Daimler, Benz und Diesel bauten in ihre ersten Motoren ausschließlich Graugußkolben ein.

Erst um 1907 werden vereinzelt Vorversuche mit Leichtmetallkolben unternommen.

**1913** Beim »Kaiserpreis für Flugmotoren« siegt ein 4-Zylinder-100-PS-Benz-Motor mit Graugußkolben. Ein von Dr. v. Selve eingereichter Motor mit Leichtmetallkolben wird von der Prüfungskommission zurückgewiesen, weil Leichtmetall mit einem Schmelzpunkt von ca. 600 °C der Verbrennungstemperatur von ca. 2000 °C nicht gewachsen sei.

Kurz vor Kriegsausbruch siegen im »Großen Preis von Frankreich« 3 Mercedes-Wagen mit in Sandguß hergestellten Aluminiumkolben.

**1917** Hellmuth Hirth baut in seiner Cannstatter Versuchswerkstatt einen Flugmotor mit in Sandguß gefertigten Aluminiumkolben.

**1918** Kurz vor Kriegsende sind bereits einige neue Flugmotorbaumuster mit Aluminiumkolben ausgerüstet.

## Sturm und Drang

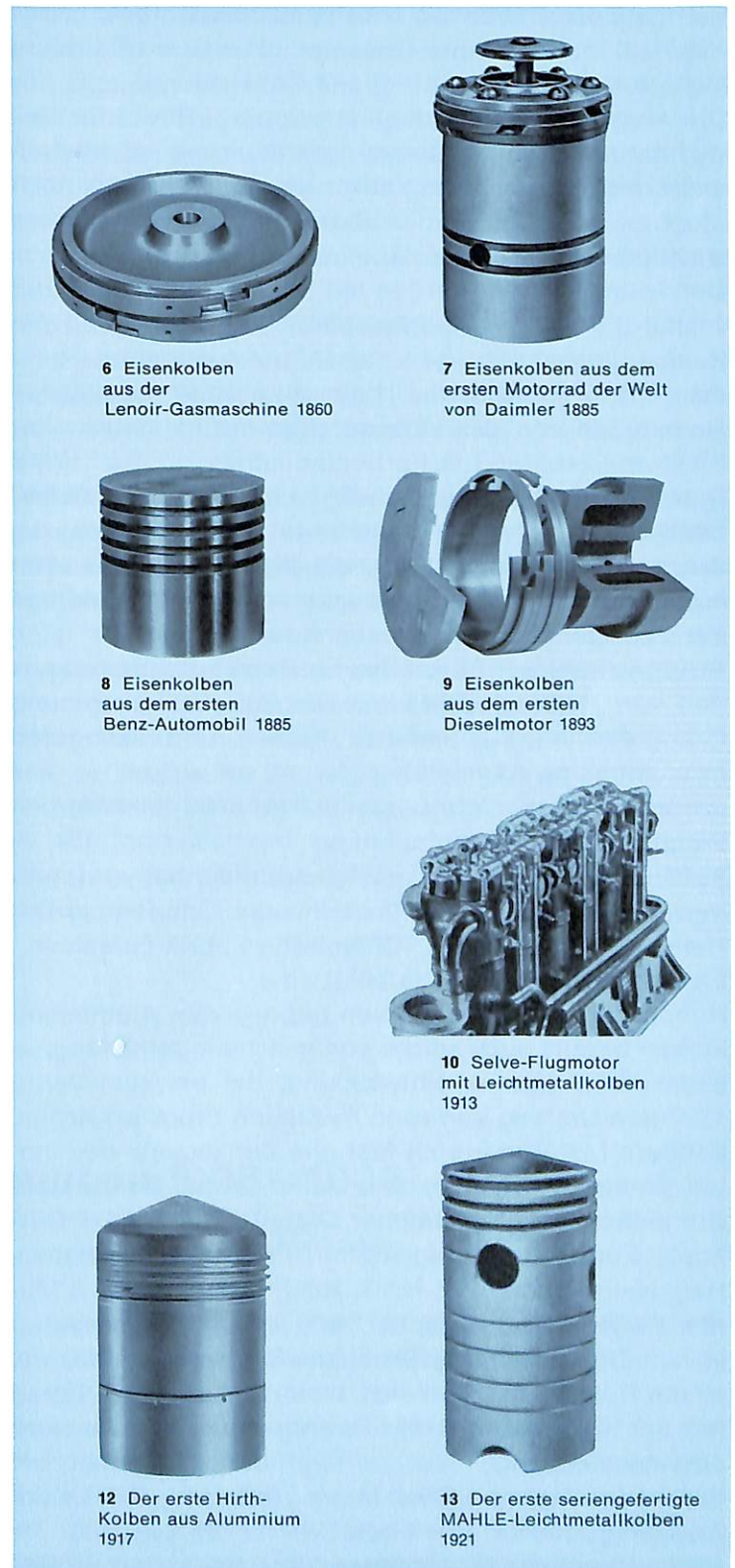
Im In- und Ausland werden die Vorteile von Leichtmetallkolben – geringeres Gewicht und bessere Wärmeleitfähigkeit – in zunehmendem Maße erkannt. Man sieht auch, daß Leichtmetallkolben entgegen der ursprünglichen Befürchtung bei hohen Verbrennungstemperaturen nicht schmelzen.

**1920** Den englischen Rolls-Royce-Werken wird ein Patent für Leichtmetall-Schlitzmantelkolben »gegen das gemeinhin bekannte Schlagen des Kolbens« erteilt.

Hermann Mahle tritt in den »Versuchsbau Hellmuth Hirth« ein.

**In der Keimzelle der heutigen MAHLE-Komm.-Ges. entsteht der erste seriengefertigte Leichtmetallkolben des Kontinents.**

**1921** Das Ergebnis des vom Reichsverkehrsministe-



6 Eisenkolben aus der Lenoir-Gasmaschine 1860

7 Eisenkolben aus dem ersten Motorrad der Welt von Daimler 1885

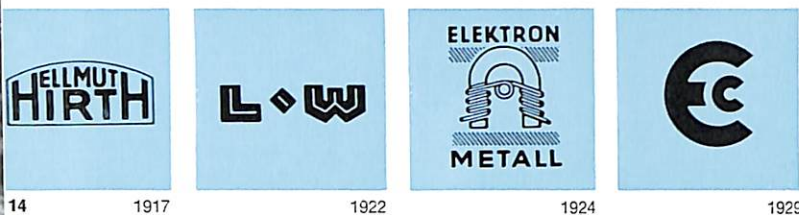
8 Eisenkolben aus dem ersten Benz-Automobil 1885

9 Eisenkolben aus dem ersten Dieselmotor 1893

10 Selve-Flugmotor mit Leichtmetallkolben 1913

12 Der erste Hirth-Kolben aus Aluminium 1917

13 Der erste seriengefertigte MAHLE-Leichtmetallkolben 1921



rium ausgeschriebenen »Kolbenwettbewerbs« bringt Klarheit in die bisher zusammenhanglos und ohne sichere Grundlagen betriebene Entwicklung.

Die Ausschreibung enthielt Bewertungsziffern für Gewichtsverminderung, Leistungssteigerung, Kraftstoffersparnis und weitere Verbesserungen, jedoch noch nicht für Lebensdauer, Geräuschlosigkeit und andere wichtige Erfordernisse der Praxis.

Der 1. und 4. Preis werden mit Magnesiumkolben, der 2. und 3. Preis mit Aluminiumkolben (vorwiegend mit Kupfer legiert) errungen. Die Aluminiumkolben stammen vom »Versuchsbau Hellmuth Hirth«, die Magnesiumkolben von der »Chemischen Fabrik Griesheim-Elektron« (später I. G. Farbenindustrie).

**Durch die Beteiligung der »Chemischen Fabrik Griesheim-Elektron« am »Versuchsbau Hellmuth Hirth« im Jahre 1922 stehen letzterem die Erfahrungen aus allen 4 preisgekrönten Entwicklungen als Arbeitsgrundlage zur Verfügung.**

Schon in dieser Frühzeit des Leichtmetallkolbens werden von Hellmuth Hirth ein aus Aluminiumkopf und Graugußschaft kombinierter Kolben und auch eine siliziumhaltige Aluminiumlegierung entwickelt.

Die ersten Serienlieferungen von Aluminiumkolben an Wanderer (Chemnitz) laufen an.

**1922** Der »Versuchsbau Hellmuth Hirth« wird umgewandelt in die »Leichtmetallwerke GmbH«, an der Hellmuth Hirth und die »Chemische Fabrik Griesheim-Elektron« je mit 50% beteiligt sind.

Neben Serienlieferungen von gegossenen Aluminiumkolben bereits auch solche von geschmiedeten Magnesiumkolben eigener Entwicklung, die bis zum Jahre 1927 den Umfang von rund 1/2 Million Stück erreichen. Größere Lieferungen an fast alle der damals bekannten Automobilfabriken wie Adler, Aga, Benz, Bob, Brennabor, Büssing, Daimler, Diabolo, Dinos, Dixi, Dürkopp, Ego, Elite, Fafag, Fafnir, Freia, Grade, Hansa, Hag, Heim, Koco, Ley, NAG, NSU, Presto, Peter & Moritz, Pluto, Rabag-Bugatti, Steiger, Turbo, Wanderer. In den USA macht Nelson seine ersten Versuche mit einem Kolben, bei dem sich, bewirkt durch Gabelstreifen, der Kolbenschaft um so weniger ausdehnt, je mehr dies der Kopf tut.

Eintritt von Dipl.-Ing. Ernst Mahle als technischer Leiter. Die Belegschaftsstärke überschreitet die Zahl 100.

**1923 Ermutigende Anfangserfolge bei vielen großen**

**und kleinen Rennen und Geländeprüfungen in ganz Europa:**

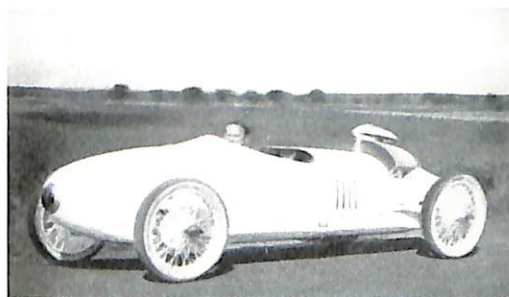
Ascari gewinnt in Monza auf Alfa-Romeo den »Großen Preis von Europa« mit MAHLE-Kolben. Auch im »Targa-Florio-Rennen« siegen Alfa-Romeo und Steyr mit MAHLE-Kolben.

Benz entwickelt den Tropfenwagen mit Heckmotor und MAHLE-Leichtmetallkolben.

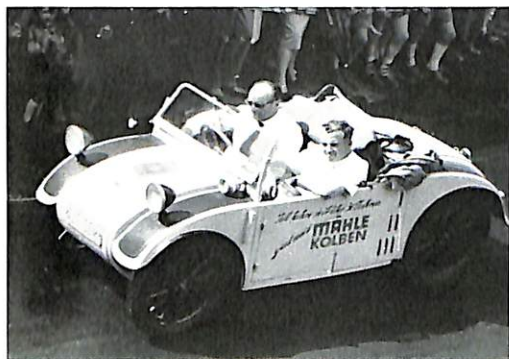
**1924** Rieken fährt auf 10/50 PS NAG mit MAHLE-Leichtmetallkolben in Monza Weltrekord: 24 Stunden mit 123 km/h Durchschnitt.

Rennerfolge des HHUZ (Hellmuth-Hirth-U-Zylinder)-Motorrads 125 ccm/7000 U/min/7 PS mit MAHLE-Kolben.

Im »Versuchsbau Hellmuth Hirth« entsteht die »Kreissäge«, der hochtourige (bis zu 7500 U/min) 250 ccm Doppelkolben-Zweitaktmotor. Sieger u. a. im »Großen



16 Benz-Tropfenwagen mit Heckmotor

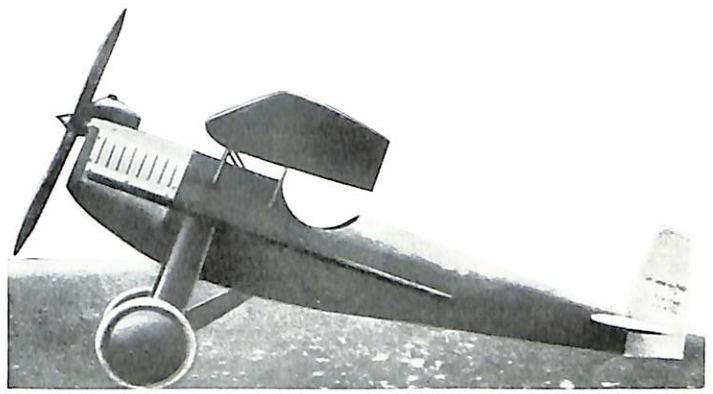


17 Hanomag 500 ccm mit geschmiedeten MAHLE-Kolben

Die Neueste Technische Errungenschaft am CHRYSLER

**INVAR Strut Kolben**

18 Chrysler-Wagen 14/70 PS mit den neuen Nelson-Bohnalite-Kolben



19 Elektronmetall-Flugzeug »Spatz« mit HHUZ-Motor, Räder aus Magnesiumblech

Preis von Deutschland« mit 180 km/h, ausgerüstet mit MAHLE-Leichtmetallkolben mit dünner eiserner Führungsmanschette.

Umwandlung der Firma in »Elektronmetall GmbH«.

**1925** Hanomag beginnt mit dem Bau des bekannten kleinen 1-Zylinder-500-ccm-Wagens von ungewöhnlicher Formgebung, aber großer Leistung und Wirtschaftlichkeit zu erschwinglichem Preis, serienmäßig mit geschmiedeten Leichtmetallkolben ausgerüstet.

Büssing, Daimler-Benz Gaggenau, MAN Augsburg und Nürnberg, Saurer Arbon u. a. gehen serienmäßig auf MAHLE-Leichtmetallkolben über.

Aufbau eines Motorenprüfstands zur Durchführung von Temperaturversuchen an Kolben und Entwicklung einer Reibungsprüfmaschine für Kolbenwerkstoffe.

**Neue Erzeugnisse werden entwickelt:**

**Filter** für Luft – später auch für Schmieröl und Kraftstoff – zur Verbesserung der Betriebsbedingungen des Kolbens. Beginn der Versuche mit Magnesium als Werkstoff für **Druckguß**.

Beginn der Versuche mit gegossenen **Flugzeugrädern** aus Magnesium. In Böblingen bei Stuttgart startet der selbstgebaute »Spatz« (Elektronmetall-Flugzeug mit HHUZ-Motor) mit Rädern aus Magnesiumblech.

**1926** Schwere Krise in der Fahrzeugindustrie.

»Chemische Fabrik Griesheim-Elektron« geht in der I. G. Farbenindustrie auf.

Der durch viele technische Neuerungen besonders beachtete 14/70 PS Chrysler-Wagen besitzt Nelson-Bohnalite-Leichtmetallkolben mit Invarstreifen zur Regelung der Ausdehnung mit dem Ziel niedrigen Laufspiels bei allen Betriebsbedingungen.

Starkes Vordringen der von den USA eingeführten Kraftwagen mit geschlossenen Aufbauten und sehr ruhigen Motoren gegenüber der deutschen, mehr sportlich eingestellten Baurichtung. **Als Folgeerscheinung konstruktiver Wandel in Deutschland: gute Maschinenleistung und Wirtschaftlichkeit genügen nicht mehr, lange Lebensdauer und Geräuschlosigkeit werden zusätzlich gefordert.** Mit Hilfe zahlreicher Sonderbauarten – Schlitzmantelkolben, Kolben mit Profilringen, Kolben mit eiserner Führungsmanschette und Kolben mit Leichtmetallkopf und Graugußschaft (zum Beispiel Sonderkonstruktion von zwei lose zusammengesteckten Teilen) – sucht man die Aufgabe der Zeit zu meistern.

**1927** Übernahme der Lizenz für die Herstellung des Nelson-Bohnalite-Kolbens in Deutschland auf Initiative von Dipl.-Ing. Ernst Mahle. Der ursprünglichen Kreuzkopfbauart folgt die Schmalplattenbauart.

Als eine der ersten Firmen in Deutschland führt MAHLE Widia-Schneidemetall in größerem Umfang zur Bearbeitung von Aluminium-Silizium-Kolbenlegierungen, speziell auch der übereutektischen mit mehr als 20% Si-Gehalt ein.

MAHLE-Kolben in MAN-Diesel-Triebwagen der Holländischen Eisenbahn. Geschmiedete Magnesiumkolben absolvieren erfolgreich die Musterprüfung der »Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt« im 6-Zylinder-BMW IV.

**Die für den Kolbenbau grundlegenden Materialbedingungen werden in Arbeiten auf dem MAHLE-Prüffeld erforscht und die gewonnenen Erkenntnisse laufend bei der Entwicklung neuer Materialien verwertet, darunter der für die Lebensdauer von Kolben entscheidende Verschleißwert. Erweiterung des Werkstoffprogramms auf alle Leichtmetall-Legierungen.**

Hellmuth Hirth scheidet aus der Elektronmetall GmbH aus, verkauft seine Anteile an die I. G. Farbenindustrie und gründet kurz darauf die »Hirth Motoren GmbH.« in Stuttgart-Zuffenhausen, um sich seinem alten Wunsch, der Herstellung von Flugmotoren, widmen zu können.

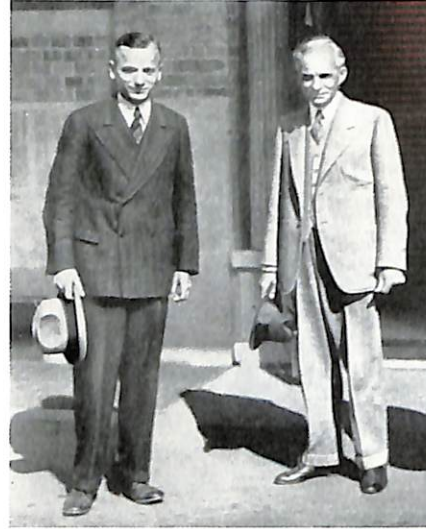
## Aufbau 1928 – 1932

**Der zweite Abschnitt der Werksgeschichte führt von der selbständigen Geschäftsführung zum selbständigen Unternehmer.**

Schwere Jahre stehen auch jetzt noch bevor. Zu den technischen Schwierigkeiten bei der gleichzeitigen Entwicklung von drei jungen Fertigungsgebieten – Filter, Druckguß und Flugzeugräder – kommen die wirtschaftlichen Sorgen. Doch wachsendes Fachwissen auf



20 Erstes  
bremsbares  
Magnesium-  
Flugzeugrad  
der Welt



21 Henry Ford  
besuchte 1930  
das MAHLE-Werk  
Hermann Mahle  
Henry Ford

allen Gebieten bei Ingenieuren, Meistern und Facharbeitern und vorsichtige kaufmännische Führung lassen auch diese schweren Jahre überwinden.

**1928** Daimler-Benz Untertürkheim geht von Grauguß auf MAHLE-Leichtmetallkolben über.

Einführung des Diamantbohrens der Bolzenlöcher.

Dipl.-Ing. Ernst Mahle in den USA.

Neue Kolbenring-Prüfverfahren.

Weiterentwicklung von geschmiedeten Kolben aus Aluminium-Kupfer- und Aluminium-Silizium-Legierungen. Neuaufbau der Reparaturkolben-Verkaufsorganisation mit rund 20 Kolbenlagern in Deutschland.

Erstes bremsbares Magnesium-Flugzeugrad der Welt mit mechanischer Bremse entwickelt.

Neues Patent für einen kombinierten Magnesiumkolben mit Eisenschaft, ebenso leicht wie ein reiner Aluminiumkolben.

Einführung der Aluminium-Legierung »Y«, gegossen und geschmiedet.

Ausbreitung des Nelson-Schmalstreifenkolbens auch für größere Abmessungen in Lastwagen.

Sehr leichte, ruhig laufende Magnesiumkolben mit Invarstahleinlagen für Sportwagen.

**1929** Umstellung der Fabrikation auf Fließarbeit. Materialprüfung neu aufgebaut: Prüfung von Kolben unter den Betriebsverhältnissen Druck und Temperatur.

Einführung der Zweimaschinenbedienung mit dem Erfolg einer bedeutenden Senkung der Arbeitszeiten. Beginn der Umstellung der Werkzeugmaschinen auf Einzelantrieb in allen Abteilungen, Abschluß 1931. Eisenkolben für Spezialzwecke (Traktoren, Luftkompressoren und ältere Wagentypen) werden aufgenommen.

Hermann Mahle in den USA.

Der 1 000 000ste Kolben wird geliefert.

Kolben normaler Querschnitte halten die unter deutschen Verhältnissen gesteigerte Beanspruchung vielfach nicht mehr aus. Bauarten, die in den USA gehen, neigen hier zum Brechen. Querschnittgestaltung der Abstützung nach neuen Gesichtspunkten. Gewinn und Übernahme neuer Erkenntnisse über Nachwachsen und Vergüten von Aluminiumlegierungen.

Weitgehende Umstellung der Lastwagenindustrie auf schnelllaufende kompressorlose Dieselmotoren mit den verschiedensten Arbeits- und Verbrennungsverfahren.

Bei der Entwicklung von Dieselmotoren herrscht anfänglich die Meinung, Leichtmetallkolben mit ihrer guten Wärmeleitfähigkeit und niedrigen Temperatur seien für die Erreichung der Selbstzündung ungeeignet, hohe Drehzahlen unmöglich und das niedrige Gewicht also belanglos. Gerade das Gegenteil tritt ein. Leichtmetallkolben setzen sich in größerem Umfang durch. Es gibt aber auch sehr hohe Spitzendrücke und Spitzentemperaturen, welche den Kolben dem Materialschmelzpunkt näher bringen als irgend ein anderes Teil im Maschinenbau.

Fensterlose Vierstreifenkolben ohne Schlitz auf der Lauffläche zur Beherrschung hoher Seitendrücke.

**1930** Breitplattenkolben auch aus Aluminium-Silizium-Legierungen.

Grundlegende Aufsätze von Dipl.-Ing. Ernst Mahle über Kolbenwerkstoffprüfung, Kolbenspiele, Kolbenbolzentoleranzen u. a.

Henry Ford besucht das MAHLE-Werk in Bad Cannstatt.

**1931** Opel geht von Grauguß auf Leichtmetall-Streifenkolben über. Damit ist innerhalb von 10 Jahren der Übergang vom Grauguß zum Leichtmetallkolben im Personen- und Nutzwagenbau abgeschlossen. Zunehmende Wirtschaftskrise in der gesamten Fahrzeugindustrie.

Mercedes-Benz »SS« gewinnt die »Mille Miglia« mit geschmiedeten MAHLE-Spezial-Rennkolben.

Oval- und Formschleifmaschinen für Kolben werden entwickelt.

Breitplattenkolben: Anwendung des von Nelson gefundenen Prinzips der ausdehnungsbeeinflussenden Wirkung der Invarstahlplatte jetzt auf die **ganze** Länge des Kolbenschaftes.

Ringträgerkolben (DRP 578 889 v. 13. 5. 31): Die Kolbenringe werden in Ni-Resist<sup>®</sup> oder Berylliumbronze-Träger eingebettet zum Schutz der Ringnuten gegen Ausschlagen und zum Schutz der Ringe vor der sehr hohen Betriebstemperatur.

Erste Versuche mit eloxiertem Kolbenschaft.

Kolben für Zeppelin-Diesel-Luftschiffmotor 1000 PS werden entwickelt.

Geschlossene Schirmringe, lose und fest, werden zwecks besserer Abdichtwirkung eingegossen.

Trotz starker Wirtschaftskrise in Deutschland von 1929–1932 gleichmäßig hohe Produktion von jährlich rund 500 000 Kolben.



## Die große Motorisierung beginnt

**1932** Entwicklung eines leichten, streifenlosen Kolbens mit geringem Laufspiel, der Röhren (MEC)-Bauart.

Hermann und Ernst Mahle erwerben die bisher der I. G.-Farbenindustrie gehörenden Anteile an der Elektronmetall GmbH.

Einrichtung eines »Kolben-Museums«.

**1933** Der »Fliegende Hamburger«, ausgerüstet mit Maybach-Motoren und MAHLE-Kolben leitet eine neue Ära im Verkehrswesen ein (Berlin–Hamburg in 130 Minuten = 160 km/h).

Entwicklung und Lieferung von gegossenen und geschmiedeten Leichtmetallkolben in Aluminium-Siliziumlegierung für Flugmotoren.

»MAHLE 124«, die erste gieß- und schmiedbare eutektische Al-Si-Legierung mit Wärmeleitahlen und Festigkeitswerten wie die Legierungen der Al-Cu-Gruppe, jedoch mit niedrigerem Ausdehnungskoeffizienten und höherem Verschleißwert setzt sich durch. Dank den jahrelangen Erfahrungen im Pressen und Schmieden von Magnesium und »Y« gelingen leichte, bei gedrängter Bauart sehr feste Kolben für höchste Beanspruchungen.

**Mit neuartigen Aufbauten und Konstruktionsverbesserungen, mit kleineren, wirtschaftlichen und trotzdem starken Motoren dringen die deutschen Wagen auch im Ausland gegen die amerikanische Baurichtung durch und bringen dem deutschen Kraftfahrzeugbau wieder Achtung und Absatzmöglichkeiten.**

Die Produktion steigt bis 1936 auf jährlich rund 2 Millionen Kolben.

**1934** Rund 10 000 Mercedes-Benz-Diesel, das sind über die Hälfte aller Fahrzeug-Diesel der Welt, sind mit MAHLE-Kolben ausgerüstet. Weltweite Siegesreihe der neuen Mercedes-Benz- und Auto-Union-Rennwagen mit MAHLE-Kolben.

**1935** Autothermik-Kolben mit Eisen- statt Invarstreifen. Daimler-Benz entwickelt einen Personenwagendiesel.

**22** Ringträgerkolben mit Ni-Resist-Ringträger 1931



**23** Autothermik-Kolben mit Eisenstreifen 1935



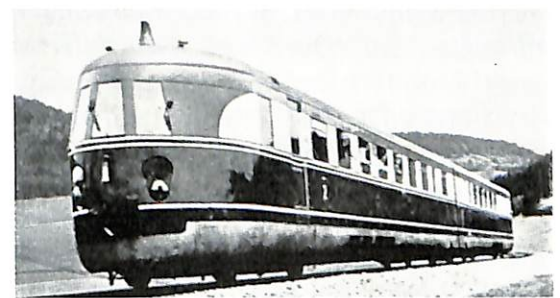
**24** Der erste formgedrehte Kolben 1935



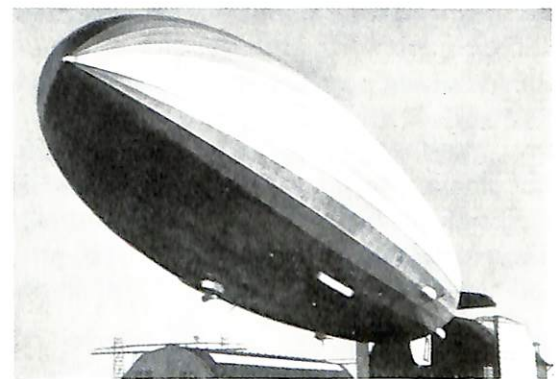
**25** Mercedes-Benz »SS« Sieger der Mille Miglia 1931



**26** Triebwagen mit Maybachmotoren und MAHLE-Kolben, der »Fliegende Hamburger«



**27** Das Luftschiff »Hindenburg« überquerte 34mal den Nord- und Südatlantik



Die Kolben werden den Erfordernissen des Dieseltreibetriebes mit seinen fast doppelt so hohen Drücken angepaßt.

Die Mitarbeiterzahl steigt auf über 1000.

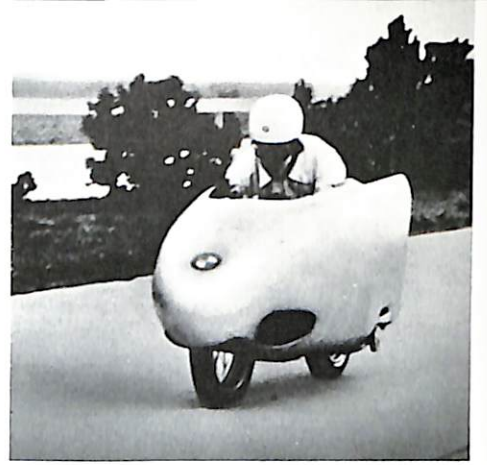
Die ersten Teilstrecken der neuen Autobahnen werden eröffnet. Sie verlangen Dauerleistungen bei höchster Geschwindigkeit – eine neue Aufgabe für den Kolbenbau.

Inbetriebnahme des Zweigwerks Berlin-Spandau.

Die ersten ballig-oval formgedrehten Kolben zum **möglichst idealen** Ausgleich von Kolben- und Zylinderdehnung.

**1936** Die Versuchsabteilung wird bedeutend erweitert. Das »Stannalverfahren« zum Schutz der Kolbensäfte bei Kalt- und Schnellstart wird eingeführt.

Das Luftschiff »Hindenburg« überquert mit Mercedes-Benz-Dieselmotoren und MAHLE-Kolben 34mal den



29 Ernst Henne auf BMW 500 ccm-Kompressor bei seiner Rekordfahrt

Nord- und Südatlantik und legt im regelmäßigen Ozeandienst 308 421 Kilometer zurück.

Die seit 1935 in größerem Umfang angestellten Versuche mit formgedrehten Kolben sind soweit fortgeschritten, daß wir 1936 als erstes Werk in immer weiterem Ausmaß zu Serienlieferungen ovaler, ballig-ovaler, doppelt-ovaler und steigend-ovaler Kolben gelangen.

Diesel-Flugmotoren werden vielfach im Ausland entwickelt, setzen sich aber nicht durch. Deutsche Junkers-Diesel-Motoren legten schon 1935 im regelmäßigen Streckendienst über 1 Million Kilometer zurück, Dornier-Flugboote überqueren damit 8mal den Nordatlantik.

**1937** Die übereutektische Aluminium-Siliziumlegierung »MAHLE 138« (gieß- und preßbar) wird nach mehrjährigen Versuchen im Serienbau verwendet.

Bau von Werkzeugmaschinen und elektrischen Öfen nach eigenen Konstruktionen.

Umwandlung der Elektronmetall GmbH. in »MAHLE-Komm.-Ges.«.

Drei Weltbestleistungen mit MAHLE-Kolben: Bernd Rosemeyer erreicht auf Auto-Union-Rennwagen 409 km/h; die höchste je von einem Landflugzeug erreichte Geschwindigkeit schafft Dr. Wurster auf »ME 109« mit Daimler-Benz-Motor; Ernst Henne holt auf BMW-

500-ccm-Kompressor den absoluten Geschwindigkeitsrekord für Motorräder mit 280 km/h wieder nach Deutschland zurück.

Immer größere Leistungen werden von den Motoren verlangt: die Literleistung steigt auf über 200 PS. Die BMW-Rekordmaschine von Henne leistet bei 500 ccm über 100 PS, die Mercedes-Benz-1,5-Liter-Rennwagen mit Kompressor über 300 PS.

Der 10 000 000ste MAHLE-Kolben verläßt die laufende Fabrikation.

Erstmaliger Einsatz von Dauerprüfmaschinen (Pulser) für die Prüfung fertiger Kolben unter betriebsähnlichen Bedingungen.

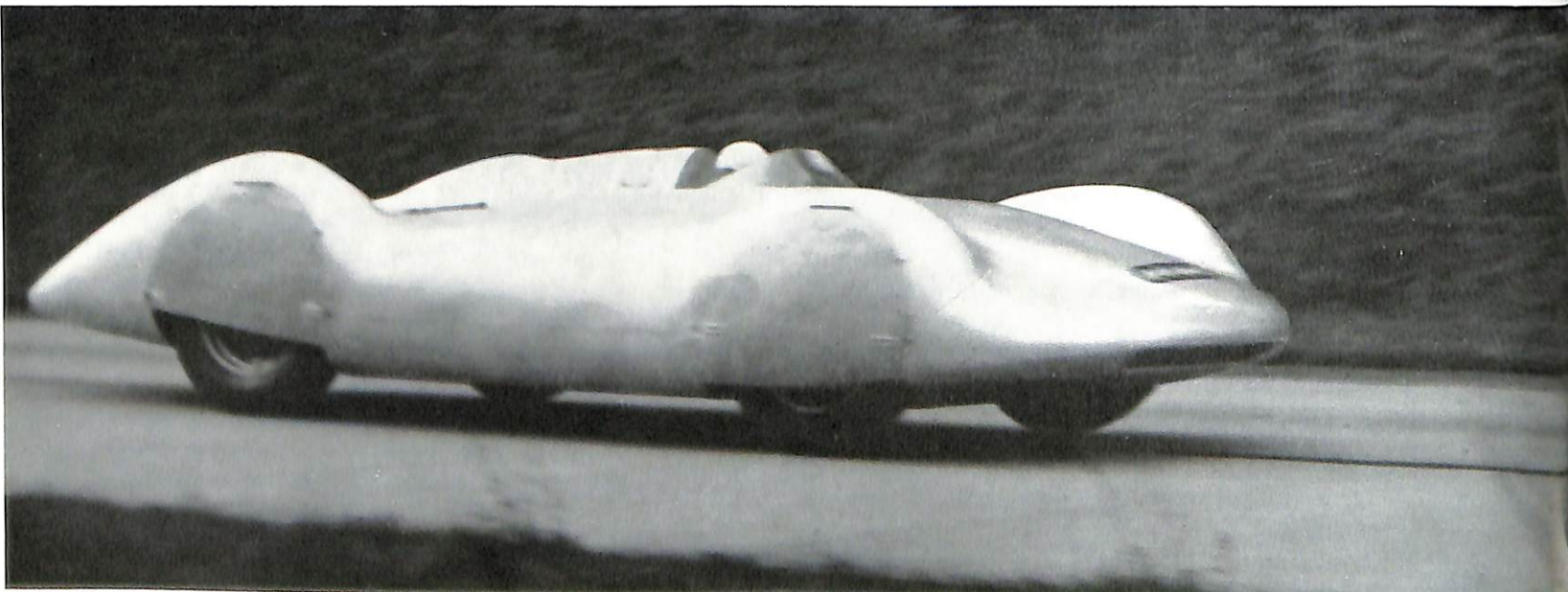
**1938** Caracciola stellt mit 437 km/h auf Mercedes-Benz mit MAHLE-Kolben eine neue Weltbestleistung auf und erreicht die höchste je auf einer Straße gefahrene Geschwindigkeit.

**1939** Schnelltriebwagen mit Maybach-Motoren und MAHLE-Kolben erreichen 215 km/h.

#### **Krieg und Zusammenbruch 1940–1945**

Die MAHLE-Betriebe haben in der Kriegs- und Nachkriegszeit über die Hälfte ihrer Substanz durch Bombenschäden, Verluste von Verlagerungsbetrieben, Demontagen usw. eingebüßt. Das Produkt Flugzeugräder ging verloren, ebenso die gut eingerichteten Werke Berlin und Wien mit je über 1000 Betriebsangehörigen.

28 Bernd Rosemeyer auf Auto-Union-Rennwagen



## Wiederaufbau und neue Fortschritte

Schon wenige Jahre nach Kriegsende ist die Erzeugung auf den verbliebenen Fertigungsgebieten derart gestiegen, daß die ehemaligen Marktanteile wieder erreicht sind.

Die maschinellen Einrichtungen werden wieder auf höchste Leistungsfähigkeit gebracht und wichtige Entwicklungsarbeiten eingeleitet, die bald zu beachtlichen Erfolgen führen.

Der direkte Export von Kolben wird wieder aufgenommen. In allen Ländern Europas und auch in Übersee hat der Name MAHLE seinen guten alten Klang behalten.

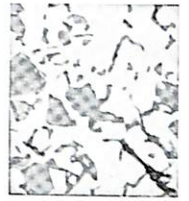
**1949** Der Kolbenbau in Rottweil a. N., ursprünglich eine kleine Verlagerungsstätte aus der Kriegszeit, wird zu einem modernen Werk ausgebaut.

Erstmals serienmäßig gerollte Bolzenlöcher.

**1950** Nachdem die schwierige Aufgabe der Verchromung von Leichtmetallteilen betriebssicher gelöst werden konnte, wird auf dem Gebiet des Leichtmetallzylinders eine 25jährige Entwicklungsarbeit von den ersten praktischen Betriebserfolgen gekrönt. **Zum vierten Mal – wie bei Leichtmetallkolben, Magnesium-Druckguß und Magnesium-Flugzeugrädern – bringt MAHLE eine wichtige technische Neuerung als erstes Werk der Welt zur Serienreife: MAHLE-Cromal-Zylinder für den Motorenbau.**



**31** Der erste serienmäßige Aluminium-Chrom-Zylinder der Welt im Fahrzeugbau 1950



**32** »MAHLE 244«, die erste Kolbenlegierung mit 25% Siliziumgehalt

Mit der übereutektischen Legierung »MAHLE 244«, der ersten Kolbenlegierung mit 25% Siliziumgehalt, gelingt eine Aluminium-Legierung von höchster Verschleißbeständigkeit und geringster Wärmeausdehnung, speziell für Zweitaktmotoren.

Hermann Mahle Ehrensenator der Technischen Hochschule Stuttgart.

Beginn der ersten Kolbenherstellung in Übersee nach MAHLE-Lizenz (Brasilien).

**1951** Die Entwicklung von Sondergußisenkolben für thermisch hochbeanspruchte Zweitakt-Dieselmotoren ist abgeschlossen.

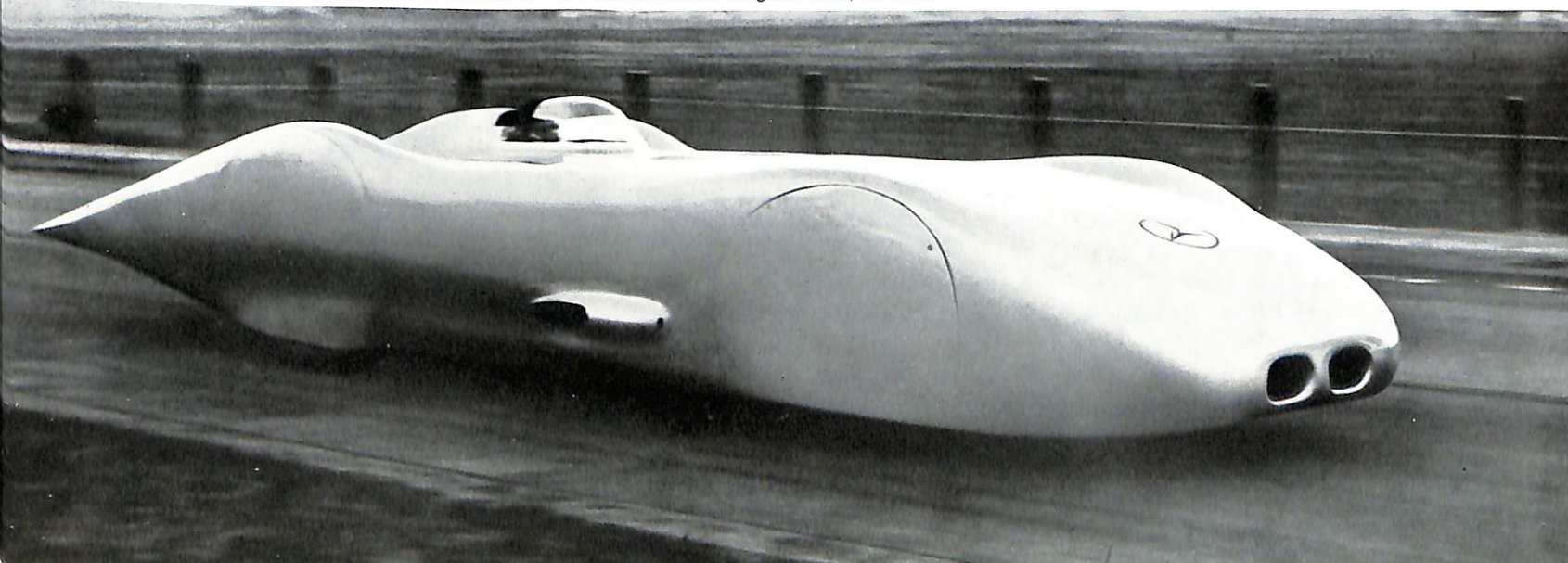
Die zum Kolbenbau benötigten Werkstofflegierungen werden ab jetzt in eigener Schmelzerei aus den Legierungskomponenten hergestellt.

Der Vollschaft-Autothermik-Kolben, eine Bauart mit fensterlosen Führungsflächen, eine Weiterentwicklung der bewährten Fenster-Autothermik-Ausführung, setzt sich erfolgreich durch.

Erste Serienlieferungen von verchromten Leichtmetallzylindern für den Fahrzeugmotorenbau. Sie bewähren sich nicht nur in Zweiradfahrzeugen, sondern auch in hochbeanspruchten Rennmotoren.

Absoluter Geschwindigkeitsweltrekord für Motorräder (290 km/h), errungen von Wilhelm Herz auf NSU 500 ccm mit MAHLE-Kolben.

<sup>30</sup> Caracciola auf Mercedes-Benz, dem bis heute schnellsten Straßenfahrzeug der Welt, 437 km/h





33 W. Herz auf NSU 500 ccm fährt Geschwindigkeitsweltrekord

**1953** Entwicklung von Kolbenbaustoffen für höchstbeanspruchte Motoren aus gesinterten Aluminiumbaustoffen (MAHLE-Sintal-Legierungen).

Fortschritte in der Automatisierung der Kolbenfertigung durch Verkettungssysteme eigener Entwicklung.

Serienlieferung von Kolben mit metallisch gebundenen Ringträgern nach dem Al-Fin-Verfahren.

**1954** Mit dem Isostatik-Kolben gelingt erstmals eine Kolbenbauart mit rippenfreier Ringzonenwand.

In allen Stadien der Herstellung – in den Gießereien und Pressereien, den Bearbeitungswerkstätten, den Abteilungen für Oberflächenbehandlung und den Kontrollen – wird die Mechanisierung mit dem Ziel weitgehender Automatisierung vorangetrieben.

**1955** Wieder ein neuer Entwicklungserfolg: der Autothermatik-Kolben – der erste Regelstreifenkolben ohne Trennschlitze zwischen Boden und Schaft.

Weitgehende Umstellung der Kolbenrohherstellung auf Gießmaschinen.

Serien-Einführung geschmiedeter Kolben aus der über-eutektischen Legierung »MAHLE 138«.

Mercedes-Benz gewinnt die Sportwagen- und Rennwagen-Weltmeisterschaft mit MAHLE-Kolben.

**1956** Ein zweites modernes Kolbenwerk mit Gießerei, Bearbeitung und Kontrolle wird in nächster Nachbarschaft des Stammwerks in Bad Cannstatt speziell für große und größte Produktionsserien in Betrieb genommen.

Einrichtung einer modernen Graugießerei.

Herstellung von geschmiedeten Kolben auf selbstentwickelten Preßgespannen.

W. Herz auf NSU 500 ccm mit MAHLE-Kolben fährt neuen Geschwindigkeitsweltrekord für Motorräder (339 km/h).

Dipl.-Ing. Ernst Mahle Ehrendoktor der Technischen Hochschule Karlsruhe.

**1957** Die Fertigung von Densalguß, einem Spezial-Kokillenguß von hoher Präzision, Dichtheit und Festigkeit, läuft an.

Durch die Einführung des Stranggießens wird das Ausgangsmaterial für geschmiedete Kolben im eigenen Werk geschaffen.

Das MAHLE-Kolbenmuseum im Stammwerk Bad Cannstatt ist wieder eingerichtet: Tausende von Kolben aller Entwicklungsstufen des Verbrennungsmotors, in allen jemals erdachten Werkstoffen, Bauarten und Herstell-

ungsverfahren, aus allen Ländern der Erde, demonstrieren die Geschichte dieses wichtigen Motorteils. Erste Lieferung von Teilen für Kreiskolbenmotoren.

**1958** Bedeutende bauliche Erweiterungen des Stammwerks.

**1959** Seit Bestehen der Firma sind jetzt über 100 Millionen MAHLE-Kolben geliefert worden.

**1960** In Markgröningen bei Ludwigsburg wird ein neues Werk zur Herstellung von Kolben, Leichtmetall-Zylindern und Leichtmetallguß eingerichtet.

Die ersten einteilig geschmiedeten Kolben mit hochwirksamem Kühlsystem, speziell für Durchmesser über 150 mm.

Übernahme von Lizenzrechten für Sphäroguß.

In 9 Ländern der Erde: in Argentinien, Brasilien, Chile, England, Frankreich, Indien, Österreich, Spanien und Uruguay werden MAHLE-Kolben in Lizenz gebaut.

Für die zahlreichen Meß- und Prüfvorgänge am Ende des Fertigungsprozesses werden die Spezial-Meßstraßen weiter verbessert.

Das Niederdruck-Gießverfahren wird im Werk Markgröningen eingeführt.

**1961** Entwicklung neuartiger Kontrollautomaten.

**1962** Neue Ringträgerentwicklungen.

1,5 Millionen Aluminiumzylinder für Serienmotoren und hochbeanspruchte Rennmotoren wurden seit 1950 hergestellt.

**1963** Von 1921 bis 1963 wurden zusammen mit den Lizenznehmern über 150 Millionen MAHLE-Kolben geliefert.

Eine neue Kolbenbauart: der MAHLE-Armal-Kolben mit Ringträger und damit verbundener Muldenrandarmierung.

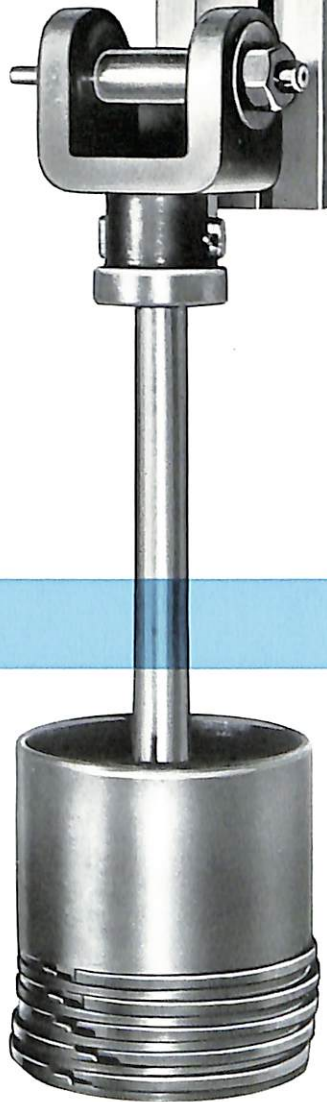


34 Kupplungsteil hergestellt im Densalgußverfahren



35 Der 100 000 000ste MAHLE-Kolben

# 100 Jahre Entwicklung von Kolben für Verbrennungskraftmaschinen



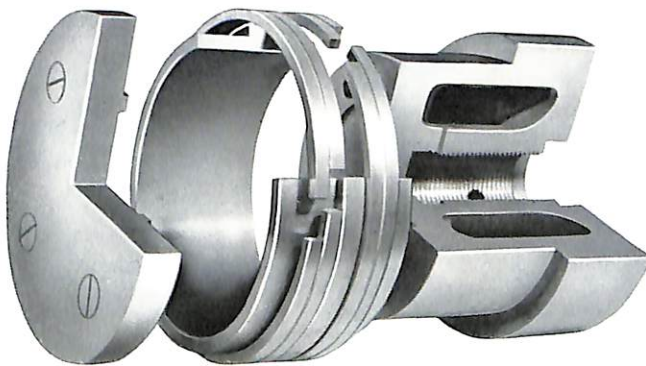
Eisenkolben aus  
der 1-PS-Gasmaschine  
von Jean I. E. Lenoir  
Baujahr 1860  
Durchmesser 195 mm  
Gewicht 5500 g



Eisenkolben aus dem  
ersten Motorrad der Welt  
von Gottlieb Daimler  
Baujahr 1885  
Durchmesser 58 mm  
Gewicht 450 g



Eisenkolben aus  
dem ersten Automobil  
von Carl Benz  
mit 1,7 PS-Motor  
Baujahr 1885  
Durchmesser 90 mm  
Gewicht 2200 g



Eisenkolben aus dem  
ersten, von Rudolf Diesel entwickelten  
Verbrennungsmotor »mit Selbstzündung«,  
dem nach ihm benannten Dieselmotor  
Leistung 20 PS bei 172 Umdrehungen  
Baujahr 1893  
Durchmesser 250 mm  
Gewicht 53 400 g



Der erste, vom Versuchsbau  
Hellmuth Hirth  
– heute MAHLE KG –  
für einen Flugmotor  
in Sandguß hergestellte  
Aluminiumkolben  
Baujahr 1917  
Durchmesser 70 mm  
Gewicht 600 g



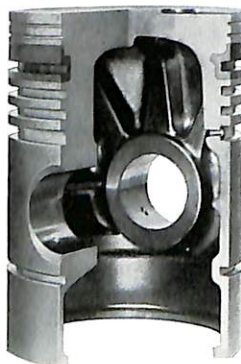
Der erste  
seriengefertigte MAHLE-  
Leichtmetallkolben  
Baujahr 1921  
Durchmesser 42 mm  
Gewicht 60 g



Der erste serienreife  
geschmiedete  
Leichtmetallkolben  
auf dem Kontinent  
von MAHLE hergestellt  
Baujahr 1921  
Durchmesser 79,5 mm  
Gewicht 370 g



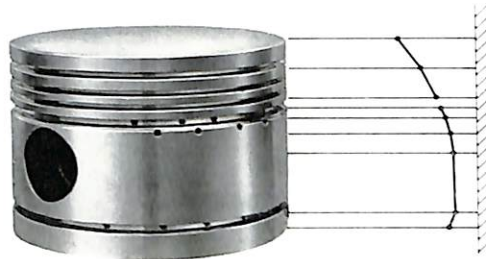
Der erste Leichtmetallkolben  
mit dehnungsregelnden  
Invarstreifen nach  
Nelson-Bohnalite-Patent  
von MAHLE in  
Deutschland eingeführt  
Baujahr 1927  
Durchmesser 76,20 mm  
Gewicht 490 g



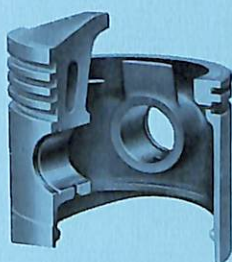
Der erste erfolgreiche  
Leichtmetallkolben  
mit Ringzonenschutz  
aus austenitischem Gußeisen  
nach MAHLE-Patent 578 889  
Baujahr 1931  
Durchmesser 110 mm  
Gewicht 1750 g



MAHLE-Kolben  
mit Ringträger  
und Bodenrandschutz  
aus austenitischem  
Sondergußeisen  
Baujahr 1932  
Durchmesser 110 mm  
Gewicht 1600 g



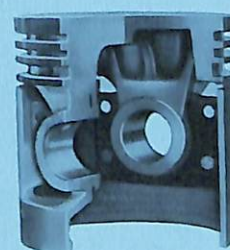
Der erste ballig-oval  
formgedrehte Kolben  
zum Ausgleich von  
Kolben- und  
Zylinderdehnung  
– eine besonders  
richtungweisende  
MAHLE-Entwicklung –  
Baujahr 1935  
Durchmesser 105 mm  
Gewicht 693 g



Elastischer, streifenloser  
Leichtmetallkolben  
mit geringem Laufspiel:  
MAHLE-Bauart »MEC«  
Baujahr 1932  
Durchmesser 71 mm  
Gewicht 260 g



MAHLE-Verbundgußkolben  
aus Al-Si-Legierung »MAHLE 124« mit  
eingegossener Bodenplatte  
aus Al-Cu-Legierung »Y«  
Baujahr 1935  
Durchmesser 100 mm  
Gewicht 1140 g



MAHLE-  
Autothermikstreifenkolben  
mit dehnungsregelnden  
Eisen- statt Invarstreifen  
Baujahr 1935  
Durchmesser 80 mm  
Gewicht 400 g



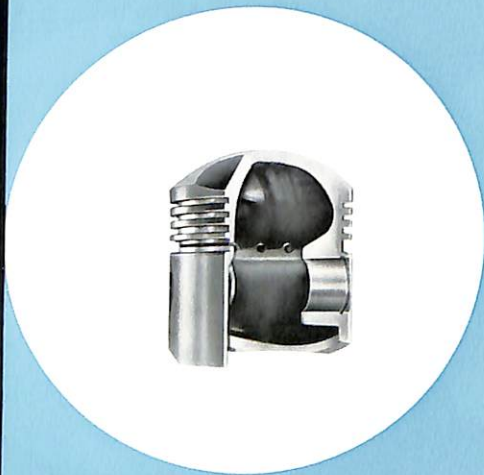
Extrem dünner  
und leichter  
MAHLE-Graphitstahl-Kolben  
Baujahr 1936  
Durchmesser 77,8 mm  
Gewicht 280 g



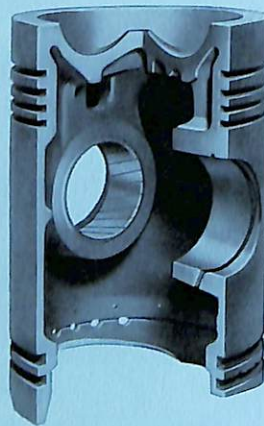
MAHLE-Schlitzmantelkolben  
Baujahr 1936  
Durchmesser 82,72 mm  
Gewicht 450 g



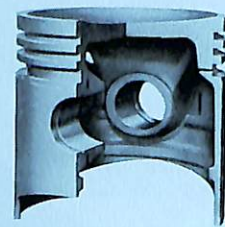
Gegossener  
MAHLE-Vollschafkolben  
für Zweitaktmotor  
aus der übereutektischen  
Al-Si-Speziallegierung  
»MAHLE 244«  
Baujahr 1950  
Durchmesser 71 mm  
Gewicht 300 g



Geschmiedeter  
Rennmotorkolben  
aus Legierung  
»MAHLE 124«  
mit hinterschmiedeter  
Innenpartie (DBP 816 780)  
Baujahr 1950  
Durchmesser 76 mm  
Gewicht 314 g

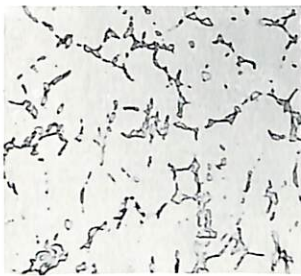


Kolben aus Sondergußeisen  
für Zweitakt-diesel  
Baujahr 1951  
Durchmesser 115 mm  
Gewicht 3675 g



Der erste  
Vollschaff-Autothermikkolben  
eine Bauart mit  
fensterlosen Führungsflächen  
Baujahr 1951  
Durchmesser 75 mm  
Gewicht 265 g





»MAHLE Y«  
die bewährte Aluminium-  
Kupfer-Kolbenlegierung  
entwickelt 1929

gegossen

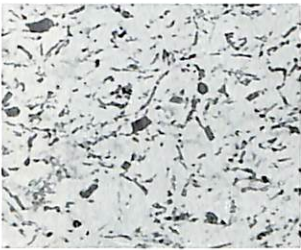


gepreßt

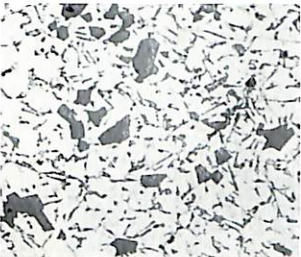


»MAHLE 124«  
die weltweit verbreitete  
gieß- und schiedbare  
eutektische Aluminium-  
Silizium-Kolbenlegierung  
entwickelt 1933

gegossen

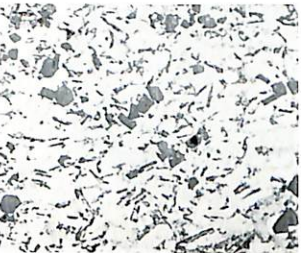


gepreßt

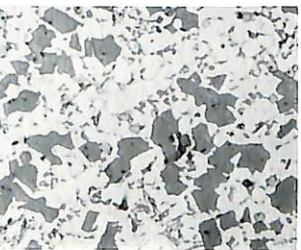


»MAHLE 138«  
die erfolgreiche  
gieß- und schiedbare  
übereutektische  
Aluminium-Kolbenlegierung  
mit 18 % Siliziumgehalt  
entwickelt 1937

gegossen



gepreßt



»MAHLE 244«  
die erste übereutektische  
Aluminium-Kolbenlegierung  
mit 25 % Siliziumgehalt  
entwickelt 1950

gegossen



Kolben für  
Triebwagen-Diesel  
mit eingegossener  
Kühlschlange  
Baujahr 1953  
Durchmesser 323.85 mm  
Gewicht 45 700 g



MAHLE-Sintalkolben  
aus MAHLE-Sintallegierung  
für Rennmotoren  
Baujahr 1953  
Durchmesser 53 mm  
Gewicht 136 g



MAHLE-Isostatik-Kolben  
mit rippenfreier Ringzonenwand  
Baujahr 1954  
Durchmesser 65 mm  
Gewicht 275 g



MAHLE-Autothermatikkolben  
der erste Regelstreifenkolben  
ohne Trennschlitze  
zwischen Kopf und Schaft  
Baujahr 1955  
Durchmesser 74 mm  
Gewicht 340 g



MAHLE-Autothermatikkolben  
mit geslipptem Schaft  
Baujahr 1955  
Durchmesser 74 mm  
Gewicht 295 g



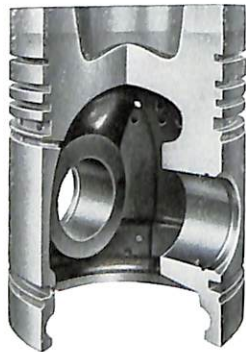
MAHLE-Ringträgerkolben  
mit eingegossener  
Kühlschlange  
für Triebwagendiesel  
Baujahr 1953  
Durchmesser 228,6 mm  
Gewicht 18 750 g



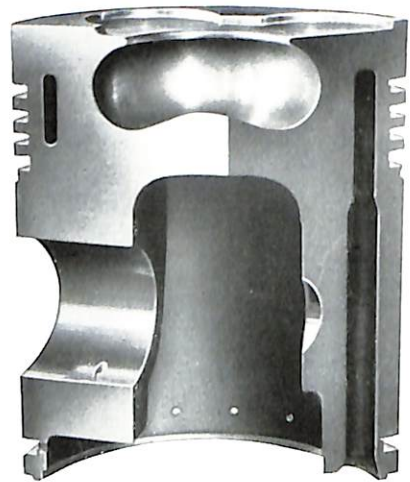
MAHLE-Großkolben  
mit Ringträger und  
eingegossener Kühlschlange  
für Großdieselmachine  
Baujahr 1958  
Durchmesser 400 mm  
Gewicht 112 500 g



Der 100millionste  
MAHLE-Kolben seit 1921  
Baujahr 1959



MAHLE-Verbundguß-Kolben  
für Dieselmotor  
aus Legierung »MAHLE 124«  
mit Reinaluminiumboden  
Baujahr 1958  
Durchmesser 127 mm  
Gewicht 2720 g



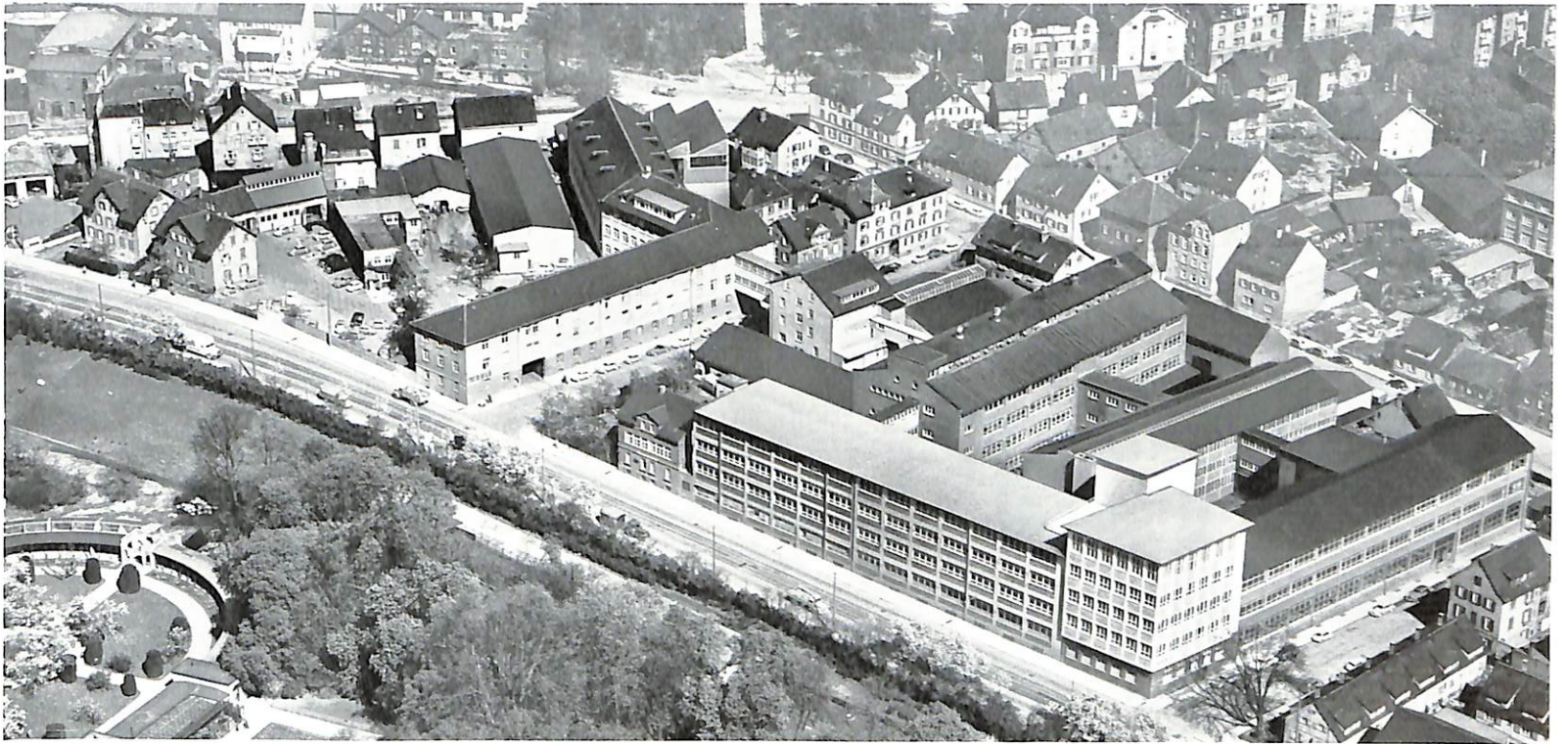
Erster einteilig  
geschmiedeter Kolben  
mit ölgekühlter Ringpartie  
für Triebwagendiesel  
Baujahr 1960  
Durchmesser 175 mm  
Gewicht 7200 g



MAHLE-Armalkolben  
mit Ringträger und  
angegossenem Muldenrandschutz  
Baujahr 1963  
Durchmesser 121 mm  
Gewicht 2400 g



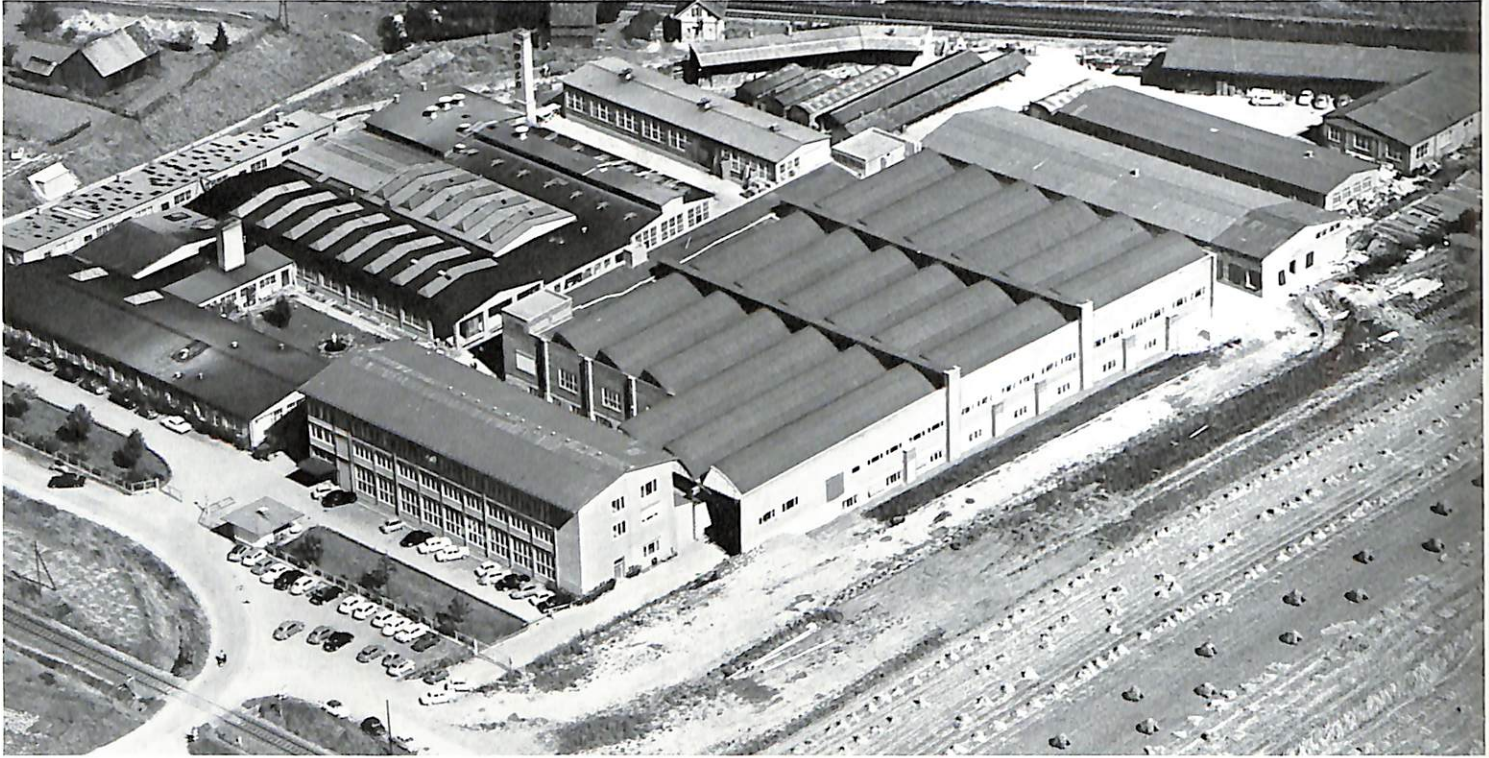
»Gebauter« Kolben  
geteilt mit Trennebene  
unter dem Kolbenboden  
Baujahr 1963  
Durchmesser 115 mm  
Gewicht 2900 g



36 Werk I Bad Cannstatt

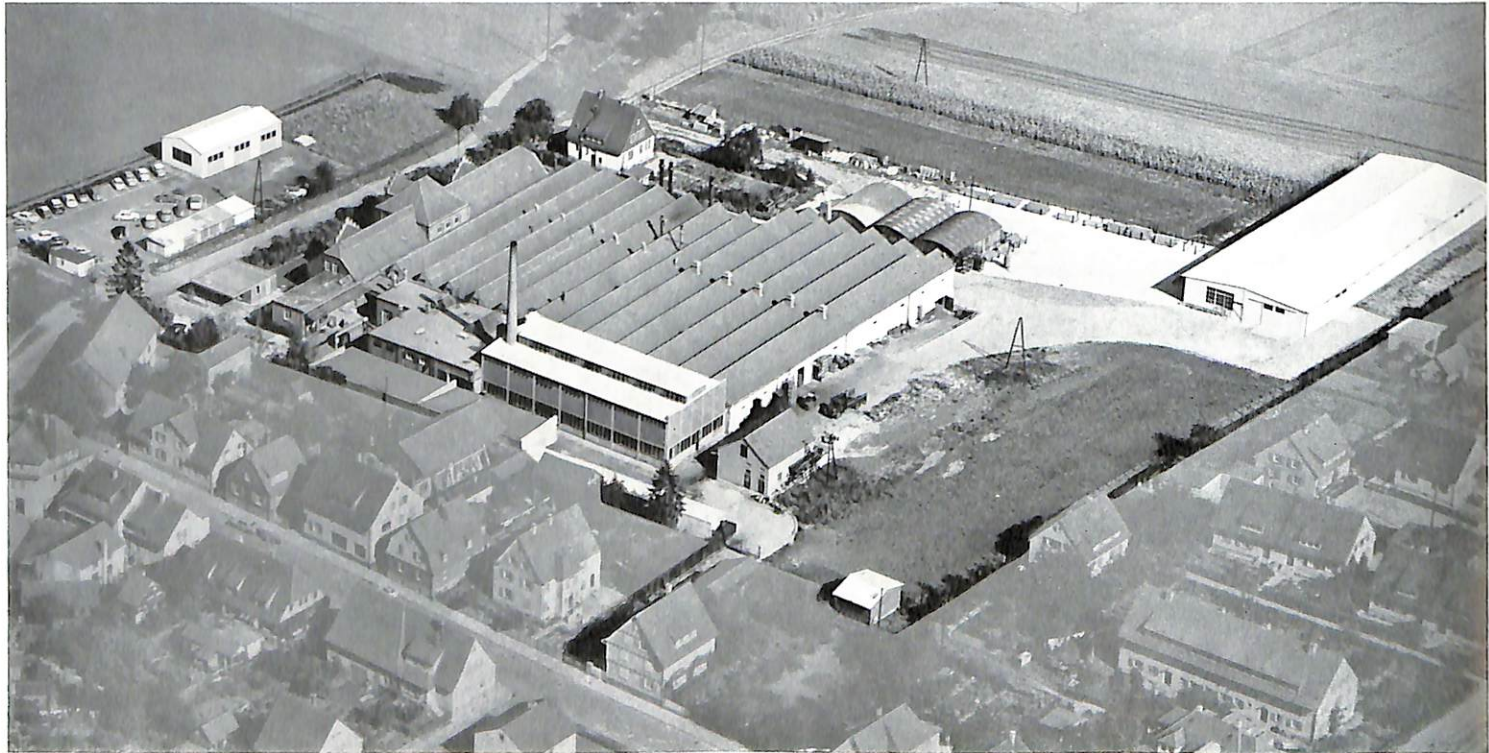
37 Werk II Bad Cannstatt





38 Werk V Rottweil a. N.

39 Werk VII Markgröningen



# Der Werkstoff Aluminium

## Geschichtliches

Aluminium – sein Name ist vom altbekannten Alaun, dem »Alumen« der Römer, abgeleitet – gehört in die Gruppe der sogenannten Leichtmetalle. Dazu zählen alle Metalle mit einem geringeren spezifischen Gewicht als 3,8: außer Aluminium und seinen sämtlichen Legierungen noch die Metalle der Alkali – und Erdalkalireihe sowie Silizium. Als Kolbenbaustoff und Legierungszusatz ist Magnesium, als Legierungselement Silizium von besonderer Bedeutung.

Aluminium wurde erstmalig 1825 von H. Chr. Oersted durch Reduktion von Aluminiumchlorid mit Kaliumamalgam und Abdestillieren des Quecksilbers aus dem entstandenen Aluminiumamalgam hergestellt. Fr. Wöhler zersetzte 1827 Aluminiumchlorid mit Kalium. Bei beiden Versuchen fiel das Metall nur in Flittern und Pulver an. Jahre später, 1845, gelang es Wöhler, Aluminium in regulinischer Form abzuscheiden, wobei erstmals die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Werkstoffes bestimmt werden konnten. Das Metall, bezeichnet als »Silber aus Lehm«, wurde zu dieser Zeit mit mehr als 2000.– Mark pro kg gehandelt. Zwar fiel der Preis im Laufe der Jahre ständig, aber an einen wirtschaftlichen Einsatz konnte erst gedacht werden, als es gelang, die schon 1854 von Bunsen gefundene elektrolytische Darstellung zu verbilligen. Das war mit der Einführung der Dynamomaschine der Fall. Die Lösung des Problems der technischen Darstellung von Aluminium durch Schmelzflußelektrolyse fanden gleichzeitig mehrere Forscher: die Amerikaner Ch. M. Hall und Ch. S. Brattley, die Franzosen P. L. F. Héroult und A. Minet und der Deutsche M. Kiliani.

Im Jahre 1886, das als Geburtsjahr der modernen Aluminiumindustrie gelten kann, meldeten Héroult in Frankreich und Hall in Amerika unabhängig voneinander die grundlegenden Patente (FP 175711 und A. P. 400766) auf industrielle Aluminiumerzeugungsanlagen durch Schmelzflußelektrolyse an. Zum erstenmal wurde klar erkannt, daß die Tonerde dem Elektrolyten periodisch zugesetzt werden kann und reine Kohleanoden verwendbar sind. 1889 gelang Kiliani die technische Durchführung der Rein-Aluminium-Elektrolyse nach Héroult.

Die von Wilm im Jahre 1909 entdeckte Vergütbarkeit des Duralumins gab den Anstoß zur Entwicklung einer

großen Zahl technisch wertvoller Legierungen und damit einer außerordentlichen Steigerung des Aluminiumverbrauchs. Die Weltproduktion von Aluminium, die im Jahre 1904 noch bei 9300 t lag, betrug 1950 1,5 Millionen t, etwa  $\frac{1}{6}$  der Produktion von NE-Metallen, und 1961 über 4,57 Millionen, fast 30% der NE-Metallproduktion.<sup>1)</sup>

Die MAHLE-Werke haben seit Gründung bis heute für Kolben, Druckgußteile, Flugzeugräder, Guß- und Preßteile rund 200 000 t Leichtmetall verarbeitet.

## Vorkommen

Die oberste Erdkruste mit einer Stärke von rund 16 km besteht zu etwa 8% aus Aluminium in Form der verschiedenartigsten Verbindungen. Aluminium ist also das bei weitem häufigste Metall unseres Lebensraums. Bauxit mit 50–60% Aluminiumoxyd, entsprechend einem Metallgehalt von 25–30% Al, ist der wichtigste Rohstoff zur Aluminiumgewinnung. Die hochwertigen europäischen Bauxitvorkommen liegen vornehmlich in Frankreich und den südöstlichen Ländern.

## Gewinnung

Der Bauxitaufschluß wird meist nach einem von Bayer erfundenen nassen Verfahren durchgeführt. Dazu wird der getrocknete und fein gemahlene Bauxit in konzentrierter Natronlauge unter Druck erhitzt. Die Tonerde wird als Natriumaluminat gelöst und Kieselsäure, Eisenoxyd, Titanoxyd und andere Verunreinigungen als ungelöster Schlammrückstand abfiltriert. Die Tonerde wird als Hydrat unter Rühren aus der verdünnten Lösung ausgefällt und von der Natronlauge getrennt, die in den Prozeß zurückfließt. Das reine Tonerdehydrat wird durch Kalzinieren bei etwa 1300 °C entwässert.

Die Herstellung des Aluminiums erfolgt aus dem Vorprodukt Aluminiumoxyd durch Elektrolyse, und zwar der Salzschmelze eines Gemisches von 18% Aluminiumoxyd und 82% Kryolith bei einer Temperatur von ca. 950 °C.

Der Schmelzpunkt des Aluminiumoxyds liegt bei über 2000 °C, also zu hoch für die Gewinnung von Aluminium, das schon bei 630 °C schmilzt. Die Mischung mit Kryolith bewirkt die notwendige Schmelzpunktniedrigung auf 935 °C. Bei der Elektrolyse wird das Aluminiumoxyd in Aluminium und Sauerstoff zerlegt. Letzte-

<sup>1)</sup> Metallstatistik der Metallgesellschaft AG, 49. Jahrgang 1962.

## Kolbenwerkstoffe

rer verbrennt an der Kohle-Elektrode zu Kohlendioxyd, während das flüssige Aluminium zu Boden sinkt (Kathode) und abgeschöpft wird.

### Anwendung

Rein-Aluminium ist für Kolben und viele andere Verwendungszwecke, ähnlich wie Reinsilber und reines Gold, zu weich, zu wenig fest und nicht verschleißbeständig. Deshalb sind zahlreiche Aluminiumlegierungen entwickelt worden, die besonders auf die im Kolbenbau nötigen Eigenschaften abgestimmt sind. Sie vereinigen bei niedrigem spezifischem Gewicht gute Festigkeitseigenschaften (auch bei höherer Betriebstemperatur) mit geringer Verschleißneigung, hoher Wärmeleitfähigkeit und zumeist auch niedriger Wärmeausdehnung. Nach dem Hauptzusatzmetall haben sich zwei Gruppen herausgebildet: Al-Cu-Legierungen und Al-Si-Legierungen.

### Aluminium-Kupfer-Legierungen

Die ersten Aluminiumkolben wurden vorwiegend aus der Legierung »MAHLE 101«, einer Aluminiumlegierung mit 10% Kupfer und ca. 0,3% Magnesium vergossen. Sie ist heute nicht mehr im Gebrauch. Eine andere kupfer-nickel-haltige Legierung mit 4% Kupfer, 2% Nickel und 1,5% Magnesium führt die Bezeichnung »MAHLE Y«. Sie geht in die Richtung der RR-Legierungen der High Duty Alloys Ltd. und wird wegen ihrer hohen Warmfestigkeit heute noch zuweilen für hochbeanspruchte Kolben verwendet.

### Aluminium-Silizium-Legierungen

a) Eutektische Legierungen mit 11–14% Si und kleineren Zusätzen an Cu, Ni, Mg. Hierher gehören die Legierungen »MAHLE 124«, »Lo-Ex« und viele andere. Diese Gruppe ist die im Verbrennungsmotorenbau meist verwendete.

b) Übereutektische Legierungen mit ca. 17–25% Si und kleineren Zusätzen an Cu, Ni, Mg, Cr, Co und Mn. In diese Klasse gehören die Legierungen »MAHLE 138« und »MAHLE 244«.

Dank ihrer technischen Vorteile, die in geringer Wärmeausdehnung und guten Verschleißigenschaften bestehen, haben Aluminium-Silizium-Legierungen die Aluminium-Kupfer-Legierungen trotz deren leichteren Bearbeitbarkeit weitgehend verdrängt.

### Wärmefragen

Die Eignung eines Werkstoffes zur Herstellung von Kolben hängt von zahlreichen Anforderungen ab, die sich nur schwer vereinigen lassen. Die meisten Kolbenwerkstoffe sind deshalb das Ergebnis eines Kompromisses zwischen angestrebten günstigen und unvermeidbaren nachteiligen Eigenschaften, der je nach dem Stand der Technik verschieden ausfallen kann. So sind anstelle des früher allgemein gebräuchlichen Graugusses heute weitgehend Aluminiumlegierungen getreten. Die Forderung nach einem ausgeglichenen Verhältnis von Festigkeit, Gewicht, Rohstoffpreis und Verarbeitungskosten müssen Kolbenwerkstoffe ebenso erfüllen wie Werkstoffe für andere Teile. Dazu kommen aber noch spezielle Anforderungen für den Betrieb bei erhöhten Temperaturen. Letztere hängen selbst wieder von der Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes ab, sie beeinflussen die Festigkeitseigenschaften wesentlich und bedingen durch Wärmeausdehnung die Laufspiele. Daher geht eine Betrachtung der Kolbenwerkstoffe am besten von den im Motorbetrieb herrschenden Temperaturverhältnissen aus.

### Betriebstemperaturen

Der Kolben des Verbrennungsmotors wird am Boden von dem verbrennenden Kraftstoffluftgemisch, das Temperaturen von 1800 bis 2600 °C erreichen kann, erhitzt, während die über alle Arbeitsspiele gemittelten Gastemperaturen meist bei 600 bis 700 °C liegen. Die vom Kolben aufgenommene Wärme wird zu einem kleinen Teil an das kalte Frischgas zurückgegeben, die Hauptmenge fließt durch Berührung mit dem gekühlten Zylinder über die Kolbenringpartie und den Schaft an das Kühlmittel ab. Auch das Schmieröl ist je nach der in das Kolbeninnere gelangenden Menge mehr oder weniger an der Kolbenkühlung beteiligt. Bei bestimmten thermischen Belastungen wird das Schmieröl auch bewußt zur Kühlung herangezogen. Die Wärmeübergangsbedingungen und die Wärmeleitfähigkeit des Kolbenwerkstoffes bestimmen die Temperaturhöhe und das Temperaturgefälle im Kolben. Nach diesen hat sich die Wahl des Werkstoffes und die Bemessung der Querschnitte und Einbauspiele zu richten.

Von MAHLE sind seit Jahrzehnten viele Temperaturmessungen an Kolben in Verbrennungsmotoren mit



Grenzen	Dieselmotoren		Ottomotoren	
	obere	untere	obere	untere
Kühlung	Luft	Wasser	Luft	Wasser
Arbeitsverfahren	2-Takt	4-Takt	2-Takt	4-Takt
Verbrennungsverfahren	Vorkammer	Direkt-Einspritz		

40 Betriebstemperaturen an Kolben bei Vollast (schematisch)

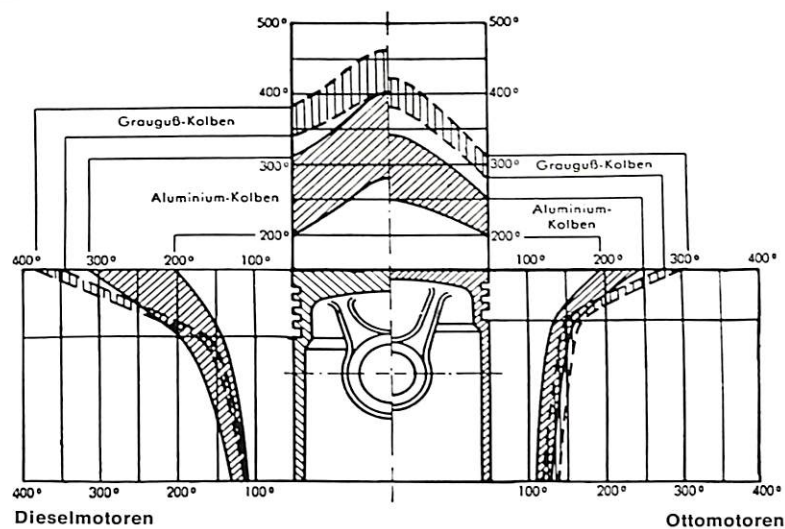
verschiedenen Arbeits- und Kühlverfahren gemacht worden. Daraus läßt sich ein guter Überblick über die Wärmeverhältnisse an Kolben gewinnen, die sich durch Berechnung nur annähernd ermitteln lassen.

Die Temperaturmessung geschieht meist mit Hilfe eines von MAHLE entwickelten Schmelzstiftverfahrens. Dabei wird die Überschreitung bestimmter Temperaturen durch Ausschmelzen von geeichten, im Kolben eingestemten kleinen Stiften aus einer Reihe von Metalllegierungen mit definiertem Schmelzpunkt beobachtet. Das Schmelzstiftverfahren erlaubt nur die Messung der während eines Prüflaufes auftretenden Höchsttemperaturen gleichzeitig an fast beliebig vielen Meßpunkten. Unter gewissen Voraussetzungen besteht die Möglichkeit, die Temperatur an Kolben mittels Thermoelementen oder Widerstandsgebern elektrisch zu messen. Jedoch bereitet diese Messung bei schnellaufenden Motoren gewisse Übertragungsschwierigkeiten. Auch Resthärtemessungen am Kolben bzw. an eingesetzten Metallstiften<sup>1)</sup> gestatten einen Rückschluß auf die Betriebstemperatur (siehe Abschnitt »Warmhärte und Resthärte«, Seite 25).

Bild 40 zeigt schematisch die Temperaturverhältnisse am Kolben. Die höchste Temperatur tritt am Kolbenboden, der den Verbrennungsraum abschließt, auf. Sie hängt von der Leistung, vom Verbrennungsverfahren, von der Kolbengröße und den Kühlbedingungen ab. Vom Boden zum Schaft herrscht ein starkes Temperaturgefälle, weil über die hier angeordneten Kolbenringe ein großer Teil der auf den Kolbenboden einfallenden Wärme an die Zylinderwand abgeführt wird. Die Temperatur des Kolbenschaftes liegt am niedrigsten. Sie hat von oben nach unten meist auch nur ein geringes Gefälle und unterscheidet sich bei den verschiedenen Motorarten nur wenig.

Der Temperaturunterschied zwischen wasser- und luftgekühlten Motoren ist meistens beträchtlich, ebenso zwischen Otto- und Dieselmotoren gleicher Abmessung. Unter den letzteren zeigen die Motoren mit unterteiltem Brennraum die steilsten Temperaturspitzen. Die damit verbundenen Wärmespannungen erzeugen Beanspruchungen, die nur mit hochwertigen Werkstoffen und besonderen Bauformen beherrscht werden können. Auch bei schnellaufenden Zweitaktmotoren

<sup>1)</sup> Thornton Research Center Shell Research Ltd.: »Application of metallurgical methods of temperature measurement«, Nov. 1961.



liegen die Kolbentemperaturen meistens im oberen Bereich.

Graugußkolben zeigen in der Schaftzone nur wenig höhere Temperaturen als Leichtmetallkolben, erreichen dagegen auf dem Kolbenboden wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes ein wesentlich höheres Temperaturniveau.

### Wärmetransport

Der in Wärme umgewandelte Anteil der Kraftstoffenergie geht teilweise mit den Abgasen verloren bzw. wird in einer Aufladegruppe zur Erhöhung des Mitteldruckes ausgenutzt. Der andere Wärmeanteil gelangt über die Brennraumwände – und damit zum Teil über den Kolben – an die Motorkühlung. Dabei stellt sich im Kolben ein Temperaturbild ein, das von folgenden Faktoren beeinflusst wird:

1. dem zeitlichen Temperaturverlauf der Verbrennungsgase bzw. -luft im Zylinder.
2. den Wärmeübergangszahlen am Kolbenboden sowie zwischen Kolben, Kolbenringen und Zylinder. (Im allgemeinen sind die Kolbenbodentemperaturen bei Dieselmotoren höher als bei Ottomotoren.) Unterschiede treten hier besonders bei den verschiedenen Dieselfahren auf, je nachdem heiße Brennstrahlen auf begrenzte Bodenbereiche auftreffen und an diesen Stellen den Wärmeübergang auch wegen ihrer hohen Strömungsgeschwindigkeit steigern;
3. der Wärmeleitzahl des Kolbenwerkstoffes. Sie bestimmt die Fähigkeit des Kolbenkörpers, die Wärme mehr oder weniger schnell weiterzuleiten und im günstigen Fall einen Wärmestau zu vermeiden;
4. den Wärmefließquerschnitten, die in gleicher Weise wie die Wärmeleitfähigkeit auf den Wärmefluß und das Temperaturbild im Kolben einwirken;
5. der Motorkühlung.

Die Wärmeübertragung vom Brenngas auf den Kolben geschieht zum größten Teil durch Wärmeübergang (Konvektion) und nur zu einem geringen Teil durch Strahlung. Die sich im Laufe des Motorbetriebs bilden-

den Ablagerungen von Ölkohle und Verbrennungsrückständen bewirken einerseits ein Ansteigen der Strahlungsabsorption, andererseits aber ergeben sie eine Zunahme des Wärmewiderstandes gegen die Konvektion. Im ganzen gesehen wirken sich diese Ablagerungen eher nachteilig aus. Der beträchtliche Unterschied zwischen den Betriebstemperaturen vergleichbarer Kolben aus Grauguß und Leichtmetall ergibt sich zum Vorteil der letzteren aus ihrer etwa dreimal so hohen Wärmeleitfähigkeit, sowie aus ihren des geringen spezifischen Gewichtes wegen leicht ausführbaren, wesentlich größeren Wärmeflußquerschnitten.

### Grenztemperaturen

Von den verschiedenen Verbrennungsverfahren her gesehen, gehen die Wünsche hinsichtlich der günstigsten Kolbenbodentemperaturen weit auseinander. Beim Ottomotor wird zur Vermeidung der Klopfgefahr eine niedrige Bodentemperatur angestrebt. Demgegenüber sind bei einigen Dieserverfahren im Interesse einer günstigeren Kraftstoffaufbereitung zur Erzielung eines kleineren Zündverzuges hohe Temperaturen erwünscht.

Die Kenntnis der Betriebstemperaturen von Kolben und der Bedingungen für ihr Zustandekommen ist vor allem deshalb wichtig, weil die Kolbenbaustoffe nur bestimmte Höchsttemperaturen annehmen dürfen. Werden diese überschritten, so wird die Kolbenbodenzone durch bleibende Verformung, Wärmespannungsrisse oder Anschmelzen beschädigt oder zerstört. Die Kolbentemperatur kann im allgemeinen durch Bemessung der Wärmeflußquerschnitte nach Erfahrungsregeln sowie durch entsprechende Kühlmaßnahmen auf den zulässigen Bereich beschränkt werden. Bei thermisch hoch belasteten Vorkammer- und Zweitakt-Dieselmotoren sowie bei hochverdichteten oder aufgeladenen Renn- und Flugmotoren wird die Beherrschung der Kolbentemperaturen zuweilen dadurch erschwert, daß schon kleine Abweichungen vom normalen Betriebszustand die Kolbentemperatur übermäßig ansteigen lassen. So können durch Störungen der Einspritzorgane (Pumpen, Düsen, Vorkammern), durch falsche Einstellung der Einspritz- oder Zündzeitpunkte, durch versagende Kolbenringe usw. schwere Kolbenschäden entstehen. Will man in solchen Fällen das Risiko der Überhitzung verringern, so ist das nur be-

grenzt, z. B. mit stark überdimensionierten Kolben (die aus Gewichtsgründen meist nicht tragbar sind), mit Hilfe von Bodeneinsätzen, durch zusätzliche Kolbenkühlung oder durch Leistungsbegrenzung möglich. Die für Kolben geeigneten Leichtmetalllegierungen beginnen meist bei 220–250 °C einen Teil ihrer Vergrütungshärte zu verlieren, was ihre Verwendbarkeit jedoch kaum beeinträchtigt. Bei 300–330 °C fällt die Festigkeit stark ab, mit dem Weichglühbereich zwischen 340 und 360 °C ist praktisch die Grenze der Belastbarkeit erreicht. In Sonderfällen können an einzelnen, mechanisch schwach belasteten Stellen von Kolbenböden Temperaturen von 400–430 °C ertragen werden, wenn gut gekühlte, reichlich bemessene Stützquerschnitte vorhanden sind. Bei 530–600 °C beginnt das Schmelzen.

Graugußkolben ertragen Temperaturen bis etwa 500 °C. Darüber fällt auch hier die Festigkeit stark ab.

### Spezifische Wärme

Im Zusammenhang mit dem Wärmefluß und der Betriebstemperatur spielt die spezifische Wärme des Kolbenwerkstoffes eine untergeordnete Rolle. Sie bestimmt nur die meist weniger als eine Minute währende Zeit, die der Kolben braucht, um die einem bestimmten Betriebszustand entsprechende Temperatur zu erreichen. Diese Dauer ist dem Produkt von Gewicht, spezifischer Wärme und Temperaturzunahme proportional.

### Wärmeausdehnung

Die Wärmeausdehnungsbeiwerte der Kolben- und Zylinderbaustoffe bestimmen zusammen mit den Betriebstemperaturen die Veränderung der Laufspiele vom Einbauzustand bis zum Betriebszustand. Dabei ist neben der höchsten Betriebstemperatur auch der Start bei starker Kälte zu berücksichtigen. Nach der folgenden Gleichung können aus den Werten der Zahlentafel mit Hilfe von geschätzten oder gemessenen Betriebstemperaturen die erforderlichen Kolbeneinbauspiele berechnet werden.

$$\Delta s = s_0 - s = D \left[ (t_k - t_0) \cdot \alpha_k - (t_z - t_0) \cdot \alpha_z \right]$$

Dabei bedeutet:

$\Delta s$  = Spielveränderung vom Einbau zum Betriebszustand

## Wärmeausdehnung von Kolben und Kolbenwerkstoffen

Gruppe	Legierungsbezeichnung	Hauptzusatzelemente	Mittlere lineare Wärmeausdehnungszahl $\alpha \cdot 10^{-6} \text{ cm/cm}^\circ\text{C}$		
			20–150 °C Kolbenschaft	20–300 °C Kolbenboden	Gruppenbereich
Mittel zur Regelung der Wärmeausdehnung in Aluminiumkolben	Stahl Rein-Si		11–12 7		
Aluminiumkolben mit Einlagen zur Regelung der Wärmeausdehnung am Schaft Autothermikkolben Autothermatikkolben	für Wasserkühlung		12–14		12–16
	für Luftkühlung und Al-Zylinder		13–16		
Eisenkolben	Grauguß Temperguß Sphäroguß	~ 3 ‰ C	11–12	11,5–12,5	11–13,5
		~ 2 ‰ C	11,5–12,5	12–13	
Eisen mit besonders hoher Wärmeausdehnung für Ringträger und Bodenplatten in Aluminiumkolben	Austenitisches Gußeisen	~ 20 ‰ Ni+Cu+Cr oder ~ 16 ‰ Mn+Ni	17–18,5	17,5–19	17–19
			17–18,5	17,5–19	
Al-Si über-eutektisch eutektisch	MAHLE 244 MAHLE 138 MAHLE 124	24 ‰ Si	17–17,5	17,5–18	17–22
		18 ‰ Si	18–19	19–20	
		12 ‰ Si	20–21	21–22	
Al-Cu-Ni	MAHLE Y	4 ‰ Cu + 2 ‰ Ni	23–24	24–25	23–25
Sinter Al	MAHLE Sintal 18	18 ‰ Si	16–17	17–18	16–18

- $s_0$  = Einbauspiel  
 $s$  = Laufspiel im Betriebszustand  
 $D$  = Zylinderdurchmesser  
 $t_k$  = Kolbenbetriebstemperatur an der betreffenden Stelle  
 $t_z$  = Zylinderbetriebstemperatur an der im unteren Totpunkt von der entsprechenden Kolbenzone berührten Stelle  
 $t_0$  = Einbautemperatur (20 °C)  
 $\alpha_k, \alpha_z$  = mittlere lineare Wärmeausdehnungszahlen der Kolben- und Zylinderbaustoffe zwischen Einbau- und Betriebstemperatur.

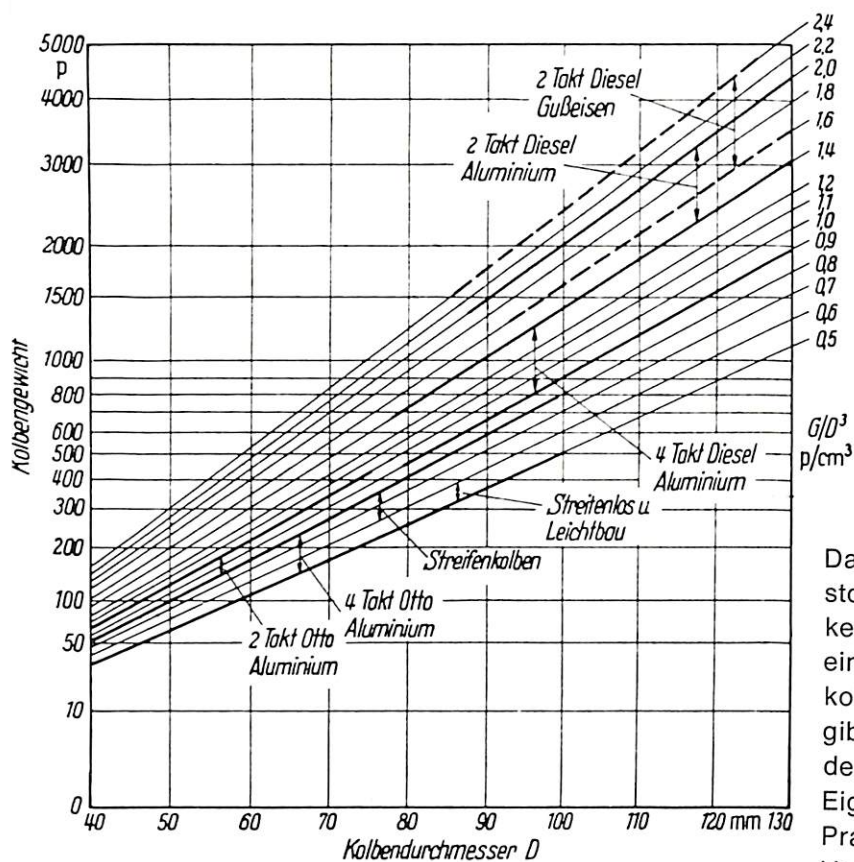
Für ruhigen und klemmfreien Kolbenlauf wäre erwünscht, daß der Kolben mit einem Spiel annähernd 0 eingebaut und dieses bei allen Betriebszuständen beibehalten würde. Für diesen Idealfall ergibt sich mit

$\Delta s = 0$  die ideale Wärmeausdehnungszahl des Kolbens

$$\alpha_k = \alpha_z \cdot \frac{t_z - t_0}{t_k - t_0}$$

Dieser Wert beträgt für den Kolbenschaft oben 6 bis  $8 \cdot 10^{-6} \text{ cm/cm}^\circ\text{C}$ , für das untere Schaftende 9 bis  $11 \cdot 10^{-6} \text{ cm/cm}^\circ\text{C}$ . Die Wärmeausdehnungszahl des Gußeisens ist von der letzteren nicht allzuweit entfernt. Dagegen dehnen sich die Leichtmetalllegierungen viel stärker aus.

Nun wird der Kolben aus verschiedenen Gründen nicht mit der Passung 0, sondern mit einem Einbauspiel größer als 0 in den Zylinder eingebaut. Da aber trotzdem das tatsächliche Laufspiel in der betriebswarmen Maschine möglichst nahe bei 0 liegen soll, ist in Wirklichkeit eine höhere Wärmeausdehnungszahl als dem



41 Gewichtsverhältnisse von ausgeführten Kolben

Idealfall entsprechen würde, erforderlich. Praktisch angestrebte Werte sind in Zahlentafel Seite 21 enthalten. Die Nichtbeachtung der hier entwickelten Gesichtspunkte kann auf der einen Seite zu Kolbengeräuschen, auf der anderen zu Kolbenfressen führen. Der Nachteil der großen Wärmeausdehnung des Aluminiums ist durch die Entwicklung der Al-Si-Kolbenlegierungen wesentlich gemildert worden. Außerdem gelang es mit verschiedenen konstruktiven Mitteln, die Wärmeausdehnung des Kolbenschaftes nahe an den Idealwert zu bringen oder sie durch eine elastische Konstruktion weitgehend abzufangen. (Näheres siehe unter »Kolbenbauarten« Seite 45–67)

### Gewicht

Der Kolben macht zusammen mit den Kolbenringen, dem Kolbenbolzen und dessen Sicherungen einen Hauptteil der hin- und hergehenden Massen aus. Diese haben, besonders bei hohen Drehzahlen, einen merklichen Einfluß auf die Lagerbelastungen, die erforderlichen Gegengewichte und damit in zweifacher Weise auf das Motorgesamtgewicht. Leichte Kolben bedeuten daher einen technischen Vorteil, der allerdings nicht durch Verzicht auf genügende Wärmeabfuhr, Steifigkeit und Festigkeit erkauft werden darf.

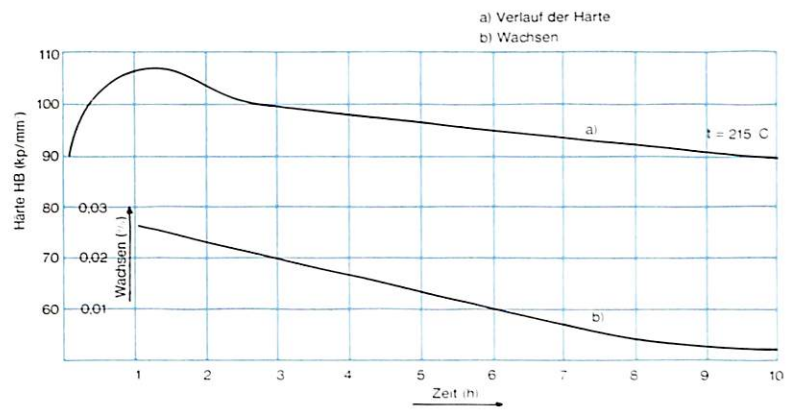
Daher eignen sich für Kolben besonders solche Baustoffe, die neben hoher Wärmeleitfähigkeit und Festigkeit ein **geringes spezifisches Gewicht** haben. Hierin ist ein Hauptanreiz für die Entwicklung der Leichtmetallkolbenlegierungen zu suchen. Untenstehende Tabelle gibt eine Übersicht, wie sich das spezifische Gewicht der Kolbenbaustoffe zusammen mit ihren mechanischen Eigenschaften auf das Kolbengewicht auswirkt. In der Praxis können sich natürlich die angegebenen rohen Vergleichszahlen durch Fertigungsgesichtspunkte oder verschiedene Beurteilung der Festigkeitsreserve etwas verschieben. Obwohl die höhere Warmfestigkeit des Gußeisens den Nachteil seines hohen spezifischen Gewichtes durch die Wahl dünnerer Querschnitte etwas auszugleichen erlaubt, können Graugußkolben unter gleichen Voraussetzungen nicht so leicht wie Aluminiumkolben gebaut werden. Das ist nur mit hochfesten stahlähnlichen Gußeisensorten annähernd möglich. Dabei sind dann aber geringere Steifigkeit, schwierige Guß- und Bearbeitungsverhältnisse wegen der sehr dünnen Wände und nicht zuletzt auch hohe Betriebstemperaturen in Kauf zu nehmen.

Besonders leichte und zugleich zuverlässige Kolben lassen sich aus gepreßten Aluminiumlegierungen herstellen. Wenn man die Gewichte von Kolben verschiedener Größe und Bauform vergleichend beurteilen will, so bezieht man sie am besten auf das Volumen eines Zylinders, der durch den Außendurchmesser  $D$  und die Gesamtlänge  $L$  bestimmt ist. Wählt man als Vergleichslänge  $L = 1,274 D$  (was einem guten Durchschnitt für viele Kolbenbauformen entspricht), so erhält man als Vergleichsvolumen

$$V = D^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot L = D^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 1,274 D = D^3$$

Das »spezifische Kolbengewicht«  $G/D^3$  ist in der Linien-

Kolbenbaustoff	spezifisches Gewicht $p/cm^3$	Kolbengewichte bei gleicher Größe und Belastung	
		bei gleicher Biegesteifigkeit a	bei gleicher Ausnutzung der Wechselfestigkeit b
Aluminiumlegierungen gegossen gepreßt	2,6–2,9	~ 1,0 (Bezugswert)	~ 1,0 ~ 0,8
Grauguß	7,1–7,3	~ 2,3	~ 1,8
stahlähnliche Sondergußeisen	7,3–7,6	~ 2,0–~ 2,2	~ 1,1–~ 1,4
Magnesiumlegierungen	1,8–2,0	~ 0,8	~ 0,75



42 Härteverlauf und Wachsen der Legierung »MAHLE 124«

tafel zur Kennzeichnung einer großen Zahl ausgeführter Kolben verwendet. Der Ordinatenmaßstab entspricht der dritten Wurzel aus G. Dadurch erscheinen die Linien gleichen »spezifischen Kolbengewichtes« als Gerade.

### Temperatur-Zeit-Einflüsse auf die Eigenschaften der Aluminiumkolbenlegierungen und Wärmebehandlung

Die meisten Eigenschaften der metallischen Werkstoffe verändern sich mit der Temperatur, und zwar um so stärker, je mehr sich die Temperatur dem Schmelzpunkt nähert. Der – im Vergleich zu Eisen- oder Kupferlegierungen – verhältnismäßig niedrige Schmelzbereich der Leichtmetalllegierungen ist daher mit einer bei den vorkommenden Betriebstemperaturen bedeutsamen Veränderlichkeit insbesondere der Festigkeitseigenschaften verbunden.

Die für Kolben geeigneten Legierungen enthalten Zusatzelemente, die zwar in der Metallschmelze vollkommen, im festen Zustand jedoch nur in geringen, stark von der Temperatur abhängigen Mengen löslich sind. Die dadurch bedingten verwickelten Vorgänge, deren Studium und Deutung ein großes Fachgebiet der Metallkunde ausmacht, können hier nur anhand der wichtigsten praktischen Folgen angedeutet werden.

**1** Die begrenzt löslichen Legierungsbestandteile (hauptsächlich Kupfer- und andere Schwermetall-Aluminide sowie Magnesium Silizid) werden bei rascher Abkühlung des in der Gußform erstarrenden Metalls oder beim Abschrecken nach einem sogenannten Lösungsglühen bei etwa 500 °C in der Aluminiumgrundmasse als zunächst einheitliche übersättigte Lösung zwangsweise festgehalten. In diesem Zustand ist die Legierung meistens weich, hat das geringste Volumen und die stärkste Neigung sich zu verändern.

**2** Schon durch Lagern bei Raumtemperatur beginnen die übersättigten Anteile sich allmählich anders anzuordnen, wobei jedoch noch keine metallographisch nachweisbaren Ausscheidungen entstehen. Dieser Vorgang, der nach einigen Stunden bis Tagen eine erhebliche Steigerung der Härte und Festigkeit bewirkt und das Volumen geringfügig vergrößert, wird als »Kaltaushärtung« bezeichnet. Seine Entdeckung durch A. Wilm beim Duralumin im Jahre 1909 hat die Technik der

hochfesten Aluminiumlegierungen und ihrer »Vergütung« eingeleitet.

**3** Der kaltausgehärtete Zustand der Legierungen ist nicht wärmebeständig. Er wird bei mäßiger Erhitzung zunächst wieder »zurückgebildet«, wobei auch die Härte zurückfällt, und geht dann in die »Warmmehrhärtung« über, bei der röntgenographisch bzw. mikroskopisch nachweisbare Ausscheidungen der überschüssigen Phasen auftreten. Dabei nehmen die Härte und Festigkeit sowie das Volumen meistens merklich zu. Die Vorgänge der »Warmmehrhärtung« bei Aluminiumlegierungen erfolgen im Temperaturgebiet von 100 bis 300 °C, die Ausscheidungen vermehren und vergrößern sich bei zunehmender Temperatur mit wachsender Geschwindigkeit. Für die technische Vergütung kommen Anlaßtemperaturen zwischen 150 und 270 °C in Betracht. An der unteren Grenze wird mit Behandlungsfristen von 12–24 Stunden die höchste Härte, aber keine ausreichende Volumenbeständigkeit erreicht, bei etwa 200 °C ergeben wenige Stunden einen für Kolben günstigen, harten und ausreichend beständigen Zustand. Einzelne Legierungen werden unter Verzicht auf höchste Härte bei 220–270 °C angelassen, um bei hohen Betriebstemperaturen ein nachträgliches »Wachsen« zu vermeiden.

**4** Der Zustand der Warmmehrhärtung strebt bei einer Temperatur über 220 °C nach vielen hundert Stunden, bei 300–350 °C jedoch schon nach wenigen Stunden einem Lösungsgleichgewicht zu, bei dem die überschüssigen Legierungselemente gröber ausgeschieden werden. Dabei wird das Material wieder weich und erreicht sein größtes Volumen. Dieses »Weichglühen« (»Totglühen«) kann auch durch sehr langsame Abkühlung von noch höheren Temperaturen bis etwa 500 °C geschehen. Bei Kolbenböden thermisch hoch beanspruchter Motoren muß es als unvermeidbar in Kauf genommen werden.

Bild 42 zeigt an zwei charakteristischen Kurven a) den Härteverlauf, b) die bleibende Längenzunahme, das »Wachsen« der eutektischen Kolbenlegierung »MAHLE 124«.

Um annehmbar geringe Werte für das Wachsen zu erreichen, muß, wie bereits erwähnt, der Werkstoff mehrere Stunden angelassen werden.

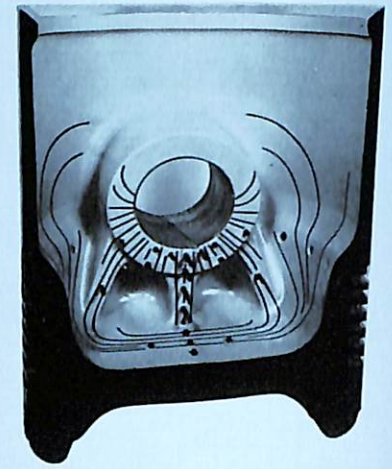
## Festigkeitsfragen

### Beanspruchung

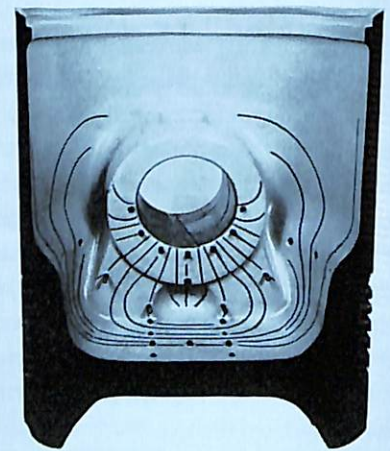
Die auf den Kolben wirkenden äußeren Kräfte – der Verbrennungsdruck am Boden, die Gegenkräfte des Bolzens in den Bolzenlöchern und des Zylinders am Schaft, dazu Gleitreibungswiderstände und Massenbeschleunigungskräfte – erzeugen ein bei jedem Arbeitstakt wechselndes und je nach Leistung und Drehzahl verschieden großes, kompliziertes System von Beanspruchungen im Kolbenwerkstoff. Durch die Wärmeausdehnung entstehen an Stellen mit großem Temperaturgefälle, also vor allem im Kolbenboden, sowie durch die Wirkung dehnungshemmender Stahleinlagen zusätzlich im Werkstoff selbst erhebliche Spannungen. Sie überlagern sich als statische Vorbelastung den von den pulsierenden äußeren Kräften hervorgerufenen Wechselspannungen.

Die Art, Größe und Richtung der Materialanstrengung – Zug, Druck, Biegung, Schub – äußert sich an jeder Stelle durch entsprechende vorwiegend elastische Formänderungen als Verlängerung, Verkürzung, Krümmung, Verschiebung. Die Richtung und Verteilung sowie in gewissen Grenzen die Größe dieser an sich winzigen Formänderungen kann bei Belastungsversuchen neben anderen Verfahren aus der Rißbildung in spröden Lacküberzügen auf der zu untersuchenden Oberfläche abgelesen werden. Eine genauere Bestimmung der Größe ist durch mechanische, optische oder elektrische Feindehnungsmessungen möglich. Bild 43 zeigt das Ergebnis derartiger Messungen an zwei verschiedenen Kolben für einen Triebwagendieselmotor. Die Spannungsverteilung hoch belasteter Bauteile wie Kolben kann auch durch spannungsoptische Untersuchungen an Modellkörpern aus Epoxy-Gießharzen nach dem Einfrierverfahren bestimmt werden. In Bild 44 ist die Isochromatenverteilung an einem vertikalen Hauptschnitt durch einen Kolben dargestellt. Derartige Untersuchungen der MAHLE Komm.-Ges. haben viel zur richtigen Gestaltung von Hochleistungskolben beigetragen. Dabei hat sich ergeben, daß bei sorgfältiger Gestaltung der Form hochbeanspruchter Bauteile (gleichmäßige Querschnittsübergänge, Verrundung an Kerbstellen usw.), häufig sogar unter Einsparung von Material, örtliche Spannungsspitzen vermieden werden können. Dadurch wird die Sicherheit eines gefährdeten Bauteils oft beträchtlich erhöht, während die Wahl

43 Darstellung des durch Dehnlinsen und Feindehnungsmessung gefundenen Spannungszustandes in einem Dieselkolben (Maybach)



Darstellung des Spannungszustandes in einem verbesserten Kolben (Maybach)

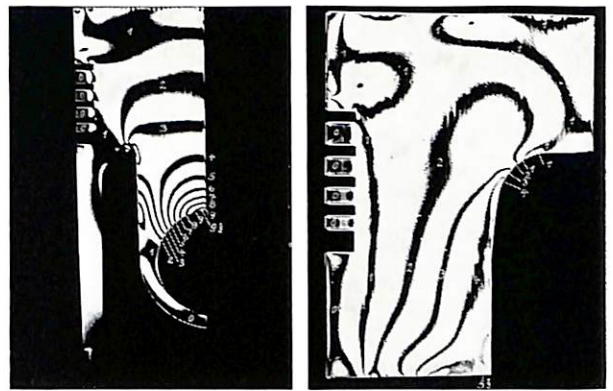


eines Werkstoffs höherer Festigkeit die Haltbarkeit meist nur um einen kleinen Betrag steigert.

### Steifigkeit und Elastizität

Da sich die Form eines Kolbens unter dem Einfluß der Betriebsbeanspruchung nicht bleibend verändern soll, dürfen die Spannungen im Werkstoff die Elastizitätsgrenze an keiner Stelle merklich überschreiten. Für das Betriebsverhalten von Kolben sind jedoch auch die rein elastischen Verformungen bedeutsam, die bei jedem Arbeitstakt entstehen und wieder verschwinden. Ihre Größe hängt von der Steifigkeit der Bauform und vom Elastizitätsmodul des Werkstoffes ab.

Allerdings nimmt der E-Modul mit zunehmender Temperatur ab. Diese Abhängigkeit ist aus Bild 45 für die drei gebräuchlichsten MAHLE-Kolbenlegierungen, die eutektische und die beiden übereutektischen, ersichtlich. Gerade im Bereich des thermisch höher beaufschlagten Kolbenbodens und der Pleuellagerzone, wo möglichst nur kleine elastische Verformungen auftreten sollen, ist der Abfall des E-Moduls erheblich, am Schaft jedoch, wo eine gewisse »Weichheit« erwünscht ist, auf Grund der dort geringeren Temperatur klein. Die jeweilige nötige Steifigkeit muß daher durch genügend kräftige Querschnitte und durch geeignete Formgebung des Kolbens erzielt werden.



44 Isochromatenverteilung an einem vertikalen Schnitt durch einen Kolben. Die eingetragenen Ordnungszahlen entsprechen den auftretenden Beanspruchungen an diesem Kolben.

### Warmhärte und Resthärte

Die Härte der Werkstoffe ist – beispielsweise durch den Kugeldruckversuch nach Brinell – auch bei erhöhten Temperaturen einfacher zu messen als eine andere Eigenschaft. Deshalb wird die Eignung von Leichtmetalllegierungen für Kolben u. a. nach ihrer Warmhärte beurteilt. Diese gibt wertvolle Aufschlüsse über die Veränderung der Festigkeitseigenschaften durch die Betriebstemperatur. Im besonderen gilt dies für den Kolbenboden und den Bereich der Kolbenringnuten, die bei Temperaturen zwischen 200 und 300 °C durch die Kolbenringe und den Gasdruck stark auf Biegung und Verschleiß beansprucht sind. Bei zu geringer Warmhärte schlagen sich die Nuten mit der Zeit aus (siehe Kapitel »Ringträgerkolben« Seite 59).

Bei den für Kolben geeigneten aushärtbaren Aluminiumlegierungen hängt die Warmhärte nicht nur vom Ausgangszustand und der Temperatur, sondern auch von deren Einwirkungsdauer ab. Das gilt auch für die nach dem Erkalten wiedergewonnene sogenannte »Resthärte«. Aus dieser kann annähernd auf die Betriebstemperatur geschlossen werden, wenn diese konstant war und während einer bekannten Zeitdauer eingewirkt hat. Betriebstemperaturen über etwa 350 °C können aus der Resthärte von Kolben meist nicht sicher

ermittelt werden, weil schon bei mäßiger Abkühlungsgeschwindigkeit eine Rückvergütung veranlaßt wird, bei der die Resthärte wieder beträchtlich zunehmen kann.

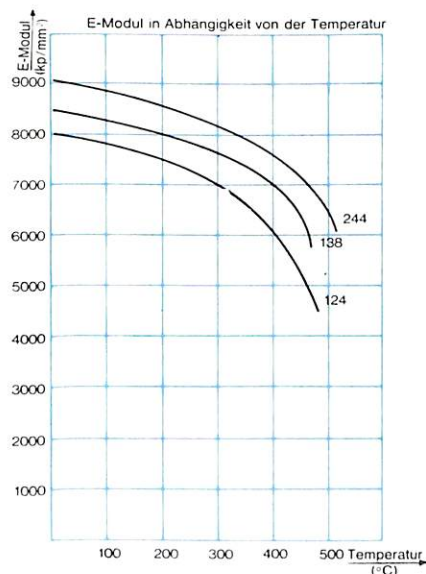
Die Bilder 46 und 47 zeigen am Beispiel der übereutektischen Legierung »MAHLE 138« (gegossen und gepreßt) bei jeweils zwei Ausgangshärten den Abfall der Härte bei Temperaturen zwischen 50 und 350 °C und Erwärmungszeiten von 1 Stunde, 100 Stunden und 250 Stunden.

### Bruchsicherheit

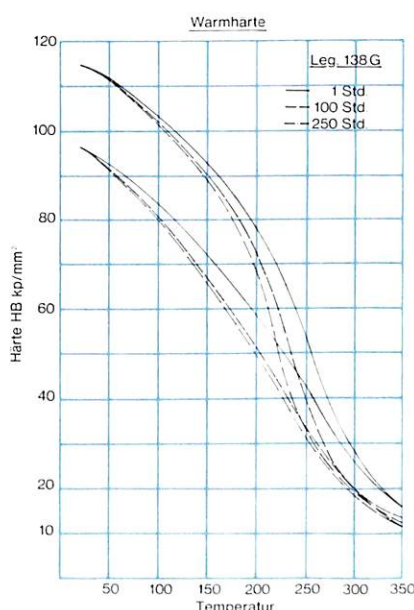
Damit ein durch pulsierende Kräfte beanspruchtes Bauteil wie der Kolben auch nach langen Betriebszeiten nicht durch Ermüdung anreißt oder bricht, muß die Dauerwechselfestigkeit des Werkstoffes an jeder Stelle größer als die Beanspruchung sein. Diese recht einfach erscheinende Forderung läßt sich in der normalen Praxis des Kolbenbaues mit einiger Erfahrung erfüllen. Sobald jedoch hohe Motorleistungen mit leichten Kolben bruch sicher beherrscht werden sollen, müssen die Dauerhaltbarkeit des Kolbenwerkstoffes und verschiedene Faktoren, von denen sie verändert wird, sorgfältig geprüft und berücksichtigt werden.

Die Erforschung der Dauerwechselfestigkeit von Kol-

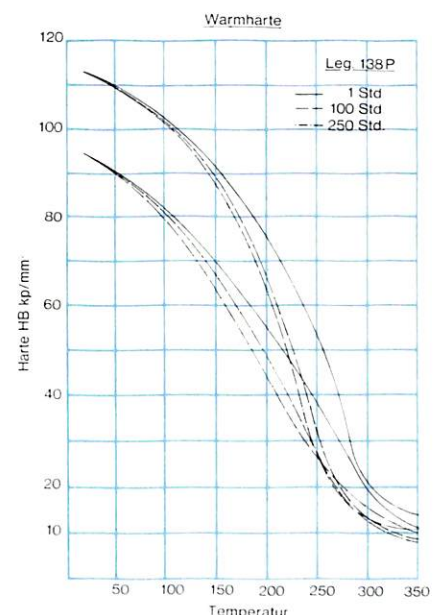
45 Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der Temperatur

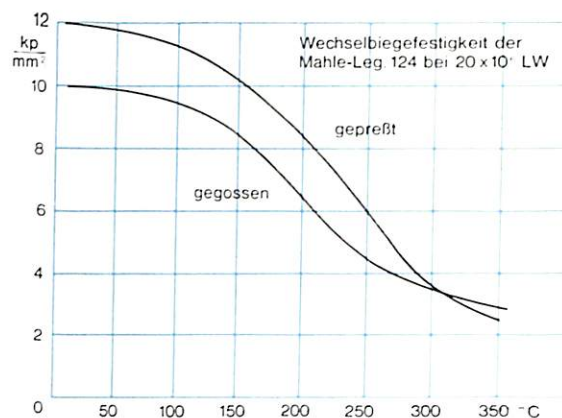


46 Warmhärtebereich Legierung »MAHLE 138« gegossen



47 Warmhärtebereich Legierung »MAHLE 138« gepreßt





48 Wechselbiegefestigkeit der Legierung »MAHLE 124«

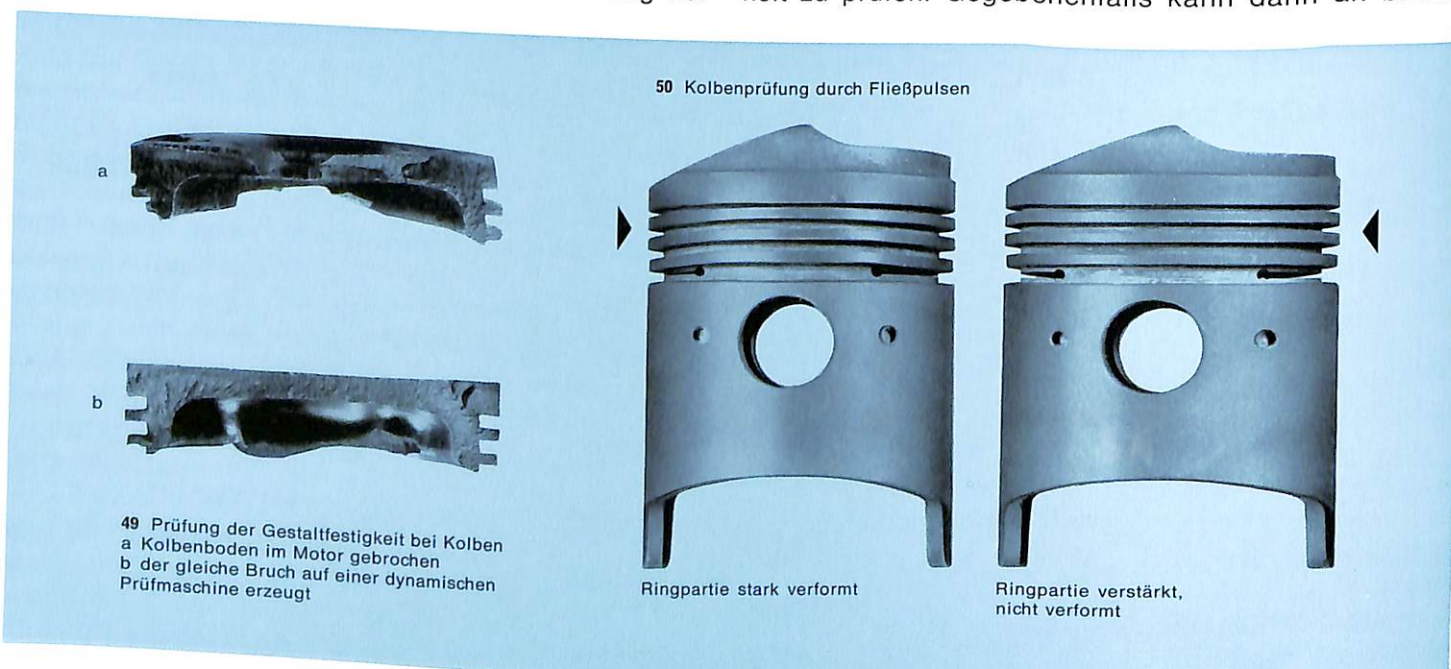
benlegierungen, an der das Laboratorium der MAHLE Komm.-Ges. viel gearbeitet hat, ergab, daß diese Werkstoffeigenschaft von der chemischen Zusammensetzung, Herstellungsart und der damit erzielten Gefügeausbildung sowie von der Wärmebehandlung abhängig ist. Gepreßte bzw. geschmiedete Aluminiumlegierungen weisen eine größere Wechselfestigkeit auf als gegossene, unter den letzteren ergibt rasch erstarrender Kokillenguß wegen seines feinkörnigen Gefüges höhere und gleichmäßigere Werte als der langsamer erstarrende Sandguß mit seinem gröberen Korn. Daneben spielt auch der Bearbeitungszustand der Materialoberfläche eine gewisse Rolle; glatte oder verdichtete Oberflächen verhalten sich günstiger als rauhe.

Bei den Leichtmetallkolbenlegierungen bedeutet schon eine Temperatur von 300–350 °C eine viel stärkere Annäherung an den Erweichungs- oder Schmelzpunkt als etwa bei den Eisen- oder Kupferlegierungen. Deshalb beeinflussen höhere Temperaturen auch die Dauerwechselfestigkeit beträchtlich: sie nimmt mit steigender Temperatur ab, wobei sich die durch die erwähnten anderen Einflüsse bedingten Unterschiede immer mehr verwischen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen des Temperatureinflusses auf die Wechselfestigkeit eines Werkstoffes an Flachbiegeproben stimmen mit der Erfahrung der

Praxis recht gut überein. Bei der Aufstellung der Wöhler-Kurven von Aluminiumwerkstoffen muß berücksichtigt werden, daß – im Gegensatz zu Stahl – die Wechselfestigkeit auch bei Lastwechselzahlen von über  $10 \cdot 10^6$  weiter abfällt. Im Prüffeld der MAHLE Komm.-Ges. wurde deshalb  $20 \cdot 10^6$  als Grenzwchsellast festgelegt. In Bild 48 ist der Einfluß der Temperatur auf die Biegewechselfestigkeit der Kolbenlegierung »MAHLE 124« im gegossenen und gepreßten Zustand dargestellt. Man sieht, daß besonders im mittleren Temperaturbereich der gepreßte Werkstoff wesentlich günstiger liegt als der gegossene, während sich bei hohen Temperaturen die Werte einander angleichen.

Die Bruchsicherheit von dynamisch beanspruchten Bauteilen hängt nicht nur von der Dauerwechselfestigkeit des Werkstoffes, der Größe und des beanspruchten Ausschnittes ab, sondern in stärkerem Maße von seiner Gestalt. Die letztere bestimmt, an welchen Stellen und in welcher Größe zulässige oder gefährliche Spannungen, zum Beispiel an Querschnittübergängen oder Kerbstellen, auftreten. Diese können nur mit großem Zeit- und Versuchsaufwand berechnet oder gemessen werden. Daher ist es häufig vorteilhafter, die Kolbenbauformen durch betriebsähnliche Schwingungsversuche mit Überlastung auf ihre Gestaltfestigkeit zu prüfen. Gegebenenfalls kann dann an bruch-





gefährdeten Stellen durch konstruktive Maßnahmen für gleichmäßigere Verteilung und Abbau der Spannungen gesorgt werden.

Das MAHLE-Prüffeld untersucht auf diese Weise schon vor der Motorerprobung neue Kolbentypen auf Gestaltfestigkeit. Dafür stehen mehrere Pulser zur Verfügung, die mit besonders zur Kolbenprüfung geeigneten Belastungs- und Heizungseinrichtungen ausgestattet sind. Die Prüfung auf Gestaltfestigkeit muß natürlich gewährleisten, daß sich die im Motor gegebenenfalls auftretenden Dauerbrüche auf dem Pulser reproduzieren lassen; Bild 49 a und b zeigen einen im Motor aufgetretenen Dauerbruch eines Kolbenbodens und einen, der auf dem Pulser reproduziert wurde. Die mit der Pulserprüfung in den letzten beiden Jahrzehnten durch viele Versuche gesammelten Erfahrungen haben die Konstruktion der MAHLE-Kolben auch hinsichtlich der Gestaltung auf eine sichere Erfahrungsgrundlage gestellt.

#### **Widerstand gegen bleibende Verformung**

Die Materialanstrengung im Kolben besteht an den meisten Stellen nicht nur aus gleich großen einander abwechselnden Zug- und Druckspannungen, wie das etwa bei der einfachen Wechselbiegung von Probestäben in deren Randfasern der Fall ist. Vielmehr kommt zum Beispiel im Kolbenboden durch das Zusammenwirken von Gas- und Massenkräften mit Wärmespannungen eine komplizierte Schwellbeanspruchung zustande, deren Mittelwert eine Zug- oder Druckspannung sein kann. Diese sollte, damit der Kolben innerhalb der meist einige tausend Stunden währenden Gebrauchszeit keine bleibende Verformung erfährt, kleiner sein als die Dauerstandfestigkeit des Werkstoffes bei der höchsten vorkommenden Betriebstemperatur. Unter der erwähnten Dauerstandfestigkeit versteht man eine Beanspruchung – vorzugsweise bei erhöhter Temperatur –, die auch bei langdauernder Einwirkung nur geringe bleibende Verformungen oder Brüche hervorruft.

Da – wie weiter oben gesagt – der Kolben nicht ruhend, sondern pulsierend belastet ist, sind zu seiner Formbeurteilung die Wechselfestigkeit und die Dauerstandfestigkeit<sup>1)</sup> heranzuziehen.

Es hat deswegen nicht an Versuchen gefehlt, das Verhalten von Leichtmetallkolbenwerkstoffen bei betriebsähnlicher Beanspruchung zu untersuchen, um zu einem

Bewertungsmaßstab zu kommen.<sup>2)</sup> Wegen der verwickelten Beanspruchungsverhältnisse am Kolben sind jedoch die Ergebnisse dieser Versuche nur beschränkt anwendbar.

Sicherer zum Ziel kommt man jedoch, wenn die bleibenden Formveränderungen am Kolben selbst sichtbar gemacht werden. Das im Festigkeitslaboratorium der MAHLE Komm.-Ges. entwickelte sogenannte Fließpulsverfahren hat sich dabei gut bewährt. Der Kolben wird hierbei über eine begrenzte Lastwechselzahl bei überhöhter Last und Temperatur einer Druck-Schwell-Belastung ausgesetzt. Im Gegensatz zu der vorher erwähnten Prüfung auf Gestaltfestigkeit wird der Kolben nicht bis zum Bruch belastet, sondern es werden an den interessierenden Stellen die bleibenden Verformungen mit Meßuhren oder elektrodynamischen Feintastern gemessen. So ist man in der Lage, die bleibenden Verformungen zu erfassen und durch konstruktive Maßnahmen auf ein Minimum herabzudrücken. Bild 50 zeigt einen Kolben in ursprünglicher und verbesserter Ausführung nach dem Fließpuls. Die Verbesserung im Widerstand gegen bleibende Verformung ist besonders im Bereich der Ringpartie sehr deutlich. Darüber hinaus lassen sich mit diesem Verfahren auch die elastischen Verformungen plastisch erkennbar machen.

#### **Laufeigenschaften**

Der Sammelbegriff Laufeigenschaften umfaßt: den für das Betriebsverhalten von Kolben entscheidend wichtigen Verschleißwiderstand, den Reibungswiderstand, die Neigung zum Fressen bei Überlastung oder Mangelschmierung und das Einlaufverhalten. Die äußeren Bedingungen, unter denen die Gleitflächen der Kolben einwandfrei arbeiten müssen, sind, wie die folgende Übersicht für normale Fahrzeugmotoren zeigt, recht verschiedenartig.

<sup>1)</sup> K. Wellinger und E. Keil, Prüfung von Leichtmetallen bei höherer Temperatur unter ruhender Belastung, Zeitschrift für Metallkunde, 1943, Heft 9.

F. Bollenrath und H. Gröber, Über das Kriechverhalten einiger Aluminiumlegierungen bei erhöhter Temperatur, Mitteilungen der Deutschen Akademie für Luftfahrtforschung, 1943, Heft 4.

<sup>2)</sup> K. Wellinger und G. Stähli, Verhalten von Leichtmetall-Kolbenwerkstoffen bei betriebsähnlicher Beanspruchung, Z. d. VDI, 1943, Heft 41/42.

be  
Kc  
st  
zu  
au  
ist  
ge  
go  
Kc  
he  
st  
be  
ob  
Ob  
Be  
ein  
An  
als  
De:  
Da  
ger  
wä  
imr  
Die  
ein  
an

Gleitfläche am Kolben	Kolbenschaft		Ringnuten (1. Nut)		Bolzenloch
Gegengleitfläche	Zylinder		Kolbenringe		Kolbenbolzen
Werkstoff	Grauguß Stahl	Hartchrom	Grauguß	Sonderwerkstoffe	Stahl
Härte	HB = 180–260 (bis 450)	HV = 800–1100	HB = 220–280	bis HV 480	einsatzgehartet RC 59–65 nitriert HV = 700–1000
mittlere Flächen- belastung	kp/cm <sup>2</sup>	4–10	Otto 30–50	Diesel 60–100	250–500
mittlere Gleit- geschwindigkeit	m/sec	5–18	bis etwa 0,03		0,5–2
Temperatur	°C	100–190	160–280		130–190
Schmierung	meist reichlich		oft halbtrocken		meist reichlich
Verschleißneigung bei Aluminiumkolben	meist bedeutungslos, merklich nur bei viel Straßenstaub in der Ansaugluft bzw. bei Eisenabrieb im Öl		meist gering, kann durch Ölkohle, Eisenabrieb, Staub beträchtlich werden		meist sehr gering, merklich nur bei viel Straßenstaub in der Ansaugluft bzw. bei Eisenabrieb im Öl
bei Graugußkolben bei Magnesiumkolben			etwas geringer als bei Aluminiumkolben größer als bei Aluminiumkolben		
Freißneigung	nur wenn der Kolben klemmt (bei zu kleinem Einbauspiel, bei Überhitzung oder durch Metallspäne) und bei Trockenlauf (Ölmangel, Kraftstoffüberschwemmung, Kaltstart)		kommt praktisch nicht vor		nur wenn der Bolzen klemmt (bei zu kleinem Einbauspiel, auch im Pleuel) oder bei ungünstigen Schmierverhältnissen (z. B. in Zweitakt- Dieselmotoren)

### Verschleißwiderstand

Beim jetzigen Entwicklungsstand der Kolbenwerkstoffe, der Kolbenkonstruktion und -feinbearbeitung ist die Gebrauchsdauer von Verbrennungsmotoren nur mehr in Ausnahmefällen durch den Verschleiß des Kolbens bestimmt. Der Verschleiß der Zylinderlaufbahnen und Kolbenringe ist gewöhnlich um ein Mehrfaches größer und bestimmt daher den Zeitpunkt, an dem eine Reparatur nötig ist.

Am Kolben sind die Ringnuten, in denen die Kolbenringe bei hohen Temperaturen und sehr ungünstigen Schmierverhältnissen laufen, am meisten dem Verschleiß ausgesetzt. Das heiße und daher dünnflüssige Öl kann dort die eindringenden Verunreinigungen – zermahlene harte Ölkohle, Eisenabrieb von den Kolbenringen und Zylinderlaufbahnen, Straßenstaub und mechanisch oder chemisch aggressive Kraftstoff- und

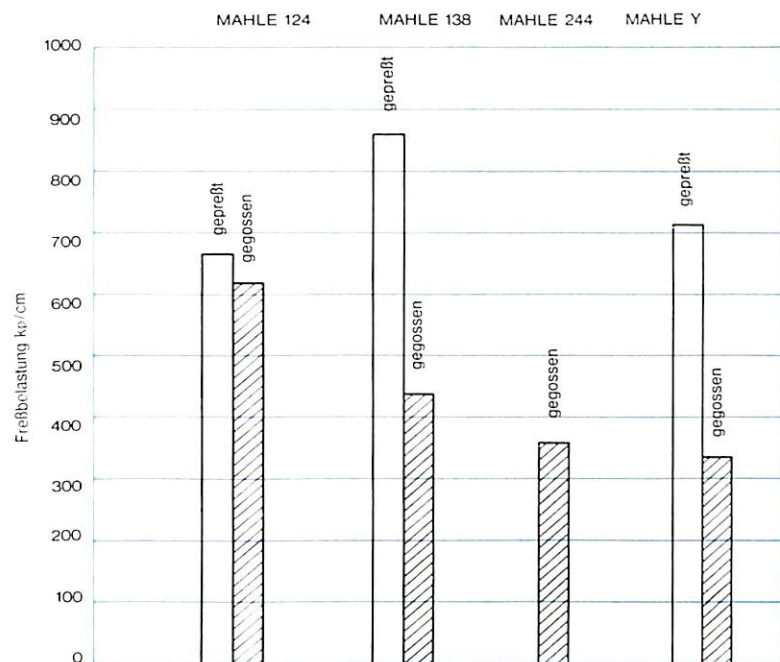
Verbrennungsrückstände – weder durch Einhüllen unschädlich machen noch schnell genug fortspülen. Deshalb ist eine hohe Verschleißbeständigkeit des Kolbenwerkstoffes besonders für die Ringnuten (wo die Warmhärte wegen der hohen Betriebstemperatur gering ist), daneben aber auch für die Schaft- und Bolzenlöcher wichtig.

Die Bestimmung der Verschleißfestigkeit von Werkstoffen auf Prüfmaschinen ist bekanntlich recht schwierig, weil die Ergebnisse je nach der Prüfmethode außerordentlich verschiedenartig ausfallen können. Relative Verschleißwerte für die MAHLE-Kolbenwerkstoffe sind in der Tafel oben und in Tafel Seite 31 enthalten. Sie wurden ermittelt auf einer abgewandelten Ausführung der Verschleißmaschine von E. Koch.<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> E. Koch, Charakteristik von Kolbenmaterialien unter Berücksichtigung des Verschleißwertes. Dissertation T. H. Aachen, 1931.

## Reibungswiderstand

An der Verlustleistung von Motoren hat die Kolbenreibung, besonders bei hohen Drehzahlen, einigen Anteil. Am Kolbenschaft handelt es sich dabei wegen der geringen Flächenbelastung vorwiegend um die innere Reibung des Schmierfilms. Die metallische Reibung



51 Mittelwerte der Freißgrenzen von Aluminium-Kolbenlegierungen gegen gehärteten Einsatzstahl

zwischen Kolbenwerkstoff und Zylinderwand kommt erst in Betracht, wenn der Anpreßdruck durch enges Spiel infolge der Wärmeausdehnung oder bei absichtlichem leichtem Klemmen von Kolben mit federndem Schaft (sogenannte Wärmebindung) groß wird. Die dabei entstehenden Druckstellen erhöhen die Kolbenreibung beträchtlich und können in Grenzfällen zum Anfressen führen.

In den Bolzenlöchern ist wegen der hohen Flächen drücke und der Relativgeschwindigkeit der Gleitpartner fast stets mit einem gewissen Anteil metallischer Reibung zu rechnen, wenn auch durch die heute übliche Feinbearbeitung eine besonders tragfähige und daher verschleißbeständige Gleitfläche erzeugt wird. Bei Zweitaktmotoren werden die Verhältnisse am Bolzen wegen der fehlenden Lastumkehr noch ungünstiger.

Nach Versuchen von P. Sommer<sup>1)</sup> mit der Lagermetallprüfmaschine von Mohr & Federhaff, Bauart M. v. Schwarz, kann für hochwertige Aluminiumkolbenlegierungen und Grauguß mit Reibungsbeiwerten von 0,004 bis 0,009 bei etwa 8 m/sec Gleitgeschwindigkeit gerechnet werden.

## Freißgrenze

Das »Fressen« von Gleitflächen, bei Kolben zum Beispiel am Schaft oder im Bolzenloch, ist ein Grenzzustand übermäßig gesteigerter Reibung, bei der die Gleitflächen verschleißt und schließlich zerstört werden. Das führt dann häufig zu weiteren Schäden. Deshalb ist auf die Erforschung und Beseitigung dieser störenden Erscheinung im ganzen Maschinenbau, besonders aber in der Kolbenindustrie, viel Mühe verwendet worden. Viele Einflüsse wirken meistens zusammen, wenn der normale Vorgang der Gleitreibung zum Fressen führt: Die beiden aufeinander gleitenden Werkstoffe mit ihrem Gefügebau, ihrer Härte, Festigkeit, Elastizität, chemischen Verwandtschaft, Wärmeleitfähigkeit usw. spielen eine große Rolle, ferner die Art und der Zustand des Schmiermittels. Ebenso aber die Form, Genauigkeit und Rauigkeit der Gleitflächen. Dazu kommen dann als äußere Bedingungen die Flächenbelastung, Gleitgeschwindigkeit und Temperatur bzw. Wärmeabfuhr. Schließlich darf die Einwirkung von Fremdkörpern, wie Metallspänen und Sand, als unberechenbare und schwer vermeidbare Zufälligkeit nicht unterschätzt werden. Aus der Fülle dieser Faktoren soll hier nur die Gleitflächenbelastung herausgegriffen werden, bei der unter sonst gleichen Bedingungen einige typische Aluminiumkolbenlegierungen zum Fressen neigen. Die Werte von Bild 51 sind von R. Dieterich<sup>2)</sup> auf einer Verschleißprüfmaschine nach Siebel-Kehl mit feinbearbeiteten Proben bei etwa 4 m/sec Gleitgeschwindigkeit gegen gehärteten Einsatzstahl C 15 (üblich für Kolbenbolzen) ermittelt worden. Die Schmierung wurde absichtlich ungünstig gehalten.

<sup>1)</sup> P. Sommer, Prüfung von Leichtkolben-Baustoffen, Dissertation T. H. München, 1931.

<sup>2)</sup> R. Dieterich, Die Freißgrenze beim Gleiten von Aluminium-Kolbenlegierungen, Diplomarbeit T. H. Stuttgart, 1951.

**Eutektische  
Kolbenlegierung  
Mahle 124**

Bild 52 gegossen, veredelt

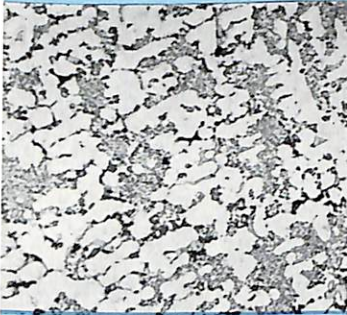


Bild 53 gegossen, unveredelt

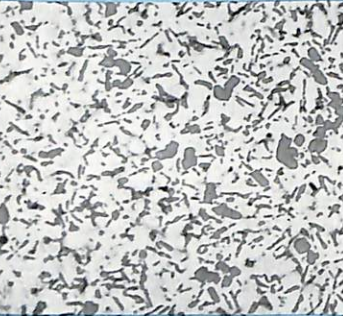
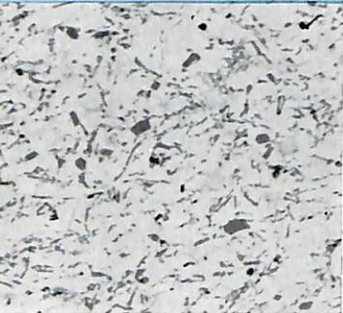


Bild 54 gepreßt



**Übereutektische  
Kolbenlegierungen  
Mahle 138 und 244**

Bild 55 138, gegossen

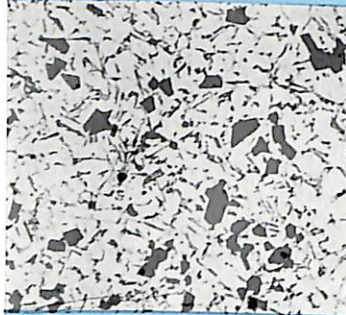


Bild 56 138, gepreßt

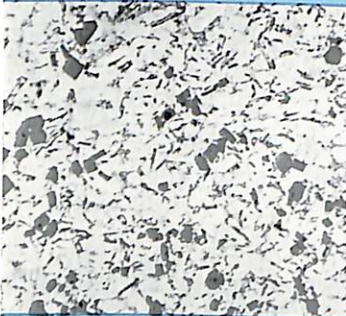
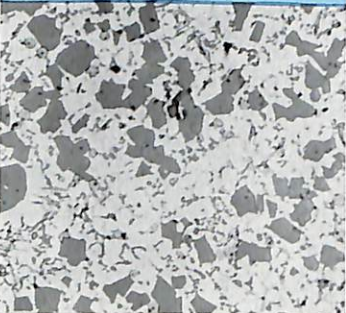


Bild 57 244, gegossen



**AL-CU-Kolbenlegierung Mahle Y**

Bild 58 gegossen

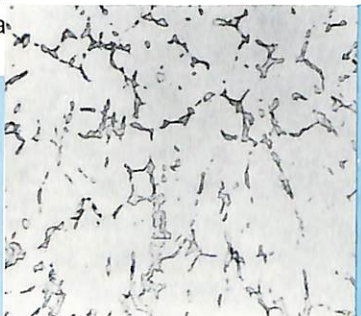


Bild 59 gepreßt

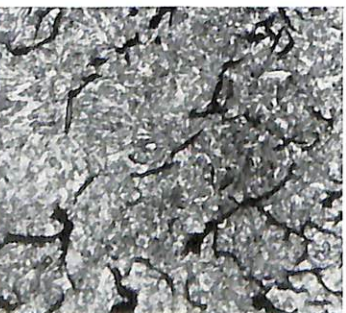


**Mahle Eisenwerkstoffe**

Bild 60 unlegiert



Bild 61 legiert, vergütet



Diese Befunde besagen, daß die Freßneigung bei den gegossenen Legierungen »MAHLE 124«, »MAHLE 138« und »MAHLE 244« mit steigendem Siliziumgehalt (etwa 12, bzw. 18 und 24% Si) zunimmt. Dabei wirken anscheinend die in den Gefügebildern 52 bis 57 erkennbaren Silizium-Kristalle mehr durch ihre Sprödigkeit und Unnachgiebigkeit nachteilig. (Für die Praxis ist aber der mit dem Siliziumgehalt zunehmende Verschleißwiderstand und die entsprechend abnehmende Wärmeausdehnung bedeutsamer.) Bei den gepreßten Legierungen (Bild 54 und 56) liegt die Freßgrenze im Vergleich zum Gußzustand allgemein wesentlich höher, wahrscheinlich wegen ihrer größeren Zähigkeit und Festigkeit.

Bei der Legierung Y, die nur verhältnismäßig geringe Mengen von harten Bestandteilen in der weicheren Aluminiumgrundmasse enthält (Bild 58 und 59), ist neben der im Gußzustand niedrigen Freßgrenze zu beachten, daß bei einem einmal örtlich einsetzenden Fressen sehr schnell die ganze Gleitfläche mit erfaßt und verschmiert wird. Dagegen beschränkt sich die Beschädigung bei den Aluminium-Silizium-Legierungen vorwiegend auf die Umgebung der Ausgangsstelle. Bei vorübergehender Entlastung kann diese dann oft wieder »ausheilen«. Damit ist zugleich auf das bei abnormalen Betriebszuständen wichtige, aber kaum zahlenmäßig erfaßbare »Notlaufverhalten« hingewiesen. Auch beim Einlaufen der Gleitflächen, das stets mit einem gewissen Abrieb und daher auch mit winzigen Freßerscheinungen an den noch allein tragenden, hochbelasteten Kämmen der Bearbeitungsspuren verbunden ist, kommt es darauf an, daß der Werkstoff nicht nur wenig zum Fressen neigt, sondern auch an entstehenden Druckstellen einen glatten Laufspiegel bekommt und nicht etwa aufgerissen wird. (Siehe hierzu auch »Laufflächenschutzschichten« Seite 37.)

## Zusammensetzung und Eigenschaften der Werkstoffe von MAHLE-Kolben

Bezeichnung	MAHLE 124		MAHLE 138		MAHLE 244	MAHLE Y		Grauguß	
Grundmetall	Aluminium							Eisen	
Legierungsgruppe	AlSi 12 Cu Ni		AlSi 18 Cu Ni		AlSi 25 Cu Ni	AlCu 4 Ni		unlegiert	legiert vergütet
Zustand K = Kokillenguß S = Sandguß P = gepreßt W = wärmebehandelt	K, W	P, W	K, W	P, W	K, W	K, W	P, W	S	S, W
Zusammensetzung % Si Cu Ni Mg Fe Mn Ti Zn Cr Al ( ) = übliche Beimengungen, Verunreinigungen	11-13		17-19		23-26	< 0,5		C 3,3-3,5	2,8-3,3
	0,8-1,5		Legierungsbestandteile entsprechend Leg. Mahle 124			3,5-4,5		Si 2,1-2,4	1,8-2,1
	0,8-1,3					1,75-2,25		Mn 0,5-0,75	0,6-0,95
	0,8-1,3					1,25-1,75		P < 0,15	< 0,15
	(0,7)					< 0,6		S < 0,1	< 0,1
	(0,2)					< 0,2			und wahlweisen Zusätzen an: Ni Cr Mo V
	(0,2)					< 0,2			
	(0,2)					< 0,2			
	-					0,3-0,6			
	Rest			Rest		Rest			
							90-93		
Zugfestigkeit kp/mm <sup>2</sup> 1) bei 20°C 2) bei 150°C 3) bei 250°C	20-25	30-37	18-22	23-30	18-22	23-28	35-42	18-25	25-35
	18-23	25-30	17-20	20-24	17-20	22-26	30-37		
	10-15	11-17	10-14	11-17	10-14	16-20	15-26		
Streckgrenze kp/mm <sup>2</sup> 1)	19-23	28-34	17-20	22-26	17-20	15-18	28-32	15-22	20-28
Bruchdehnung δ <sub>5</sub> % 1)	0,3-0,8	1-3	0,2-0,7	0,5-1,5	0,1-0,3	0,3-1,0	5-15	< 1	< 1
Brinellhärte kp/mm <sup>2</sup> bei 20°C	90-125					95-125			
Warmhärte bei 150°C } bei 250°C } 3)	70-90							200-240	250-280
	30-40		35-45	30-45	35-45				
Biegewechselfestigkeit kp/mm <sup>2</sup> 1)	8-12	11-14	8-11	9-12	7-10			10-14	11-16
Verschleißwert 1) (Abriebmenge bezogen auf Leg. MAHLE 138)	ca. 1,2		ca. 1		ca. 0,7			ca. 0,3	ca. 0,3
Elastizitätsmodul kp/mm <sup>2</sup> (bei 200°C)	7500		8000		8600	7200		10 000 -12 000	11 000 -14 000
Dichte g/cm <sup>3</sup>	2,70		2,68		2,65	2,80		7,3	7,3
Wärmeleitfähigkeit cal/cm sec °C	0,33 -0,37	0,34 -0,37	0,30 -0,34	0,30 -0,35	0,28 -0,32	0,33 -0,36	0,34 -0,38	0,10-0,13	0,08-0,11
Mittlere lineare Wärmeausdehnung (20-200°C) cm/cm °C · 10 <sup>-6</sup>	20,5-21,5		18,5-19,5		17-18	23-24		11-12	11-12

1) Die angegebenen Werte gelten bei gegossenen Legierungen für getrennt in Kokille gegossene Probestäbe

2) Nach Erwärmung auf Prüftemperatur zwischen 20 und 100 Stunden

3) Nach 250 Stunden Erwärmung auf Prüftemperatur

4) Auf MAHLE-Verschleißmaschine

## Herstellungsverfahren für Rohkolben

Für die Rohformung von Leichtmetallkolben kommen verschiedene Fertigungswege in Betracht. Der Sandguß wird meist nur bei geringen Stückzahlen großer Kolben angewendet. Außenkokillen mit Sandkernen eignen sich für kleine Mengen, bei denen die Anfertigung von Stahlkernen noch unwirtschaftlich ist.

Der Kokillenguß erlaubt eine vielseitige Formgebung. Durch entsprechende Kernteilungen lassen sich Innenformen mit Hinterschneidungen und Rippen sowie komplizierte Brennraummulden am Kolbenboden fertig gießen. Dehnungshemmende Stahlstreifen, Ringträger und andere Konstruktionselemente können mit eingegossen werden. Die rasche Erstarrung in den Metallkokillen bewirkt ein feinkörniges, gleichmäßiges Gefüge und gute Festigkeitseigenschaften der Gußstücke. Wegen der konstruktionsbedingten, oft beträchtlichen Dickenunterschiede bei Stützrippen, Bolzennaben und Kolbenböden im Verhältnis zum meist dünnwandigen Kolbenschaft muß durch besondere Maßnahmen für eine geregelte Wärmeabführung vom Gußstück an die Kokillen gesorgt werden, damit alle Gußquerschnitte dicht ausfallen. Bei entsprechend angepaßter Arbeitsweise lassen sich die verschiedensten Leichtmetallkolbenlegierungen einwandfrei in Kokillen vergießen. Die meisten Kolben für Ottomotoren in Personenwagen, Motorrädern und Mopeds, sowie

verschiedene für Dieselmotoren in Lastwagen, Schleppern und stationären Anlagen werden wegen der technischen Güte und der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens im Kokillenguß hergestellt. In großen Mengen benötigte Kolben für bestimmte Wagentypen werden in laufend stärker mechanisierten, kostensparenden Gießmaschinen gegossen.

Das Gesenkpressen von Kolben (meist als »Schmieden« bezeichnet) macht den Werkstoff fester, zäher und gleichmäßiger, als er im gegossenen Zustand ist. Die höhere Güte wird durch die unter Druck erfolgende Verdichtung und Knetung erreicht, die in mehreren Stufen auf großen Pressen erfolgt. Verwickelte Innenformen, besonders solche mit Hinterschneidungen, können in der Regel nur durch nachträgliches Zerspanen hergestellt werden. In Sonderfällen werden auch Kolben mit Hinterschneidungen gepreßt.

Das Gesenkpressen wurde von MAHLE schon in der Einführungszeit des Leichtmetallkolbens seit 1921 angewendet. Gepreßte Kolben aus Aluminiumlegierungen werden hauptsächlich dort verwendet, wo besonders hohe mechanische und thermische Belastungen vorkommen, wie in bestimmten Fahrzeugdiesel-, Renn- und Sportmotoren.

Bei letzteren wird die erhöhte Festigkeit durch gewichtsparenden Leichtbau ausgenützt.

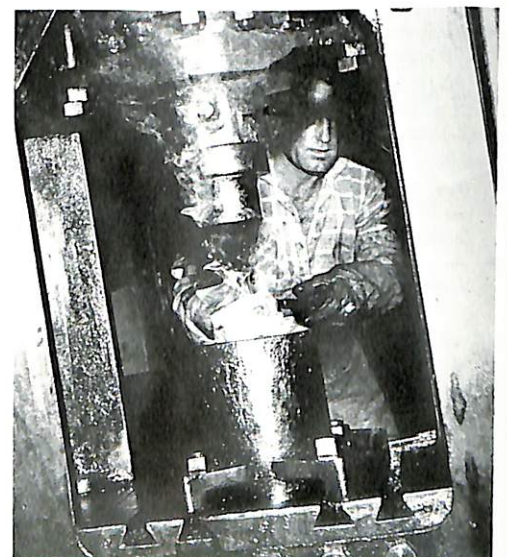
62 Kokillengießen (Handguß)



63 Kokillengießen (Maschinenguß)



64 Gesenkpressen (Schmieden)



# Kolbenbearbeitung

## Formgenauigkeit und Maßhaltigkeit

Der Kolben braucht als bewegliches Kraftübertragungs-, Dichtungs- und Führungselement an allen Gleitstellen bei möglichst kleinen Spielen freie Beweglichkeit. Dieser Zustand muß bei allen Betriebsverhältnissen, also unter Einwirkung verschieden hoher wechselnder Drücke und Temperaturen über sehr lange Betriebszeiten gesichert bleiben.

Unter der Voraussetzung richtiger Konstruktion und Werkstoffwahl vermag der Kolben seine Aufgabe um so besser zu erfüllen, je genauer die Spiele, Passungen und Abmessungen von der Fertigung erzeugt werden, welche auf Grund der Gegebenheiten von Werkstoff, Konstruktion und Betriebsbedingungen als Bestwerte gelten können. Es ergeben sich daraus für Maßhaltigkeit und Formgenauigkeit des Kolbens teilweise so enge Fertigungstoleranzen, wie sie sonst nur bei ganz wenigen Maschinenteilen, eigentlich nur im Meßgeräte- und Lehrenbau, verlangt werden.

Die gleichen Anforderungen sind natürlich auch an die Formgenauigkeit der Zylinder zu stellen.

## Schaftlauffläche

Der Kolbenschaft übt im Triebwerk die Funktion des Kreuzkopfes aus, das heißt: er leitet während seiner Gleitbewegung die durch die Pleuelauslenkung hervorgerufenen Seitenkräfte an die Zylinderwand ab. Bei einem Fahrzeugmotor entspricht der dabei zurückgelegte Gleitweg jedes Kolbens etwa der halben bis ganzen Fahrstrecke des Fahrzeugs. Daneben spielt der Kolbenschaft auch eine nicht unwesentliche Rolle bei der Wärmeableitung und bei der Regelung des Schmierölhaushalts. Seine Form muß meistens um kleine, sorgfältig bemessene Beträge an Konizität oder Ovalität von der reinen Zylindergestalt abweichen. Durch sinnvolle Kombination solcher geometrischer Formelemente läßt sich dem Kolbenschaft auch eine auf jeden Spezialfall zugeschnittene Gestalt verleihen, das heißt, der Schaft kann beispielsweise ballig, ballig-oval, oval-oval, oval-rund u. a. bearbeitet werden. Dieser Weg wurde erstmalig von MAHLE schon im Jahre 1935 bei der Schaftformgebung von Kolben für Sport-, Renn-, Flug- und Fahrzeugmotoren mit großem Erfolg beschritten und hat sich seither in zahlreichen Varianten für Serienkolben jeder Art und Größe bestens bewährt.

65 Der erste formgedrehte Kolben der Welt

1935

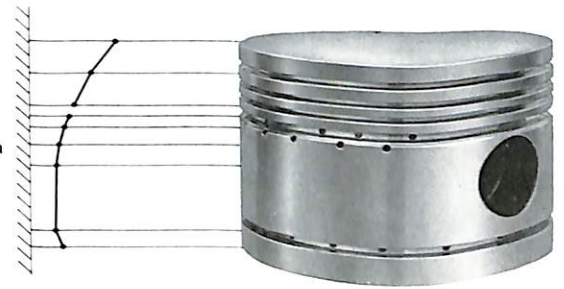
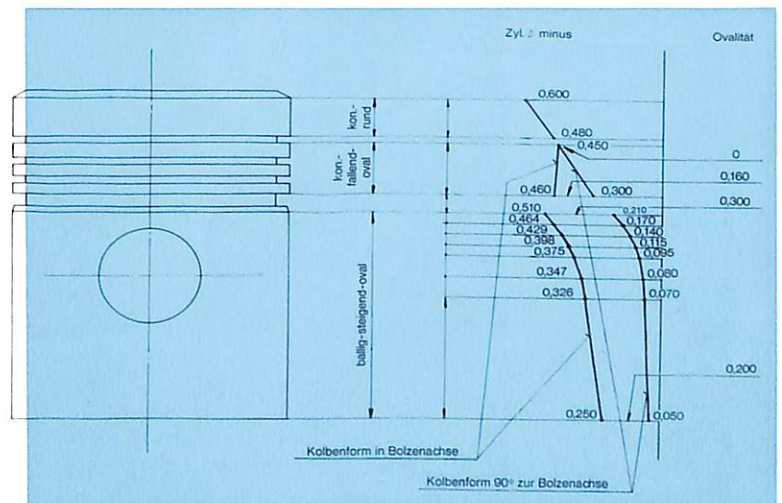


Bild 66 zeigt als Beispiel das Bearbeitungsprofil eines Ottomotor-Kolbens mit der den gegebenen Verhältnissen entsprechenden Veränderlichkeit des Kolbendurchmessers.

Die Fertigbearbeitung des Schaftes erfolgt in der Regel durch Feindreihen auf Kopiermaschinen.

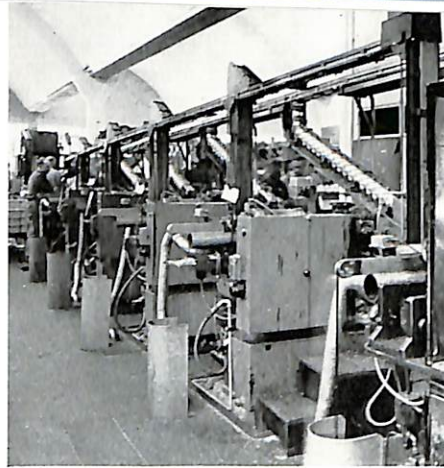
Neben der geeigneten Profilform ist für das einwandfreie Laufverhalten des Kolbenschaftes auch die Oberflächenfeingestalt von großer Bedeutung. Von dieser ist in hohem Maße einerseits der kraftübertragende Flächenanteil und damit die Flächenpressung, andererseits die sichere Versorgung der Schaftgleitfläche mit Schmieröl abhängig. Außerdem beeinflusst die Oberflächenfeingestalt auch erheblich die gegenseitige Anpassungsfähigkeit der Kolbenschaft-, der Kolbenring- und der Zylinderlauffläche während der Einlaufperiode des Motors. Die Erfahrungen der letzten Jahre haben klar gezeigt, daß weder die Zylinder- noch die Kolbenlauffläche zu glatt sein sollen, vielmehr mittlere Rauhtiefen im Zylinder zwischen 3 und 6 µm und am Kolbenschaft zwischen 3 und 8 µm je nach Motorgröße eingehalten werden sollten. Von Fall zu Fall werden auch größere Rauigkeiten an der Kolbenlauffläche ausgeführt. Die Erklärung für diese Erscheinung ist die, daß einer unter allen Umständen gesicherten Schmierung der Gleitflächen – ermöglicht durch den Ölvorrat in den beiderseitigen Bearbeitungsriefen – größere Bedeutung zukommt, als einem übersteigerten Volligkeitsgrad der Tragflächen.

66 Beispiel eines Kolbenbearbeitungsprofils





67 Bearbeitungsstraße für Spezialkolben



68 Bearbeitungsstraße für Großserien



69 Bearbeitungsstraße für Großkolben

Auf Bild 70 wird die nach den erwähnten Grundsätzen erzeugte Oberfläche in verschiedenen Darstellungsweisen gezeigt. Die bei der Bearbeitung noch stehbleibenden kleinen Erhöhungen werden im Zuge des Einlaufens der Gleitflächen allmählich abgetragen. Die weitere Werkstoffabtragung und die damit verbundene maßliche Veränderung, die man als Verschleiß bezeichnet, ist sehr gering und bildet unter normalen Betriebsbedingungen keinen Anlaß zum Austausch eines Kolbens.

Die Forderung nach hoher Formgenauigkeit, Maßhaltigkeit und Oberflächengüte kann nur durch sorgfältige Zergliederung der ganzen Bearbeitung und sinnvolle Zusammenfassung der einzelnen Schritte erfüllt werden. So muß die Bearbeitung an den wichtigsten Stellen, z. B. am Schaft, in Stufen zunehmender Feinheit erfolgen, damit sich das durch die Spanabnahme gestörte innere Spannungsgleichgewicht in der anschließenden kurzen Pause wieder einspielen und die damit verknüpfte Formänderung durch die nachfolgenden Schritte beseitigt werden kann. Beim letzten Arbeitsgang erlaubt die querschnittabhängige, örtlich verschiedene Formsteifigkeit nur einen geringen Spanquerschnitt, da sonst die »weicheren« Partien unter dem Werkzeugdruck von der angestrebten Form unzulässig abweichen würden. Um diesen hohen Ansprüchen mit wirtschaftlichen Fertigungszeiten zu genügen, hat die MAHLE Komm.-Ges. Spezialmaschinen und Maschinenstraßen selbst entwickelt und gebaut, die unmittelbar auf die Bedürfnisse der Kolbenfertigung zugeschnitten sind.

### Kolbenbolzenlöcher

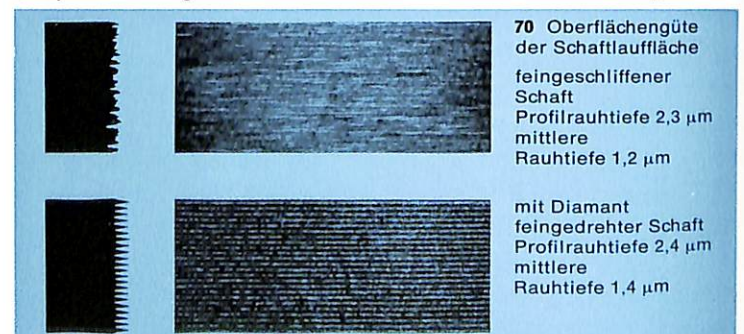
Für die Bearbeitung eines Bolzenlochs zwischen 18 und 30 mm  $\phi$  wird heute allgemein eine Fertigungstoleranz von 0,006 mm verlangt. Die Grenzen sind also enger als für die Edelpassung nach DIN bzw. für die ISA-Qualität H 4. Für die Passung zwischen Kolben und Bolzen ist auch diese Spanne mitunter noch zu groß. Man unterteilt daher die aus der Fertigung kommenden Kolben von Fall zu Fall noch in 2 Gruppen und ergänzt sie mit entsprechend sortierten Bolzen, um die angestrebte Passung so genau wie möglich zu erreichen. Neuere Erfahrungen deuten darauf hin, daß der Passungsbereich zwischen Bolzen und Bolzenloch ohne Nachteil erweitert werden kann, wodurch die Not-

wendigkeit zur Gruppenunterteilung entfällt. Es versteht sich unter diesen Umständen von selbst, daß alles über Formgenauigkeit, Maßhaltigkeit und Oberflächengüte Gesagte hier in besonderem Maße gilt. Außerdem muß auf genaues »Fluchten« der beiden Bolzenlöcher sowie auf eine einwandfrei rechtwinklige Lage zur Kolbenlängsachse geachtet werden. Nach dem Vorbohren werden die Bolzenlöcher meist auf mehrspindeligen Spezialbohrmaschinen eigener Konstruktion mit Diamantwerkzeugen feingeböhrt.

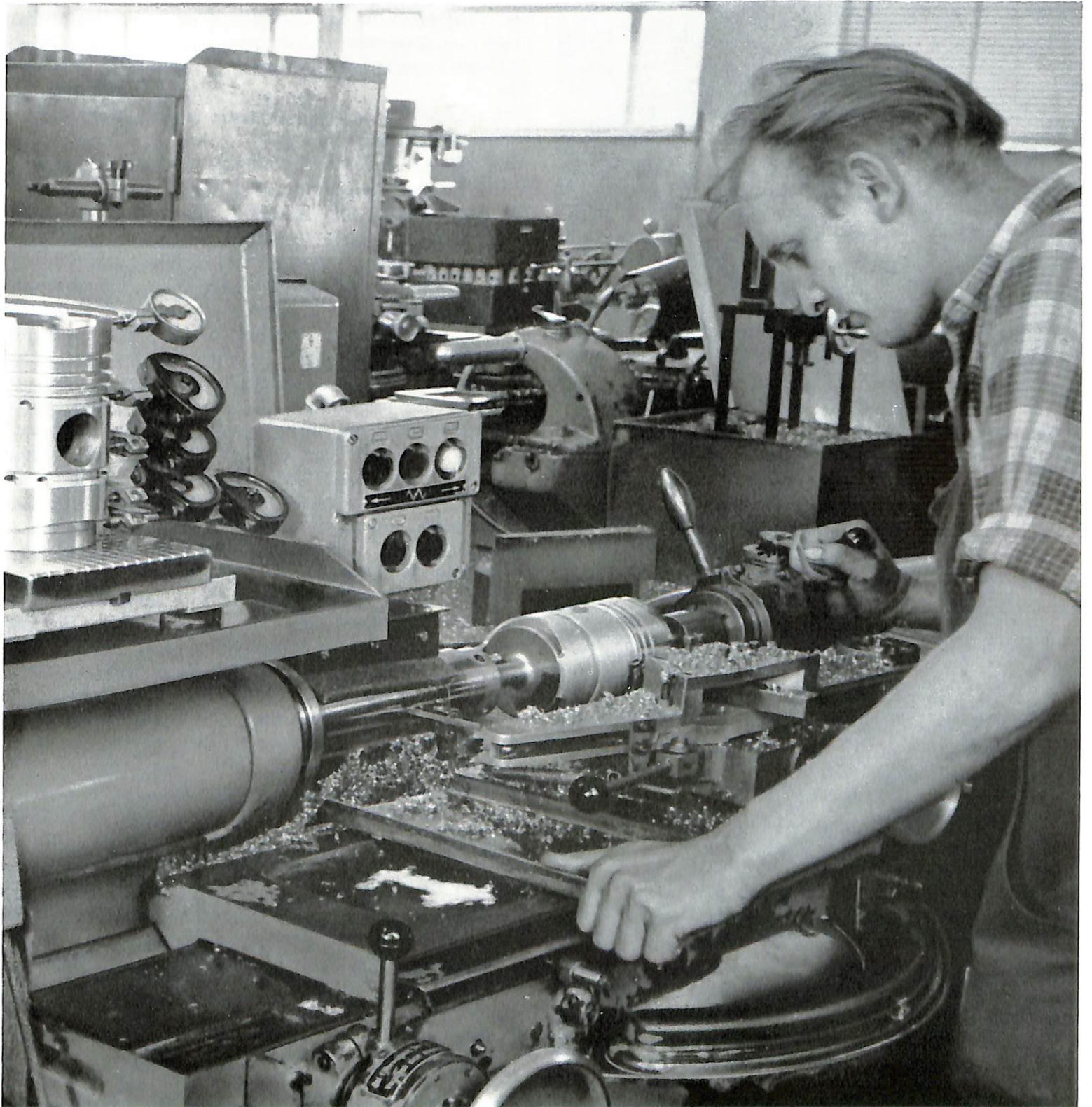
Die für das Bolzenloch bestgeeignete Oberflächenform ist in erheblichem Maße davon abhängig, ob der betreffende Bolzen im Pleuel frei beweglich (schwimmend) gelagert oder fest eingeschrumpft oder geklemmt ist (Schrumpf- bzw. Klemm-Pleuel).

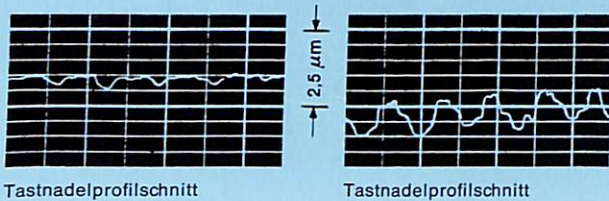
Beim schwimmenden Bolzen ist angenommen, daß dieser sich in erster Linie im Pleuelauge dreht, während die Drehung im Kolbenbolzenloch als »Reserve« anzusehen ist. Es soll sich ein tragfähiger Schmierfilm ausbilden können, was im allgemeinen durch das »Pumpen« beim Krafrichtungswechsel gewährleistet ist. Wegen der hohen Flächenbelastung (bis ca. 500 kp/cm<sup>2</sup>) bei geringer Gleitgeschwindigkeit wird ein hoher Völligkeitsgrad der Tragfläche angestrebt.

Erheblich anders stellen sich die Bedingungen bei den im Pleuel festsitzenden Bolzen dar. Die Gleitbewegung kann hier nur im Kolbenbolzenloch vor sich gehen. Die Anwesenheit eines tragfähigen Ölfilms an der gesamten Gleitfläche ist daher unbedingt erforderlich. Seiner Ausbildung kommt entgegen, daß die höchste Druckbelastung (im OT) zeitlich mit der größten Gleitgeschwindigkeit bei der Schwenkbewegung des Pleuels zusammenfällt, wodurch sich vermutlich eine Art hydrodynamischer Schmierung aufbaut. Von der Bearbeitung her wird in diesem Fall im Sinne einer Öl-speicherung eine ähnliche Oberflächenfeingestalt







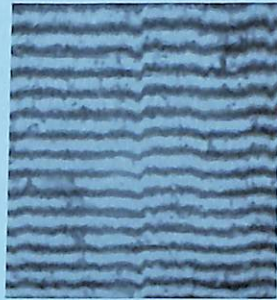


Tastnadelprofilschnitt

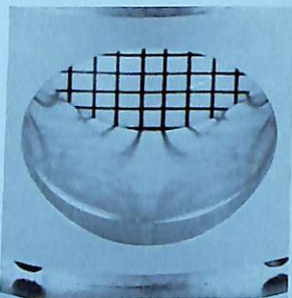
Tastnadelprofilschnitt



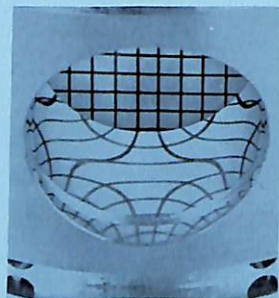
Gleichmäßige Bearbeitungsspuren



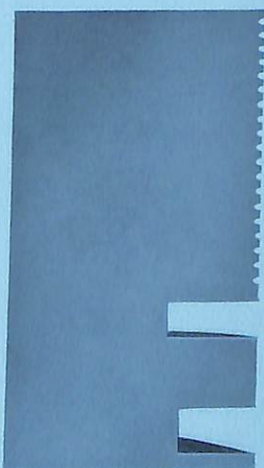
Ursprüngliche Spuren weitgehend eingeebnet. Vorschubabstand noch sichtbar



Mit Diamant feingebohrt, mittlere Rauhtiefe 1 μm



Mit Diamant feingebohrt, dann spanlos nachverdichtet, mittlere Rauhtiefe 0,25 μm



73 Ringzone im Schnitt mit gestrahltem Feuersteg



Dieselpiston mit gestrahltem Feuersteg

angestrebt wie bei der Schaftlauffläche; die Rauhtiefen liegen im allgemeinen zwischen 0,5 und 2 μm. Bild 72 zeigt eine Gegenüberstellung der beschriebenen Oberflächen.

### Kolbenringnuten

Die Kolbenringnuten sollen den Ringen als den eigentlichen Dichtungselementen die erforderliche freie Beweglichkeit, gleichzeitig aber auch möglichst satte Führung bieten. Erste Voraussetzung für ihre einwandfreie Funktion ist eine formsteife Gestaltung der Bodenzone sowie eine zweckentsprechende Auswahl und Anordnung der Ringe. Besonders hohe Ansprüche müssen aber auch an die Fertigung gestellt werden. Für sichere Dichtwirkung ist ferner einwandfreie Berührung der meist geläpten Ringflanken mit den jeweils zur Anlage kommenden Nutenflanken unerlässlich. Sie müssen also auf ihrem ganzen Umfang eben und parallel zur entsprechenden Ringflanke sein. Für die Bewertung der Oberflächengüte gelten sinngemäß ähnliche Gesichtspunkte wie bei Bolzenloch und Kolbenschaft.<sup>1)</sup>

Große Sorgfalt muß auch auf die Ausrundung des Nutengrunds verwendet werden. Scharfe Ecken verursachen durch Kerbwirkung hohe Spannungsspitzen und damit bei hochbeanspruchten Ringstegen die Gefahr des Ausbrechens. Sorgfältige Untersuchungen bei der MAHLE Komm.-Ges. haben gezeigt, daß mit annähernd parabolischer Nutengrundausrundung die günstigste Dauerhaltbarkeit bei Kolben mit besonders hoch beanspruchten Stegen erreicht werden kann.

### Strahlung der Ringzone

Der Kolben soll den Verbrennungsraum beweglich abdichten. Unbeschadet der Funktion der Kolbenringe wird er dies um so besser können, je kleiner in der Ringzone die Spalte zwischen Kolben und Zylinder, d. h. die Spiele bei den jeweiligen Betriebszuständen sind. Die Erfahrung hat gezeigt, daß insbesondere bei Dieselmotoren mit unterteiltem Verbrennungsraum enge Spiele am Feuersteg von Vorteil sind, weil auf diese Weise der Ansatz von Ruß am Feuersteg selbst und in der obersten Ringnut vermindert werden kann. Ein wichtiges Hilfsmittel zu diesem Zweck ist das Strahlen des Feuerstegs. Dabei werden in diesen rillenartige

<sup>1)</sup> E. Mickel, Die Kolbenringnut, Luftwissen, Bd. 6, Nr. 12, Dez. 1939

## Laufflächenschutz

Vertiefungen eingestochen, so daß nur noch ein Teil der Fläche – ca. 20 bis 50% – am Zylinder zum Tragen kommen kann. Die vorteilhafte Wirkung der Strahlung läßt sich wie folgt beschreiben:

a) Gegenüber dem nicht gestrahlten Feuersteg läßt sich das Spiel an dieser Stelle fühlbar verkleinern. Die Kämme der Strahlung werden bewußt an der Zylinderlaufbahn zum Tragen gebracht. Erhöhte Freßgefahr tritt dabei nicht ein, weil durch die Vertiefungen die Tragflächen in Bewegungsrichtung unterbrochen sind. Durch örtlichen Abrieb oder plastische Verformung der Tragkämme kann sich der Feuersteg während des Einlaufens das für den kritischen Betriebszustand benötigte Laufspiel selbst herstellen.

b) Auch wenn sich mit zunehmender Laufzeit die Rillen der Strahlung mit Ruß bzw. Ölkohle füllen, bleibt wegen der erreichten Spielverkleinerung und Spielanpassung eine dauernde Verbesserung der Abdichtung und Schonung der Ringzone erhalten.

### Kolbenboden

Der Kolbenboden erfährt keinerlei reibende Beanspruchung. Seine äußere Form richtet sich weitgehend nach den konstruktiven Gegebenheiten der einzelnen Motortypen, das heißt also, nach der Form des Verbrennungsraumes, nach der Lage der Ventile, der Zünd- oder Einspritzorgane usw. Dementsprechend wird der Boden ganz, teilweise oder überhaupt nicht bearbeitet. Das früher übliche Polieren, das die Wärmeaufnahme und den Ölkohleinsatz hemmen sollte, wird heute kaum mehr angewandt, da es sich wenig wirksam erwiesen hat. Gelegentlich verleiht man dem Kolben einen gewissen Schutz gegen Anschmoren durch eine Eloxal-Schicht.



Das Laufverhalten von Leichtmetallkolben wird durch den Werkstoff und die Feinbearbeitung ihrer Lauffläche bestimmt. Es läßt sich außerdem durch besondere Schutzschichten verbessern.

Nach der Endbearbeitung erkennt man unter dem Mikroskop am Kolbenschaft die durch das Schleifen oder Feindreihen erzeugten feinen Kämme des Schnittprofils, die etwa 3 µm bis 10 µm über den vollen Werkstoffquerschnitt hinausragen.

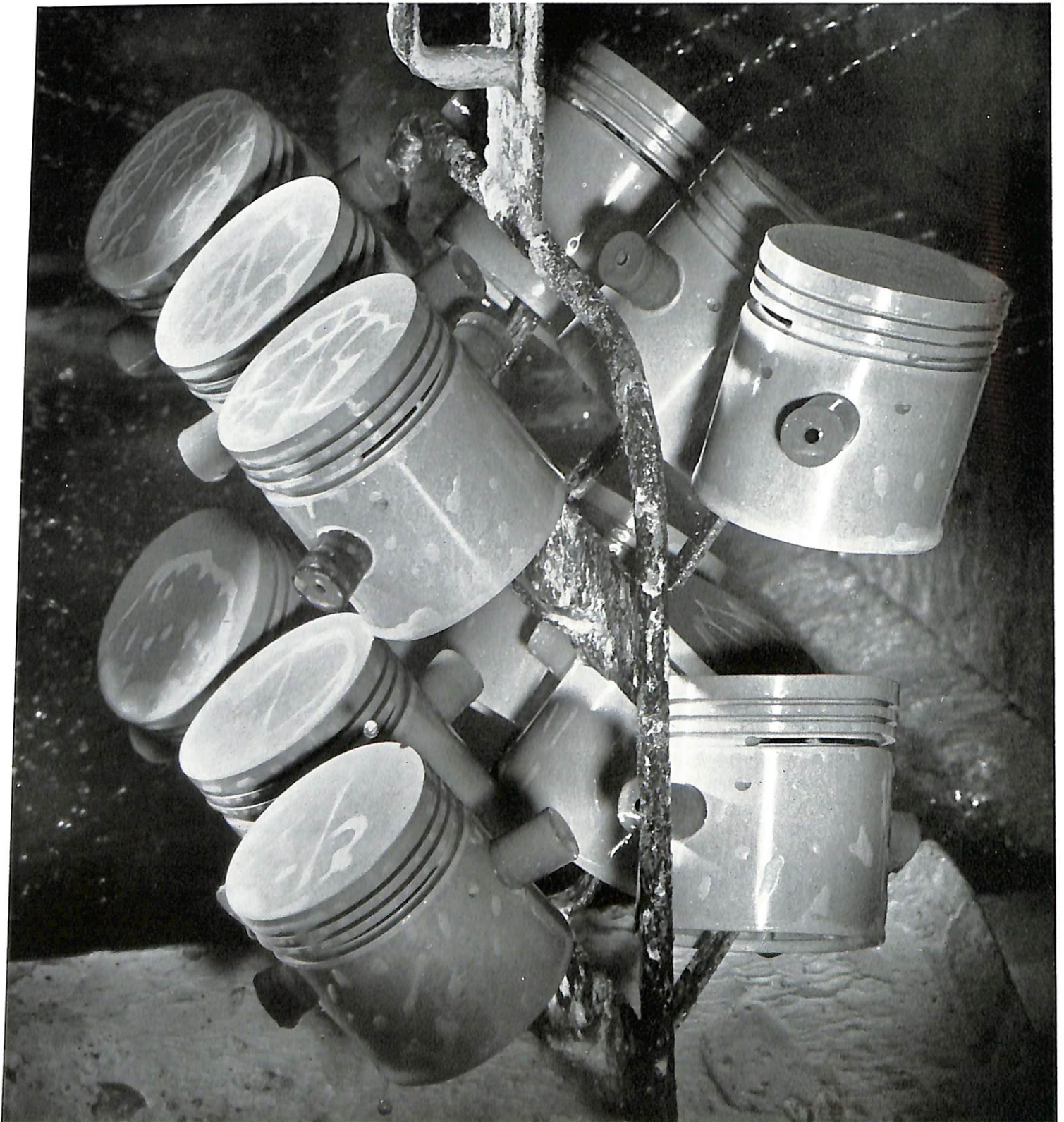
Mit diesen Kammlinien nimmt der neue Kolben beim Gleiten im Zylinder die Kolbenseitenkraft auf. Die dabei entstehenden hohen Anpreßdrücke bewirken ein allmähliches Abtragen der Kammrücken und ermöglichen dadurch während der Einlaufzeit eine gewisse gegenseitige Anpassung der Zylinder- und Kolbenlauffläche, wie im Abschnitt »Schaftlauffläche« näher beschrieben. Es ist daher ratsam, den Motor während dieser Zeit zwar zügig, jedoch nicht extrem zu belasten.<sup>1)</sup>

Um die Gefahren während der Kolben- und Ring-Einlaufzeit weiter zu vermindern, sind verschiedene Schutzschichten für Kolbengleitflächen entwickelt, sorgfältig lange Zeit erprobt und dann eingeführt worden. Sie beschleunigen das Einlaufen wesentlich und ergeben auch noch nach längerem Betrieb ein gewisses »Notlaufverhalten«, Bild 74. Auf dieses kommt es vor allem dann an, wenn die Schmierung des Kolbenschaftes vorübergehend beeinträchtigt wird, wie z. B. bei sehr großer Kälte, bei Ölverdünnung durch Benzin (was bei häufigem Starten mit angereichertem Gemisch im Winter vorkommen kann), oder bei Ölüberhitzung infolge von Überlastung, Ölverlusten oder Kühlstörungen.

### Verbleite Aluminiumkolben

Für das Verbleien von Aluminiumkolben hat sich ein chemisches Austauschverfahren gut bewährt. Da Blei in der elektro-chemischen Spannungsreihe der Metalle edler als Aluminium ist, wird es in einer geeigneten Bleisalzlösung an der Oberfläche von Aluminiumgegenständen niedergeschlagen. Dafür wird dort solange Aluminium aufgelöst, bis sich eine geschlossene Bleischicht gebildet hat und der Austauschvorgang aufhört.

<sup>1)</sup> Das Einlaufen mit beschränkter Leistung und Drehzahl dient außerdem der Selbstreinigung des Motors von unvermeidlichen kleinen Verunreinigungen, die aber mit besonderen Spülmethode neuerdings schon beim Prüflauf beseitigt werden können.





76 Kolben im Eloxalbad

In geeigneten Bädern lassen sich nach entsprechender Vorbehandlung Bleischichten von etwa 0,003 mm Dicke erzeugen. Die weiche Schicht hat trotz ihrer geringen Stärke eine ausgezeichnete Gleitschutzwirkung und läuft – ähnlich wie ein Weichmetallager – schnell und gleichmäßig ein. Das Verfahren ist einfach und zuverlässig. Es wird seit langer Zeit mit Erfolg angewendet und erlaubt schon kurz nach dem Einbau die volle Belastung der Kolben.

Die meisten bekannten Motorhersteller in Deutschland und viele im Ausland bauen Kolben mit MAHLE-Bleischutzschichten serienmäßig in Personen- und Nutzfahrzeugmotoren ein.

#### **Verzinnte Aluminiumkolben**

Ähnliche Eigenschaften wie das Verbleien ergibt auch das Verzinnen von Kolben, das in derselben Weise durchgeführt wird.

In Grenzfällen ist Blei als Kolbenschutzschicht durch seinen höheren Schmelzpunkt (327 °C) dem Zinn (232 °C) überlegen.

#### **Grafitierte Aluminiumkolben**

Grafit ist als Schmiermittel, besonders auch als Zusatzmittel zum Motoröl, altbekannt, weil es den Schmierstoff haftfähiger macht und selbst zusätzlich eine Schmierwirkung entfaltet, wenn der Ölschmierfilm versagt.

Es war schwierig, Grafit haltbar und betriebssicher auf Kolbenschäfte aufzubringen. Die üblichen Methoden der Vorgrafitierung von Motorteilen mit wässrigen Grafitaufschwemmungen sind nur von vorübergehender Wirkung, weil der Grafit durch das Schmieröl zum größten Teil bald wieder fortgespült wird, selbst wenn die Kolbenauflfläche vorher durch Aufrauhen besonders haftfähig gemacht wurde. Erst durch das MAHLE-Grafalverfahren gelang es, eine gebundene, haftfeste Grafitenschutzschicht auf Kolben zu erzeugen. Damit wird eine den Metallschichten noch überlegene Schutzwirkung erzielt. Die MAHLE-Grafalschicht hat den Vorteil, den Einlaufvorgang zu beschleunigen sowie gegen Freßangriffe bei Kaltstart oder Überlastung zu schützen. Verunreinigungen im Motor werden eingebettet und unschädlich gemacht. MAHLE-Grafalschichten haben eine Dicke von 0,02 bis 0,04 mm, die bei der Bemessung des Einbauspiels größerer Kolben meist

unberücksichtigt bleiben kann. Bei kleineren Kolben ist dies jedoch wegen der an sich schon geringen Einbauspiele kaum möglich. Deshalb zieht man hier Weichmetallaufschichten vor. Das Verfahren ist auf alle Kolbenbaustoffe anwendbar.

#### **Eloxierte Aluminiumkolben**

Das bekannte Verfahren der elektrischen Oxydation von Aluminiumkolben besteht darin, daß die Oberfläche in einem galvanischen Bad unter Stromeinwirkung anodisch bis zu einer Dicke von etwa 0,01 bis 0,02 mm in Oxyd verwandelt wird. Dabei bildet sich aus dem verhältnismäßig weichen Werkstoff eine harte, festhaftende Schicht von hoher Schmelztemperatur.

In Anbetracht der hohen Betriebsbeanspruchung der Kolbenauflflächen versprach man sich anfänglich von einer solchen »Panzerschicht« erhebliche Vorteile. Es zeigte sich aber, daß die harte Eloxalschicht örtliche Druckstellen, wie sie u. a. beim Einlaufen oder bei Überlastung auftreten können, nicht zu überbrücken vermag, weil der Oxydpanzer wohl eine hohe Abriebfestigkeit, aber keine »Notlaufeigenschaften« besitzt. Die Eloxalschicht verhütet also das Fressen nicht mit Sicherheit. Wenn sie zum Fressen kommt, gefährdet sie sogar wegen ihrer Härte die Zylinderlaufbahn. Außerdem füllt sich manchmal die poröse Eloxalschicht mit kleinen schmirgelnden Abriebteilen, so daß das Gegenteil der erstrebten Verbesserung eintritt.

Am Schaft werden Kolben aus den genannten Gründen nur noch selten eloxiert, dagegen haben sich eloxierte Kolbenböden bei hoher thermischer Beanspruchung gut bewährt, Bild 76. (Korund 2000 °C Schmelzpunkt.)

#### **Schutzschichten auf Graugußkolben**

Grauguß besitzt bekanntlich gute Laufeigenschaften. Trotzdem hat man in den USA schon lange erkannt, daß Graugußkolben durch dünne Überzüge mit weichen Metallen, wie bei Aluminiumkolben 0,01 bis 0,02 mm dick aufgebracht, beim Einfahren und bei vorübergehender Überlastung betriebssicherer werden. Das ist vor allem deshalb wichtig, weil Graugußkolben, wenn sie einmal zum Fressen kommen, die Zylinderlaufbahn beschädigen. Die weiche, schmiegsame Schicht gleicht die geringen Bearbeitungsspuren aus und bildet an den Kolbenauflflächen schon nach kurzer Laufzeit eine gleichmäßig glatte Tragfläche.

## Richtlinien für die konstruktive Gestaltung des Kolbens

Für die Betriebsbedingungen neuzeitlicher Kraftfahrzeugmotoren sind Aluminiumlegierungen meist die zweckmäßigsten Kolbenbaustoffe. Grauguß oder legierter Sonderstahlguß werden nur noch in Sonderfällen verwendet, wenn die Wärmebeanspruchung gering ist oder durch besondere Kühlmaßnahmen beherrscht werden kann. Die folgenden Angaben beziehen sich deshalb vorwiegend auf Leichtmetallkolben. Der Kolben hat im Verbrennungsmotor vielseitige Auf-

gaben zu erfüllen, denen er nur bei bestimmten Eigenschaften von Werkstoff und Bauart gewachsen ist. Der Konstrukteur muß seinen Entwurf auf die speziellen Betriebsverhältnisse des einzelnen Motors abstimmen und die gewählte Ausführung oft noch durch eingehende Versuche in die günstigste Form bringen. In dieser Tafel ist der Zusammenhang zwischen den Betriebsbedingungen und den erwünschten und erreichbaren Eigenschaften des Kolbens schematisch dargestellt.

Betriebsbedingung	Anforderung an den Kolben	Anforderung erfüllbar	
		konstruktiv durch	durch Werkstoff
1. Mechanische Belastung: a) Kolbenboden bis 60 atü (Ottomotor) bis 100 atü (Dieselmotor) b) Kolbenschaft 4–10 kp/cm <sup>2</sup> mittl. Gleitbahndruck c) Bolzennaben 250–500 kp/cm <sup>2</sup> mittl. Flächenpressung	hohe statische und dynamische Festigkeit	genügende Wandstärke, gestaltfeste Bauweise, gleichmäßiger »Kraftfluß«	Vergütete Al-Gußlegierungen, Grauguß, bei Höchstanforderung gepreßte und vergütete Al-Legierungen
2. Hohe Temperatur: im Verbrennungsraum bis 2600 °C. Am Kolbenboden bis 450 °C bei Grauguß, 250–350 °C bei Leichtmetall. Am Kolbenschaft bis 170 °C bei Grauguß, bis 150 °C bei Leichtmetall	Festigkeit muß auch bei hoher Temperatur noch erhalten bleiben. Kennzeichen Warmhärte, Dauerfestigkeit. Dazu hohe Wärmeleitfähigkeit zur Temperatursenkung	a) ausreichende Wärmeflußquerschnitte b) Ölkühlung c) gebaute Kolben	wie oben beste Wärmeleitfähigkeit eutektische Al-Si-Legierungen, Al-Cu-Legierungen (> 0,30 cal/cm sec °C)
3. Massenbeschleunigung von Kolben und Pleuel bei hoher Drehzahl: mittl. Kolbengeschwindigkeit bis 14–18 m/sec	geringes Gewicht (ergibt kleine Massenkräfte)	Leichtbau mit höchster Werkstoffausnutzung	Al-Legierungen mit eutektischem und übereutektischem Si-Gehalt
4. Gleitende Reibung in den Kolbenringnuten, am Kolbenschaft, in den Bolzenlagern, z. T. ungünstige Schmierverhältnisse	geringer Reibungswiderstand, hohe Verschleißfestigkeit (bedingt Gebrauchsdauer), keine Neigung zum Fressen	genügende Gleitflächen, gleichmäßige Druckverteilung bei allen Betriebszuständen	Al-Si-Legierungen, Grauguß, Schaft verzinnt, verbleit, grafiert, eloxiert
5. Wechsel der Anlage von einer Zylinderseite zur andern	Geräuschlosigkeit, kein »Kolbenkippen« bei kalter und warmer Maschine, dazu Anpassung der Wärmeausdehnung des Kolbens an die des Zylinders	möglichst enges Laufspiel, Autothermik-, Autothermatik-Streifenkolben, Bolzen-Desachsierung	niedrige Wärmeausdehnung: Grauguß, eutektische, noch günstiger übereutektische Al-Si-Legierungen

## Die Hauptabmessungen des Kolbens

1. Der Durchmesser (D) eines Kolbens wird meistens am Ende des Kolbenschaftes gemessen und ergibt sich nach Abzug des für den Betrieb des Motors erforderlichen Einbauspiels vom Durchmesser des Zylinders.

2. Als Kompressionshöhe (KH) bezeichnet man den Abstand der Kolbenbolzenachse von der Kolbenbodenkante – ohne Berücksichtigung von Höckern und Mulden, die gesondert gemessen werden. Das übliche Maß beträgt bei Ottomotoren 50–70%, bei Dieselmotoren 55–85% des Kolbendurchmessers.

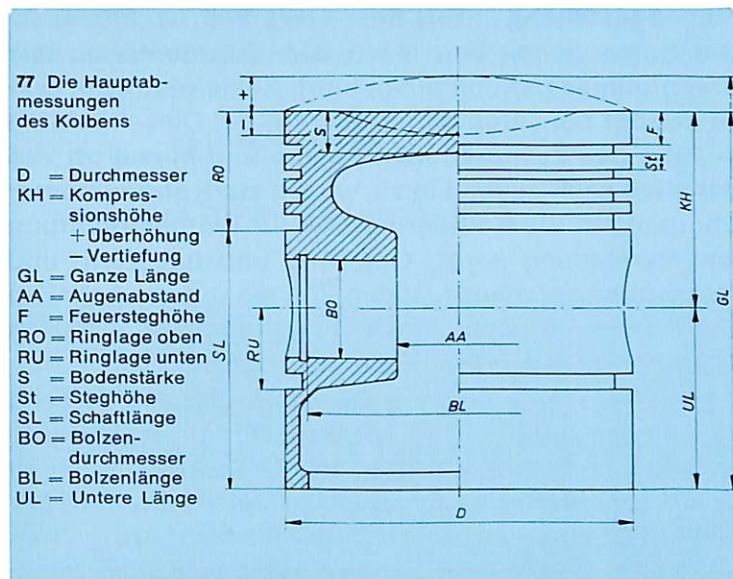
3. Die untere Länge (UL) ist das Maß von der Mitte der Kolbenbolzenbohrung bis zum Schaftende. Es beträgt bei Ottomotoren etwa 40–60%, bei Dieselmotoren etwa 55–65% des Kolbendurchmessers.

4. Die Gesamtlänge (GL) ergibt sich aus der Kompressionshöhe, der unteren Länge und gegebenenfalls zusätzlichen Überhöhungen des Bodens. Durchschnittlich liegen ihre Werte bei Ottomotoren bei 100–140%, bei Dieselmotoren bei 120–170%, bei Kraffrad- und Rennmotoren bei 90–130% des Kolbendurchmessers.

5. Der Augenabstand (AA) wird zwischen den Enden der Bolzennaben im Kolbeninnern gemessen. Ein kleiner Abstand begünstigt die Abstützung des Kolbens in der oberen, im Betrieb infolge Erhitzung nicht so festen und deshalb zu Verformungen neigenden Bodenzone. Bei großem Augenabstand kann eine breite, niedrig belastete Pleuellagerung des Bolzens untergebracht werden, dagegen erhöhen sich die Biegebeanspruchung des Bolzens und die Flächenbelastung in den Kolbennaben. Günstige Verhältnisse ergeben Augenabstände von etwa 40% des Kolbendurchmessers.

6. Der Bolzenlochdurchmesser (BO) ergibt sich aus dem je nach der zulässigen Beanspruchung und Flächenbelastung erforderlichen Durchmesser des Kolbenbolzens. Die übliche Bemessung beträgt bei Ottomotoren 26–28%, bei Dieselmotoren 33–40% des Kolbendurchmessers.

7. Die Bolzenlänge (BL) wird so bemessen, daß eben noch genügend Raum übrigbleibt, um die Sicherungsringe in den Nabenenden unterzubringen. Gewöhnlich



rechnet man im Durchschnitt für die Bolzenlänge etwa 85% des Kolbendurchmessers.

8. Die Kolbenringzone besorgt die bewegliche Abdichtung gegen den Verbrennungsraum. Ihre Höhe richtet sich nach der Zahl und Höhe der unterzubringenden Kolbenringe, deren es bei Ottomotoren meist 2–3, bei Dieselmotoren 3–4 sind, wozu noch je 1–2 Ölabbstreifringe teilweise unterhalb des Kolbenbolzens kommen. Die Höhe der Stege über und zwischen den Ringen kann nach unten zu infolge der fallenden Temperatur- und Gasdruckbelastung abnehmen.

Für die Feuersteghöhe (F) ist zum Schutze des ersten Kolbenringes ein nicht zu kleines Maß anzustreben, das bei Ottomotoren 6–10% und bei Dieselmotoren 10–18% des Kolbendurchmessers betragen soll.

Für die axiale Höhe der Ringstege St haben sich bei Leichtmetallkolben folgende Werte bewährt:

	Otto	Diesel
St 1	3,5–6,5%	4–7%
St 2	3,0–5,0%	3,5–6,5%

Bei Graugußkolben lassen sich die Werte reduzieren.

Das Maß RU, das die Lage des unteren Ölabbstreifringes angibt, hängt in der Hauptsache von der unteren Totpunkt-lage des Kolbens im Zylinder ab, da der Ring das Zylinderende nicht überlaufen darf.

### **Kolbengestaltung**

Der Kolbenboden wird nach den Erfordernissen der Brennraumgestaltung ausgeführt. Seine geringste Dicke beträgt bei Ottomotoren 5–7%, bei Dieselmotoren 8–25% des Zylinderdurchmessers und nimmt oft von der Mitte nach außen hin zu, wo ein stark abgerundeter Übergang in die Kolbenringzone für Wärmeabführung und Versteifung sorgt. Gewölbte und mit Kühl- und Stützrippen versehene Böden können dünner gehalten werden; die Rippen selbst sind allerdings höheren Wärme- und Biegespannungen ausgesetzt.

Der Kolbenschaft dient zur Geradföhrung des Kolbens im Zylinder und überträgt die bei Schräglage der Pleuelstange am Bolzen auftretenden Seitenkräfte gleitend an die Zylinderwand. Er ist so zu bemessen, daß der mittlere Gleitbahndruck 4–10 kp/cm<sup>2</sup> nicht überschreitet. Durch genügende Länge wird das Kippen beim Seitenwechsel gering gehalten. Dies ist für ruhigen Gang und zur Verminderung des Verschleißes an allen Gleitflächen des Kolbens wichtig.

Die Bolzenlage hat verschiedenartigen Anforderungen zu genügen. Die gleichmäßigste Belastung der Schaftgleitfläche würde durch den Bolzen in der Mitte ihrer Höhe erreicht werden. Für die Vermeidung von Massendrehmomenten beim Seitenwechsel spricht dagegen die Anordnung im Schwerpunkt des Kolbens. Beide Forderungen können jedoch praktisch nicht voll verwirklicht werden. In der Regel wird der Bolzen zwischen Kolbenschwerpunkt und halber Schafthöhe angeordnet, wobei zu beachten ist, daß ausreichend Schaftragfläche über dem Bolzen erhalten bleibt.

Über Bolzen-Desachsierung siehe Seite 43.

Die Bolzennaben haben die gesamten Längsdruckkräfte vom Kolben auf den Bolzen zu leiten und müssen daher gegen den Boden gut abgestützt sein. Die Verbindung mit dem Schaft muß eine gleichmäßige Verteilung der Seitenkräfte zulassen. Der Abstand zwischen den beiden Naben (Augenabstand AA) richtet sich nach der Breite des Pleuelauges, soll aber im Interesse geringer Kolbenverformung möglichst klein gehalten werden.

### **Einbau- und Laufspiele**

Das Spiel der Kolbenringe in den Nuten wird so bemessen, daß die Ringe frei beweglich sind, aber auch keine Möglichkeit haben, die Nuten auszuschlagen.

Die oberen Ringe brauchen häufig mehr Spiel (bis etwa 0,15 mm), besonders bei Zweitakt- und Dieselmotoren, damit sie durch die entstehende Ölkohle nicht zu rasch festbrennen und an ihrer Dichtwirkung verhindert werden. Die Einbauspiele des Kolbens in der Ringzone werden entsprechend der Wärmeausdehnungszahl der Werkstoffe von Zylinder und Kolben und der Betriebstemperatur so ermittelt, daß im betriebswarmen Zustand ein einwandfreies Laufen – ohne Freißgefahr – gewährleistet ist.

Am Kolbenschaft strebt man danach, das Einbauspiel möglichst nicht viel größer als das Laufspiel bei warmem Motor zu halten, damit bei allen Betriebszuständen gleichmäßig ruhiger Gang erreicht wird. Infolge der hohen Wärmeausdehnung der Leichtmetallbaustoffe des Kolbens gegenüber dem Grauguß des Zylinders ist dieses Ziel nur durch besondere Konstruktionsmaßnahmen annähernd zu erreichen. Bei Motoren mit Leichtmetallzylindern sind die Verhältnisse günstiger. Die Möglichkeiten zur Anpassung der Mantelform des Kolbens an den Zylinder sind aber damit noch nicht erschöpft. Wegen der ungleichen Temperaturverteilung und der unvermeidlichen Verformungen unter Last genügt es nicht, dem Kolbenmantel eine genau zylindrisch-kreisrunde Form zu geben. Vielmehr sind Abweichungen von dieser üblich:

Zum Ausgleich der gegen den Kolbenboden hin ansteigenden Temperaturen muß auch das Kaltspiel an diesen Stellen größer sein als am unteren Schaftende. Dies führt über die konische zu einer Fülle von »balligen« Formen.

Desgleichen wird allgemein – zum Teil aus Gründen, die im Abschnitt »Kolbenbauarten« näher erläutert sind – der Kolbenschaftdurchmesser in Bolzenrichtung geringfügig kleiner gehalten als in Druckrichtung. Man spricht deshalb von Ovalitäten, die in sich wieder aus verschiedenen Formelementen bestehen können. Die Darstellung in Bild 66 gibt einen Begriff über die möglichen Kolbenmantelformen. Die MAHLE Komm.-Ges. hat als erste im Jahre 1935 die Entwicklung dieser Kolbenformen aufgenommen und auch die dazu benötigten Maschinen gebaut.

Die für die Spielbemessung maßgebenden Kolbenbetriebstemperaturen zeigt Bild 40. Eine Übersicht über die Einbauspiele verschiedener Kolben in der Ringzone und am Schaft gibt nebenstehende Zahlentafel.



Die Passung des Kolbenbolzens in den Kolbennaben ist für den ruhigen Lauf der Kolben und den Verschleiß dieser Lagerstelle entscheidend wichtig. (Siehe auch Abschnitt Kolbenbearbeitung Seite 33 und Kolbenbolzenlöcher Seite 34.)

Bei der »schwimmenden« Bolzenlagerung, wie sie heute vielfach üblich ist, wird eine Spielpassung angestrebt, die einerseits das Bolzenspiel im betriebswarmen Zustand beschränkt, andererseits noch erlaubt, den Bolzen bei der Montage ohne Anwärmen des Kolbens einzuführen.

Beim Schrumpf- oder Klemmpleuel muß die freie Beweglichkeit des Bolzens im Kolbenbolzenloch unter allen Umständen gewährleistet sein. Dies erfordert schon bei kaltem Motor einen leichten Schiebesitz.

In Tafel Seite 44 sind Richtwerte für die angewendeten Bolzenpassungen zusammengestellt.

#### Kolben mit versetzter Bolzenachse (Desachsierung) <sup>1)</sup>

In vielen Motoren werden Kolbenbolzen außerhalb der Kolbenlängsachse angeordnet. Diese Maßnahme kann aus 2 verschiedenen Gründen angewendet werden:

- zur Vermeidung oder zumindest Verminderung von Kolbengeräuschen,
- zur thermischen Entlastung der Ringzone und dadurch zur Ausschaltung von Ruß- bzw. Ölkohlebildung in den oberen Kolbenringnuten.

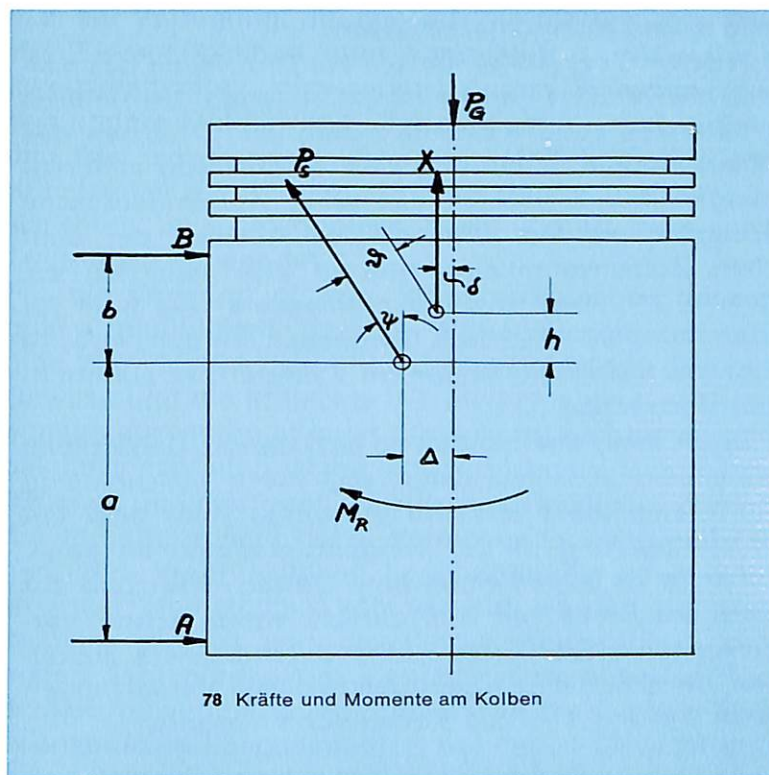
Durch die außermittige Bolzenanordnung wird um den Schwerpunkt des Kolbens ein zusätzliches Moment

<sup>1)</sup> Dr.-Ing. A. Meier, »Zur Kinematik der Kolbengeräusche«, ATZ 1954, Heft 6

ausgeübt, so daß sich — mit Bezug auf Bild 78 — die fiktiven Abstützkräfte A und B am Zylinder ergeben zu

$$B = \frac{-P_s [\delta - (a+h) \sin \varphi] - P_G \cdot \delta - M_R}{a+b}$$

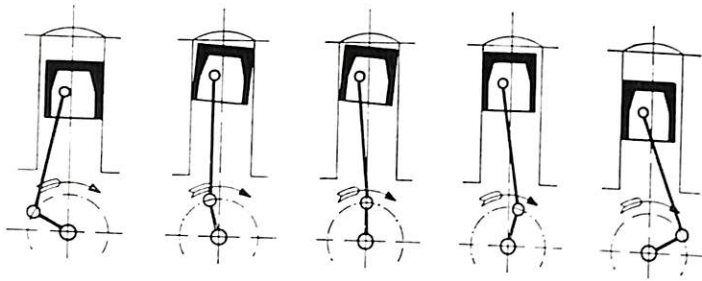
$$A = \frac{P_s [\delta + (b-h) \sin \varphi] + P_G \cdot \delta + M_R}{a+b}$$



78 Kräfte und Momente am Kolben

#### Kolbenspiele in ‰ vom Zylinderdurchmesser

Kolbenbauart	Autothermik bzw. Autothermatikkolben				Vollschaftkolben				Graugußkolben	
	Motor		Motor		Motor		Motor			
	Otto		Diesel		Otto (Zweitakt)		Diesel		Diesel (Zweitakt)	
Kühlung	Wasser	Luft	Wasser	Luft	Wasser	Luft	Wasser	Luft	Wasser	
 Einbauspiele an den Meßstellen	c	4,5 ÷ 6,0	4,0 ÷ 5,0	3,5 ÷ 5,5	4,0 ÷ 4,5	4,0 ÷ 5,5	4,5 ÷ 5,5	4,0 ÷ 5,5	4,0 ÷ 4,5	4,0 ÷ 4,5
	B	0,8 ÷ 1,2	1,0 ÷ 1,5	1,2 ÷ 1,6	1,8 ÷ 2,2	1,5 ÷ 2,0	1,7 ÷ 2,1	2,0 ÷ 2,5	2,3 ÷ 2,7	0,7 ÷ 1,3
	A	0,4 ÷ 0,6	0,5 ÷ 0,8	0,7 ÷ 0,8	0,5 ÷ 0,7	0,5 ÷ 0,7	0,8 ÷ 1,0	1,1 ÷ 1,3	1,2 ÷ 1,4	0,5 ÷ 0,6



79 Stellungen des Pleuellagers bei versetzter Pleuellagerachse

K  
D  
B  
K  
8-  
d  
Ü  
u  
S  
v  
V  
L  
i  
e  
z  
I

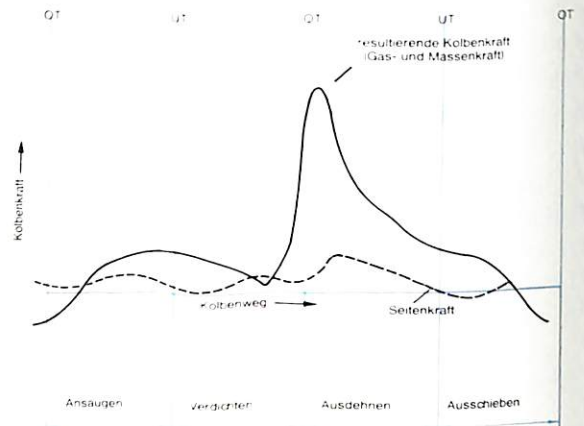
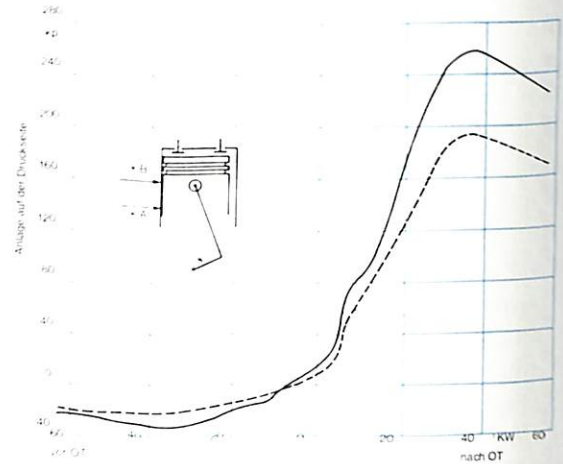
Abbildung 80 zeigt den rechnerischen Verlauf dieser beiden Kräfte für einen PKW-Viertakt-Ottomotor in der Nähe des Zündtotpunktes.

Die beiden Formeln besagen – zusammen mit Bild 81 – daß beim Pleuellager mit mittigem Pleuellager das Reibmoment  $M_R$  den Pleuellager selbst in OT-Stellung noch zu drehen versucht. Durch die Hinzufügung des Momentes aus der Pleuellager-Versetzung kann das Moment  $M_R$  ausgeglichen oder überspielt werden. Dabei sind die Fälle a) und b) zu unterscheiden:

a) Hier wird der Pleuellagerbolzen zur Druckseite des Pleuellagers hin versetzt und damit ein Anlegen des unteren Pleuellagers zur Druckseite schon vor Erreichen des OT erzwungen. Erfahrung und eingehende Untersuchungen haben gezeigt, daß diese Pleuellagergeräusche vermieden werden können. Das Ausmaß der seitlichen Pleuellagerversetzung bewegt sich zwischen ca. 0,5 und 2% des Pleuellagerdurchmessers und muß für jeden Motortyp empirisch festgestellt werden. Abb. 79 zeigt die Pleuellagerstellungen im Zylinder bei außermittiger Pleuellagerlage.

b) In diesem Falle handelt es sich darum, den Pleuellager im Zylinder so aufzurichten, daß durch gleichmäßige Abdichtung keine stärkere einseitige Ruß- oder Öl-Kohleablagerung in der Ringpartie entstehen kann. Hierzu ist im allgemeinen eine Pleuellagerversetzung zur Gegenseite hin erforderlich, wobei schon Verlagerungen bis 1% des Pleuellagerdurchmessers ausreichen. Im allgemeinen genügen seitliche Versetzungen bis zu 0,5 und 1% des Pleuellagerdurchmessers.

80 Verlauf der Stützkräfte A und B am Pleuellager, abhängig von der Pleuellagerstellung (in Nähe des Zündtotpunktes)



81 Kräfteverlauf am Pleuellager über ein Arbeitsspiel

Passung zwischen Pleuellager und Pleuellagerauge (in  $\mu\text{m}$ )

Pleuellager-Werkstoff	Pleuellager-Durchmesser mm	Arbeitsverfahren des Motors	
		Viertakt	Zweitakt
1. Sicherung durch <b>Sicherungsring</b> : Al-Legierungen		+ = Spiel - = Überdeckung	
Grauguß	$\div 100$ $100 \div 150$ $90 \div 130$	etwa + 3 bis - 2 etwa + 4 bis - 4	etwa + 3 bis + 5 etwa + 3 bis + 15 etwa + 15 bis + 25
2. Sicherung durch <b>Klemmpleuel</b> : Al-Legierungen Grauguß	$50 \div 130$ $50 \div 130$	etwa + 6 bis + 8 etwa + 7 bis + 9	

## Kolbenbauarten

Der Kolben ist das erste Glied in der Kette der kraftübertragenden Teile einer Verbrennungskraftmaschine. Ihm fällt die Aufgabe zu, die bei der Umwandlung der aus dem Kraftstoff freiwerdenden chemischen Energie in mechanische Energie auftretenden Druckkräfte über die Pleuelstange auf die Kurbelwelle zu übertragen.

Um diese Aufgabe über lange Laufzeiten und auf möglichst verlustarme Weise sicher erfüllen zu können, soll er vor allem folgende Eigenschaften aufweisen:

1. Ausreichende Festigkeit bei allen vorkommenden Betriebstemperaturen.
2. Geringe Wärmeausdehnung, möglichst nahe der des Zylinderwerkstoffes, um bei allen Betriebszuständen gute Führung, ruhigen Lauf und gute Abdichtung zu gewährleisten. Auch bei extremen Betriebszuständen darf das erforderliche Mindestlaufspiel nicht unterschritten werden, um hohe Reibungsverluste oder gar Freßerscheinung zu vermeiden.
3. Gute Laufeigenschaften und hohe Verschleißfestigkeit, um die Reibungsverluste klein zu halten, sowie zur Erzielung geringer Abnutzung und hoher Lebensdauer.
4. Niederes Gewicht zur Verringerung der hin- und hergehenden Massen, was geringer belastete oder leichtere Triebwerksteile ermöglicht.
5. Gute Wärmeleitfähigkeit, um allgemeine und örtliche Überhitzungen zu vermeiden.

Diese Eigenschaften lassen sich in einer einzigen Kolbenbauart nicht ohne weiteres in jeweils vollkommener Weise vereinigen. Die ersten Schwierigkeiten ergeben sich schon bei der Auswahl der Werkstoffe, von denen jeder neben vorteilhaften auch weniger günstige Eigenschaften aufweist. Einen in jedem Fall idealen Kolbenwerkstoff gibt es nicht. Ebenso wenig gibt es eine universell geeignete konstruktive Bestlösung. Der

Kolbenbauer ist daher in der Regel auf Kompromisse angewiesen. Er hat für jeden einzelnen Motortyp eine Kolbenbauart zu wählen und zu entwickeln, die dem jeweils vorliegenden Verwendungszweck bestmöglich angepaßt ist, wobei die Eigenschaften, auf welche es besonders ankommt, von Fall zu Fall verschieden sein können.

An Werkstoffen stehen Grauguß, Stahl, Leichtmetalle u. a. zur Verfügung, die entweder je für sich zum Bau von Einmetallkolben oder kombiniert zum Bau von Zweimetallkolben Verwendung finden. Daneben werden andere Metalle, wie Chrom, Kupfer, Bronze, Zinn und Blei, sowie keramische Werkstoffe, Graphit und Kunststoffe zur Bildung von Überzügen und Schutzschichten und gelegentlich auch von Büchsen und Tragringen verwendet.

Für die Verwendung von Grauguß sprechen dessen gute Gleitfähigkeit, geringe Wärmeausdehnung und gute Warmfestigkeit, während sein hohes spezifisches Gewicht und die schlechte Wärmeleitfähigkeit sich ungünstig auswirken können. Umgekehrt empfehlen sich bei Leichtmetallen deren ausgezeichnete Wärmeleitfähigkeit und niedriges spezifisches Gewicht, während die verhältnismäßig hohe Wärmeausdehnung und die geringere Warmfestigkeit gegebenenfalls durch konstruktive Maßnahmen kompensiert werden müssen. Ziemlich einfach war die Werkstoffauswahl in den ersten Jahrzehnten des Fahrzeugmotorenbaues. Die damals verwendeten Motoren waren thermisch mäßig beanspruchte Langsamläufer, bei denen Gewicht und Wärmeleitfähigkeit des Kolbens noch keine große Rolle spielten. Der aus dem Dampfmaschinenbau übernommene Grauguß war damals auch für den Motorenbauer das zur Herstellung von Kolben am besten geeignete Material. Die ersten Kolben für Verbrennungsmotoren waren daher Graugußkolben.

## Graugußkolben

K  
D  
B  
k  
8  
d  
Ü  
u  
S  
v  
v  
[  
i  
e  
:

Dank seiner ausgezeichneten Laufeigenschaften, seiner einfacheren Herstellbarkeit und seines aus dem kleinen Wärmeausdehnungsbeiwert resultierenden geringen Spielbedarfs fand der Graugußkolben von der Frühzeit des Motorenbaues bis weit in die zwanziger Jahre hinein fast unbeschränkte Anwendung. Erst mit der Entwicklung von Motoren mit höherer Verdichtung und größeren Drehzahlen machten sich das verhältnismäßig hohe spezifische Gewicht und die niedrige Wärmeleitfähigkeit des Gußeisens nachteilig bemerkbar. In den USA, wo z. B. für PKW bis heute noch großvolumige und daher verhältnismäßig niedrig belastete Motoren gebaut werden, behauptete sich der Graugußkolben auch im Kraftfahrzeugmotor zum Teil noch wesentlich länger (Bild 82). In den letzten Jahren ist er aber auch dort vom Leichtmetallkolben weitgehend verdrängt worden, ohne jedoch – wie auch in Europa – seine Bedeutung völlig zu verlieren.

Den durch die hohe Dichte des Gußeisens ( $7,3 \text{ g/cm}^3$  gegenüber  $2,65\text{--}2,9$  von Aluminiumlegierungen) bedingten Nachteil kann man dadurch ausgleichen, daß die Wandstärken und Querschnitte möglichst schwach bemessen werden. Die Grenzen, die in dieser Hinsicht durch noch tragbare Warmfestigkeit- und Warmhärte- werte gesetzt sind, lassen sich jedoch schon aus fertigungstechnischen Gründen nicht immer voll ausnützen. Außerdem leiten dünne Wandquerschnitte die bei der Verbrennung anfallende Wärme langsamer ab, was in Verbindung mit der schon an sich schlechteren Wärmeleitfähigkeit des Gußeisens dazu führen kann, daß sich in der Boden- und Ringzone unzulässig hohe Temperaturen einstellen. Infolgedessen kann es zur Verkokung von in diesen Zonen befindlichem Schmieröl und unter Umständen auch zu so starker Wärmebean-

82 Gußeisenkolben für Chevrolet-Personenwagen, eingebaut bis 1952



spruchung kommen, daß diese selbst von hochwarmfesten Gußeisensorten nicht mehr mit Sicherheit ertragen wird. Es ist jedoch möglich, auch dieser Gefahr durch besondere konstruktive Maßnahmen, insbesondere durch eine Ölkühlung des Bodens zu begegnen, wie zum Beispiel bei dem in Bild 83 gezeigten modernen Kolben für einen Zweitakt-Dieselmotor, dessen reichlich mit Kühlrippen ausgestattete Bodeninnenfläche durch einen am Pleuelkopf austretenden Ölstrahl gekühlt wird.

Die guten Laufeigenschaften und der hohe Verschleißwiderstand des Gußeisens ergeben sich aus der besonderen Ausbildung des Gefüges. Die vorwiegend perlitische bis sorbitische Grundmasse ist gleichmäßig von feinen Grafitadern durchsetzt. Diese haben eine gewisse selbstschmierende Wirkung und verbessern außerdem die Ölhaltefähigkeit der Gleitflächen. Die Neigung zum Fressen ist infolgedessen gering. Durch einen dünnen Überzug aus Blei, Zinn oder eine andere geeignete Oberflächenbehandlung, beispielsweise durch eine Grafalschicht, läßt sich ein zusätzlicher Schutz gegen örtliches Anfressen erzielen.

Neben dem unvergüteten, unlegierten Gußeisen, das für den Normalfall ausreichend ist, stehen noch andere Gußeisensorten zur Verfügung, die durch Legierungszusätze oder geeignete Wärmebehandlungsverfahren auf besondere Erfordernisse abgestimmt sind. Die Legierungszusätze – z. B. Nickel, Chrom, Molybdän u.a. – werden so ausgewählt, daß Festigkeit und Zähigkeit zunehmen, ohne daß die Vergießbarkeit und Bearbeitbarkeit merklich leiden. In bestimmten Fällen kann sich auch die Verwendung eines vergüteten Werkstoffes empfehlen.

Besondere Erwähnung verdient eine Entwicklungsrichtung, die eine Zeitlang im amerikanischen Fahrzeugbau beschritten wurde. Im Streben nach besonders leichten Gußeisenkolben wurde ein kohlenstoffarmes, aber noch gut vergießbares stahlähnliches Gußeisen von hoher Festigkeit (ca.  $70 \text{ kp/mm}^2$ ) entwickelt. Diese »Halbstahl«-Kolben (Bild 84) waren aber schwierig herzustellen und konnten sich gegen den Leichtmetallkolben auf die Dauer nicht durchsetzen.

Eine weitere Werkstoffrichtung, die in den USA heute noch große Bedeutung hat, ist unter dem Markennamen »Arma Steel« bekannt. Es handelt sich um eine besondere Art von Temperguß, wobei der Hauptunterschied



83 Kolben für Zweitakt-Dieselmotor aus Sondergußeisen. Bolzensitz mit bronzeplattierten Büchsen ausgefüllt

84 Sehr leichter, dünnwandiger Kolben aus einem stahlähnlichen Sondergußeisen (»Halbstahl«)

## Zweimetallkolben

bei der Herstellung in einer andersartigen Glühbehandlung liegt. Die Kolben einiger bekannten US-amerikanischen Zweitakt Dieselmotoren sind aus diesem Werkstoff hergestellt und haben sich gut bewährt.

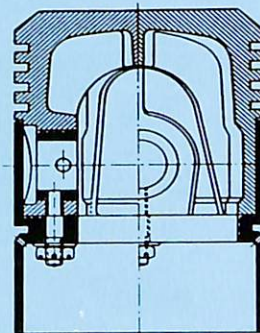
Seit einigen Jahren finden die verschiedenen Qualitäten von Kugelgraphit-Gußeisen überall dort eine starke Verbreitung, wo hohe Beanspruchungen gefordert werden. MAHLE hat Versuche eingeleitet, um die Eignung dieses Werkstoffes für hochbeanspruchte Kolben zu ermitteln und ihn bei günstigen Ergebnissen in den Dienst des Motorenbaues zu stellen.

Die angeführten Eigenheiten des Gußeisenkolbens lassen erkennen, daß dieser trotz seiner unbestreitbaren Vorzüge beim heutigen Stand der motortechnischen Entwicklung nur noch in beschränktem Umfang mit dem Leichtmetallkolben in Wettbewerb treten kann. Im Pumpen-, Kompressoren- und Dampfmaschinenbau ist ihm allerdings noch ein breiteres Anwendungsgebiet verblieben, vor allem dann, wenn mit stärkerer Korrosionsgefahr zu rechnen ist.

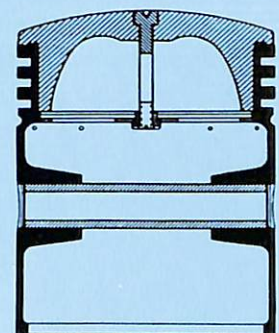
Ein besonderes, dem Gußeisenkolben durchaus noch zugängliches Gebiet stellt der Zweitakt-Diesel-Fahrzeugmotor dar. Die dichtere Aufeinanderfolge der Arbeitstakte verursacht hier eine verschärfte thermische Belastung des Kolbens. Sie kann in Grenzfällen an exponierten Stellen, beispielsweise an der Feuerstegkante (Steuerkante) so groß werden, daß Leichtmetalllegierungen mit ihrem verhältnismäßig niedrigen Schmelzpunkt unter Umständen gefährdet wären. Da sich nun im Zweitaktmotor durch die besondere Art des Kräftespiels das Kolbengewicht nicht so nachteilig auswirken kann, besteht hier die Möglichkeit, anstelle einer örtlichen Bewehrung der gefährdeten Bereiche den ganzen Kolben aus Gußeisen herzustellen, allerdings nur dann, wenn durch betriebssichere Zwangskühlung des Kolbens einem übermäßigen Wärmestau vorgebeugt wird. Durch Wahl besonders zäher und warmfester Gußeisensorten, lassen sich die durch Wärmespannungen verschärfte Beanspruchungen noch sicherer beherrschen.

Als nächstliegende Lösung des Problems, die Vorteile der Eisen- und der Leichtmetallwerkstoffe in einer Kolbenbauart zu vereinigen, bot sich die Schaffung eines Mischtyps zwischen dem reinen Leichtmetallkolben und dem Graugußkolben an. Diese Bauart ist unter der Bezeichnung Zweimetallkolben bekannt geworden.

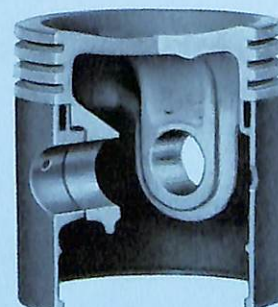
Man versteht darunter Leichtmetallkolben, die am Schaft mit Tragflächenteilen oder Einlagen aus Eisen oder mit ganzen Eisenschäften versehen sind. Auf diese Weise wird die gute Wärmeleitfähigkeit und das geringe Gewicht des Leichtmetalls mit der geringen Wärmeausdehnung und gegebenenfalls auch mit der hohen Verschleißfestigkeit des Gußeisens oder Stahls verbunden. Schon bei dem »Kolbenwettbewerb« siehe Seite 8 im Jahre 1921 war ein Kolben mit Leichtmetallkopf und angeschraubtem Graugußschaft beteiligt (Bild 85). Ähnliche Zweimetallkolben mit mechanisch verbundenen Teilen zeigen die Bilder 86 und 87. Beim Kolben nach Bild 86 ist der verschiedenen starken Wärmeausdehnung des Leichtmetallkopfes und des Eisenschafte durch federnde Verbindung dieser beiden Teile Rechnung getragen. Um eine betriebssichere Verbindung von Schaft und Kopf trotz ungleich starker Wärmeausdehnung zu gewährleisten, müssen insbesondere auch bei Zweimetallkolben mit vergossenen Tei-



85 Hirth 1921,  
Graugußschaft angeflanscht



86 Ing. Wunderlich 1926,  
Leichtmetallboden mit  
Federplatte festgezogen



87 Zweiteilig, durch Bolzen  
zusammengehalten.  
1930 noch in Frankreich  
angewendet

K  
L  
E  
F  
E  
C  
I

## Leichtmetallkolben

len – nach den Bildern 88 bis 91 – die Verbindungsstellen möglichst kurz gehalten werden, wie zum Beispiel beim Kolben nach Bild 87, wo die Verbindung nur in den Bolzennaben ist.

Von den in den Bildern 85–91 gezeigten Ausführungen kamen nur wenige über das Versuchsstadium hinaus. Auch gebrauchstüchtige Lösungen, die gefunden waren, setzten sich nicht durch, weil inzwischen die Haupttücken des Leichtmetallkolbens durch einfachere Maßnahmen überwunden waren. In den ersten Entwicklungsjahren hätte der Zweimetallkolben durchaus zu Bedeutung kommen können, wenn man es damals schon verstanden hätte, die Eisenteile mit dem Leichtmetall betriebssicher zu verbinden.

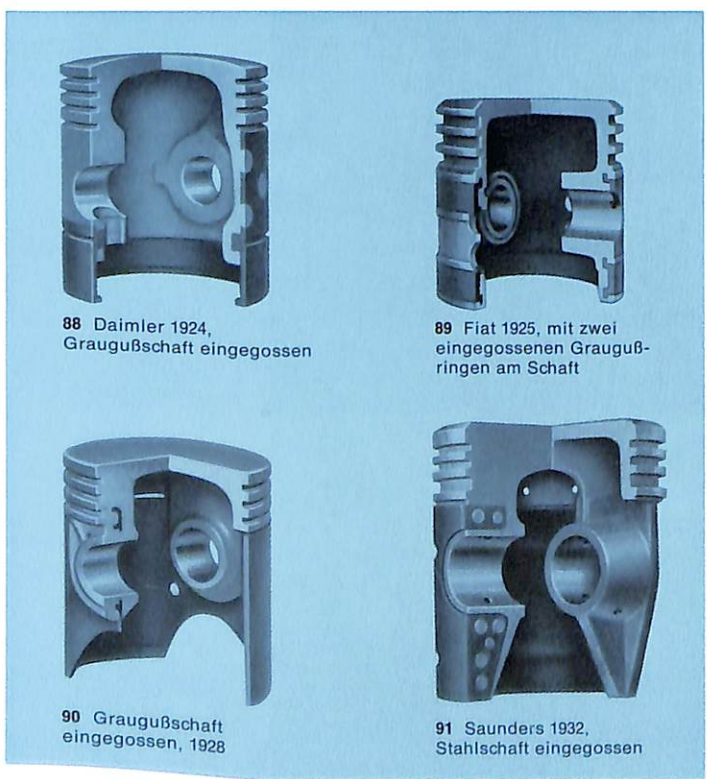
Im weiteren Sinne gehören zu den Zweimetallkolben auch solche Konstruktionen, bei welchen die den heißen Verbrennungsgasen ausgesetzte Bodenzone oder die Ringzone ganz oder teilweise durch Teile aus Grauguß oder Stahl gebildet sind.

Diese Gruppe nimmt auch im modernen Kolbenbau noch eine hervorragende Stellung ein. Sie wird in den Abschnitten über »ölgelkühlte Kolben« und »Ringträgerkolben« ausführlich beschrieben.

Während beim Graugußkolben und dem mit Tragflächen aus Grauguß ausgestatteten Leichtmetallkolben die Aufgabe, ihn mit möglichst knappem Spiel zu führen, verhältnismäßig leicht zu lösen ist, liegen die Verhältnisse beim reinen Leichtmetallkolben jedenfalls dann wesentlich schwieriger, wenn er in einem Zylinder oder einer Zylinderbüchse aus Eisenwerkstoffen laufen soll. Der Wärmeausdehnungswert der in Betracht kommenden Leichtmetall-Kolbenwerkstoffe liegt wesentlich höher, nämlich um 60–120 ‰, als derjenige des Zylinder-Gußeisens. Wie sich das auswirkt, ergibt sich aus folgender Überlegung:

Der Kolben muß im Zylinder einwandfrei geführt sein. Dazu ist es notwendig, daß sein Führungsteil, der Kolbenschaft, in die Zylinderbohrung so eingepaßt ist, daß er auch bei den höchsten Betriebstemperaturen nicht gegen die Zylinderlaufbahn drückt, weil das zu Leistungsverlusten und gegebenenfalls sogar zu Festfressen führen müßte. Andererseits darf er aber auch bei den niedrigsten Betriebstemperaturen nicht die Möglichkeit haben, sich von der Zylinderlaufbahn so weit abzuheben, daß beim Anlagewechsel Geräusche entstehen. Ideal wäre ein Motor, bei dem das Spiel zwischen Kolbenschaft und Zylinderbohrung bei allen Betriebszuständen konstant gehalten werden könnte. Dieser Idealfall läßt sich aber nicht ohne weiteres erreichen, weil der Durchmesser sich mit wechselnder Belastung und Temperatur beim Kolben und Zylinder unterschiedlich ändert. Im ruhenden Motor weisen Zylinder und Kolben dieselbe Temperatur auf. Mit der Belastung steigt jedoch die Temperatur des nur indirekt gekühlten Kolbens rascher an als diejenige des mit Wasser oder Luft direkt gekühlten Zylinders. Dadurch wird das Betriebsspiel zwischen Kolben und Zylinder zunehmend kleiner als das bei 20 °C gemessene Einbauspiel, und zwar bei Kolben, deren Wärmeausdehnungsbeiwert demjenigen des Zylinderwerkstoffes gleich ist, proportional zu der sich einstellenden Temperaturdifferenz, und bei Kolben, deren Wärmeausdehnungsbeiwert größer ist als derjenige des Zylinderwerkstoffes, in entsprechend verstärktem Maße. Will man das vermeiden, so muß man die tatsächliche Wärmeausdehnung dieser Kolben entgegen dem Ausdehnungsbestreben ihrer Werkstoffe durch besondere konstruktive Maßnahmen beeinflussen.

Die Lösung dieser Aufgabe wird dadurch erleichtert,



88 Daimler 1924, Graugußschaft eingegossen

89 Fiat 1925, mit zwei eingegossenen Graugußringen am Schaft

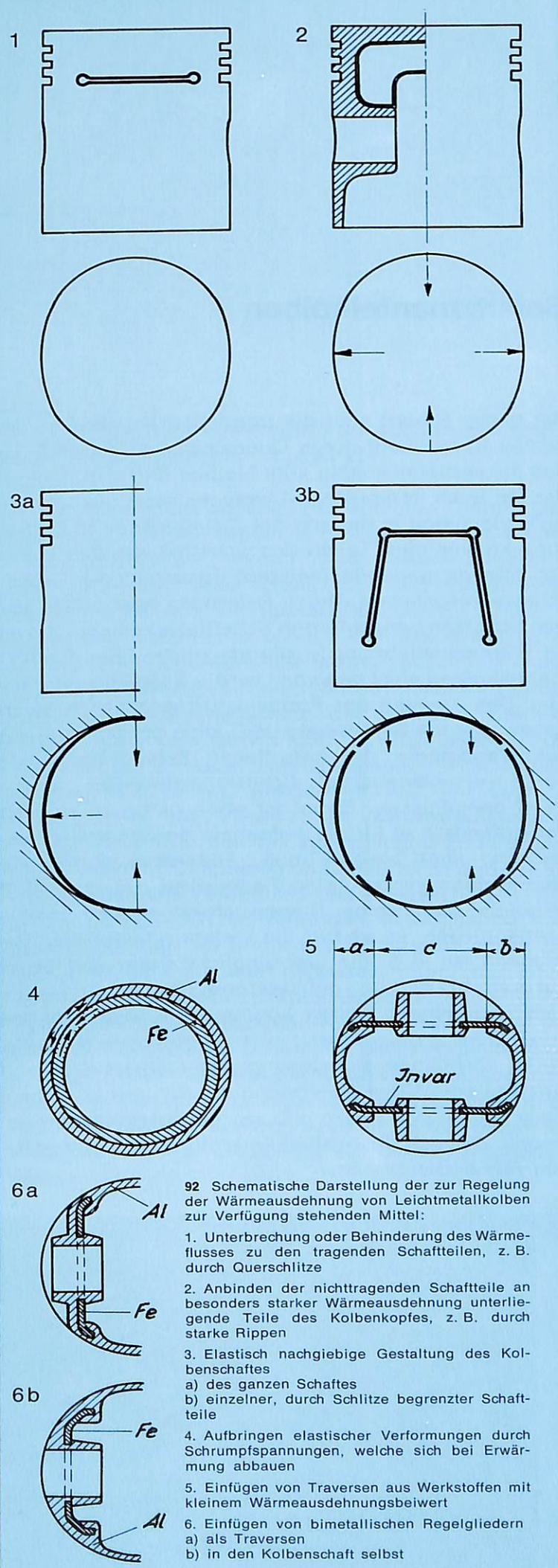
90 Graugußschaft eingegossen, 1928

91 Saunders 1932, Stahlschaft eingegossen

daß es genügt, für eine Verminderung der radialen Wärmeausdehnung und damit für kleine Einbauspiele im Bereich der tragenden Teile des Kolbenschaftes zu sorgen. Für die den Bolzennaben benachbarten nicht-tragenden Schaftteile kann sogar eine verstärkte Wärmeausdehnung hingenommen werden, weil dort entsprechende Vergrößerungen des Einbauspieles ohne Einfluß auf die Qualität der Führung bleiben. Die zur Regelung der Wärmeausdehnung von Leichtmetallkolben zur Verfügung stehenden Mittel sind:

1. Thermische Entlastung der tragenden Schaftteile durch Unterbrechung oder Drosselung des Wärmeflusses vom Kolbenkopf,
  2. bevorzugte Ableitung der einfallenden Wärme zu den nicht tragenden Schaftteilen, so daß deren dadurch größer werdende radiale Wärmeausdehnung eine Ovalverformung des Schaftes im Sinne einer relativen Verkleinerung des Abstandes der Tragflächen bewirkt,
  3. Ausgleich der Wärmeausdehnung durch federnd nachgiebige Gestaltung der tragenden Schaftteile,
  4. Veränderung des Wärmeausdehnungsverhaltens durch Einlagen, auf welche der Leichtmetallschaft aufschumpft,
  5. Behinderung der Wärmeausdehnung durch im wesentlichen als Zugglieder wirkende Einlagen,
  6. Veränderung des Wärmeausdehnungsverhaltens durch Einlagen, welche zusammen mit dem Kolbenwerkstoff bimetalliche Regelglieder bilden.
- In Bild 92 ist die Wirkungsweise dieser Maßnahmen schematisch erläutert:

Von den unter der Gruppe 1 beschriebenen Konstruktionen hat der Schlitzmantelkolben die größere Bedeutung.



92 Schematische Darstellung der zur Regelung der Wärmeausdehnung von Leichtmetallkolben zur Verfügung stehenden Mittel:

1. Unterbrechung oder Behinderung des Wärmeflusses zu den tragenden Schaftteilen, z. B. durch Querschlitz
2. Anbinden der nichttragenden Schaftteile an besonders starker Wärmeausdehnung unterliegende Teile des Kolbenkopfes, z. B. durch starke Rippen
3. Elastisch nachgiebige Gestaltung des Kolbenschaftes  
a) des ganzen Schaftes  
b) einzelner, durch Schlitz begrenzte Schaftteile
4. Aufbringen elastischer Verformungen durch Schrumpfspannungen, welche sich bei Erwärmung abbauen
5. Einfügen von Traversen aus Werkstoffen mit kleinem Wärmeausdehnungsbeiwert
6. Einfügen von bimetallichen Regelgliedern  
a) als Traversen  
b) in den Kolbenschaft selbst

## Schlitzmantelkolben

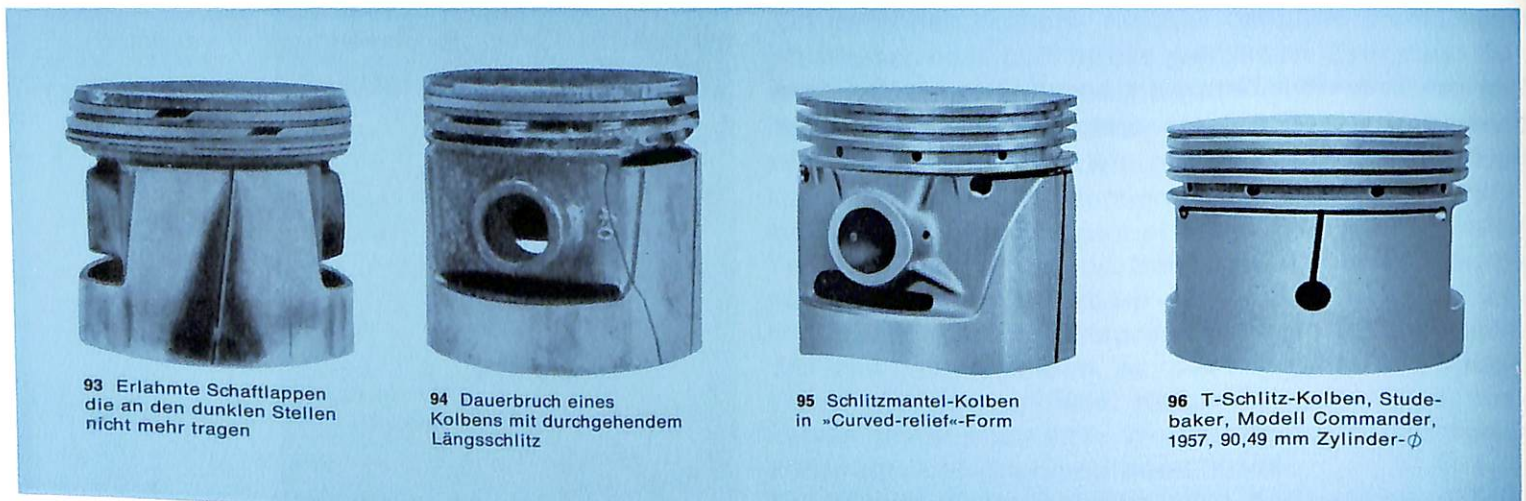
Bei dieser Bauart sind die tragenden Schaftteile vom heißen Kolbenkopf durch Querschlitz abgetrennt, so daß sie verhältnismäßig kühl bleiben und sich infolgedessen auch entsprechend weniger stark ausdehnen. Außerdem sind in den mit der Zylinderwand in Berührung kommenden Teilen des Schaftes von den Querschlitz ausgehende, meist schräg verlaufende Längsschlitz vorgesehen. Durch federndes Nachgeben der den Schlitz benachbarten Schaftteile kann ein Zuviel an Wärmeausdehnung – die als solche beim Schlitzmantelkolben nicht gehemmt wird – ausgeglichen werden. Das Ausmaß der Formelastizität läßt sich durch entsprechende Bemessung der Länge der Schlitz und der Wandstärke der betroffenen Schaftteile, sowie durch verschiedenartige Schlitzanordnungen weitgehend beeinflussen. Dabei ist aber zu beachten, daß der Kolbenschaft für die Aufnahme der Seitkräfte ausreichend steif bleiben muß. Außerdem dürfen die dem Kolben zugemuteten Federwege den Werkstoff nirgends über seine Biegewechselfestigkeit hinaus beanspruchen, sonst tritt die Gefahr allmählichen Erlassens ein, d. h. die ursprüngliche Form und damit die erstrebte Wirkung geht verloren (Bild 93). In besonders ungünstigen Fällen können Teile des Schaftes durch Überbeanspruchung auch wegbrechen (Bild 94). Durch sorgfältige Bemessung der Querschnitte und durch zweckmäßige Anordnung der Schlitz kann man diese Gefahr verringern und so zu Konstruktionen gelangen, die sich für bestimmte Motoren mit gutem Erfolg verwenden lassen.

Die älteste und einfachste Form des Schlitzmantelkolbens weist zwei unterhalb der Ringzone in Endlöcher auslaufende Querschlitz und auf der weniger belasteten Tragflächenseite einen durchgehenden, leicht schräggestellten Längsschlitz auf. Da der Federweg am Ende des Querschlitzes gering ist, muß diese Stelle wirksam zurückgenommen werden, was entweder durch exzentrische Bearbeitung oder – wie zum Beispiel bei der »Curved-relief«-Form – durch eine schon am Gußstück vorgesehene Einziehung erfolgt (Bild 95).

Diese Bauform ist besonders »labil«, das heißt, sie ergibt eine sehr große Federung und dementsprechend eine hohe Freßsicherheit und Laufruhe, ist aber der Gefahr einer bleibenden Verformung und Überbeanspruchung zwangsläufig stärker unterworfen.

Die federnde Nachgiebigkeit ist für die heißeren Schaftpartien, also den oberen Mantelteil, wichtiger als für das kühlere untere Schaftende. Man macht von dieser Erkenntnis beim »T-Schlitz«-Kolben Gebrauch, bei dem der Längsschlitz nicht bis zum unteren Schafttrand durchgezogen ist, sondern etwas oberhalb in einem Endloch ausläuft. T-Schlitz-Kolben erlauben ähnlich kleine Einbauspiele wie durchgehend geschlitzte Kolben, sind aber erheblich stabiler und gegen Erlassungsgefahr besser geschützt (Bild 96).

Durch Anordnung von zwei nicht durchgehenden Längsschlitz auf einer Schaftseite, die in die Endlöcher eines Querschlitzes einmünden, ergibt sich für den von Schlitz eingeschlossenen Schaftteil eine besonders





gute Nachgiebigkeit. Im Gebiet der unteren Schlitzenden solcher U-Schlitz- oder Trapez-Schlitz-Kolben treten allerdings verhältnismäßig hohe Biegebeanspruchungen auf, die durch kräftige Querschnitte auf ein tragbares Ausmaß beschränkt werden müssen (Bild 97).

Schlitzmantelkolben zeichnen sich durch sehr gute Anpassungsfähigkeit auch an durch Wärmespannungen verformte Zylinder aus und können mit sehr engen Spielen eingebaut werden. Sie haben sich in mäßig beanspruchten Motoren bewährt, so daß sie auch heute noch verwendet werden. T-Schlitzkolben werden z. B. noch in Cadillac- und in Studebaker-Motoren serienmäßig eingebaut. In Europa, wo vorwiegend Motoren mit kleinerer Leistungsreserve gebaut werden, die häufig auf Höchstleistung beansprucht sind, ist man von der Verwendung von Schlitzmantelkolben weitgehend abgekommen, weil es sich gezeigt hat, daß die Elastizität der abgetrennten Schaftzonen unter länger andauernder Belastung durch hohe Drücke und Temperaturen fortschreitend nachläßt. Die abgetrennten Schaftteile erfahren dann bleibende Verformungen, sie fallen ein oder brechen ab.

Um diesen Nachteil zu vermeiden, sind vielerlei Hilfsmaßnahmen erdacht worden, die größtenteils darauf hinauslaufen, die Federung der abgetrennten Schaftteile durch »Fremdfederung« mittels eingegossener oder nachträglich eingesetzter »Expanderfedern« aus Stahl zu unterstützen, oder gar bereits entstandene

Ermüdungsfolgen nachträglich durch Einsetzen solcher Federn zu kompensieren (Bild 98).

Eine interessante Lösung, bei der eine Stahlringeinlage nicht nur das Einfallen des geschlitzten Kolbenmantels verhindert, sondern auch dessen Lage in jedem Betriebszustand regelt, stellt der »steel belted piston« der Firma Thompson (Bild 99).

Im oberen Schaftende eines T-Schlitzkolbens ist ein Stahlring eingegossen, der vorher graphitiert wurde. Die Graphitschicht verhindert eine metallische Bindung mit dem Leichtmetallschaft, der auf dem Stahlring gleiten kann und gezwungen ist, sich dessen Form anzupassen. Er kann sich insbesondere in radialer Richtung nur so weit ausdehnen, wie dies auch der Stahlring tut. Sein zusätzliches Wärmeausdehnungsbestreben wird in der längsgeschlitzten Zone in peripherer Richtung umgelenkt und äußert sich dort in einer entsprechenden Verengung des Längsschlitzes. Eine sich zwischen den Bolzenaugen erstreckende hohe Mittelrippe führt im Sinne der Erläuterungen zu Bild 92.2 außerdem zu einer Ovalverformung des Stahlringes und damit des Schaftes, wobei dessen tragende Teile nach innen gezogen werden. Man erhält also einen Kolben, dessen Schaft im Einwirkungsgebiet des eingegossenen Stahlringes eine Wärmeausdehnung hat, die in Richtung der Bolzenachse größer und in der dazu senkrechten Richtung – auf die es hier besonders ankommt – sogar kleiner als bei einem Graugußkolben ist.



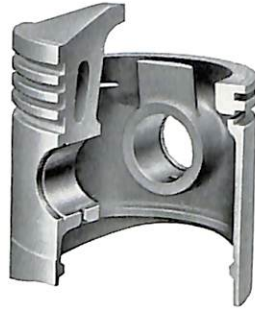
97 U-Schlitz-Kolben (Chrysler)

98 Amerikanischer Schlitzmantelkolben mit Expanderfeder

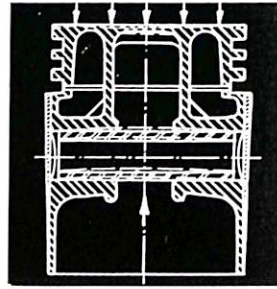
99 »steel-belted-piston« der Thompson Products (T-Schlitz-Kolben mit eingegossenem Stahlgürtel) USA-Patent 2.262, 132



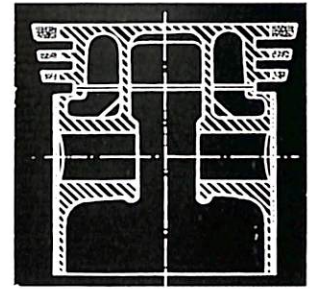
100 Stützstege zwischen Boden und Naben mit der Ringzone verbunden



101 Stützstege zwischen Boden und Naben von der Ringzone getrennt



102 Elastische Verformung durch Gaskräfte



103 Wärmeausdehnung

## Röhren (MEC\*)-Kolben

Querschlitz, die den Kolbenschaft von der Ringzone weitgehend (Bild 100 und 101) oder sogar vollständig (Bild 102 und 103) abtrennen und demzufolge den Wärmefluß zum Schaft, insbesondere im Bereich der Tragflächen, stark drosseln, weist der von MAHLE im Jahre 1932 geschaffene Röhren (MEC)-Kolben auf. Diese Bauart unterscheidet sich jedoch vom Schlitzmantelkolben durch das Fehlen von Längsschlitz, sowie vor allem dadurch, daß sich der Boden über zwei besondere Stützstege unmittelbar auf die Bolzen-naben abstützt. Dadurch wird der Hauptteil der auf den Boden einwirkenden Kräfte auf dem kürzesten Wege über den Bolzen an das Pleuel abgeleitet. Die damit erzielte Verkleinerung der Stützweite hat wesentlich kleinere Biegemomente und damit geringere Verformungen von Kolben und Bolzen zur Folge (Bild 103). Außerdem wird auch die Wärmeausdehnung des Schaftes durch die Stützstege im Sinne der Abb. 92.2 dadurch beeinflußt, daß die in Bolzenrichtung liegenden Schaftteile über die Stützstege an den Boden »angebunden« sind, an dessen Wärmeausdehnung teilnehmen und so einen zusätzlichen Ovalverzug des Schaftes herbeiführen. Dadurch wird die effektive Ausdehnung des Schaftes in der für die Führung entscheidenden Druckrichtung noch weiter verringert. Sorgt man durch Ovalbearbeitung dafür, daß sich der Ovalverzug ungehindert in Richtung der Bolzenachse auswirken kann, so kommt man mit ausgesprochen niedrigen Einbauspielen aus.

Kennzeichnend für diese Röhrenbauart ist also, daß die Verformungstendenz in der Bodenzone durch eine günstige Abstützung an sich schon sehr niedrig gehalten und der Schaft durch ausgedehnte Querschlitz gegen Kräfte- und Wärmefluß von der Bolzenzone her weitgehend abgeschirmt wird. Der Kolben kann sich ziemlich ungestört als »elastische Röhre« (daher die Bezeichnung Röhrenkolben) dem Zylinder anpassen. Die in allen Bereichen sehr mäßigen Beanspruchungen erlauben eine besonders leichte Gestaltung. Röhrenkolben werden heute nur noch in Ausnahmefällen verwendet, weil ihre Fertigung einen komplizierten Aufbau der zum Gießen benötigten Kerne voraussetzt, was die Herstellung verteuert.

\* MAHLE-Elektron-Cannstatt = MEC (sprich M – E – C)

## Kolben für Zweitaktmotoren

Das Zweitaktprinzip mit seiner verlockenden Zusammenraffung des ganzen Arbeitsspiels auf eine Kurbelwellenumdrehung hat schon die Väter des Verbrennungsmotors intensiv beschäftigt. Zunächst konnten sich allerdings nur große, langsam laufende Dieselmotoren durchsetzen, da man bei kleineren Maschinen mit den verschiedenen Schwierigkeiten, die dem Verfahren anhaften, noch nicht so ohne weiteres fertig wurde. Es ist aber verständlich, daß die Motorenbauer bestrebt waren, die bestechenden Vorzüge des Zweitaktprinzips auch dem Fahrzeug- und Kleinmotorenbau nutzbar zu machen. Größte Einfachheit im Aufbau und in der Wartung, größere Hubraumleistung und geringes Leistungsgewicht ließen den Zweitaktmotor vor allem als Kraftquelle für Motorräder und für Hilfsaggregate aller Art geeignet erscheinen. Besonders in Deutschland wurde mit diesem Ziel eine intensive Entwicklungsarbeit geleistet und es gelang, den Zweitakter zu einer Reife zu bringen, die ihm auch im Bau von leichten Personenwagen und Schnellastern eine unbestrittene Bedeutung sichert. Neue Impulse erfuhr die Entwicklung durch die Einführung der Benzineinspritzung im Fahrzeugmotor. Auch der Fahrzeug-Dieselmotorenbau wandte sich dem Zweitaktprinzip inzwischen mit großem Erfolg zu.

Es kostete nun allerdings erhebliche Mühe, Zweitaktmotoren in allen ihren Teilen zur heutigen Reife zu züchten, und gerade der Kolbenbauer stand dabei vor schwierigen Problemen. Die Kolben sind thermisch erheblich höher belastet, da die dem Viertaktprinzip eigenen Leerhübe wegfallen und für den Abtransport der Wärme ein wesentlich kleinerer Anteil des gesamten Arbeitsspiels zur Verfügung steht. Darüber hinaus hat der Kolben zusätzlich die Aufgabe eines Steuer-schiebers zu erfüllen, wodurch die thermische Belastung noch gesteigert wird. Da der Kolben diese Steuerungsfunktion bei allen Betriebszuständen, beim Start also ebenso wie bei höchster Belastung, zuverlässig erfüllen muß, erwachsen für die Spielgebung besondere Schwierigkeiten.

### Ausführung und Werkstoffe

Die hohe thermische Belastung und die zusätzlichen Aufgaben bei der Gaswechselsteuerung sind auf die Arbeit des Kolbenkonstruktors von bestimmendem



104 Kolben mit fensterartigem Durchbruch

Einfluß. Er wird natürlich versuchen, den Wärmefluß der Querschnitte, insbesondere in der Boden- und Ringzone, zu fördern, um so die thermische Belastung von vornherein niedrig zu halten. Die gute Wärmeleitfähigkeit der Leichtmetalllegierungen erleichtert ihm dabei die Arbeit erheblich.

Die Aufgaben bei der Gaswechselsteuerung kann der Kolben im Zweitaktmotor um so besser erfüllen, je genauer er im Zylinder geführt ist. Dies ist für die Ringzone, im besonderen für die Bodenkante ebenso wichtig wie für den Schaftteil, der meist fensterartige Durchbrüche oder Einschnitte an der Schaftunterkante aufweist (Bild 104 und 105). Ein möglichst enges, bei allen Betriebszuständen und über sehr lange Laufzeiten unveränderliches Spiel ist also die Voraussetzung.

Das Hauptaugenmerk galt der Entwicklung von Legierungen, die durch einen besonders niedrigen Wärmeausdehnungsbeiwert kleine Einbauspiele erlauben. Die hoch-siliziumhaltigen, sogenannten übereutektischen Al-Si-Legierungen – zum Beispiel »MAHLE 138« mit 18% und »MAHLE 244« mit 25% Silizium – brachten dabei erhebliche Fortschritte. Eine geringere Wärmeausdehnung in Verbindung mit sehr guten Warmfestigkeits- und Verschleißigenschaften machen diese Werkstoffe zu ausgesprochenen Zweitaktlegierungen. Neben dem Werkstoff kommt der Gestaltung und der Bearbeitung eine ganz besondere Bedeutung zu. Jede Partie des Kolbens nimmt in irgendeiner, aber durchaus unterschiedlicher Weise an dem Arbeits- und Kräfte spiel teil. Eine mitunter schroff wechselnde Temperaturverteilung ist die unvermeidliche Folge. Gleichwohl wird verlangt, daß die Führung und Dichtwirkung des Kolbens im Zylinder in jedem Fall einwandfrei ist. Durch ein geeignetes, auf die »persönlichen« Eigenarten eines Motors zugeschnittenes Bearbeitungsbild läßt sich diese fast unlösbar scheinende Aufgabe befriedigend lösen. Bild 66 zeigt ein solches kompliziertes Bearbeitungsschema. Im Abschnitt »Kolbenbearbeitung« (Seite 33–37) finden sich weitere Angaben zu diesem Thema. Der Boden des Zweitaktkolbens erhielt bei früheren Konstruktionen meist einen nasen- oder höckerförmigen Aufsatz, der die Aufgabe hat, den Gasstrom beim Ladungswechsel so zu lenken, daß eine möglichst gute Füllung bei geringen Spülverlusten eintreten kann. Bei neueren Spülverfahren wird der Kolbenboden allerdings meist nicht mehr in dieser Weise zur Umlenkung

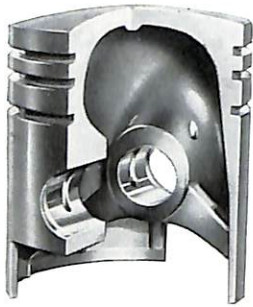
des Gasstroms herangezogen, vielmehr wird durch geeignete Führung der Kanäle der Gasstrom so gelenkt, daß auch mit Flachkolben ein sehr guter Spülwirkungsgrad gewährleistet ist.

Bei der Gestaltung des Schafts ist der Kolbenbauer häufig durch die vom Motorenkonstrukteur verlangten Fenster und Schafttrandkonturen weitgehend gebunden, und es bedarf zuweilen großer Erfahrung, die Forderungen nach hoher Gestaltfestigkeit, strömungsgünstiger Durchbildung und guter Gießbarkeit mit den vorgegebenen Wünschen des Motorenwerks in Einklang zu bringen. Die neueren Kolbenkonstruktionen, bei denen dehnungshemmende oder -begrenzende Einlagen in einem vollständig geschlossenen Schaft untergebracht sind, lassen sich auch vielfach bei Zweitaktmotoren verwenden. Die nach funktionstechnischen Gesichtspunkten festgelegte Schaftform bringt zwar für deren Auswahl häufig gewisse Einschränkungen, aber es ist doch meist möglich, auf eine der verschiedenen Bauarten – seien es nun Vollschaff-Autothermik-, Autothermatik- oder Stahlring-Konstruktionen – zurückgreifen und sie gegebenenfalls für den einzelnen Fall abzuwandeln (Bild 106). Für den Zweitaktmotor ist die damit erreichbare Senkung der Einbauspiele, die durch Verwendung von übereutektischen Legierungen noch gefördert werden kann, natürlich besonders vorteilhaft. Soweit bei diesen Bauformen Querschlitz erforderlich sind, werden sie im Nutengrund angeordnet und durch den Kolbenring so wirksam abgedeckt, daß ein »Kurzschluß« im Gasstrom nicht entstehen kann.



105 Kolben mit Einschnitten am Schaft

106 Kolben mit Fenstern in Vollschaff-Autothermik-Konstruktion. Stahleinlage als »Halbstreifen« ausgeführt



107 Isostatik-Kolben

### Isostatik-Kolben®

Eine den Bedürfnissen des Zweitaktmotorenbaus besonders entsprechende, aber auch zur Bestückung von Viertaktmotoren mit Vorteil verwendbare Leichtkonstruktion stellt der MAHLE-Isostatik-Kolben dar. Seine wesentlichen Merkmale bestehen darin, daß die unmittelbar mit dem Kolbenschaft verwachsenen Bolzennaben mit Hilfe von quer zur Kolbenbolzenachse verlaufenden Stützrippen ausschließlich gegen das offene Schaftende abgestützt sind, wobei diese Stützrippen im Bereich ihrer Einmündungsstellen in Schaft und Naben zwischen sich und der Schaftinnenwand einen Zwischenraum frei lassen (Bild 107).

Diese durch DRP 1 008 529 und Auslandspatente geschützte Bauweise erlaubt auch bei dünnwandigen oder durch Fenster geschwächten Schaftteilen eine einwandfreie Abstützung der Kolbenauflflächen, die ihrerseits wieder große Laufruhe, auch nach längeren Betriebszeiten, bewirkt. Der Schaft ist zwar wirksam gegen Einfallen geschützt, kann sich aber trotzdem elastisch an die Zylinderlaufbahn anschmiegen, worauf besonders bei Zweitaktkolben, deren Schaft auch die Aufgabe eines Steuerschiebers zu erfüllen hat, Wert gelegt werden muß. Als weiterer Vorteil kommt hinzu, daß die nahezu rotations-symmetrische Ausbildung der Kopf- und Ringzone des Isostatik®-Kolbens einen sehr gleichmäßigen Wärmeabfluß vom Kolbenboden über die Ringzone nicht nur zu den Bolzennaben, sondern auch zu den Tragflächen gewährleistet. Dadurch werden die Bolzennaben in erheblichem Maße thermisch entlastet, was sich auf die Schmierung und die Spielbemessung der Bolzenlagerung, sowohl im Kolben als auch im Pleuel, vorteilhaft auswirkt. Dem gleichmäßigen Wärmefluß ist es auch zu verdanken, daß innerhalb gleicher Querschnittsflächen keine wesentlichen Temperaturdifferenzen auftreten, und sich infolgedessen auch die radiale Ausdehnung, die der Kolben unter dem Einfluß der Betriebswärme erleidet, wesentlich gleichmäßiger als bei älteren Bauarten vollzieht. Auch das kommt wiederum der Dichtwirkung und damit der Leistung zugute.

### Kolbenzubehör im Zweitaktmotor

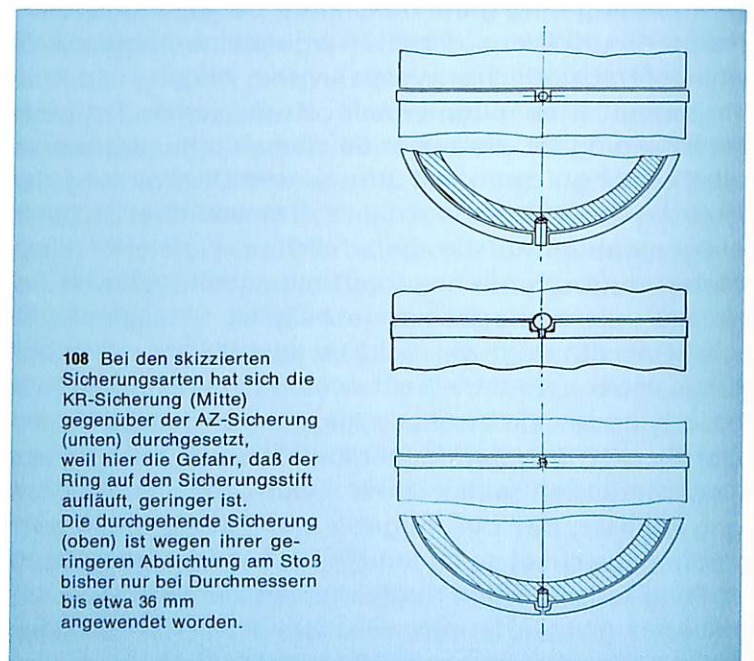
Die Kolbenringe arbeiten, ganz abgesehen von der thermischen Belastung, im Zweitaktmotor unter erschwerenden Bedingungen:

1. Sie liegen fast dauernd an der Unterflanke an und neigen dadurch eher zum Festwerden, zumal die Gefahr einer Ölverkokung bei der meist üblichen Gemischschmierung ohnehin größer ist als beim Viertaktmotor.
2. Die Ringe müssen in der Regel gegen Verdrehen gesichert werden, da die Stoßenden nicht über zylinderseitige Schlitze oder Kanalöffnungen laufen dürfen. Die Art, Zahl und Lage der Ringe ist für die Betriebstüchtigkeit des Zweitaktkolbens von ganz wesentlicher Bedeutung (Bild 108).

Auch der Kolbenbolzen ist im Zweitaktmotor besonders schwierigen Bedingungen unterworfen. Durch die dauernd einseitige Anlage in seinen Lagerstellen wird die Schmierung sehr erschwert. Da man ferner bestrebt ist, den Bolzendurchmesser möglichst klein zu halten, um bei der Anordnung der Fenster und Schlitze mehr Freiheit zu haben, erhält er oft sehr knappe Auflageflächen.

Unter diesen Umständen kommt den Pleuelbüchsen sowohl hinsichtlich des Materials wie der Passungsverhältnisse im Zweitaktmotor eine erhöhte Bedeutung zu.

Über Kolbenringe, Ringsicherungen und Bolzen ist im Abschnitt »Kolbenzubehör« auf den Seiten 68 bis 82 noch weiteres ausgeführt.



108 Bei den skizzierten Sicherungsarten hat sich die KR-Sicherung (Mitte) gegenüber der AZ-Sicherung (unten) durchgesetzt, weil hier die Gefahr, daß der Ring auf den Sicherungsstift aufläuft, geringer ist. Die durchgehende Sicherung (oben) ist wegen ihrer geringeren Abdichtung am Stoß bisher nur bei Durchmessern bis etwa 36 mm angewendet worden.

# Stahlstreifenkolben

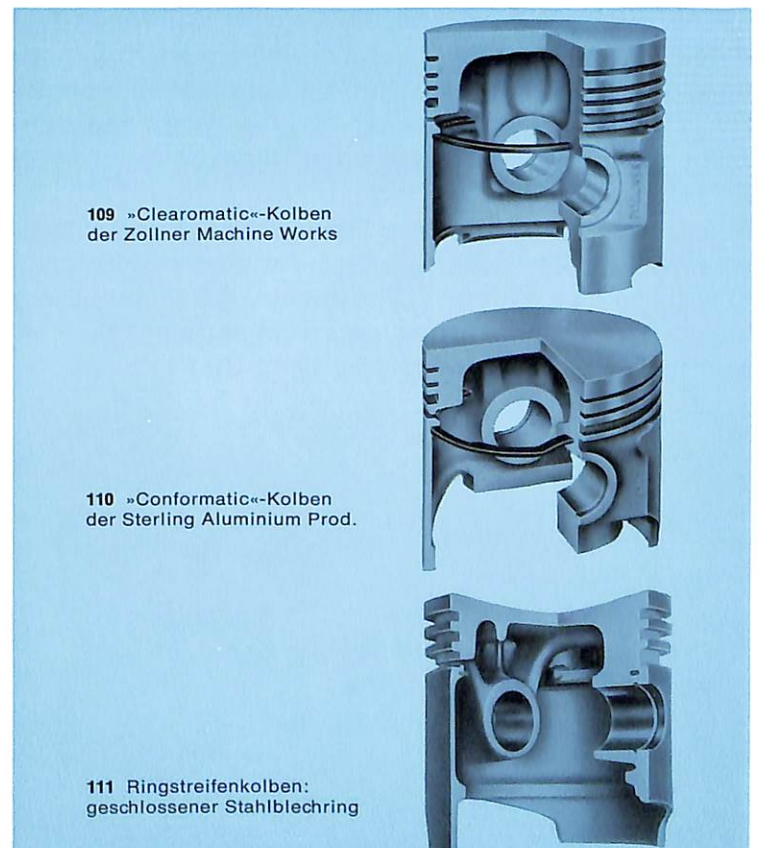
## Leichtmetallkolben mit ringförmigen Stahleinlagen

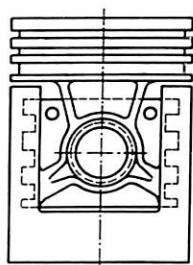
Regelglieder in Form von ringförmigen Stahleinlagen werden in verschiedenen Ausführungen und mit unterschiedlicher Wirkungsweise verwendet. Vom bereits besprochenen »steel-belted-piston« (Bild 99) unterscheidet sich die Kolbenbauart nach Bild 111 dadurch, daß ihr Schaft auf einen eingegossenen Stahlring aufgeschumpft und an den mit dem Ring in Berührung stehenden Stellen ungeschlitzt ist. Die Schrumpfspannung bewirkt eine elastische Dehnung des Leichtmetallschaftes und eine elastische Stauchung des Stahlringes im Sinne der in Bild 92.4 eingezeichneten Pfeilpaare. Bei Erwärmung bewirkt die Wärmeausdehnung bis zum völligen Abbau der Schrumpfspannung nur einen entsprechenden Abbau der elastischen Verformungen, wobei eine Durchmesserergrößerung des Kolbenschaftes nur in dem Ausmaß eintritt, in welchem der Durchmesser des Stahlringes größer wird. Der Schaft verhält sich also hinsichtlich seiner radialen Wärmeausdehnung so, als ob er aus einem Werkstoff bestehen würde, dessen Wärmeausdehnungsbeiwert zwischen demjenigen des Schaftwerkstoffes und des Ringwerkstoffes liegt. Dabei tritt eine Annäherung an das Ausdehnungsverhalten des Ringwerkstoffes um so vollkommener ein, je geringfügiger die durch die Schrumpfspannung bewirkte elastische Stauchung des Ringes im Verhältnis zur elastischen Dehnung des Schaftes, bzw. je größer der Ringquerschnitt im Verhältnis zur Schaftwandstärke ist. Nach diesem Prinzip sind die in den USA bekannten »Clearomatic«- bzw. »Conformatic«-Kolben aufgebaut (Bild 109 und 110). In Europa hat sich diese verhältnismäßig starre Bauart nicht durchgesetzt. Statt dessen findet hier der sogenannte »Ringstreifenkolben« Verwendung (Bild 111), der mit dem »Clearomatic«-Kolben das Merkmal gemeinsam hat, daß sein Schaft ohne Längsschlitzung ausgeführt und mit der Ringeinlage durch Schrumpfung fest verbunden ist. Dabei ist jedoch die zusätzlich mittels einer Zackenkronen im Schaftwerkstoff verkrallte Ringeinlage biegsam genug, um wie diejenige des »steel-belted-piston« oval verformt werden zu können. Die günstigen Auswirkungen des in Bild 92.4 veranschaulichten Schrumpfeffektes und des bei Erwärmung eintretenden Verzuges in Richtung der Bolzenachse gemäß Bild 92.2 sind also gleichmäßig ausgenützt, es

resultiert daraus eine beträchtlich verbesserte Regelwirkung, die allerdings wie bei jenen mit wachsendem Abstand von der Einlage stetig abnimmt.

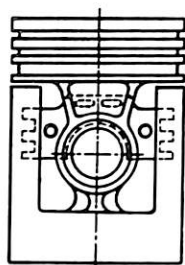
## Leichtmetallkolben mit dehnungshemmenden Traversen

Die älteste Leichtmetallkolben-Bauart, bei der das Problem der Wärmeausdehnung des Kolbenschaftes in befriedigender Weise gelöst wurde, ist der 1923 von dem Amerikaner Nelson erfundene, in den USA von der Bohn Aluminum & Brass Corp. und in Deutschland von MAHLE gebaute »Nelson-Bohnalite«- oder »Invarstreifen«-Kolben (Bild 92.5). Das kennzeichnende Merkmal dieser Bauart besteht darin, daß die durch Wanddurchbrechungen vom Kolbenkopf abgetrennten gleitschuhartigen tragenden Schaftteile durch seihenartig angeordnete Einlagen aus Invarstahl miteinander verbunden sind. Da Invarstahl (34–36%iger Nickelstahl) einen Wärmeausdehnungsbeiwert von nur etwa  $3 \cdot 10^{-6} \text{ cm/cm}^\circ\text{C}$  aufweist, wirken die Einlagen im Bereich c, Bild 92.5, sehr stark dehnungshem-

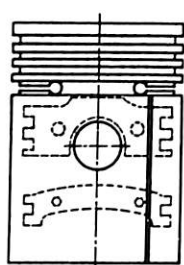




112 Breitplatten-ausführung



113 Schmalstreifen-ausführung



114 Fensterlose Vierstreifen-ausführung

mend. Durch geeignete Anordnung kann man erreichen, daß die Gesamtwärmeausdehnung (im von den Einlagen beherrschten Bereich c und in den Leichtmetallbereichen a und b zusammen) das für jeden gegebenen Fall am besten geeignete Ausmaß annimmt. Durch entsprechende Wahl der axialen Höhe der Einlagen läßt sich auch ohne weiteres erreichen, daß sich deren dehnungshemmende Wirkung über die ganze Länge des Kolbenschaftes gleichmäßig erstreckt. Von dieser Kolbenbauart, von der Bild 112 bis 114 drei charakteristische Beispiele der damaligen Ausführung zeigen, sind schon bis 1936 weit über 100 Millionen Stück hergestellt und eingebaut worden.

#### Autothermik-Kolben®

Der Nelson-Bohnalite-Kolben wurde später durch eine Bauart abgelöst, bei der die sehnartigen Einlagen aus unlegiertem Stahl bestehen. Zusammen mit den auf ihrer Außenseite aufliegenden Leichtmetallrippen bilden sie bimetallische Regelglieder (Bild 92.6a), deren Wirkungsweise in Bild 119 veranschaulicht ist. Da die Stahleinlagen und die Leichtmetallrippen fest miteinander verbunden sind, können sie auf Temperaturänderungen nicht unabhängig voneinander reagieren. Sie behindern einander in ihrer Wärmeausdehnung und rufen so Spannungen hervor, die zu einer Krümmung führen.

Bimetallische Regelkolben dieser Art sind in Deutschland unter der Bezeichnung »Autothermik-Kolben« (eingetragenes Warenzeichen der MAHLE Komm.-Ges.) bekanntgeworden. Ein heute noch serienmäßig verwendetes Ausführungsbeispiel zeigt Bild 115.

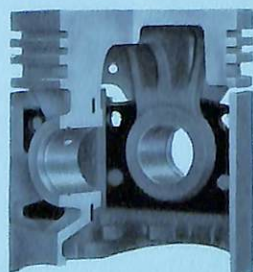
#### Vollschacht-Autothermik-Kolben DBP 963 912

Nach dem gleichen Prinzip arbeitet auch der »Vollschacht-Autothermik-Kolben« (Bild 92.6b), bei dem jedoch Teile des Kolbenschaftes selbst als bimetallische Regelglieder ausgebildet sind, so daß, wie aus den Bildern 116 bis 118 hervorgeht, der Kolbenschaft vollwandig ausgeführt werden kann. Dadurch wird auch für hohe Kolbengeschwindigkeiten und bei großem Spritzölanfall eine klare Trennung zwischen dem Schmierfilm an der Zylinderwand und dem im Kolbeninnern vom Örling her zurückfließenden Überschußöl bzw. dem dort anfallenden Sprühöl erreicht. Diese Bauform kann durch entsprechende Dimensionierung der Streifen und kleine zusätzliche Elemente, wie Hemmrippen und Bunde, auf jede für den Motorbetrieb nötige Wärmeausdehnungszahl in Druckrichtung gebracht werden. Damit lassen sich sowohl die Arbeitsbedingungen luftgekühlter wie wassergekühlter Motoren einwandfrei erfüllen.

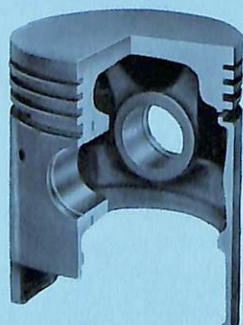
Der geschlossene Schaft erlaubt auch die Anwendung in Zweitakt-Motoren, wo Gasführungs Kanäle im Zylinder abgedeckt werden müssen. Der Vollschacht-Autothermik-Kolben findet bei den vielen heute gebauten Motoren für Personenkraftwagen Verwendung. Einige serienmäßige Anwendungsbeispiele zeigen die Abb. 116 bis 118.

#### Autothermatik-Kolben® DBP 1 003 990 bzw. 1 041 293

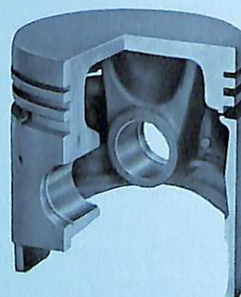
Allen bisher besprochenen Regelkolben ist gemeinsam, daß ihr in seiner Wärmeausdehnung durch Einlagen geregelter Schaft durch Querslitze vom Kolbenkopf abgetrennt ist, und zwar wegen der durch die Abtren-



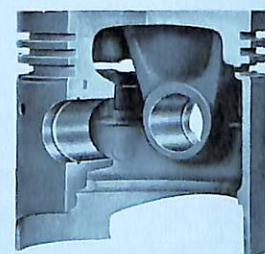
115 Autothermik-Kolben für Opel »Olympia«, »Rekord« und »Kapitän«, 80 mm  $\phi$



116 Vollschacht-Autothermik-Kolben für Daimler-Benz 220 SE, 80 mm  $\phi$

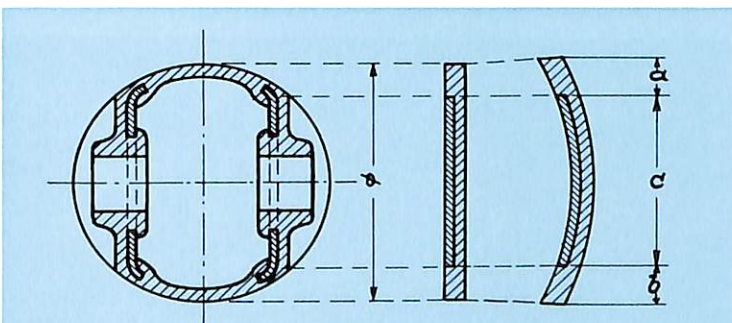


117 Vollschacht-Autothermik-Kolben für Ford 17 M, 84 mm  $\phi$



118 Vollschacht-Autothermik-Kolben für Volkswagen, 77 mm  $\phi$

nung erreichten größeren Flexibilität und damit Regelbarkeit des Schaftes. Mitunter können derartige Querschlitzte jedoch auch nachteilig sein. Die durch sie verursachte Unterbrechung des Wärmeflusses führt nämlich nicht nur zu einem erwünschten oder wenigstens unschädlichen Absinken der Temperatur in den darunter liegenden Schaftzonen, sondern auch zu einer entsprechenden Temperatursteigerung in den darüber liegenden Teilen der Ringzone, was unter Umständen zu Ölkohleansatz und zum Festwerden der Kolbenringe führen kann. Ebenso verbessert zwar die Anordnung von Querschlitzten die Biegsamkeit des Schaftes, aber sie vermindert auch die Gestaltfestigkeit des Kolbens. Um diese Nachteile zu vermeiden, ist der Autothermatik-Kolben entwickelt worden, bei dem die bisher für unentbehrlich gehaltenen Querschlitzte unter gleichzeitiger Anpassung der Wandstärken im Bereich des Übergangs vom Kopf zum Schaft und im Bereich der Einlagen weggelassen sind. Die dehnungsregelnde Wirkung wird durch diese Maßnahmen am obersten Schaftende nur geringfügig, im Bereich des unteren Schaftendes überhaupt nicht beeinträchtigt. So ist es möglich, den »Autothermatik-Kolben« mit dem gleichen Nennspiel wie den quergeschlitzten »Autothermik-Kolben« einzubauen, und ihn dadurch ebenso laufruhig zu machen wie letzteren. Seine größere Festigkeit erlaubt die Verwendung auch bei sehr hohen Belastungen in Otto- und Dieselmotoren, seine Freiheit von Querschlitzten den Einbau in schlitzgesteuerte Zweitaktmotoren. Serienmäßig verwendete Ausführungsbeispiele zeigen die Bilder 120 bis 125.



**119** Bimetalleffekt beim Autothermik-Kolben: Wenn die bimetallichen Teile im Bereich c erwärmt werden, krümmen sie sich. Das Maß c verändert sich dabei nur unbedeutend. Lediglich die Maße a und b ändern sich entsprechend der Wärmeausdehnung des Kolbenwerkstoffes

**120** Autothermatik-Kolben für Alfa-Romeo 1900 Super, 84,5 mm  $\phi$



**121** Autothermatik-Kolben für BMW 2,6 l, 74 mm  $\phi$



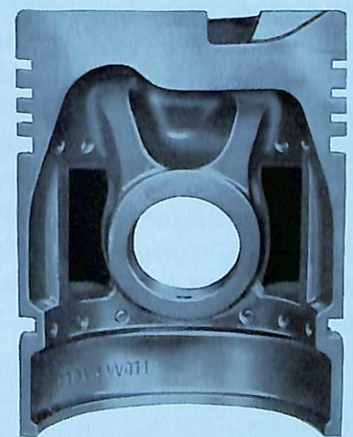
**122** Autothermatik-Kolben für DAF B 74, 85,5 mm  $\phi$



**123** Autothermatik-Kolben für Daimler-Benz 190, 85 mm  $\phi$



**124** Autothermatik-Kolben für Klöckner-Humboldt-Deutz-Magirus 514/614, 110 mm  $\phi$



**125** Autothermatik-Kolben für Volvo 122 S, 84,14 mm  $\phi$



## Vollschaftkolben

Als Vollschaft- oder Glattschaftkolben werden alle einfach wirkenden Tauchkolben bezeichnet, bei denen der Boden- und Kolbenringteil mit dem zur Geradführung dienenden Schaft, der auch die Bolzenlagerung enthält, ohne Schlitze oder dehnungshemmende Einlagen zu einem verhältnismäßig steifen, einheitlichen Körper vereinigt sind. Man könnte diese wohl ursprünglichste und einfachste Form des Kolbens auch durch eine völlige Verschmelzung des Tellerkolbens der Dampfmaschine mit dem Kreuzkopf definieren. Nahezu alle Graugußkolben für Verbrennungsmotoren und Kolbenverdichter waren und sind in diesem Sinne Vollschaftkolben. Dagegen ist die Eignung von Vollschaftkolben aus Leichtmetalllegierungen wegen der größeren Wärmeausdehnung dieser Werkstoffe auf bestimmte Anwendungsgebiete beschränkt, bei denen die Vorteile der Einfachheit, der hohen Gestaltfestigkeit und des ungestörten Wärmeflusses von der Ringzone zum Schaft besonders ins Gewicht fallen. Im Vergleich zu den für Ottomotoren von Personenwagen fast ausschließlich verwendeten Kolben mit Schlitzen, dehnungshemmenden Stahleinlagen u. ä. erfordern Vollschaftkolben meist wesentlich größere Einbauspiele am Schaft, damit sie bei voller Betriebstemperatur klemmfrei laufen. Wird auch im Start- und Teillastzustand große Laufruhe verlangt, dann muß der Schaft durch relativ große Länge, oft auch durch eine besonders abgestimmte Formgebung möglichst satt im Zylinder geführt werden. Ferner empfiehlt es sich, die Nabenbohrungen für den Kolbenbolzen etwas außermittig anzuordnen, um dadurch einen sanfteren Anlagewechsel im Bereich des Totpunktes zu erreichen (siehe auch Abschnitt Kolbengestaltung Seite 40). Im übrigen kann man auch durch Verwendung der über-eutektischen Aluminium-Silizium-Legierungen »MAHLE 138« und »MAHLE 244«, die geringere Wärmeausdehnungskoeffizienten haben und daher kleinere Kolbenspiele erlauben, auf gute Laufruhe hinarbeiten.

### Anwendung

Dieselmotoren, die wegen ihrer meist relativ hohen Zünddrücke und Betriebstemperaturen robuste Kolben erfordern, sind das Hauptanwendungsgebiet für Vollschaftkolben. Leichtmetall-Vollschaftkolben erlauben im Viertakt-Dieselmotor nicht nur in kleineren und mittleren Einheiten, sondern auch noch bei Großmoto-

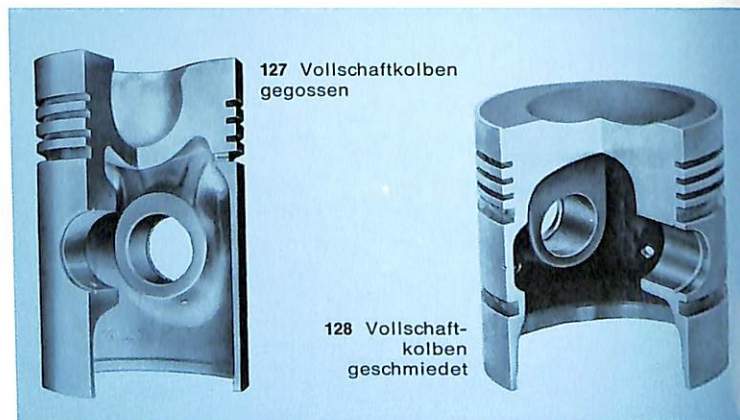
126 Geschmiedeter Kolben aus NSU-Weltrekord-Motorrad 1956, 63 mm



ren (Seite 62) mit Kolbendurchmessern von 400 mm und mehr ungekühlte Ausführungen. Auch die meisten Fahrzeug-Dieselmotoren haben noch Vollschaftkolben, wenn auch hier schon mit Hilfe von Regelkolben, insbesondere von Autothermatik-Kolben, eine bessere Anpassung an die stark wechselnden Betriebstemperaturen erstrebt und erreicht worden ist. Auch die meisten Zweitakt-Dieselmotoren werden mit Vollschaftkolben bestückt. Die meist höhere Belastung und die ungünstigen Schmierbedingungen für die Lagerung des Kolbenbolzens machen hier zuweilen besondere konstruktive Maßnahmen nötig. So ist es oft vorteilhaft, die Kolbenbolzenaugen mit Bronze- oder Stahl-Bronze-Verbundbüchsen auszurüsten. Bei höherer Belastung muß zuweilen eine zusätzliche Kühlung des Kolbenbodens vorgesehen werden. Damit wird die Betriebstemperatur soweit gesenkt, daß Beschädigungen des Bodens und Festbrennen der Kolbenringe vermieden werden. Es hängt meist von den Besonderheiten des Arbeitsverfahrens ab, ob gekühlte Zweitakt-Dieselmotoren vorteilhafter aus Leichtmetall oder besonderen Grauguß-Sorten hergestellt werden.

Kolben für Zweitaktmotoren entsprechen in der Regel ebenfalls der Vollschaftbauart. Wegen der hier vorliegenden Sonderbedingungen sind sie in einem besonderen Abschnitt »Kolben für Zweitaktmotoren« (Seite 52) beschrieben.

Bei gepreßten Kolben kann der Vollschaftkolben als Normalbauart gelten. Er stellt in Verbindung mit den guten Festigkeitswerten des gepreßten Werkstoffes die Bauart dar, die den hohen Anforderungen im Renn- und Sportmotor, im Hochleistungs-Diesel- und Flugmotor am besten gewachsen ist (Bild 126 und 128).





## Ringträgerkolben

Die Lebensdauer von Leichtmetallkolben in Verbrennungsmotoren ist im allgemeinen größer als die der Kolbenringe und Zylinderlaufbahnen. Es gibt jedoch besondere Fälle, wo die obersten Kolbenringnuten – z. B. in hochbeanspruchten Dieselmotoren oder bei rauen Betriebsverhältnissen – zur Verlängerung der Laufzeit zusätzlich geschützt werden müssen.

In den Nuten, vorzugsweise in der dem Verbrennungsraum nächstgelegenen Nut, wirken mehrere ungünstige Bedingungen zusammen. Der erste Kolbenring wird in axialer und radialer Richtung nahezu vom vollen Verbrennungsdruck beaufschlagt. Er gleitet daher auf der Nutenflanke beim Seitenwechsel des Kolbens mit beträchtlicher Reibung. Der örtliche Berührungsdruk kann zudem durch geringe Verformungen erhöht werden, die der Kolben durch Wärmeausdehnung und mechanische Kräfte erleidet. Diese Scheuerbeanspruchungen werden erst dann gefährlich, wenn der Kolbenwerkstoff durch hohe Betriebstemperaturen erweicht wird (siehe Abschnitt »Warmhärte«, Seite 25). Er reibt sich dann nicht nur leichter ab, sondern kann auch plastisch verformt, die Nut also »ausgeschlagen« werden (Bild 131). Die erwähnten hohen Temperaturen verschlechtern zudem die Schmierfähigkeit des Öles und begünstigen die Bildung von verschleißfördernden Rückständen aus dem Öl und dem Brennstoff. Dazu kann sich besonders beim Betrieb von Motoren in staubiger Umgebung (z. B. Erdbewegungen, Landwirtschaft) noch Schmutz und schließlich der Eisenabrieb der Kolbenringe und Zylinder als Verschleißmittel gesellen.

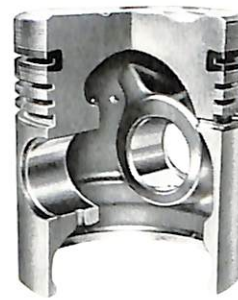
Wenn der Verschleiß von Kolbenringnuten durch diese Einflüsse ein gewisses Ausmaß erreicht hat, nimmt er

mit wachsender Geschwindigkeit weiter zu. Dabei verlieren dann auch die Kolbenringe ihre genaue Parallelführung, zunehmende Schräglagen lassen sie selbst, die Nuten und die Zylinder schnell weiter verschleifen. Als Folge ergibt die allmählich versagende Kolben-dichtung ansteigenden Öl- und Brennstoffverbrauch, sinkende Leistung und verkürzte Lebensdauer des Motors.

Gegen den Verschleiß der Nuten, besonders der dem Brennraum nächstgelegenen, sind zahlreiche Konstruktionen von Ringträgern aus verschleißfesten Werkstoffen vorgeschlagen worden.

Die erste wirklich brauchbare Lösung wurde durch das im Jahre 1931 Dipl.-Ing. Ernst Mahle erteilte DRP. 578 889 gefunden und in großem Umfang mit bestem Erfolg im Kolbenbau eingeführt. Aus Werkstoffen hergestellt, deren Wärmeausdehnungsverhalten demjenigen des Kolbenwerkstoffs angeglichen ist, sind diese Ringträger durch Eingießen betriebssicher mit dem Kolbenkörper verbunden. Der Ringträgerkolben vereinigt so die Vorteile des Leichtmetallkolbens mit denen des Eisenkolbens in idealer Weise.

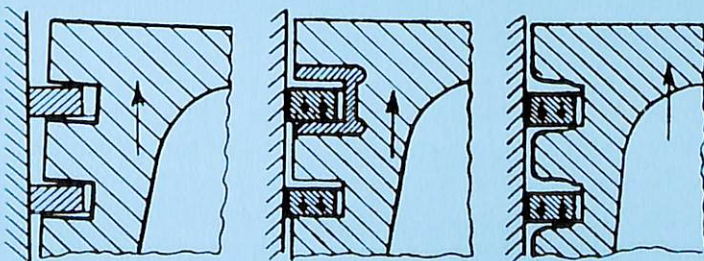
Der Ringträger besteht aus einem geschlossenen, meist allseitig bearbeiteten Gußeisenring, der beim Guß des Kolbenrohrlings in die Kokille eingelegt und vom Leichtmetall dicht umschlossen wird. Eine gute Verankerung im Kolbenkörper wird durch entsprechende Formgebung des Ringträgers gesichert. Seit mehreren Jahren kann durch geeignete Verfahren eine metallische Bindung zwischen dem Ringträger und dem Kolbenkörper erzielt werden. Das AL-FIN-Verfahren, das bei MAHLE-Ringträgerkolben angewendet wird, hat sich in dieser Zeit als zuverlässig bewährt (Bild 132).



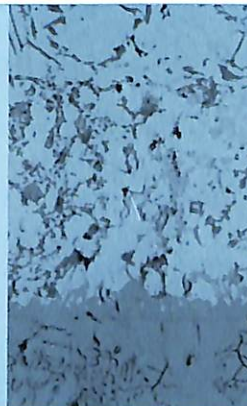
129 KHD FL 714  
Vielstoffmotor  
Legierung »MAHLE 138«



130 Alco Engine 244  
9"  $\varnothing$  (228,6 mm)



131 Der Ringträger schützt die Nut vor dem Ausschlagen



- a) Kolbenwerkstoff
- b) Eisenaluminium
- c) Ni-Resist

a Ni-Resist-Ringträger mit AL-FIN-Bindung. Kontinuierlicher Übergang Ni-Resist-Eisenaluminid-Al-Si-Legierung V = 200

b

c



132 AL-FIN-gebundener Ni-Resist-Ringträger für Volvo-Diesel, Typ D 96 AS, 1957



132 a Armal-Kolben®

### Ausführung

Im allgemeinen ist ein Ringträger für den ersten Kolbenring ausreichend (Bild 129). Es können aber auch mehrere Ringe in einen Ringträger eingebettet werden (Bild 130). Bei dem in jüngster Zeit entwickelten MAHLE-Armal®-Kolben ist an den Ringträger noch ein weiteres Schutzelement angegossen, das den Rand der Bodenmulde gegen die Angriffe durch den sogenannten Feuerkreisel abschirmt (Bild 132 a). Eingehende Temperaturmessungen an gleichen Kolben mit und ohne Ringträger haben ergeben, daß die Wärmeabführung durch Ringträger nur unwesentlich vermindert wird.

### Werkstoffe

Der für Ringträger verwendete Werkstoff ist hochlegiertes austenitisches Sondergußeisen, z. B. Ni-Resist oder Duleman, das einen ähnlich hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten wie das umgebende Leichtmetall – etwa  $18 \times 10^{-6} \text{ cm/cm}^\circ\text{C}$  – aufweist. Damit wird beim Eingießen durch gleichmäßiges Schwinden ein fester Sitz erreicht und im Betriebszustand vermieden, daß sich der Ringträger lockert.

### Anwendung

Ringträgerkolben werden mit Vorteil überall da verwendet, wo außergewöhnliche Laufzeiten verlangt werden oder normale Kolben durch hohe Drücke und Temperaturen in der Ringzone, rauhen Betrieb und Staub gefährdet sind. Letzteres ist vor allem in hochbeanspruchten Fahrzeugdiesel-, Schlepper- und Einbaumotoren der Fall.

Seit dem Jahre 1932 hat der MAHLE-Kolbenbau ohne Unterbrechung Ringträgerkolben in Großserien für Fahrzeug- und Schlepper-Dieselmotoren geliefert, darunter auch solche von besonderer Bauart für die ehemaligen Junkers-Flugdieselmotoren. Weit über eine Million Ringträgerkolben – davon etwa eine halbe Million mit metallischer Bindung – umfaßt das Liefervolumen dieser Jahre.

Seit dem Ende des zweiten Weltkrieges werden Ringträger auch in den USA in steigendem Umfang verwendet, meist nach dem Vorbild von E. Mahle aus Gußeisenlegierungen von großer Wärmeausdehnung und mit metallischer Bindung. Daß das Bedürfnis nach Ringträgerkolben in den USA erst jetzt entstanden ist, mag damit zusammenhängen, daß der Fahrzeug-Dieselmotor in Europa früher ausgereift war und erst viel später in Amerika wirtschaftlich interessant und eingeführt wurde.

## Verbundguß-Kolben

Die Kolbenspeziallegierungen vereinen in sich eine ganze Reihe von Eigenschaften, die der Funktion des Kolbens in bestmöglichem Maße dienlich sind. Die einzelnen Eigenschaften kommen allerdings an den verschiedenen Stellen des Kolbens in unterschiedlichem Ausmaß zum Zuge, so etwa die Warmfestigkeit und die Wärmeleitfähigkeit besonders am Boden, die Verschleißeigenschaften dagegen vorwiegend an der Ringpartie und am Schaft. Eine »heterogene« Verteilung wäre demnach durchaus wünschenswert, läßt sich aber natürlich innerhalb eines und desselben Werkstoffes kaum erreichen. Für die weitaus größte Zahl aller Fälle stellen die Standard-Kolbenwerkstoffe einen voll befriedigenden Kompromiß dar. In gewissen Fällen, wo man örtlich noch ganz bestimmte Eigenschaften braucht, die von der Kolbenlegierung selbst nicht erwartet werden können, läßt sich eine lokale Verbesserung sozusagen »auf Umwegen« erreichen. Der Schutz der ersten Ringnut durch Eingießen eines Ringträgers und die Bewehrung des Bodens gegen Anschmoren mit Hilfe einer oxydischen oder galvanisch aufgetragenen Schicht oder einer Schwermetallplatte ist schließlich nichts anderes als eine derartige »Veredelung«, und in gewissem Sinn kann auch das Eingießen von dehnungshemmenden Einlagen zu diesen Maßnahmen gerechnet werden.

Über diese bekannten und bereits beschriebenen Maßnahmen hinaus gibt es aber noch die Möglichkeit, verschiedenartige Leichtmetalllegierungen so miteinander zu verbinden, daß sich bestimmte Eigenschaften gerade dort ergeben, wo sie am nützlichsten sind. MAHLE hat verschiedene Verbundverfahren entwickelt, die es beispielsweise gestatten, für Kolbenböden, die durch Wärmespannung rißgefährdet sind, Werkstoffe mit höherer Wärmeleitfähigkeit oder Warmfestigkeit zu wählen.

### Ausführung

Nach einem von MAHLE Komm.-Ges. entwickelten Verfahren lassen sich zwei Legierungen unter bestimmten Voraussetzungen so zusammengießen, daß eine ununterbrochene metallische Übergangsschicht entsteht und beide Werkstoffe ihre spezifischen Eigenschaften beibehalten. Bild 133 zeigt einen Dieselpiston aus dem Jahre 1935, bei dem ein Bodenstück aus Legierung »Y« mit einem Grundkörper aus Legierung »MAHLE 124«

im Verbundguß sozusagen zu einem homogenen Körper mit heterogenen Eigenschaften vereinigt ist. Das Gefügeschliffbild (Bild 134) läßt den stetigen Übergang an der »Nahtstelle« zwischen beiden Werkstoffen deutlich erkennen.

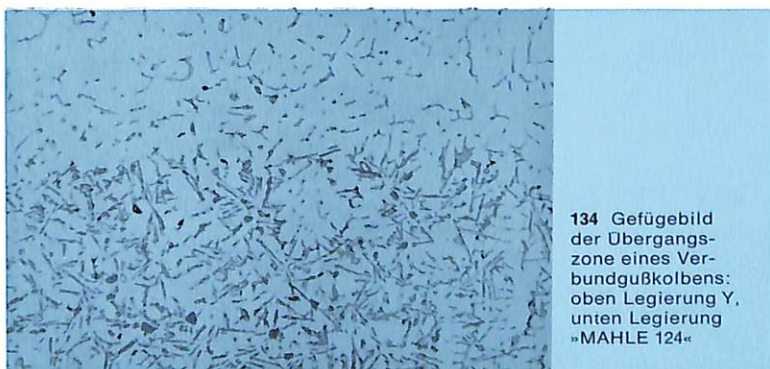
Eine Abwandlung dieses Verfahrens besteht darin, in ähnlicher Weise einen Kolbenkörper aus einer der üblichen Kolbenlegierungen (»MAHLE 124«, »MAHLE 138« oder »MAHLE 244«) mit einem Kolbenboden aus Rein-Aluminium zu verbinden (Bild 135). In diesem Fall wird durch bessere Wärmeableitung der Gefahr überhöhter Wärmespannungen entgegengewirkt.

Einige Bedeutung verdienen in diesem Zusammenhang auch die warmfesten Sinter-Aluminium-Werkstoffe \*), deren Festigkeit weit weniger temperaturabhängig ist als diejenige der durch Schmelzen erzeugten Kolbenlegierungen. Auch diese Werkstoffe können nach einem besonderen, bei MAHLE entwickelten Verfahren mit dem normalen Kolbenmaterial haftfest verbunden werden. Solche Kolben sind in bezug auf Warmfestigkeit der Kolbenböden allen anderen Leichtmetallausführungen erheblich überlegen.

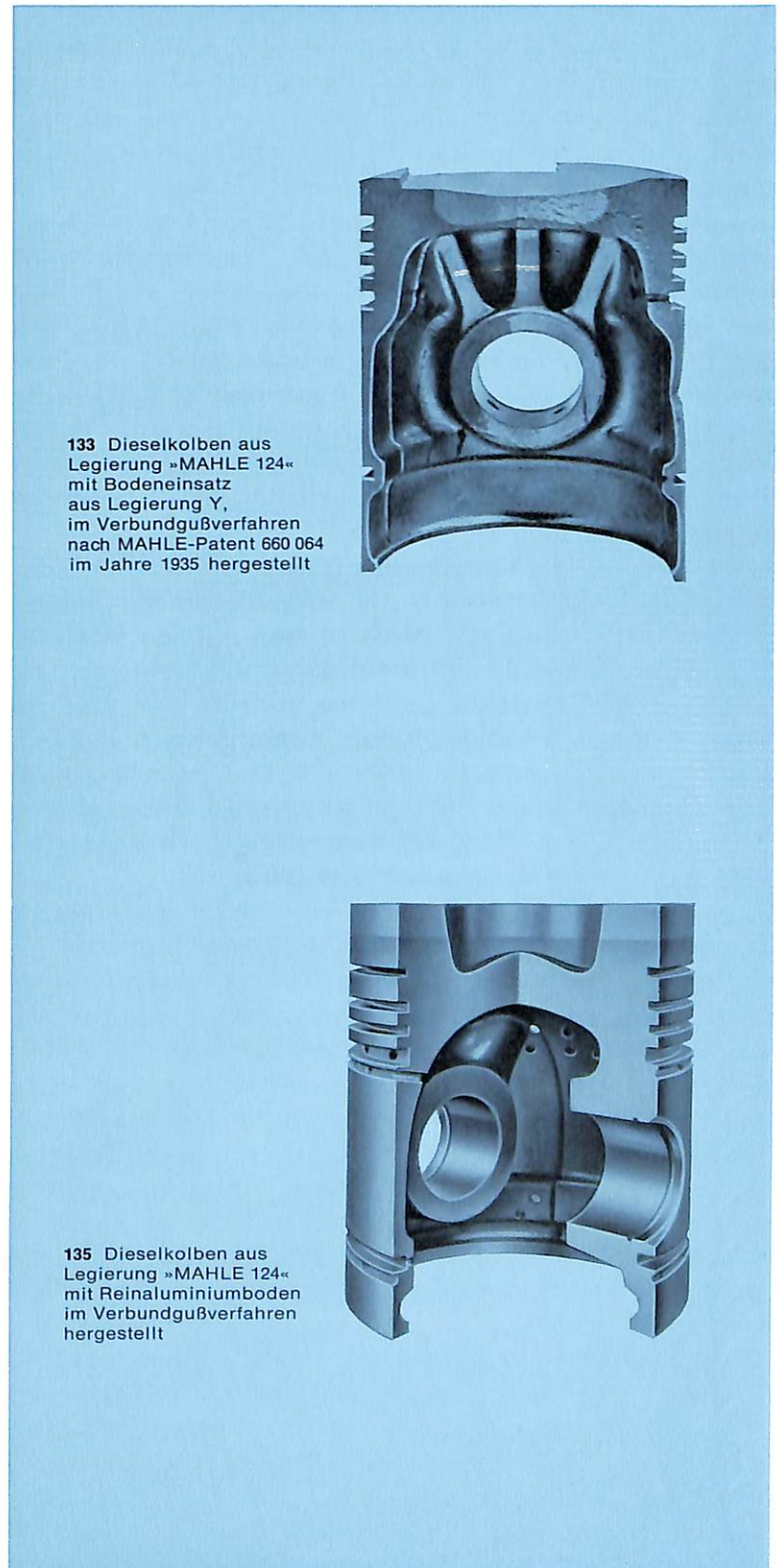
Bodenbewehrungen der vorerwähnten Art sollten sich möglichst über die ganze Bodenfläche erstrecken. Angesichts der unterschiedlichen Wärme- und mechanischen Eigenschaften sollten auch die Verbindungszonen der verschiedenen Werkstoffe im Bereich gleichmäßiger Temperatur liegen, um nicht bei Überlastung den angestrebten Erfolg gefährden zu können.

Leider ist die Anwendung aller angeführten Verfahren mit zum Teil erheblichen zusätzlichen Aufwendungen verbunden, weshalb man bemüht ist, ohne sie auszukommen.

\*) SAP® bzw. Sintal®



134 Gefügebild der Übergangszone eines Verbundgußkolbens: oben Legierung Y, unten Legierung »MAHLE 124«



133 Dieselkolben aus Legierung »MAHLE 124« mit Bodeneinsatz aus Legierung Y, im Verbundgußverfahren nach MAHLE-Patent 660 064 im Jahre 1935 hergestellt

135 Dieselkolben aus Legierung »MAHLE 124« mit Reinaluminiumboden im Verbundgußverfahren hergestellt

## Großkolben

### Begriff

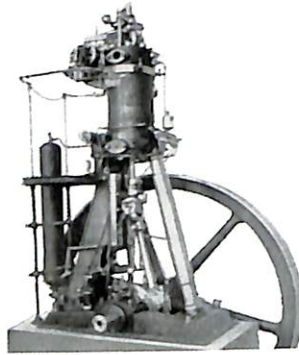
Die Unterscheidung »Großkolben« und »Kleinkolben« ist relativ. Für die Kolbenindustrie, die auch kleinste Kolben von der Größe einer Zündholzschachtel herstellt, und für den großen Kreis der Motorenfachleute, die in den Dimensionen des Kraftfahrzeugs zu denken gewohnt sind, zählen Kolben mit 180 mm Durchmesser schon zu den »Großen«, während die Großmotorenhersteller erst bei Größen ab 400 mm Durchmesser von »Großkolben« sprechen. Der Gebrauch dieses Begriffs als Sammelbezeichnung für alle Kolben »jenseits« der im Kraftfahrzeug üblichen Abmessungen ist durchaus sinnvoll und berechtigt. Im folgenden sind jedoch vornehmlich die größeren Typen gemeint, wie sie in stationäre Motoren, Lokomotiven und Schiffsmotoren eingebaut werden.

Als Schöpfer des Verbrennungsmotors mit Selbstzündung gilt Rudolf Diesel. Unter seiner Leitung entstand im Werk Augsburg der MAN in den Jahren 1892–96 der »neue rationelle Wärmemotor Patent Diesel«. Die ganze erste Entwicklungsphase vollzog sich also an einer verhältnismäßig großen stationären Maschine, und es erscheint daher angebracht, in diesem Abschnitt das Kernstück jenes Patents zu zitieren, mit dem sich Diesel im Jahre 1892 Arbeitsverfahren und Ausführungsart seines Motors schützen ließ:

»... daß in einem Zylinder vom Arbeitskolben reine Luft oder anderes indifferentes Gas mit reiner Luft so stark verdichtet wird, daß die hierdurch entstandenen Temperaturen weit über der Entzündungstemperatur des zu benützensden Brennstoffs liegen, worauf die Brennstoffzufuhr vom Totpunkt ab so allmählich stattfindet, daß die Verbrennung wegen des ausschließenden Kolbens und der dadurch bewirkten Expansion der verdichteten Luft (bzw. des Gases) ohne wesentliche Druck- und Temperaturerhöhung erfolgt, worauf nach Abschluß der Brennstoffzufuhr die weitere Expansion der im Arbeitszylinder befindlichen Gasmasse stattfindet.«

Wenn auch die technische Entwicklung später in Einzelheiten einen etwas anderen Weg ging, so war damit doch schon das Arbeitsprinzip des vielseitigen, wirtschaftlichen Dieselmotors der Gegenwart im wesentlichen vorgezeichnet.

Wie im ganzen übrigen Motorenbau wurden auch im Großdieselbau lange Zeit ausschließlich Eisenkolben



136 Der erste betriebsfähige Dieselmotor mit 250 mm Bohrung und 400 mm Hub aus dem Jahre 1897

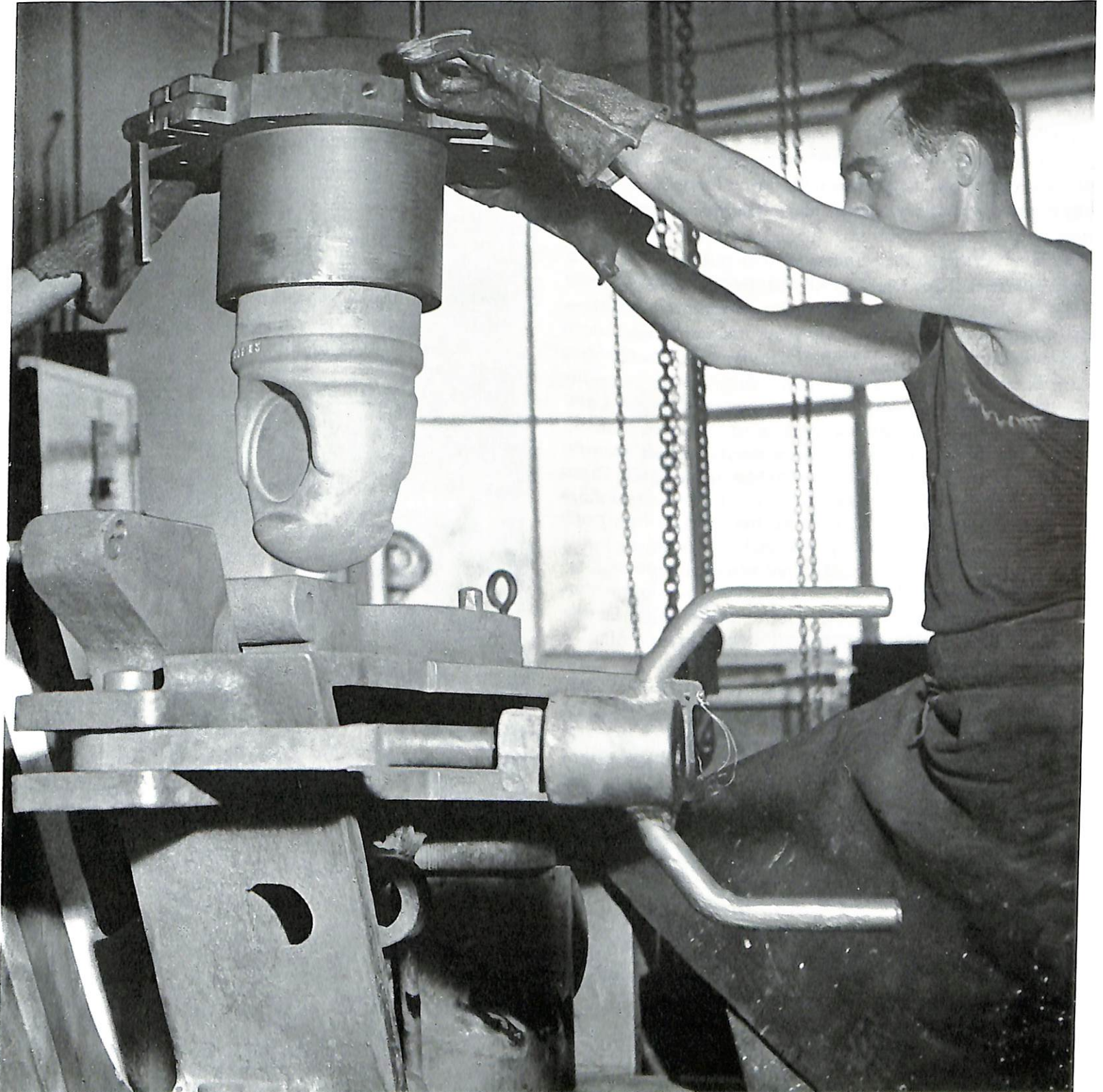
verwendet. Sie blieben auch dann noch vorherrschend, als sich im schnellaufenden Fahrzeugmotor der Leichtmetallkolben schon weitgehend durchgesetzt hatte. Dies liegt darin begründet, daß bei den niedrigen Drehzahlen des Diesels ein hohes Kolbengewicht nicht besonders störte und außerdem gute und betriebssichere Kolbenkühlungssysteme untergebracht werden konnten, womit sich die geringe Wärmeleitfähigkeit der Eisenwerkstoffe überwinden ließ. Bei den großen teuren Maschineneinheiten konnte man sich zudem das Risiko unsicherer Experimente nicht leisten. So vollzog sich auch die Entwicklung des Leichtmetall-Großkolbens, als sie zu Beginn der zwanziger Jahre doch aufgegriffen wurde, verhältnismäßig langsam und unter sehr vorsichtiger Erprobung.

Ging es bei dieser Entwicklung auch anfangs nur darum, wenigstens die Ebenbürtigkeit des Leichtmetallkolbens zu beweisen, so ergab sich doch bald, daß das niedrige Gewicht und die gute Wärmeleitfähigkeit derartige Vorteile brachten, daß dadurch eine beachtliche Weiterentwicklung im Großmotorenbau überhaupt erst möglich wurde. Die genannten besonderen Vorzüge mußten um so vorteilhafter in Erscheinung treten, je größer die den Maschinen abverlangten spezifischen Leistungen wurden:

1. Die Reduzierung des Kolbengewichts auf etwa die Hälfte ergab für sämtliche Triebwerksteile einschließlich der Lager eine erhebliche Entlastung und ließ eine Steigerung der Drehzahlen, das heißt eine Senkung des Leistungsgewichts zu. Für die großen beweglichen Motoren, bei denen sich allein die Gewichtsverminderung als wirtschaftlicher Vorteil bemerkbar machte, war dies natürlich besonders willkommen.
2. Die wesentlich bessere Wärmeleitfähigkeit brachte eine merkliche Senkung der Kolbentemperaturen, vor allem in der Bodenzone, und ermöglichte somit eine Erhöhung der Mitteldrücke. Selbst unter den verschärften Bedingungen des Aufladebetriebs konnte man in vielen Fällen ohne besondere Zwangskühlung des Kolbens auskommen und somit gegenüber dem Eisenkolben eine beträchtliche Vereinfachung des Aufbaus und der Wartung erzielen.

Es ist mehr als eine historische Erinnerung, wenn an

137 Zusammenbau einer Großkolbenkille



dieser Stelle darauf hingewiesen werden kann, daß schon im Jahre 1921, also kurz nach Gründung der heutigen MAHLE Komm.-Ges., dort die ersten Leichtmetallgroßkolben in Deutschland hergestellt wurden.

### Ausführung

Die wenig wechselnden Betriebsbedingungen bei stationären Anlagen, Schiffsantrieben, Triebwagen- und Lokomotivmotoren sind günstige Voraussetzungen für den einfachen, robusten, ungeschlitzten Vollschafkolben, der deshalb auch zur Normalart im Großkolbenbau wurde. Die Boden- und Ringzone ist sehr kräftig ausgeführt, um gegenüber den Verbrennungsdrücken genügend fest und steif zu sein und dem entsprechend großen Wärmefluß einen ausreichenden Querschnitt zu bieten.

Da bei Großmotoren mit langen, gleichmäßigen Lastperioden gefahren werden muß, wird der oberste Ring in jedem Fall so weit heruntergelegt, daß er in eine Zone mäßiger Temperatur (möglichst unter 200 °C) zu liegen kommt. Man bleibt damit in einem Gebiet, in dem die Warmfestigkeit des Kolbenwerkstoffes noch keinen unzulässigen Abfall erfährt, wodurch sich die Gefahr des Nutenausschlags vermeiden läßt. Außerdem tritt in diesem Temperaturbereich noch keine Verkockung des Schmieröls und damit auch keine Beeinträchtigung der Ringbeweglichkeit ein.

Bei der Bolzenlagerung lehnte man sich zunächst an die beim Graugußkolben bewährten Konstruktionen an, das heißt die Bolzen wurden mit einem erzwungenen Festsitz in den Bolzenlöchern untergebracht, die dabei meist eine Stahlbüchsenarmierung erhielten. Diese Bauweise wurde aber den besonderen Eigenschaften der Leichtmetallkolben nicht gerecht (unterschiedlicher Ausdehnungsbeiwert gegenüber dem Bolzen) und daher bald zugunsten der einfacheren und technisch besseren »schwimmenden« Bolzenlagerung unmittelbar im Kolbenwerkstoff verlassen.

Bei der Bearbeitung von Großkolben werden natürlich die gleichen Fertigungsmittel und -verfahren angewendet, die sich allgemein im Kolbenbau gut bewährt haben. Die geometrische Form des Schaftes und der Ringzone wird sorgfältig der Temperatur- und Spannungsverteilung des betriebswarmen Kolbens angepaßt, wobei sich jede beliebige Formkombination aufbringen läßt.

138 Vollschafkolben geschmiedet für Daimler-Benz-Diesel  
175 mm  $\phi$   
Schaft grafitiert



139 Vollschafkolben geschmiedet mit Kühlkanal für MAN Diesel hochaufgeladen  
265 mm  $\phi$



140 Ringträgerkolben mit eingegossener Kühlschlange für MAN Diesel 400 mm  $\phi$



## Gekühlte Kolben

Im Viertaktmotor findet in der Regel der einteilige Tauchkolben, der ja im Grunde eine Kombination von Kreuzkopf und eigentlichem Kolben darstellt, Verwendung. In vielen Fällen kommt man ohne besondere Kolbenkühlung zurecht. Im Zweitaktmotor ergibt sich infolge der verschiedenen möglichen Bauarten eine weit größere Vielfalt von Kolbenkonstruktionen. Die Wärmebelastung eines Kolbens wächst mit dem Kolbendurchmesser, dem Mitteldruck und der Drehzahl des Motors. Der Einfluß des Kolbendurchmessers beruht dabei auf dem Umstand, daß bei geometrisch ähnlicher Vergrößerung die Oberfläche des Brennraumes mit der zweiten Potenz, das Volumen aber – und bei richtiger Ausnützung auch der Wärmehalt desselben – mit der dritten Potenz des Durchmessers ansteigen. Jede Einheit der Brennraum-Oberfläche muß also pro Zeiteinheit eine größere Wärmemenge aufnehmen und ableiten.

Eine anschauliche Kennzahl für die vom Kolben zu tragende Gesamtbeanspruchung ist die spezifische Kolbenflächenleistung, das ist die je  $\text{cm}^2$  projizierte Kolbenbodenfläche erzeugte Motorleistung in PS. Sie ist ein Maß für die im Motor durchgesetzte Energiemenge und gestattet damit in guter Näherung einen Vergleich der in den verschiedenen Motortypen herrschenden Kolbenbeanspruchung. Da in dieser Kennzahl Mitteldruck und Drehzahl gleichwertig behandelt werden, d. h. es gleichgültig ist, ob eine bestimmte Zylinderleistung durch hohen Mitteldruck oder große Drehzahl erzeugt wird, läßt sich der Vergleich auf einen breiten Bereich von Motorgrößen und -bauarten anwenden. Aus einer Übersicht über die erreichten spezifischen Kolbenflächenleistungen, abhängig vom Zylinderdurchmesser, lassen sich die folgenden Entwicklungsrichtungen ableiten:

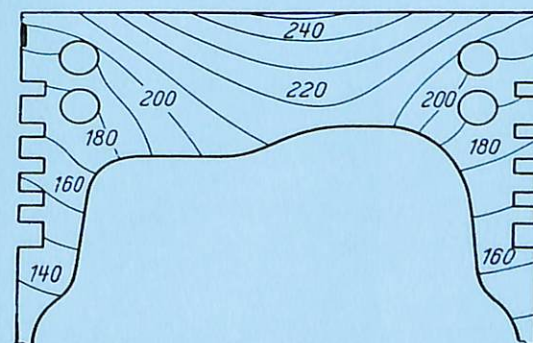
1. Mit steigendem Zylinderdurchmesser nehmen die ohne Sondermaßnahmen erreichbaren spezifischen Kolbenflächenleistungen ab. Dies ist verständlich, da – wie bereits erwähnt – das Verhältnis von Oberfläche zu Inhalt des Brennraumes ungünstiger wird und sich zudem bei größeren Motoren keine so hohen mittleren Kolbengeschwindigkeiten erzielen lassen.
2. Durch zusätzliche Kühlung der Kolben läßt sich die erreichbare spezifische Kolbenflächenleistung steigern. Bei zu hoher Gesamtbeanspruchung treten vor allem zwei Gefahrenschwerpunkte auf:

Die höheren Gasdrücke bewirken Spannungen in den tragenden Kolbenquerschnitten, denen wegen der gleichfalls gestiegenen Betriebstemperatur eine geringere Werkstoff-Festigkeit gegenübersteht. Die Gefahr von Anrissen oder Brüchen ist daher größer. Die gesteigerten Temperaturen führen im Bereich des obersten Verdichtungsringes unter Umständen zu erhöhtem Nutenverschleiß, verstärkter Verkokungsneigung des Schmieröls und der Gefahr des Ringklemmens (Bild 141).

Wie der Kühlraum anzuordnen ist, hängt davon ab, ob in erster Linie die Festigkeit des Kolbenbodens erhöht oder thermisch entlastet werden soll.

Bei Tauchkolbenmotoren wird das Motorschmieröl als Kühlmittel benutzt. Die Zuführung kann bei fast allen Anordnungen entweder über das durchbohrte Pleuel geschehen, oder das Öl wird unter Umgehung desselben über am Gehäuse befestigte Rohre dem Kolben zugeführt oder im offenen Strahl eingespritzt. Über die günstigste Ausnützung des Kühllöls im Kolben-Kühlkreislauf sind auf dem MAHLE-Prüffeld eingehende Untersuchungen durchgeführt worden. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse kommen der laufenden Verbesserung der Kolbenkonstruktion zugute. So wurden, um nur einige Beispiele zu nennen:

der Einfluß der in der Zeiteinheit durch den Kolben durchgesetzten Kühllölmenge ermittelt und festgestellt, daß die Kühlwirkung dieser nicht proportional ist, sondern spezifisch nachläßt;



141 Isothermen bei einem gekühlten Vollschafftkolben (Kalorimeterversuch)



145 Kolbenunterteil geschmiedet mit aufgeschraubtem Stahlboden für Maybach-Diesel, 185 mm  $\phi$

die Kühlung geschmiedeter Kolben (Bild 142) entwickelt und dabei die günstigen Festigkeitseigenschaften des gepreßten Werkstoffes für Hochleistungsmotoren erschlossen;

bei Kühlschlankenkolben (Bild 143) der Einfluß des Schlangenwerkstoffes auf den Wärmedurchgang untersucht, woraus sich wertvolle Erkenntnisse ergaben. Die konstruktive Ausbildung der Kolbenkühlung hat sich hinsichtlich des Aufwandes ganz nach den jeweiligen Erfordernissen zu richten. Die bisher zu Bedeutung gelangten Ausführungen lassen sich (in der Reihenfolge ihrer Wirksamkeit) in folgende Gruppen einteilen:

1. Anspritzen der Kolbenboden-Innenform
2. Sogenannte »Cocktail-Shaker«-Kühlung (Bild 144)
3. Eingießen von Kühlschlangen bei gegossenen Kolben (Bild 143).
4. Einstecken eines kreisförmigen, durch Schweißung verschlossenen Kühlkanals bei geschmiedeten Kolben
5. Geteilter Kolbenkörper mit Trennebene unter dem Kolbenboden, sogenannter »gebauter Kolben« (Bild 145).

Bei allen diesen Kolben sind die Voraussetzungen für die Anordnung einer wirksamen Kühlung besonders günstig. Durch die größere Freiheit in der Gestaltung des Kühlraumes kann das Kühlöl den besonders zu kühlenden Bereichen des Kolbenbodens bzw. der Ringzone leichter als bei anderen Bauarten zugeführt werden.

Der »gebauter« Kolben hat gegenüber den vorerwähnten Bauarten noch den weiteren sehr wesentlichen

Vorteil, daß man bei Beibehaltung des gegossenen oder geschmiedeten Leichtmetall-Kolbenschaftes freie Wahl beim Kolbenbodenwerkstoff hat. Dafür kommen – um nur wenige zu nennen – Stahl, Gußeisen (z. B. Kugelgraphit-Gußeisen), Al-Legierungen, Titan und Sinter-Al-Legierungen in Betracht.

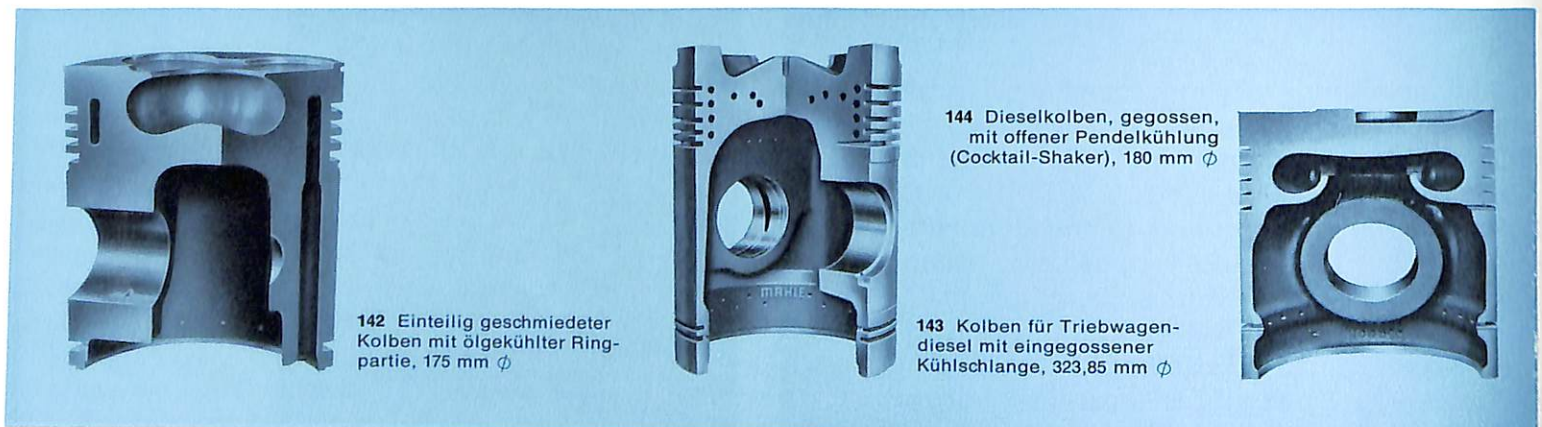
Bei der Konstruktion des gebauten Kolbens erfordert die Schraubenverbindung von Boden und Schaft besondere Aufmerksamkeit. Zu den Forderungen, die dabei erfüllt werden müssen, zählen vor allem folgende: Sichere Verbindung: erprobte Dehnschraubenverbindungen sind der statischen und dynamischen Beanspruchung zuverlässig gewachsen.

Sichere Abstützung der Bodenplatte auf dem Kolbenkörper: die Auflageflächen zwischen den beiden Teilen müssen ausreichend groß sein, um eine haltbare Abstützung über die ganze Lebensdauer des Kolbens zu gewährleisten.

Öldichtheit: der von Bodenplatte und Kolbenkörper gebildete Ölraum muß dicht abgeschlossen werden, was vor allem durch gleichmäßige Pressung an den Auflageflächen und eine dementsprechend große Zahl von Verbindungsschrauben zu erreichen ist.

Geringes Gewicht: alle hier genannten Forderungen sollen mit geringstmöglichem Gewichts Aufwand erfüllt werden.

Selbst diese unvollständige Aufzählung der Anforderungen macht schon deutlich, daß der gestaltende Konstrukteur vor schwierigsten Aufgaben gestellt ist, die nur bei sorgfältiger Einfühlung in jeden Anwendungsfall optimal gelöst werden können.



142 Einteilig geschmiedeter Kolben mit ölgekühlter Ringpartie, 175 mm  $\phi$

144 Dieselkolben, gegossen, mit offener Pendelkühlung (Cocktail-Shaker), 180 mm  $\phi$

143 Kolben für Triebwagen-diesel mit eingegossener Kühlschlange, 323,85 mm  $\phi$



146 Aus der technologischen  
Versuchsabteilung  
Kolben- und Ringprüfung





## Kolbenzubehör

Der Kolben wird erst nach Ausrüstung mit zweckentsprechenden Dichtringen und dem Bolzen zur funktionsfähigen Einheit. Die Fertigung dieser Zubehörteile liegt ebenso wie die des Kolbens bei Spezialfabriken, die sich in enger Fühlung mit der Kolben- und Motorenindustrie ständig um die Weiterentwicklung ihrer Produkte bemühen. Unerläßliche Voraussetzung sind dabei umfassende Erfahrung und Sicherheit in der Werkstoffbeherrschung, Ausnützung aller Möglichkeiten fortschrittlicher Fertigungstechnik und nicht zuletzt enger Kontakt mit der motortechnischen Entwicklung. Auch den Hilfsmitteln zur Bolzensicherung muß der Kolbenbauer seine Aufmerksamkeit schenken, und selbst die Pleuelbüchsen, die ja eigentlich nicht mehr zum Kolbenzubehör zu rechnen sind, beanspruchen sein Interesse, da sie bei unbefriedigendem Betriebsverhalten sehr wohl den Kolben selbst gefährden können.

### Kolbenringe

Die Hauptaufgabe der Kolbenringe besteht darin, den Verbrennungsraum beweglich gegen den Triebwerksraum abzudichten. Eine weitere wesentliche Funktion fällt den Ringen mit der Ableitung der Verbrennungswärme zu.

Die Abdichtungsaufgabe ist eine doppelte. Zunächst muß der Durchtritt der Verbrennungsgase vom Kompressionsraum zum Kurbelgehäuse verhindert werden, denn jedes Durchblasen mindert die Motorleistung und gefährdet Kolben und Ringe durch Überhitzung. Außerdem wird der Schmierzustand an der Zylinderwand gestört und schließlich noch das Schmieröl im Kurbelraum verdorben.

Die Abdichtung gegen Gasdurchtritt übernehmen hauptsächlich die Verdichtungsringe.

Nicht minder wichtig ist die Abdichtung gegen unzulässigen Öldurchtritt vom Kurbelgehäuse zum Verbrennungsraum. Diese Aufgabe wird dadurch erschwert, daß der Zylinder und auch alle Ringe mit einer möglichst knappen, aber doch für alle Betriebszustände ausreichenden Schmierölmenge versorgt werden müssen. Im wesentlichen besorgen dies die Ölabbstreifringe, die allerdings dabei noch von den übrigen Ringen mehr oder weniger unterstützt werden, besonders dann, wenn diese demgemäß gestaltet sind, zum Beispiel als Nasenringe. Selbstverständlich müs-

sen Kolben und Ringe in den entsprechenden Details sorgfältig aufeinander abgestimmt sein, um den erstrebten Gesamteffekt zu erzielen. Darüber hinaus besteht noch die Möglichkeit, die Ölabbstreifwirkung durch den Kolben selbst, z. B. durch eine geeignete Ausbildung der Schaftunterkante, zu regulieren.

Sehr bedeutsam ist auch die Rolle, die den Ringen bei der Ableitung der Wärme zufällt. Bekanntlich wird im Motor nur ein verhältnismäßig kleiner Anteil der vom Kraftstoff zugeführten Energie in nutzbringende mechanische Arbeit umgesetzt. Der größere Teil muß als fühlbare Wärme durch Kühlung abgeleitet werden, um Wärmestauungen, das heißt örtliche Überhitzungen auszuschließen. Die vom Kolben aufgenommene Wärmemenge wird zu einem großen Teil über die Ringe an die Zylinderwand abgeführt.

Aus allen diesen Aufgaben ergeben sich für die Entwicklung der Kolbenringe zahlreiche Einzelprobleme, die nur durch Ausschöpfung aller konstruktiven, stofflichen und fertigungstechnischen Möglichkeiten befriedigend zu lösen sind.

### Konstruktion


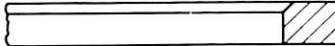


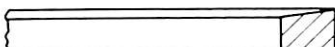
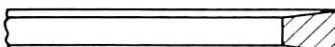



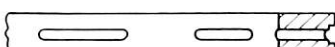
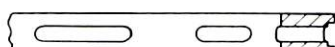



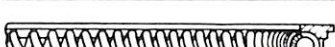

Aus der fast unübersehbaren Fülle von Ringbauarten, die im Laufe der Entwicklung vorgeschlagen wurden, haben sich nur einige wenige, verhältnismäßig einfache Bauformen durchgesetzt. Dies gilt sowohl für die Querschnittsgestaltung wie für die Ausbildung des Ringstoßes. Verdichtungsringe haben meist einen rechteckigen Querschnitt. Neben der einfachsten Form mit zylindrischer Lauffläche sind noch einige Varianten im Gebrauch. Sie sollen beispielsweise dafür dienen, das Einlaufen zu beschleunigen. Dazu gehören die Minutenringe und die Innenfasenringe. Sie werden bevorzugt in der obersten Nut verwendet und müssen selbstverständlich in der richtigen Lage eingebaut werden. Die dem Kolbenboden zugekehrte Flanke wird deshalb mit »Top« gekennzeichnet. Andere Sonderformen wurden für Ringe entwickelt, die neben der Dichtwirkung gegen Gasdurchtritt auch noch eine ausgeprägte Ölabbstreifwirkung haben sollen, z. B. Nasenringe. Wieder andere Bauformen sollen vor allem ein Festwerden in den Nuten verhindern, z. B. Trapezringe.

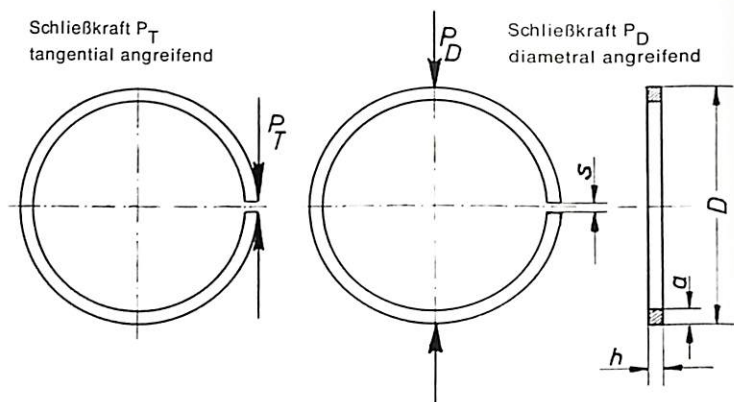
Als Ölabbstreifringe werden vorwiegend Ringe verwendet, die in der Mitte ihrer zylindrischen Gleitfläche eine umlaufende Rille tragen, von welcher das überschüs-

## Kolbenringformen

## Kurz- zeichen

## Einbauvorschrift

	Rechteckring (Kompressionsring)	<b>R</b>	Kann in beiden Richtungen eingebaut werden
	Rechteckring mit Innenfase (Innenfasenring)	<b>IF</b>	Die Fase liegt in Richtung Kolbenboden
	Minutenring	<b>M</b>	Die mit »TOP« bezeichnete Ringflanke liegt in Richtung Kolbenboden
	Schwachminutenring	<b>SM</b>	Die mit »TOP 2« bezeichnete Ringflanke liegt in Richtung Kolbenboden
	Trapezring (einseitig)	<b>Tr</b>	Die konische Ringflanke liegt in Richtung Kolbenboden
	Trapezring (doppelseitig)	<b>Tr</b>	Kann in beiden Richtungen eingebaut werden
	Lamellenringe	<b>La</b>	Oberster Ring muß mit der hohlen Seite nach unten und unterster Ring mit der hohlen Seite nach oben montiert werden
	Nasenring	<b>N</b>	Der ausgedrehte Winkel liegt in Richtung offenes Schaftende
	Nasenring mit Expander	<b>N/Exp.</b>	Der ausgedrehte Winkel liegt in Richtung offenes Schaftende
	Ölschlitzring (normal)	<b>O</b>	Kann in beiden Richtungen eingebaut werden
	Ölbreitschlitzring	<b>BS</b>	Kann in beiden Richtungen eingebaut werden
	Gleichfasen-Ölschlitzring	<b>GF</b>	Die Fasen und das Topzeichen liegen in Richtung Kolbenboden
	Dachfasen-Ölschlitzring	<b>DF</b>	Kann in beiden Richtungen eingebaut werden
	Ölring mit Expander	<b>O/Exp.</b>	Ölringe mit Expander gibt es in den Ausführungen Normal, BS, GF und DF
	Schlauchfeder- Ölschlitzring	<b>S</b>	Schlauchfeder-Ölschlitzringe gibt es in Ausführungen Normal, BS, GF und DF. Bei BF liegen Fasen u. Topzeichen in Richtung Kolbenboden
	Ölring, Lamellen mit Expander		Kann in beiden Richtungen eingebaut werden



149 Die einfach zu messende Schließkraft und die Maßverhältnisse des Rings bilden die Grundlage für die Ermittlung des mittleren spezifischen Anpreßdrucks

sige Öl über gefräste Schlitze oder Bohrungen zum Nutengrund und dort durch entsprechende Rückführöffnungen zum Kolbeninnern geleitet wird. Die Abstreifwirkung dieser Ringe kann durch besondere Gestaltung der Laufstege verschärft werden. Die Kolbenringe sind fast ausnahmslos selbstspannende Biegefedern, das heißt so gestaltet, daß sie im spannungslosen Ausgangszustand eine vom Nenndurchmesser abweichende Form haben und die Stoßenden um ein bestimmtes Maß – Maulweite oder Spreizöffnung genannt – auseinanderklaffen. Zum Einbau ist dann eine elastische Formveränderung erforderlich, wobei die erwünschte Federkraft und somit ein bestimmter Anpreßdruck gegen die Zylinderwand hervorgerufen wird. Dieser vom Ring selbst aufgebraachte Anpreßdruck wird im Betrieb durch den Einfluß der hinter die Ringe tretenden Gase erheblich, zeitweilig sogar um ein Vielfaches verstärkt. Er ist – meist absichtlich – nicht gleichmäßig über den ganzen Ringumfang verteilt. Man nimmt jedoch vielfach eine gleichmäßige Verteilung an, und der davon ausgehende Begriff des mittleren spezifischen Anpreßdrucks spielt bei der Bewertung eines Rings und als Ausgangspunkt für die Dimensionierung eine wichtige Rolle. Er wird errechnet aus der Kraft, die erforderlich ist, um die Stoß-

öffnung bis auf das vorgeschriebene Einbaustoßspiel zu schließen. In der Regel wird die tangential an den Stoßenden angreifende Schließkraft  $P_T$  gemessen, zuweilen auch die diametrale Schließkraft  $P_D$  (häufig in USA, siehe Bild 149). Die beiden Größen sind durch folgende Beziehung verknüpft:

$$P_D = 2,63 P_T$$

$$\text{bzw. } P_T = 0,38 P_D$$

Zwischen dem mittleren spezifischen Anpreßdruck und der tangentialen Schließkraft besteht folgender Zusammenhang:

$$p = \frac{2 P_T}{D \cdot h}$$

- $p$  = mittl. spezifischer Anpreßdruck in  $\text{kp/cm}^2$
- $P_T$  = tangentiale Schließkraft in  $\text{kp}$
- $D$  = Nenndurchmesser in  $\text{cm}$
- $h$  = axiale Ringhöhe in  $\text{cm}$

Die Größe der vom Ring zu erwartenden Federkraft ist bestimmt durch die geometrische Gestalt und durch die für das elastische Verhalten maßgebende Werkstoffeigenschaft, den Elastizitätsmodul. Aber nicht nur die Federkraft (»Spannung«) als solche, sondern mehr noch der mittlere spezifische Anpreßdruck der Kolbenringe ist von Bedeutung. Sein Zusammenhang mit den genannten Größen ist durch folgende Gleichung gegeben:

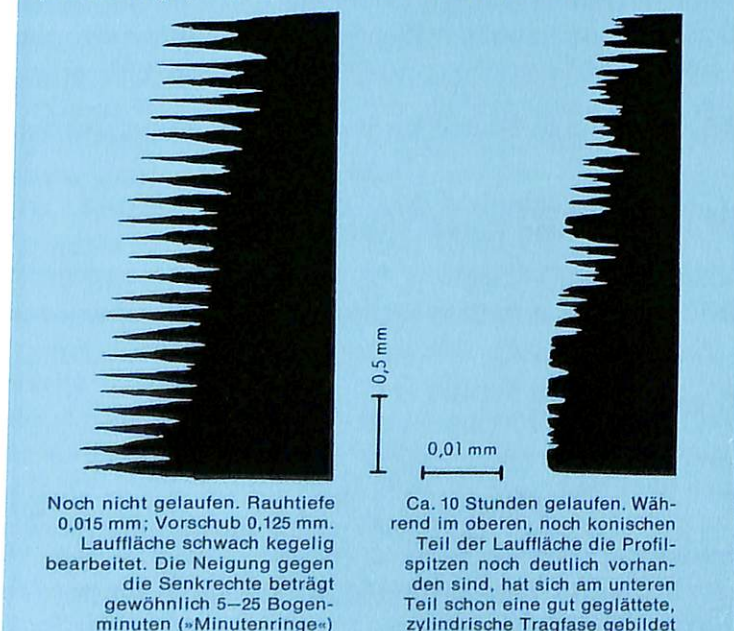
$$p = \frac{m}{D} \cdot \frac{E}{7,07 \cdot \left(\frac{D}{a} - 1\right)^3}$$

- $p$  = mittl. spezifischer Anpreßdruck in  $\text{kp/cm}^2$
- $m$  = Maulweite in  $\text{cm}$
- $D$  = Nenndurchmesser in  $\text{cm}$
- $a$  = radiale Wandstärke in  $\text{cm}$
- $E$  = Elastizitätsmodul in  $\text{kp/cm}^2$

Die Gleichung zeigt sofort, daß die spezifische Pressung außer vom E-Modul nur von dem Verhältnis Maulweite : Durchmesser, Spreizung genannt, und von dem Wandstärkenverhältnis  $D : a$  abhängt, also nicht von der axialen Höhe.

Da nun die Forderung besteht, daß der Ring sowohl beim Überstreifen wie auch beim Zusammendrücken

148 Laufflächenprofile von Kolbenringen mit schwach konischer Lauffläche (»Minutenringe«). Profilschnittaufnahme nach Leitz-Förster



Noch nicht gelaufen. Rauhtiefe 0,015 mm; Vorschub 0,125 mm. Lauffläche schwach kegelig bearbeitet. Die Neigung gegen die Senkrechte beträgt gewöhnlich 5–25 Bogenminuten (»Minutenringe«)

Ca. 10 Stunden gelaufen. Während im oberen, noch konischen Teil der Lauffläche die Profilspitzen noch deutlich vorhanden sind, hat sich am unteren Teil schon eine gut geglättete, zylindrische Tragfase gebildet

auf Nennmaß auf keinen Fall nennenswert bleibend verformt werden oder gar zu Bruch gehen darf, so ergeben sich für die Dimensionierung folgende Einschränkungen:

1. Die Spreizung darf weder zu klein, also unzureichend, noch zu groß sein, da sonst die Gefahr einer unzulässigen Verformung oder gar Bruchgefahr entsteht. Praktisch muß die Maulweite etwa zwischen 10 bis 15 % des Durchmessers betragen.

2. Auch die radiale Wandstärke darf einen bestimmten Bruchteil des Durchmessers nicht überschreiten. Dieses Verhältnis  $D : a$  ist ebenfalls ein sehr wichtiger Begriff bei der Dimensionierung und Normung von Kolbenringen.

Die früheren deutschen Normen für Kolbenringe (DIN 73 102 bis 73 105) sahen zwei Gruppen vor: Normalspannungsringe und Hochspannungsringe. Die Entwicklung ist inzwischen erneut in Fluß gekommen, und

zwar in Richtung höherer Anpreßdrücke und – bei Verdichtungsringen – geringerer axialer Höhe. Der gesteigerte spezifische Anpreßdruck ist vor allem deshalb nötig, weil bei höheren Drehzahlen die Zeit zur Bildung eines wirksamen Gasdrucks hinter den Ringen kürzer wird und die im Ölfilm entstehenden dynamischen Kräfte, die den Ring von der Zylinderwand abzuheben trachten, mit der Gleitgeschwindigkeit wachsen. Ringe mit höherem Anpreßdruck bleiben auch über längere Laufzeit wirksam, weil der Spannungsverlust durch Verschleiß von einem hohen Anfangswert ausgeht und somit eine größere Restspannung übrig läßt als bei schwach gespannten Ringen. Die heute gültigen Abmessungen der Kolbenringe zwischen 18 und 1000 mm Nenndurchmesser sind in den DIN-Blättern 24 909 bis 24 948 festgelegt (siehe untenstehende Tabelle).

Bei Ölschlitzringen läßt sich der höhere Anpreßdruck außer durch die Wandstärkenerhöhung auch durch schmalere Laufstege erzielen.

#### Übersicht über die radialen Wandstärken und spezifischen Anpreßdrücke bei Verdichtungsringen

	Durchmesserbereich	Wandstärkenverhältnis $D : a$	mittl. spez. Anpreßdruck $\text{kp/cm}^2$
Frühere deutsche Norm DIN 73 102 FI normalgespannte Ringe hochgespannte Ringe	30–150 50–130	ca. 25 21,8–24	1,2–1,0 2,3–1,3
Neue deutsche Normen 24 910 (Rechteckringe) 24 911 (Minutenringe) 24 930 (Nasenringe) 24 913 (eins. Trapezringe) 24 914 (doppels. Trapezringe) 24 915 (Schwachminutenringe) 24 919 (Rechteckring mit geringem Anpreßdruck)	} 30–200 70–200 82–200 50–200 30–150	} 21,4–26 nicht stetig zunehmend 25–26	} 2,5–1,0 1,2–1,0
Britische Norm	2"–6"	24,0–26,1	1,5–1,1
Amerikanische Norm SAE J 611 normale Wandstärke	1"–8"	21,5–26,5 nicht stetig zunehmend	(2,0–1,0) <sup>1)</sup>
dicke Wandstärke	3"–5"	20 gleichbleibend	(~ 25) <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Die Tangentialkraft (kp) ist in den amerikanischen Normen nicht festgelegt. Der Anpreßdruck wurde daher unter Annahme eines mittleren E-Moduls von 10 000  $\text{kp/mm}^2$  und einer Spreizung von 12 % errechnet.

In wachsendem Ausmaß wird die Ringeigenspannung durch Stahlfedern erhöht, die im Ringrücken angeordnet sind. Es sind in den letzten Jahren eine ganze Reihe von Ausführungsformen bekannt geworden, die sich wie in untenstehender Tabelle gruppieren lassen. Die axiale Ringhöhe hat sich bei Personwagenmotoren in laufender Entwicklung von 3–3,5 mm auf 2–2,5 mm verringert. Der axial niedrige Ring hat einige Vorzüge, die ihn für den schnellaufenden Motor besonders geeignet machen:

Das geringe Gewicht, also die kleinere Massenwirkung, verringert die Gefahr des Ausschlagens der Ringnuten. Die Massenkraft hat außerdem bei der Kolbenbewegung zum und vom oberen Totpunkt das Bestreben, den Ring von der unteren Nutenflanke abzuheben. Dieser Kraft steht jedoch die Gaskraft entgegen, die den Ring auf die untere Flanke drückt. Solange dies der Fall ist, kann verdichtetes Gas durch den Spalt zwischen oberer Ring- und Nutenflanke auf die Ringrückseite gelangen und so die Ringeigenspannung unterstützen. Wird nun bei höheren Drehzahlen die Ringmassenkraft größer als die Gaskraft zuzüglich Reibung, so wird der Ring von der unteren Flanke abgehoben und damit der erwünschte Gasdurchtritt

hinter den Ring abgedrosselt. Dadurch wird der Ring unter Umständen auch von der Zylinderwand abgehoben und verliert somit gerade im wichtigsten Zeitpunkt des ganzen Arbeitsspiels seine Dichtwirkung, was sich in verstärktem Durchblasen und erhöhtem Ölverbrauch bemerkbar macht. Durch Verwendung leichter Ringe läßt sich das Überwiegen der Massenkraft über die Gas- und Reibungskraft (also das Abheben) zu wesentlich höheren Drehzahlen verschieben<sup>1)</sup>. Axial niedrige Ringe laufen außerdem schneller ein, neigen weniger zum Fressen und erlauben durch ihren kleineren Platzbedarf und ihr niedriges Gewicht leichtere Kolbenkonstruktionen.

#### Werkstoffe






Aus den Aufgaben, die der Kolbenring im Motor zu erfüllen hat, ergeben sich folgende Anforderungen an den Ringwerkstoff:

a) Gute Laufeigenschaften:

Die Ringe sollen rasch und doch schonend einlaufen. Der unvermeidliche Verschleiß soll an den Ringen und

<sup>1)</sup> P. de K. Dykes, Piston Ring Movement during Blow-by in High Speed Petrol Engines (The Institution of Mechanical Engineers, Automobile Division, – 9 – Proceedings 1947–48, Part II).

#### Kolbenring-Spezialausführungen

Grundring	Federart	Abstützung im Nutengrund	Beispiel
Graugußring	Expander Blattfeder	ja	
	Schlauch- (Schrauben-)feder	nein	
Stahllamellen	Expander	ja	
	Gliederfeder	nein	
ohne	Gliederfeder auf Zylinderwand gleitend	nein	

am Zylinder nach dem Einlaufen nur sehr langsam fortschreiten. Unerwünscht sind auch plastische Verformungen an den Rändern (Bartbildung). Der Ring soll gute Notlaufeigenschaften aufweisen, das heißt, er soll auch bei schlechter oder zeitweilig ausbleibender Schmierung noch freßsicher laufen. Der Reibungsbeiwert soll möglichst niedrig sein, um die dadurch bedingten Leistungsverluste klein zu halten.

b) Gute Elastizität und Festigkeit:

Als selbstspannende Feder braucht der Ring eine gute Elastizität über einen möglichst großen Bereich. Die Streckgrenze soll hoch liegen, damit bei den in Frage kommenden Dehnungen keine nennenswerten bleibenden Formänderungen entstehen. Die Biegefestigkeit muß ausreichen, um alle Beanspruchungen beim Überstreifen und beim Zusammendrücken zu bewältigen.

c) Wärmeunempfindlichkeit:

Für einen Kolbenring ist sehr wichtig, daß die genannten Eigenschaften, insbesondere die Federspannung auch unter Einwirkung von höheren Temperaturen über lange Betriebszeiten erhalten bleiben.

d) Gute Verarbeitbarkeit:

Kolbenringe müssen sich als ausgesprochene Massen- und Verschleißteile wirtschaftlich herstellen lassen, das heißt die Rohformung und die maschinelle Verarbeitung müssen auf einfache Weise erfolgen können. Diese Eigenschaften sind nun bei keinem Werkstoff in so hohem Maße vereinigt wie beim Gußeisen. Die Gleiteigenschaften und die Wärmebeständigkeit sind dabei so hervorstechend, daß die an sich gegenüber Stahl nicht besonders hohen Festigkeits- und elastischen Kennwerte in Kauf genommen werden.

Die guten Lauf- und Verschleißigenschaften sind durch die Art und Anordnung der Gefügekomponenten bedingt. Kennzeichnend für das Gußeisen ist der als Grafit ausgeschiedene und in der Grundmasse eingelagerte Kohlenstoff, der die Reibung herabsetzt und als Schmiermittel wirkt. Der Grafit soll vorwiegend in Form feiner Blättchen ausgeschieden sein. Sehr feiner Grafit erhöht zwar die Festigkeit, kann aber den Verschleißwiderstand herabsetzen, wenn gleichzeitig nennenswerte Mengen von Ferrit vorliegen.

Die Grundmasse soll möglichst aus Perlit oder Sorbit bestehen.

Das Phosphideutektikum ist ein harter Gefügebestand-

teil, der in den meisten Gußeisensorten enthalten ist. Es soll bei Kolbenringen die Grundmasse in Form eines geschlossenen engmaschigen Netzes durchsetzen, das ein verschleißfestes Tragskelett bildet.

Die Härte eines solchen hochwertigen Kolbenringgußeisens liegt meist im Bereich von 99–105 Rockwell-B-Einheiten (entspricht etwa 230–280 Brinell-Einheiten). Die Härte allein ist allerdings noch kein Gütemaßstab und die Bewertung der Verschleiß- und Laufeigenschaften eines Ringwerkstoffs kann eigentlich nur unter Einbeziehung des Gegenwerkstoffs erfolgen.

Normale Kolbenringe (aus Einzelguß) haben einen Elastizitätsmodul von 9000–11 000 kp/mm<sup>2</sup>. Durch besondere Schmelz- und Gießmethoden sowie durch Legierungszusätze und Wärmebehandlung lassen sich auch Werte von 12 000–13 000 kp/mm<sup>2</sup> erzielen. Die Biegefestigkeit erreicht normal 40 bis 45 kp/mm<sup>2</sup> und kann für Sonderzwecke (bei Sonderwerkstoffen) auf über 50 kp/mm<sup>2</sup> gesteigert werden. Harte Ringe (Tabelle Seite 28) können in Sonderfällen in Bezug auf Zylinderverschleiß Vorteile bringen. Die Beanspruchung beim Überstreifen der Ringe über den Kolben und im Betrieb soll 75 % der Biegefestigkeit nicht überschreiten.

In neuerer Zeit scheint die Bruchfestigkeit des Gußeisen-Kolbenrings den gestiegenen Anforderungen im Hochleistungsmotor nicht mehr in jedem Fall gewachsen zu sein. Man ist deshalb mitunter gezwungen, auf Stahlringe überzugehen, wobei aus Gründen der Wärmestabilität nur hochwertige Stahlsorten in Betracht kommen. Auch der Verschleiß der Ringflanken in der Kolbennut scheint einen hochwertigen Stahl zu verlangen, während der Verschleiß an der eigentlichen Dichtfläche gegenüber der Zylinderwand durch die auch bei Gußeisenringen übliche Chromschicht in Grenzen gehalten wird.

Inwieweit Kolbenringe aus Kugelgrafit-Gußeisen sich angesichts der Anforderungen im neuzeitlichen Hochleistungsmotor durchsetzen können, ist derzeit noch nicht endgültig zu beurteilen.

### **Kolbenringherstellung**

Rohformgebung:

Kolbenringrohlinge für schnelllaufende Fahrzeugmotoren werden vorwiegend im Einzelgußverfahren gegossen oder – seltener – von geschleuderten Büchsen abgestochen.

Beim Einzelgußverfahren wird jeder Ringrohling als Einzelstück in Gruppen eingeformt und im »Stapelguß« abgegossen. Man erreicht damit eine gute, gleichmäßige Gefügeausbildung über den ganzen Querschnitt und geringe Zerspanung. Außerdem kann man damit dem Ringrohling schon die der Fertigform angenäherte Unrundform geben, die zum Ausschneiden erforderlich ist.

#### Spannungsgebung:

Kolbenringe üblicher Bauart mit gleichmäßiger Wandstärke müssen im spannungslosen Zustand eine von der Kreisform abweichende Gestalt aufweisen, damit sie sich im geschlossenen, gespannten Zustand überall genau und dicht an die Zylinderwand anlegen. Diese für den ungespannten Ring charakteristische Form kann durch verschiedene Verfahren erzeugt werden:

##### 1. Hämmern oder Walzen:

Durch örtliche Kaltverformung, das heißt durch eine ungleichmäßige Streckung der Innenseite des zunächst kreisrund bearbeiteten und geschlitzten Rings wird die Krümmung vergrößert, der Ring also aufgespreizt. Solche Ringe sind nicht besonders wärmebeständig. Für Hochleistungsmotoren haben sie praktisch keine Bedeutung mehr.

##### 2. Thermische Spannungsgebung:

Dieses Verfahren geht von kreisrunden Rohlingen aus, die zunächst kreisrund bearbeitet und dann aufgeschnitten werden. Dann werden die Ringe so weit aufgespreizt, daß die Stoßenden um die der Ringgröße entsprechende Maulweite auseinanderklaffen. In dieser Lage werden die Ringe paketweise in einer entsprechenden Spannvorrichtung festgehalten und in Salzbädern oder Luftumwälzöfen spannungsfrei geglüht. Temperatur und Behandlungsdauer werden dabei so gewählt, daß die Ringe ihre elastische Spannung verlieren, ohne daß dabei nennenswerte Gefügeänderungen vor sich gehen. Der Ring behält die ihm bei der Spreizung aufgezwungene Form nach der Abkühlung bei und setzt nunmehr dem Zusammenbiegen auf Nenndurchmesser die erwünschte Federkraft entgegen. Dabei nehmen die so behandelten Ringe die Kreisform an, die sich durch ein weiteres Überdrehen des zusammengespannten Rings noch verbessern läßt. Thermisch gespannte Ringe weisen unter normalen Beanspruchungen eine ausreichende Wärmebeständig-

keit auf. Bei höheren Belastungen und Temperaturen verlieren sie jedoch einen gewissen Teil ihrer Spannung.

Ringe nach 1. und 2. werden in Deutschland schon lange nicht mehr, im Ausland – besonders in England – nur noch in relativ geringen Mengen verwendet.

##### 3. Ringe mit »natürlicher« Spannung:

Die dem thermisch gespannten Ring eigene Wärmeempfindlichkeit läßt sich vermeiden oder doch merklich verringern, wenn man dem Rohling schon beim Guß in möglichst guter Annäherung jene Form gibt, die dem ungespannten fertigen Ring entspricht. Der natürliche, aus der Schmelze gewachsene Gefügebau ist gegenüber den im Betrieb auftretenden Temperatureinwirkungen wesentlich beständiger.

Von den verschiedenen möglichen Herstellungsverfahren hat sich nach verhältnismäßig kurzer Erprobungszeit das folgende durchgesetzt:

Die unrund gegossenen, in der Rohform schon weitgehend dem fertigen, spannungslosen Ring angepaßten Einzelgußrohlinge werden zunächst an den Flanken fertig geschliffen bzw. geläppt. Dann werden die Ringe in nicht aufgeschnittenem Zustand am Außendurchmesser nach einer vorher genau festgelegten Kurve auf die Form fertig überdreht, die man für den ungespannten Ring anstrebt. Erst dann wird ein der Maulweite entsprechendes Stück des Umfangs – und zwar immer an der Angußstelle – herausgeschnitten. Die Fertigbearbeitung des Innendurchmessers erfolgt entweder gleichzeitig mit dem Außendurchmesser an dem noch nicht aufgeschnittenen Ring oder aber erst dann, wenn der außen fertig bearbeitete Ring aufgeschnitten und auf die kreisrunde Form vom Nenndurchmesser zusammengespannt ist. Anschließend folgt noch ein Rundüberdrehen mit nur geringer Spanabnahme, damit die Ringe im Zylinder vollständig lichtspaltdicht sind.

Dieses Verfahren stellt zwar an Gießerei und Fertigung hohe Anforderungen, ergibt aber nach dem heutigen Stand der Technik die besten Kolbenringe. Die beim Einzelguß unvermeidlichen, durch die verschiedene Entfernung vom Anguß bedingten Unterschiede in der Gefügeausbildung haben bei unrund gegossenen und formgedrehten Ringen keinen Einfluß auf die Gleichmäßigkeit der einzelnen Ringe, da der Ausschnitt für

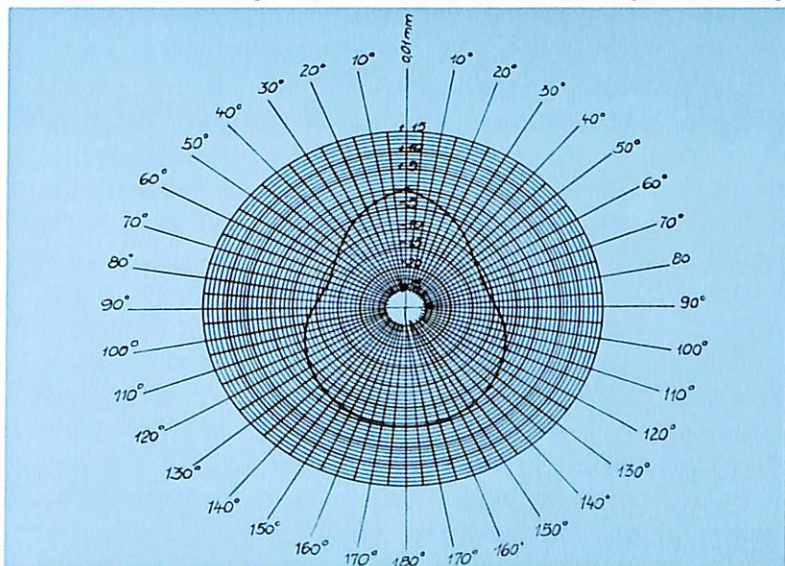


die Stoßöffnung immer an der gleichen Stelle, nämlich am Anlauf erfolgt und damit alle sonstigen Gefügeunterschiede symmetrisch zur Stoßrichtung liegen. Außerdem kann man bei diesem Verfahren die Bearbeitungskurve so festlegen, daß sich jede gewünschte Radialdruckverteilung ergibt.

#### Radialdruckverteilung:

Der ideale Zustand wäre zweifellos dann gegeben, wenn der Anpreßdruck eines Rings bei allen Betriebsbedingungen und über lange Laufzeiten auf dem ganzen Umfang gleich groß bliebe. Dies erscheint zunächst am sichersten gewährleistet, wenn die Radialdruckkurve bzw. die Form des in einem elastischen Band zusammengespannten Rings sich der Kreisform nähert. Die praktische Erfahrung zeigt jedoch, daß die Stoßenden der Kolbenringe im Motorbetrieb zum Abheben neigen und auch schneller verschleifen als der übrige Ringumfang. Deshalb wird bei hochwertigen Kolbenringen dafür gesorgt, daß der Anlagedruck in diesem und notwendigerweise auch in dem gegenüberliegenden Bereich etwas über dem Mittelwert liegt. Das bedeutet praktisch, daß der Durchmesser im Spannband über dem Stoß gemessen um 0,4–0,8% größer sein muß als senkrecht dazu. Selbstverständlich darf der Anpreßdruck an keiner Stelle des Umfangs auf Null absinken. Die Spannbandform eines solchen hochwertigen Rings ist birnenförmig (Bild 150).

150 Gute, »birnenförmige« Spannbandform eines hochwertigen Kolbenrings



#### Bearbeitung:

Die Kolbenringflanken müssen im Interesse einer guten Dichtwirkung von vornherein mit den entsprechenden Nutenflanken in möglichst satte Berührung kommen. Gute Formgenauigkeit ist daher ebenso wichtig wie hohe Oberflächengüte. Beide werden heute meist durch Feinschleifen oder Läppen erzielt. Damit können der Reibungswiderstand und der Verschleiß klein gehalten werden. Auch die Gefahr des Ringsteckens ist bei glatten Flanken kleiner, da sich die Ölkohle an solchen nicht so leicht ansetzen kann.

Für die Lauffläche gelten andere Gesichtspunkte. Hier würde eine allzu große Glätte die unerläßliche Anpassung an die Zylinderwand, den Einlaufvorgang, sehr erschweren. Die Ringlaufflächen werden daher nicht geschliffen, sondern mit Vorschüben zwischen 0,10 und 0,15, teilweise bis zu 0,30 mm feingedreht. Die Profilspitzen werden während des Einlaufens je nach dem örtlichen Anpreßdruck rasch abgetragen, so daß sich sehr bald eine allseitig dichte Anlage ergibt. Die in den letzten Jahren gewonnenen Erfahrungen zeigen immer deutlicher, daß störungsfreies Einlaufen der Kolbenringe auch eine bestimmte Mindestrauigkeit der Zylinderlauffläche verlangt. Die mit »Einlaufen« bezeichnete wechselseitige Anpassung der Gleitpartner ist überhaupt erst möglich, wenn beide Oberflächen einem begrenzten Abrieb unterliegen. Die in den sogenannten »Tälern« der Oberflächengebirge gespeicherte Ölreserve sorgt dafür, daß dieser Vorgang ohne »Makro«-Schädigung vonstatten geht und die abgeriebenen Verschleißpartikel fortgespült werden.

#### Gleitflächenbehandlung:

Das Einlaufverhalten läßt sich durch geeignete Schutzschichten verbessern. Dabei wird die Oberfläche des Ringwerkstoffs entweder chemisch verändert, oder mit einem Überzug aus einem geeigneten Stoff versehen. Solche Schutzschichten wirken derart, daß sie entweder die Ölhaltefähigkeit verbessern und beim Abrieb als schonend wirkendes Poliermittel fungieren oder an Stellen hoher örtlicher Drücke rasch abgerieben werden und so die Anpassung beschleunigen. Zuweilen wird durch den dabei entstehenden Laufspiegel der weitere Verschleißablauf verzögert.

Ein bekanntes Verfahren, bei dem die Oberfläche des Ringwerkstoffes selbst verändert wird, ist das »Ferr-



151 Querschnitt durch einen Kompressionsring mit verchromter Lauffläche (V = 50:1)

oxieren«. Dabei wird die Oberfläche des Ringgußeisens in eine harte, fest haftende, ca. 0,005 mm dicke Schicht aus magnetischem Eisenoxyd umgewandelt. Auf der Gleitfläche bildet sich bald ein verschleißfester Laufspiegel.

Verbreitet und bewährt sind auch verschiedene Verfahren zum Phosphatieren von Kolbenringen. Man erhält dabei verhältnismäßig weiche, selbstschmierende und gut ölhaltende Einlaufschichten. Auch die bei Kolben bekannten Laufflächenüberzüge aus Blei, Zinn, Kadmium und anderen niedrig schmelzenden Metallen sind bei Kolbenringen üblich und nützlich.

Ferner werden Kunstharzüberzüge zum Teil mit Zusätzen von Graphit oder Poliermitteln mit Erfolg verwendet.

Die meisten der erwähnten Schutzschichten dienen zugleich als wirksamer Korrosionsschutz für Transport und Lagerung.

Verchromte Kolbenringe:

Nicht alle Ringe eines Kolbens sind den gleichen Bedingungen unterworfen. Am schwierigsten sind die Verhältnisse beim obersten Ring. Er ist den Verbrennungsgasen unmittelbar ausgesetzt und muß in der Lage sein, hohen Drücken und Temperaturen unter erheblichen chemisch-korrosiven Einwirkungen standzuhalten. Zudem wird er am schlechtesten mit Schmieröl versorgt. Demzufolge ist der Verschleiß beim obersten Ring meist am größten und auch im Zylinder entsteht am oberen Umkehrpunkt des obersten Rings ein Verschleißmaximum. Mit der Einführung des hartverchromten Rings konnten hier wesentliche Verbesserungen erzielt werden. Überraschenderweise ergab sich während dieser Entwicklung, daß bei Verwendung eines verchromten Rings lediglich in der obersten Nut auch die darunterliegenden Ringe und der Zylinder selbst besser geschützt werden.

Galvanisch aufgebraachte Hartchromschichten auf Kolbenringen sind je nach Ringgröße und Ringtyp 0,06 bis 0,25 mm dick und haben meist eine Vickers-Härte von 800 bis 1100 kp/mm<sup>2</sup>. Die hohe Verschleißfestigkeit hat allerdings auch zur Folge, daß ein verchromter Ring nicht so rasch einlaufen kann wie ein unbewehrter Graugußring. Man kann demnach nur ein befriedigendes Betriebsverhalten erwarten, wenn der verchromte Ring eine sehr gute Bearbeitungs- und Formgenauig-

keit aufweist und auch der Zylinder als Partner des Rings eine gute Formgenauigkeit im Ausgangszustand wie im Betrieb besitzt. Zunächst hat man versucht, das Einlaufvermögen des verchromten Rings durch Aufrauung der Hartchromschicht zu verbessern. Solche porös verchromten Ringe reiben sich an den Stellen hoher örtlicher Drücke rascher ab, wobei sich die verbesserte Ölhaltefähigkeit günstig auswirkt. Inzwischen wurde aber die Porösverchromung für diesen Zweck praktisch wieder aufgegeben und die Qualität der hartverchromten Ringe dadurch verbessert, daß man sie nach dem Verchromen an der Lauffläche einläppt oder hont, so daß schon im Einbauzustand eine gute Anlage auf dem ganzen Umfang bzw. an der Laufkante bei Minuten- und Winkelringen gesichert ist.

#### Kolbenringwahl und -prüfung

Art, Zahl und Anordnung der Kolbenringe werden im wesentlichen schon beim Entwurf eines neuen Kolbens festgelegt. Man versucht dabei, den angestrebten Zweck mit möglichst wenig Ringen zu erzielen. Eine genaue Kenntnis aller verfügbaren Ringarten, ihrer Wirkungsweise und spezifischen Eigenschaften ist daher auch für den Kolbenbauer unerläßlich. Die Feinabstimmung der Ringbestückung neuer Kolbentypen auf die gegebenen Bedingungen erfolgt meist in systematischen Versuchen auf dem Motorenprüffeld. Bei diesen Prüfstandversuchen werden Leistung, Reibleistung, Ölverbrauch und Durchblasemenge gemessen und dabei die letzten Korrekturen am Bearbeitungsschema des Kolbens selbst und gegebenenfalls an der Ringausrüstung vorgenommen.

Der große Einfluß der Ringqualität auf die Gebrauchstüchtigkeit des Kolbens macht eine sorgfältige Kontrolle und Überwachung der Ringe vor dem Aufsetzen auf den fertigen Kolben notwendig. Prüfteilungen und Laboratorium des Kolbenwerks müssen in der Lage sein, die angelieferten Ringe in jeder Hinsicht zu prüfen und zu beurteilen, und sind daher mit allen notwendigen Geräten und Einrichtungen zur Maß- und Werkstoffprüfung ausgestattet. Werkstoffseitig bedürfen die Festigkeits- und Härtewerte, die elastischen Eigenschaften, die Wärmebeständigkeit, die Gefügeausbildung, unter Umständen auch das Verschleißverhalten einer Überwachung. Die Maßprüfung erstreckt sich zum Beispiel neben der Durchmesserprüfung auf



Stoßspiel, Tangentialspannung, Maulweite, Spannungsverteilung, axiale Höhe, radiale Wandstärke und Formgenauigkeit. Mit besonderen Meßgeräten werden ferner die Lichtspalt- und Gasdichtheit geprüft. Bei verchromten Ringen ist außerdem die Stärke und Haftfestigkeit der Chromschicht zu bestimmen. Manche dieser Prüfoperationen werden mit sinnvollen, im eigenen Hause entwickelten Geräten durchgeführt oder überhaupt erst ermöglicht.

### Ringsicherungen

Weist die Zylinderwand innerhalb des von den Kolbenringen bestrichenen Bereichs irgendwelche Unterbrechungen oder Aussparungen auf, so müssen die Ringe unverdrehbar so angeordnet werden, daß die Stoßenden nicht an den Laufbahnkanten hängen bleiben können. Derartige Unterbrechungen der Laufbahn entstehen bei allen Zweitaktmotoren durch die hier notwendigen Schlitze und Kanalöffnungen. Bei Viertaktmotoren ist die Notwendigkeit zur Fixierung der Ringe gegen Verdrehen nur sehr selten gegeben, beispielsweise dann, wenn ein unter dem Bolzen angeordneter Kolbenring eine Aussparung am unteren Zylinderrand (für Pleuel o. ä.) bestreicht, oder – noch seltener – bei Konstruktionen mit Schiebersteuerung. Von den Hilfsmitteln zur Ringsicherung ist zu fordern, daß sie auf einfache Weise angebracht werden und sich im Betrieb weder lockern noch merklich verschleiben können. Sie sollen ferner die Gasdichtheit nicht spürbar beeinträchtigen und den Ring möglichst wenig schwächen.

Auch auf diesem Gebiet haben sich von den zahlreichen Vorschlägen nur ganz wenige durchgesetzt. (Siehe auch Abschnitt »Kolben für Zweitaktmotoren«, Seite 52.)

### Kolbenbolzen \*

Der Kolbenbolzen stellt die kraftschlüssige Verbindung zwischen Kolben und Pleuelstange her und bildet somit ein wichtiges Glied in der Kette der kraftübertragenden Teile. Seine Arbeitsbedingungen sind gekennzeichnet durch rasche Hin- und Herbewegung, eine verhältnismäßig kleine und langsame Gleitbewegung gegenüber den Lagerstellen im Kolben und Pleuel, die bei kleinsten Spielen unter mageren Schmierbedingungen vor sich gehen muß, sowie durch schlagartige Belastungen aus wechselnden Richtungen.

\* DIN 73 124 und 73 125



153 Verschiedene Bolzenausführungen:  
a) Bolzen mit durchgehend zylindrischer Bohrung (Normalform)  
b) Bolzen mit kegelig aufgeweiteten Bohrungsenden  
c) Bolzen mit mittig geschlossener Bohrung  
d) Bolzen mit einseitig geschlossener Bohrung

Daraus ergeben sich folgende Forderungen:

1. geringes Gewicht, um die Massenkräfte klein zu halten, hohe Steifigkeit zur Vermeidung von unzulässigen Verformungen, die auch den Kolben in Mitleidenenschaft ziehen würden,
2. hohe Festigkeit und Zähigkeit, um die schlagartigen hohen Belastungen ohne Bruchgefahr ertragen zu können,
3. gute Gleiteigenschaften, also hohe Oberflächengüte und Formgenauigkeit,
4. hoher Verschleißwiderstand, das heißt hohe Oberflächenhärte.
5. Weiter muß verlangt werden, daß die Fertigung verhältnismäßig einfach und somit wirtschaftlich erfolgen kann.

Der Kolbenbolzen wird in der Hauptsache auf Biegung beansprucht. Um ihn möglichst biegesteif zu machen, wird er üblicherweise rohrförmig mit einer durchgehenden zylindrischen Bohrung ausgeführt, die man zuweilen an den Enden kegelig erweitert, um dadurch einem Körper gleicher Beanspruchung nahe zu kommen. Die Rohrform ergibt allerdings eine zusätzliche Beanspruchung durch Abplattung des kreisrunden Querschnitts. In der Scherstelle zwischen Kolben- und Pleuelauge treten außerdem Schubbeanspruchungen auf. Diese durch äußere Kräfte bedingten Beanspruchungen

chungen überlagern sich den im Werkstoff von der Wärmebehandlung her vorhandenen inneren Spannungen. Die daraus resultierende Gesamtspannungsverteilung läßt sich zwar etwa abschätzen, jedoch rechnerisch nicht genau erfassen, zumal die elastischen Verformungen des Kolbens das Spannungsfeld in unübersichtlicher Weise beeinflussen.

Früher war es üblich, Kolbenbolzen als Biegestab mit punktförmigen Auflagern in der Mitte der Kolbennaben zu berechnen. Dabei ergibt sich aber eine viel kleinere Beanspruchung als in der Wirklichkeit.

Deshalb sind von Rothmann<sup>1)</sup> und Schlaefke<sup>2)</sup> erweiterte Berechnungsmethoden ausgearbeitet worden, bei denen die Abplattung mit berücksichtigt wird. Damit sind jetzt gute Annäherungen an Betriebserfahrungen mit verschiedenen Kolbenbolzenabmessungen möglich.

Rothmann legt die Abplattung als begrenzende Größe zugrunde und führt an, daß bei einer Wahl der Bolzenabmessung nach dem Gesichtspunkt der Formänderung die Werkstoffbeanspruchungen durch Biege- und Scherkräfte auf jeden Fall genügend weit unterhalb der zulässigen Beanspruchung bleiben. Demzufolge sei es auch durchaus möglich, in Dieselmotoren mit einfacheren, niedrig legierten Stählen auszukommen, da für die Formänderung nicht die Festigkeit, sondern der Elastizitätsmodul ausschlaggebend sei, der bei normalen Stahlsorten praktisch derselbe ist.

Schlaefke gibt mit seinem Verfahren einen Weg zur Ermittlung der Gesamtbeanspruchung an, die sich aus Biegebeanspruchung und Abplattung zusammensetzt. Die Dimensionierung erfolgt dann so, daß die Gesamtbeanspruchung kleiner als die Biege-wechselfestigkeit bleibt.

Hoch beanspruchte Bolzen werden mit Vorteil auch aus Nitrierstählen hergestellt. Bei diesen erzielt man die hohe Oberflächenhärte durch »Aufsticken« der Oberflächenschicht im Ammoniakstrom bei etwa 500 °C. Voraussetzung für die Nitrierbarkeit eines Stahls ist das Vorhandensein bestimmter Legierungszusätze wie Chrom, Molybdän, Vanadin und Aluminium. Stähle mit Al-Zusatz ergeben die höchste Oberflächenhärte.

<sup>1)</sup> Dr.-Ing. G. Rothmann: Berechnung der Kolbenbolzen von Fahrzeugdieselmotoren, Mitt. Forsch. Anst. GHH-Konzern, Nov. 1936.

<sup>2)</sup> Dr.-Ing. K. Schlaefke: Zur Berechnung von Kolbenbolzen, Motor-technische Zeitschrift, 1940, Heft 4.

Die Härteschichten von nitrierten Bolzen sind in der Regel dünner als die von Einsatzbolzen. Dies ist insofern von Bedeutung, als die sonst bei Bolzen übliche Härteprüfmethode nach Rockwell (Rc) mit 150 kp Prüfdruck nicht anwendbar und statt dessen die Prüfung nach Vickers mit kleinen Prüflasten vorzunehmen ist. Gehärtete Oberflächenschichten erhöhen durch die in ihnen herrschenden Druckspannungen die Dauerfestigkeit der Bolzen, vermindern sie jedoch, wenn der Anteil der Schicht 30% des gesamten Querschnitts übersteigt. Aus diesem Grund ist es außerordentlich wichtig, daß die zugelassenen Einsatziefen eingehalten und strengstens überwacht werden. Einsatzhärtung der Innenbohrung ist unbedingt anzuraten, da sie vor allem zwei Vorteile bietet:

einmal erhöht sie, wie schon angedeutet, die Dauerfestigkeit der Bolzen, indem sie die kritischste Beanspruchung des Bolzens – die Zugspannung in der Innenbohrung – durch ihre Druck-Vorspannung herabsetzt, zum anderen wird auf jeden Fall die sogenannte Randentkohlung vermieden, die an der gleichen Stelle einer Schwächung gleich käme.

Vergütungsstähle kamen bisher für die Bolzenherstellung wenig in Betracht. Die induktive Oberflächenhärtung wird ihnen jedoch vielleicht neue Anwendungsmöglichkeiten erschließen. Dieses Verfahren erlaubt eine exakte Steuerung der Härtetiefe, arbeitet schnell und sauber und bietet so die Möglichkeit, die Oberflächenhärtung unmittelbar in die Fertigungsreihe zu verlegen.

Die Art der Oberflächenhärtung und der ganzen Wärmebehandlung hat großen Einfluß auf die Dauerhaltbarkeit der Bolzen. Unter Umständen übertrifft er selbst jenen, der durch die Unterschiede in der Nennfestigkeit des Stahls bedingt ist, das heißt, der Werkstoffzustand ist von größerer Bedeutung als die Werkstoffsorte. Es ist daher besser, Werkstoffe zu verwenden, die in bezug auf die Wärmebehandlung verhältnismäßig unempfindlich sind und sich somit auf gleichmäßige Güte bringen lassen, als Stähle zu wählen, die zwar durch ganz bestimmte Behandlung auf sehr hohe Festigkeitswerte zu bringen sind, aber auf die unvermeidlichen kleinen Schwankungen der Behandlung sehr empfindlich reagieren. Für das Betriebsverhalten sind einzig und allein die tatsächlich erreichten Eigenschaften ausschlaggebend. Eine sichere Beherrschung der

Wärmebehandlung ist also oberstes Gebot für die Bolzenfertigung.

Die Erfahrung zeigt auch, daß Bolzenbrüche viel eher durch Wärmebehandlungsfehler als durch eigentliche Werkstofffehler verursacht werden. Gefährlich und daher unbedingt zu vermeiden sind folgende Fehler:

Härterisse, vor allem in der Bohrung, Grobkornbildung (Überhitzung), Randentkohlung, falsche Einsattiefe, schroffer Übergang von der Einsattzone zur Kernzone. Diese Mängel können vor allem dann gefährlich werden, wenn gleichzeitig im Werkstoff selbst gewisse Unregelmäßigkeiten (z. B. Seigerungen oder Schlackenzeilen) vorliegen.

Im Hinblick auf gleichmäßige Qualität ist man bemüht, mit nur wenigen Stahlsorten auszukommen. Die üblichen Bolzenwerkstoffe, ihre Eigenschaften und Anwendungsgebiete sind aus der untenstehenden Tabelle zu entnehmen.

### Bearbeitung

Wegen der meist erforderlichen engen Passung müssen Kolbenbolzen eine hohe Formgenauigkeit besitzen, das heißt, sie müssen genau rund und zylindrisch sein. Wandstärkenunterschiede sind angesichts der verhältnismäßig knapp bemessenen Querschnitte nur in mäßigen Grenzen zulässig.

Die Außenfläche der Bolzen muß als Gleitfläche möglichst glatt sein. Sie wird fein geschliffen und dann meist noch geläppt. Der sichtbare Glanz kann dabei je nach dem angewandten Läppverfahren bei gleicher Glätte unterschiedlich ausfallen. Beim Centerless-Verfahren ergeben sich spiegelglänzende Oberflächen, beim Plattenläppen dagegen matt-glänzende. Die Bohrung muß sauber bearbeitet sein. Scharfe und tiefe oder unregelmäßige Drehriefen setzen ebenso wie Zieh- oder Räumriefen die Dauerfestigkeit der Bolzen herab.

### Stähle für Kolbenbolzen

Bezeichnung	Einsatzstähle nach DIN 17210				Nitrierstähle nach Stahl-Eisen-Werkstoffblatt 850-60	
	Ck 15	15 Cr 3	16 MnCr 5	15 CrNi 6	31 CrMoV 9	34 CrAl 6
frühere Bezeichnung	—	EC 60	EC 80	ECN 15	N 54 Krupp	FP 12 Krupp
Werkstoff-Nr.	1.11 41	1.70 15	1.71 31	1.59 19	1.85 19	1.85 04
Werkstoffzeichen <sup>1)</sup>	K	L	M	Y	N 1	N 4
Zugfestigkeit <sup>2)</sup> im Kern (einsatzgehärtet bzw. nitriert) kp/mm <sup>2</sup>	50-65	60-85	80-110	90-120	100-115	75-95
Wechselspannungsfestigkeit <sup>3)</sup> kp/mm <sup>2</sup>	25-29	30-36	40-48	44-51	50-54	37-42
Oberflächenhärte Rockwell-C-Einheiten <sup>4)</sup> (HRC 150) Vickers-Einheiten <sup>5)</sup> (HV 10)	59-65 (690-830)	59-65 (690-830)	59-65 (690-830)	59-65 (690-830)	(59) mind. 690	(65) mind. 850

- <sup>1)</sup> Werkstoffzeichen nach DIN-Normvorschlag. Werkstoffzeichen werden bei Kolbenbolzen ab 15 mm Außendurchmesser angebracht.  
<sup>2)</sup> Gewährleistete Festigkeitseigenschaften nach DIN 17210, Tabelle 2 für Einsatzstähle bzw. Stahl-Eisen-Werkstoffblatt 850-60 Tafel 2 für Nitrierstähle.  
<sup>3)</sup> Angenähert aus der Beziehung berechnet: Wechselspannungsfestigkeit = 0,25 (Streckgrenze + Zugfestigkeit) + 5 kp/mm<sup>2</sup>.  
<sup>4)</sup> Übliches Prüfverfahren für Einsatzschichten über 0,5 mm. Entsprechende Härtevergleichswerte in Klammern.  
<sup>5)</sup> Übliches Prüfverfahren für Einsatzschichten unter 0,5 mm und nitrierte Bolzen. Entsprechende Härtevergleichswerte in Klammern.

## Prüfung

Auch die Bolzen werden, bevor sie mit den Kolben zusammen das Werk verlassen, sorgfältig kontrolliert. Bei der Maßkontrolle werden vor allem Durchmesser, Rundheit, Zylindrizität sowie die Oberflächengüte geprüft. Auch die Oberflächengüte der Bohrung wird überwacht.

Für die serienmäßige, zerstörungsfreie Prüfung des Werkstoffzustandes, vor allem der Härte und der Kernvergütung wurden Sondergeräte entwickelt, die ihrem Prinzip nach zum Beispiel von der Tatsache Gebrauch machen, daß der Werkstoffzustand die Magnetisierbarkeit beeinflußt. Auch eventuelle Werkstoffverwechslungen, die mit anderen Mitteln im fertigen Bolzen nicht zu erfassen sind, treten dabei deutlich zutage. Daneben wird das bekannte Magnetpulververfahren mit fluoreszierendem Pulver für die Prüfung auf Werkstofffehler wie Schlackenzeilen, Härte- und Schleifrisse angewandt.

## Werkstoffe

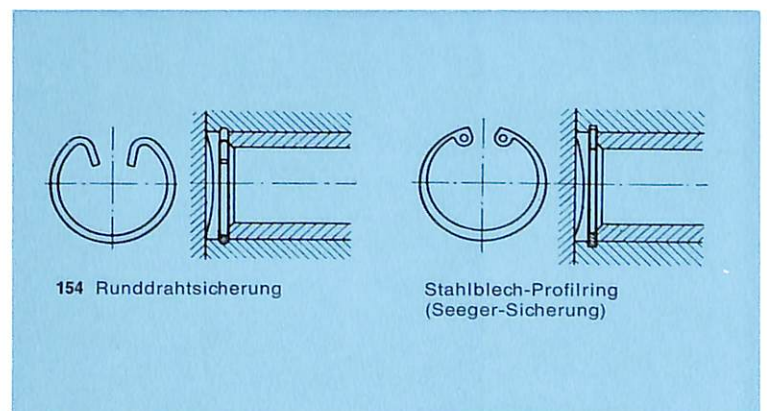
Die an den Bolzenwerkstoff zu stellenden Forderungen ergeben sich eindeutig aus den eingangs erwähnten Arbeitsbedingungen. Die Wechselbeanspruchung mit stoßartigem Charakter verlangt hohe Wechselfestigkeit und gewisse Zähigkeit, die Gleitbewegung in den Lagerflächen jedoch harte, verschleißfeste Oberflächen. Beide Forderungen lassen sich zwar mit legierten Vergütungsstählen gleichzeitig erfüllen, die jedoch teuer und schwer zu verarbeiten sind und für den Normalfall ausscheiden. Daher werden für Kolbenbolzen fast ausnahmslos niedrig gekohlte, unlegierte oder schwach legierte Stähle verwendet, die sich durch geeignete Wärmebehandlung auf ausreichende Festigkeit bringen lassen. Die nötige Oberflächenhärte wird durch Einsatzhärten oder Nitrieren erzeugt.

Bolzen aus Einsatzstahl werden nach dem Aufkohlen der Randschicht gewöhnlich einer Doppelhärtung unterzogen, das heißt, in einer ersten Wärmebehandlung wird das beim Einsetzen entstandene grobe Korn verfeinert (Kernrückfeinung), in einer zweiten Wärmebehandlung erfolgt dann die Härtung der Randzone. Anschließende Anlaßbehandlung bringt bei geringem Härterückgang noch eine Steigerung der Zähigkeit und verbürgt vor allem die unbedingt nötige Volumstabilität.

Außerhalb der laufenden Serienkontrolle werden die Zusammensetzung und die Eigenschaften der Kolbenbolzenwerkstoffe im Laboratorium sorgfältig überwacht. Dabei wird besonders der Einfluß der Werkstoffart und der Herstellungsweise auf die Haltbarkeit durch betriebsähnliche Dauerversuche erfaßt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bilden zusammen mit den ausgedehnten Erfahrungen der Praxis, wie sie zwangsläufig aus dem ganzen Kundenbereich beim Kolbenwerk gesammelt werden, die Grundlage für die Werkstoffwahl, Bemessung und Weiterentwicklung von Kolbenbolzen.

## Bolzensicherungen

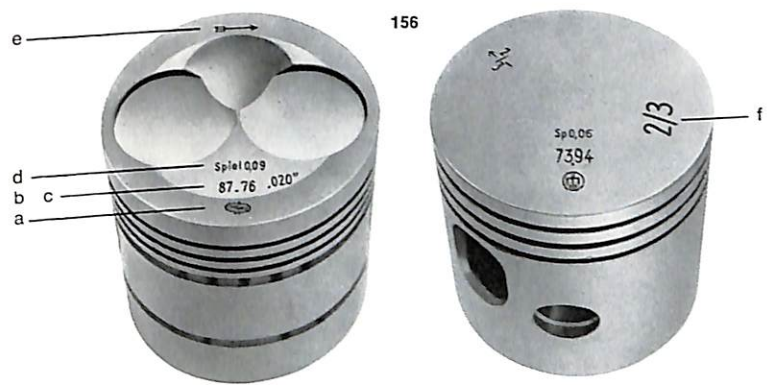
Sofern die Bolzen nicht durch Schraub- oder Klemmverbindungen im Pleuel festgehalten werden – eine Methode, die bei uns kaum, im Ausland dagegen noch häufig im Gebrauch ist –, müssen sie durch besondere Sicherungselemente am Anlaufen an der Zylinderwand gehindert werden. Früher wurden vielfach sogenannte Pilze aus Leichtmetall mit kugeligen Enden, die den Bolzen unter Linienberührung mit dem Zylinder führten, in die Bolzenenden eingesetzt. Heute werden fast ausschließlich federnde Ringe verwendet, die in entsprechende Rillen am Außenrand der Bolzenlöcher eingesetzt werden und so die Seitenbewegung des Bolzens begrenzen. Sehr verbreitet sind dafür die aus Federstahl gestanzten Seegerringe. Häufig werden aber auch Ringe aus Runddraht – seltener Flachdraht – verwendet, deren Enden zur Erleichterung der Montage meist hakenförmig umgebogen sind.



155 Prüfen von Kolbenbolzen







## Kolben-Einbauregeln

Im Kolbenwerk wird unter Ausnützung aller Möglichkeiten der Konstruktion, der Werkstoffwahl und der Fertigung alles darangesetzt, **den** Kolben zu schaffen, der auch den höchsten Anforderungen eines modernen Verbrennungsmotors gewachsen ist. Es versteht sich nun eigentlich von selbst, daß ein Bauelement von so hoher Präzision beim Zusammenbau mit den ergänzenden Bauteilen ebenso wie beim Einbau in den Motor unbedingt einer entsprechend sorgfältigen und sachgemäßen Behandlung bedarf.

Folgende Grundregeln sind dabei zu beachten:

### Auf dem Kolbenboden sind angebracht:

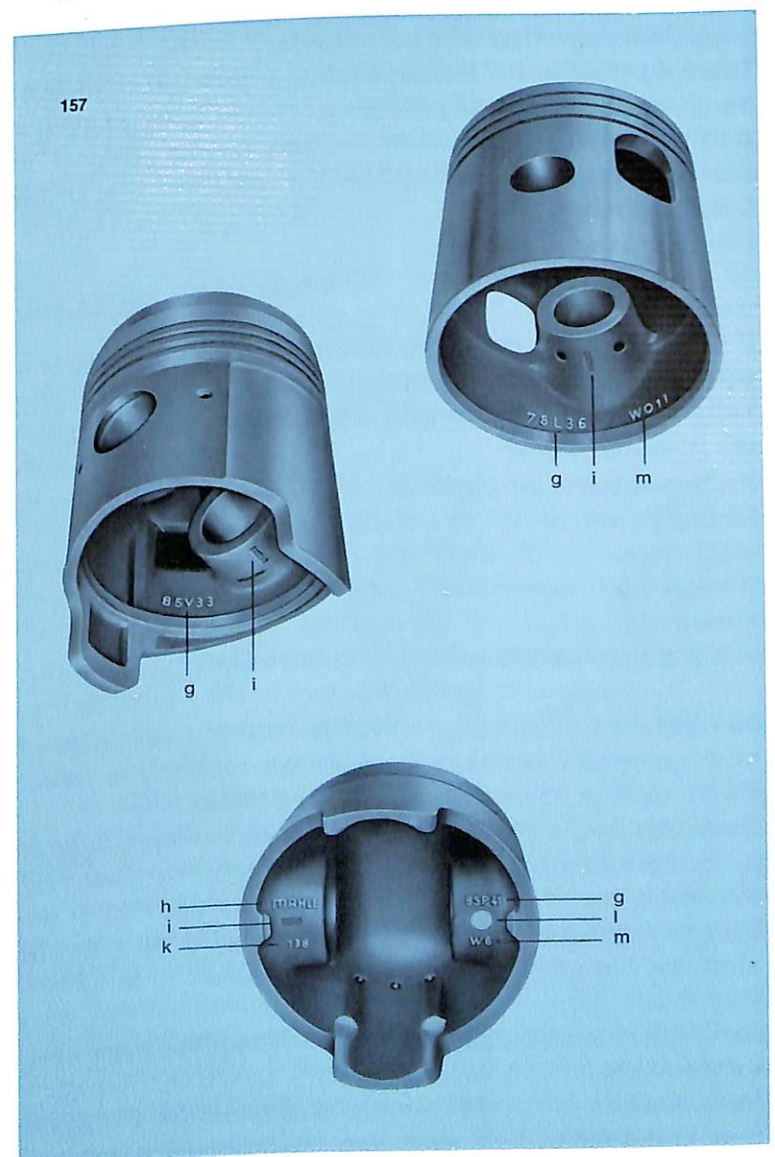
- a) Firmen- und Gütezeichen **MAHLE** oder **M**
- b) Maß des Kolbendurchmessers in mm, senkrecht zur Bolzenachse an der Stelle des größten Schaftdurchmessers gemessen
- c) Kolbenübermaß in Zoll bei ausländischen Typen
- d) Maß des Einbauspiels in mm, gleichbedeutend mit der Differenz des Durchmessers von Zylinderbohrung und Kolben bei 20 °C
- e) Pfeilzeichen, manchmal durch die Bezeichnung »vorn« oder »Front« ergänzt und meist in Fahrtrichtung weisend, bei Kolben mit aus der Mitte versetzter Bolzenachse, bei Kolben mit geschlitztem Schaft oder besonderen Bodenformen
- f) Sonderzeichen, die von den Motorenherstellern gewünscht werden, wie z. B.:  
A = Auslaß, E = Einlaß, 1 = Zylinder 1,  $\frac{2}{3}$  = Zylinder 2 und 3, 2-Zyl. = 2-Zylinder-Ausführung, 3-Zyl. = 3-Zylinder-Ausführung (Bild 156)

### Im Kolbeninnern sind angebracht:

- g) Rohlingsbezeichnung am Kolbenboden oder Kolbenschaft zur Kennzeichnung der jeweiligen Kolbenbauart,  
(z. B.: 85 V 33 = Autothermik-Kolben, 78 L 36 = Einmetall-Kolben, 85 P 41 = geschmiedeter Kolben)
- h) Firmenname **MAHLE**
- i) Kontrollstempel, meist am Bolzenauge
- k) Legierungsbezeichnung (die Standardlegierung »MAHLE 124« wird nicht angegeben)
- l) Farbpunkt am Bolzenauge, als Gruppenbezeichnung für die Bolzenpassung
- m) Werkzeugnummer (Bild 157)

### MAHLE-Kolben sind einbaufertig!

Genau so, wie sie aus der Verpackung genommen werden, sind MAHLE-Kolben ohne jede Nacharbeit in die auf Nennmaß bearbeitete Zylinderbohrung einzubauen. Kolben für Ersatzbedarf werden in genormten Übermaßen von 0,5 zu 0,5 mm steigend (bei Kolben für Mopeds teilweise auch von 0,25 zu 0,25 mm steigend) hergestellt, sofern die Motorenhersteller keine anderen Maße vorschreiben. Normalerweise gibt es 4 Übermaße. Die Zahl richtet sich nach der Wandstärke des Zylinders bzw. nach der Kolbenbauart. Bei der Bestellung von Ersatzkolben ist stets der Zylinderdurch-





158 Einsetzen  
von Drahtsprengringen  
mit Spezialzange

messer anzugeben, da das notwendige Einbauspiel bereits eingerechnet ist.

Die Zylinderbohrung beim Nachhonen mittels des Kolbens zu prüfen ist nicht ratsam, da hierbei der Kolben verformt und zerkratzt werden kann!

### Kolbenbolzen nicht verwechseln!

Kolbenbolzen, die mitgeliefert werden, sind bereits nach der entsprechenden Passung ausgewählt und zur Vermeidung von Fehlkombinationen mit dem gleichen Farbzeichen wie der dazugehörige Kolben markiert. Werden Bolzen mit einer anderen Farbgruppe zum Einbau verwendet, so kann dies unangenehme Betriebsstörungen zur Folge haben.

Die Farbpunkte im Kolbenbolzen sowie auf dem Bolzenauge kennzeichnen die jeweilige Maßgruppe. Weiße und schwarze Farbpunkte werden angebracht, wenn die Bolzentoleranz der DIN-Norm entspricht, z. B. für Ottomotoren:

Kolbenbolzen- $\phi$	
12 bis 18 mm	20 bis 30 mm
weiß	
0 bis -0,0025 mm	0 bis -0,003 mm
schwarz	
-0,0025 bis -0,005 mm	-0,003 bis -0,006 mm

für Dieselmotoren:

Kolbenbolzen- $\phi$	
22 bis 30 mm	32 bis 50 mm
weiß	
0 bis -0,003 mm	0 bis -0,0035 mm
schwarz	
-0,003 bis -0,006 mm	-0,0035 bis -0,007 mm

Für andere Toleranzlagen werden üblicherweise grüne und gelbe Farbpunkte verwendet, wobei die grüne Farbe den größeren Durchmesser bezeichnet.

Trotz der heute meist gebräuchlichen leichten Bolzenpassung sollte der Kolben vor dem Zusammenbau nach wie vor angewärmt werden, damit die Lauffläche des Bolzenauges keinesfalls beschädigt wird. Die Bolzen sind vor dem Einschleiben gut einzuölen.

### Nur Normalmaßbolzen und neue Pleuelbüchsen verwenden!

Vom Kolbenwerk zum Versand gebrachte Standard- und Übermaßkolben sind mit Normalmaßbolzen ver-

sehen. Beim Einbau sind deshalb neue Pleuelbüchsen zu verwenden, weil die alten meistens ausgeschlagen sind und daher zu große Spiele bringen würden. Die Pleuelbüchsen durch Aufreiben nachzuarbeiten und dann Übermaßbolzen zu verwenden, ist nicht empfehlenswert, da ausgeriebene Bolzenlöcher und Pleuelbüchsen keine gute Lagerung ergeben und erfahrungsgemäß zu Laufschwierigkeiten führen. In den neuen Pleuelbüchsen müssen die Bolzen ein dem Büchsenwerkstoff entsprechendes Spiel erhalten. Zu stramme Passung ergibt Schwierigkeiten. Manche Büchsenwerkstoffe, wie z. B. Bronze, müssen vor der Endbearbeitung in einem Ölbad »entspannt« werden, damit sie im Betrieb nicht »schrumpfen«, den Bolzen blockieren und damit zu schweren Kolbenschäden führen. Beim Austausch von Büchsen sollte immer das vom Motorhersteller vorgeschriebene Büchsenmaterial verwendet werden.

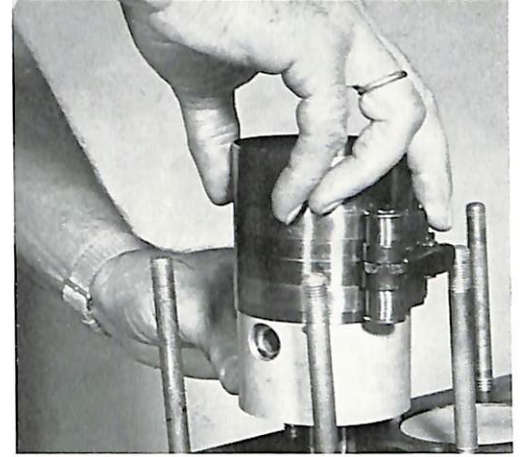
### Bolzensicherungen richtig einbauen!

Seegersicherungen, aus Federstahl gestanzte Ringe, Sprengringe oder Ringe aus Runddraht in verschiedenen Ausführungen (mit einem, zwei oder ohne Haken, nach außen gekröpft oder gewellt) sind zur Vermeidung von Verwechslungen in Ersatzkolben bei der Lieferung bereits eingebaut.

Die Montage der Sicherungen darf nur mit Spezialzangen vorgenommen werden (Bild 158). Bei Verwendung anderer Hilfsmittel können die sehr sorgfältig bearbeiteten Bolzenlochbohrungen leicht beschädigt werden. Vorsicht beim Zusammendrücken der Sicherungsringe, damit sich diese nicht bleibend verformen! Jede Sicherung muß in der für sie bestimmten Nut rund und fest liegen. Rechteckig-kantig eingestochene Sicherungsnuten sind für Seegersicherungen oder Flachdrahtsicherungen bestimmt.

### Kolbenringe nicht abnehmen!

Die Kolbenringe werden mit Spezialgeräten sorgfältig aufgesetzt. Jedes unnötige Auf- und Abziehen beeinträchtigt die Spannung der Ringe. Muß ein Ring einmal ausgebaut und wieder aufgesetzt werden, so darf dies nur mit Kolbenringzangen geschehen, denn jedes übermäßige Spreizen verursacht bleibende Verformung und beeinträchtigt damit den Ölverbrauch und die Motorleistung.



159 Sachgemäße  
Einführung des Kolbens  
in die Zylinderbohrung

### Pleuelstangen überprüfen!

Vor dem Zusammenbau ist jede Pleuelstange mittels eines Spezialgeräts sorgfältig auf Achsparallelität der Augen sowie auf Verdrehung oder Verbiegung zu überprüfen. Nicht einwandfreie Pleuel müssen ersetzt werden, da die Praxis erwiesen hat, daß »Richten« in den meisten Fällen erfolglos bleibt: das Pleuel geht nämlich bei Betriebstemperatur wieder auf die ursprüngliche verdrehte oder verbogene Form zurück.

### Zylinder vorbereiten!

Zylinder oder Zylinderblock sind vor dem Einbau der Kolben sauber zu reinigen. Vor allem sind die Honrückstände sehr sorgfältig zu entfernen. Die Bohrungen werden dann mit gutem Motorenöl eingeeilt.

### Sachgemäßer Zusammenbau

Nachdem die einzelnen Einbauteile überprüft sind, werden die Kolben – ohne Abnahme der Kolbenringe – mit sauberem Waschbenzin außen und innen sorgfältig abgespült. Die Kolben sind auf einer Heizplatte oder im Ölbad auf 40–60 °C anzuwärmen. Der Einbau des zuvor gut eingeeilten Bolzens in den angewärmten Kolben sollte rasch erfolgen, damit sich der Bolzen nicht zu schnell erwärmt und dadurch vorzeitig festsetzt. Mit einem angeschrägten Hilfsbolzen aus Hartholz oder Aluminium kann man sich das Einschieben erleichtern. Dann werden die Bolzensicherungen eingesetzt und unter leichtem Schließdruck in der Nut gedreht. Ist der Bolzen mit einer Klemmschraube im Pleuel befestigt, so prüfe man nach dem Festziehen, ob sich der Kolben noch leicht kippen läßt. Der Bolzen wird nämlich durch zu starkes Festziehen der Klemmschraube verformt. Die auf die Pleuelstangen montierten und ebenfalls gut eingeeilten Kolben können nun eingebaut werden. Die Kolbenringe sind mit einer Ringmanschette – keinesfalls mit dem Schraubenzieher! – zusammenzudrücken und dann in die Bohrung einzuführen (Bild 159). Man achte darauf, daß die Ringstöße gegeneinander versetzt sind.

Nach dem Festschrauben des Zylinders bzw. Zylinderblocks muß man den Motor mehrmals durchdrehen können, ohne Klemmstellen zu spüren. Bei richtigem Einbau muß sich auf der Kolbenbodenseite – in Bolzenrichtung gesehen – der gleiche Abstand zwischen Kolben und Zylinder ergeben. Zu dieser Nachprüfung verwendet man üblicherweise einen Spion (Fühlerlehre).

### Einlaufen und Einfahren des Motors

Kommt der überholte Motor zum Laufen, so müssen sich alle aufeinandergleitenden Teile, z. B. die Kolbenringe und die Zylinderlaufbahn, erst glätten. Die noch von der Bearbeitung herrührenden Spitzen reiben sich dabei ab, ein Vorgang, den man als »Einlaufen« oder »Einfahren« bezeichnet.

Hierbei besteht die Gefahr, daß sich die Oberflächen bei zu großer Belastung gegenseitig verschweißen, das heißt »fressen«. Ausreichende Schmierung hat dies zu verhindern. Weiterhin ist dafür zu sorgen, daß die abgeriebenen Teilchen so schnell wie möglich, ohne noch irgendwo Schaden anrichten zu können, beseitigt werden. Eine sorgfältige Durchspülung ist deshalb nach dem Zusammenbau sehr zu empfehlen. Später besorgt dies der rechtzeitige, gründliche Ölwechsel. Wichtig ist, daß nur dünnflüssige Markenöle verwendet werden, worauf ja auch die Motorenhersteller mit besonderem Nachdruck hinweisen.

### Besondere Hinweise:

Oberflächenschutzschichten aus Zinn, Blei oder Graphit, wie sie für MAHLE-Kolben verwendet werden, setzen die Freßgefahr während des Einlaufens wesentlich herab.

Zur Verkürzung des Einlaufvorgangs soll der Motor mit Teillast und mittleren Drehzahlen laufen und die Temperatur des Kühlwassers bei etwa 80 °C liegen. Man achte deshalb auf »zügige« Fahrweise und schalte rechtzeitig, um den Motor »auf Drehzahl« zu halten! Auch die Filter (Öl-, Benzin- und Luftfilter) sind stets in Ordnung zu halten und sorgfältig zu warten! Mangelhafte Schmierung ist während der Einfahrzeit noch gefährlicher als nach längerer Laufzeit.

»Kraftstoffüberschwemmung«, die den Ölfilm wegwascht, muß unter allen Umständen vermieden werden. Man fahre also nicht mit gezogenem Starterzug und vermeide bei Vergasern mit Beschleunigerpumpe übermäßige Kraftstoffzufuhr durch Spielen mit dem Gaspedal.

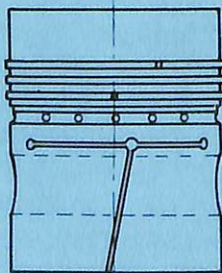
Thermische Überlastung des Kolbens wird durch richtige Zünd- und Vergasereinstellung, bei Dieselmotoren durch Überprüfung der Einspritzorgane auf Abspritzdruck, Einspritzmengen und Einspritzzeitpunkt vermieden.

## Patente

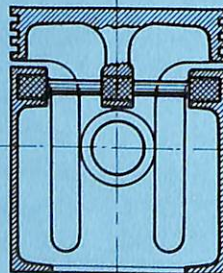
Sich anhand der Patentliteratur über die Entwicklung und Probleme eines bestimmten Fachgebiets zu orientieren, ist ebenso reizvoll wie interessant. Das Patentschrifttum über Kolben ist jedoch derart umfangreich, daß es im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht einmal möglich ist, einen auch nur annähernden Überblick zu bieten. Schon eine Besprechung der wichtigsten bis zum Jahr 1937 auf dem Teilgebiet Leichtmetallkolben erteilten Patente füllt ein ganzes Buch (Krüger: »Leichtmetallkolben für Fahrzeugmotoren«). Deshalb müssen wir uns hier darauf beschränken, einige wenige Probleme herauszugreifen und auch diese nur in groben Zügen darzustellen.

Ein Hauptproblem stellt – wie von Anfang an – auch heute noch die Aufgabe dar, das Spiel zwischen dem Kolbenschaft und der Zylinderwand bei allen Betriebszuständen einerseits so klein zu halten, daß gute Abdichtung und ruhiger Lauf gewährleistet sind, andererseits doch groß genug, um »Fresser« zu vermeiden. Mit dieser Schwierigkeit beschäftigt sich schon die deutsche Patentschrift 25588 aus dem Jahre 1882. Der Erfinder schlägt darin eine »eigenthümliche Construction des Kolbens« vor, deren Hauptmerkmal ein spiralförmiger Schlitz ist, »um das Ende des Kolbens in eine Feder zu verwandeln«. Wir haben es bereits mit einem Vorläufer des sogenannten **Schlitzmantelkolbens** zu tun, der sich dann etwa 40 Jahre später durchsetzte

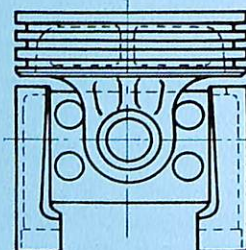
und von dem die deutsche Patentschrift 348440 aus dem Jahre 1920 (Bild 160) ein charakteristisches Beispiel zeigt. Einen Schlitzmantelkolben mit der Besonderheit, daß die durch breite U-förmige Schlitz vom übrigen Kolbenkörper abgetrennten Manteltragflächen untereinander durch eine Strebe aus einem Werkstoff mit geringer Wärmeausdehnung verbunden sind, zeigt die USA-Patentschrift 1454762 von Nelson aus dem Jahre 1921 (Bild 161). Diese Bauart wurde im Jahre 1923 zum **Nelson-Bohnalite-Kolben** mit zwei aus Invar, einem Nickelstahl mit besonders kleinem Wärmeausdehnungsbeiwert, bestehenden Streifeneinlagen nach USA-Patent 2006008 weiterentwickelt (Bild 162). 1934 wurde dieser Kolben durch Nelson zum **Autothermik®-Kolben** (USA-Patent 2086677) vervollkommen, bei dem an Stelle der Invar-Streifen nunmehr aus Stahlblechen mit aufgegossenen Leichtmetallrippen bestehende Bimetallemente treten. Unter Verwendung von Merkmalen eines aus dem Jahre 1929 stammenden Vorschlages von Debelak (Österr. Patent 566738) entstand dann der **Vollschaff-Autothermik®-Kolben**, von dem die Bilder 163 und 164 zwei neuere, der MAHLE Komm.-Ges. durch die Patente 935221 und 963912 geschützte Ausführungen mit besonderen Verrippungen zeigen, die eine Vergleichmäßigung des »Tragbildes« bewirken. Alle diese Kolben weisen Querschlitz auf. Erst in allerneuester Zeit ist es gelungen, auf dem



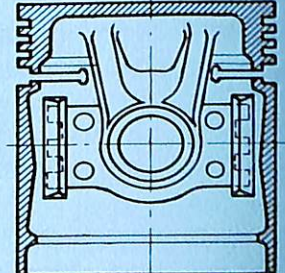
160 T-Schlitzkolben  
nach DRP 348 440 (1920)



161 Kolben mit zwischen den  
Tragflächen sich erstreckender  
Stahlstrebe nach  
USA-Patent 1 454 762 (1921)



162 Nelson-Bohnalite-Kolben  
mit Invarstreifen nach  
USA-Patent 2 006 008 (1923)



163 Vollschaff-Autothermik®-  
Kolben mit in der Mitte  
verstärktem Schaft  
nach DBP 935 221 (1952)

Bimetallprinzip fußende Regelkolben zu entwickeln, die keine Querslitze mehr besitzen. Dadurch erhöht sich die Belastbarkeit des Kolbens und außerdem wird ein gleichmäßigerer Wärmefluß erreicht (MAHLE-Patente 1 003 990 aus 1955 und 1 041 293 aus 1957). Die Bauart ist unter der Bezeichnung **Autothermatik®-Kolben** bekannt geworden. Ein Beispiel zeigt Bild 165.

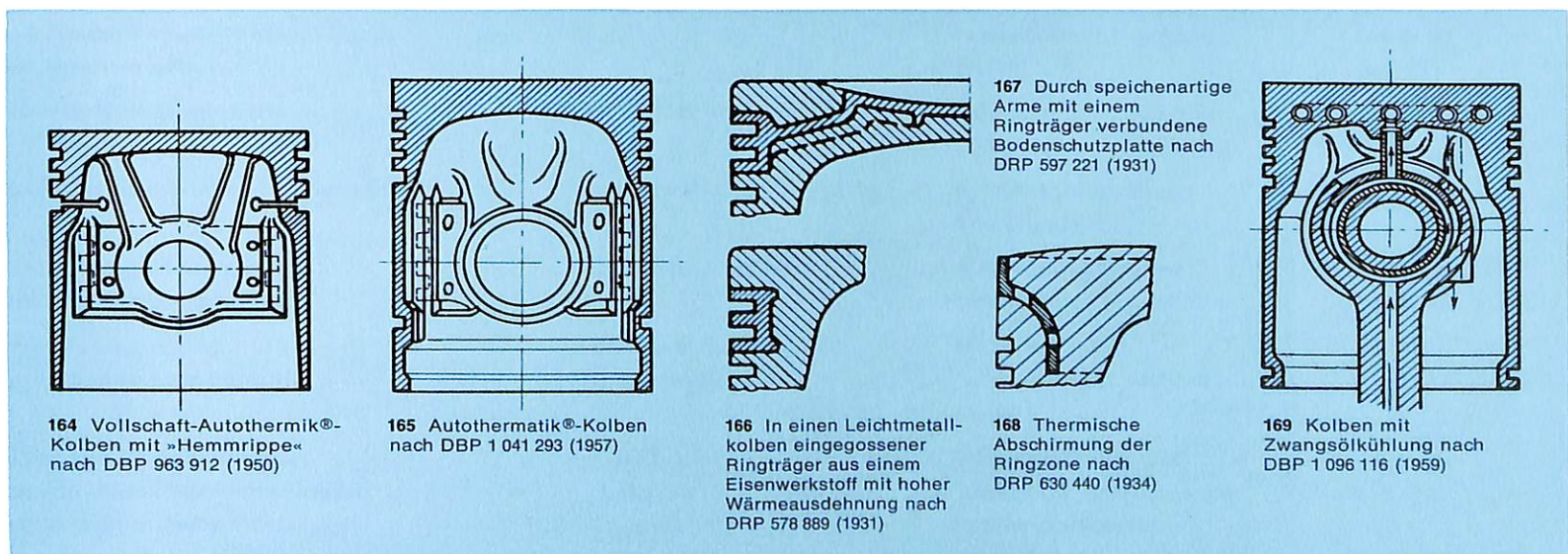
Ein zweites, mit der Entwicklung immer schneller laufender und höher belasteter Fahrzeugmotoren an Bedeutung und an Schwierigkeit zunehmendes Problem stellt der Schutz der dem Wärmeeinfall stark ausgesetzter Kolbenzonen gegen Überhitzung dar. Dafür gibt es drei Möglichkeiten: Bewehrung durch Einsätze aus hochwarmfesten Werkstoffen, thermische Abschirmung und Kühlung.

Da die Ringzone und der Kolbenboden besonders gefährdet sind, wurde schon frühzeitig vorgeschlagen, diese Zonen mit eingegossenen **Ringträgern** bzw. **Bodenschutzplatten** zu bewehren (vgl. z. B. die französische Patentschrift 455 539 aus 1913 und die schweizerische Patentschrift 55 262 aus 1911). Eine einwandfreie Verankerung solcher Einsätze gelang erstmals im Jahre 1931 nach den MAHLE-Patentschriften 589 409, 578 889, 580 106 und 597 221 durch die Verwendung von Kolben- und Einsatzwerkstoffen mit annähernd gleichem Wärmeausdehnungsbeiwert (Bilder 166 und 167). Nach der in diesen Patentschriften niedergelegten

Lehre werden auch heute noch fast alle Ringträgerkolben ausgebildet. In neuerer Zeit wird häufig noch zusätzlich eine metallische Bindung zwischen dem Ringträger- und dem Kolbenwerkstoff nach verschiedenen Verfahren vorgenommen, von denen das AL-FIN®-Verfahren (DBP 860 303) das bekannteste ist.

Ein Beispiel für **thermische Abschirmung** zeigt Bild 168. Entsprechend der deutschen Patentschrift 630 440 (1934) ist hier die Ringzone gegen zu starken Wärmeeinfall vom heißen Kolbenboden her durch eine ringförmige Einlage abgeschirmt, die gleichzeitig auch den oberen Teil des »Feuersteiges« bewehrt.

Für **gekühlte Kolben** wurde die auch heute noch zur Anwendung gelangende Zuführung des Kühlmittels durch Posaunenrohre oder über ein Hohlpleuel schon im Jahre 1903 erfunden (USA-Patentschriften 740 711 und 751 802). Damals diente als Kühlmittel Luft, und man konnte sich damit begnügen, diese gegen die Unterseite des Kolbenbodens zu blasen. Die heutigen Hochleistungsmaschinen erfordern eine intensivere Kühlung, bei der das Kühlmittel, meist Öl, näher an die zu kühlenden Stellen herangebracht und zu diesem Zweck durch Kanäle in den Kolbenwänden geleitet werden muß. Ein Beispiel zeigt das MAHLE-Patent 1 096 116 aus dem Jahre 1959 (Bild 169).



## MAHLE Schrifttum über Kolben und Zylinder

Seit über 40 Jahren findet die in den MAHLE-Werken geleistete Forschungs-, Entwicklungs- und Erprobungsarbeit auch ihren Niederschlag in laufenden Berichten an die Öffentlichkeit. Diese umfangreiche Dokumentation reicht vom Forschungsbericht und der wissenschaftlichen Dissertation, über Fachbeiträge zu den bekannten Standardwerken des Kraftfahrzeug- und Motorenbaus und der namhaften einschlägigen Zeitschriftenpresse bis zu Reportagen im Blätterwald der Tageszeitungen und Wirtschaftsliteratur. Aus den Tausenden von Veröffentlichungen haben wir hier in thematischer und chronologischer Gliederung eine beschränkte Anzahl solcher Arbeiten aus der Feder von MAHLE-Forschungsmitarbeitern zusammengestellt, die sich mit den theoretischen und praktischen Grundlagen

des Kolben- und Zylinderbaus sowie vergleichenden Überblicken über den jeweiligen Stand der Technik befassen. Wer sich eingehender in die Problematik unseres Fachs vertiefen möchte, findet in dieser Bibliographie viele wertvolle Erkenntnisquellen. Von manchen der zitierten Arbeiten stehen Sonderdrucke zur Verfügung, die wir Interessenten gerne überlassen. An dieser Stelle sei auch noch ergänzend darauf hingewiesen, daß wir über alle Bereiche unserer Arbeit, wie Werkstoffe, Fertigung, Bauarten, Oberflächenschutz, Einbau, Pflege usw., aktuelle Einzelschriften und orientierende Zusammenfassungen aufgelegt haben, die neben der folgenden Literatur vor allem den Praktiker unterrichten wollen und auf Anforderung kostenlos abgegeben werden.

Titel	Verfasser	Erscheinungsort	Erscheinungszeit
<b>I. Arbeiten über Grundlagen und Werkstoffe</b>			
Werkstoffprüfung für Kolben von Fahrzeugmotoren	Dipl.-Ing. E. Mahle	Maschinenbau, Berlin	1931 Heft 10
Charakteristik von Kolbenmaterialien unter Berücksichtigung des Verschleißwertes	Dipl.-Ing. E. Koch	Dissertation, TH Aachen	1931
Prüfung von Leichtkolben-Baustoffen	Dipl.-Ing. P. Sommer	Dissertation, TH München	1931
Die Werkstoffe im Kolbenbau	Dr.-Ing. E. Koch	Deutsche Motor-Zeitschrift (DMZ), Dresden	1937 Heft 9
Leichtmetall-Legierungen für warmbeanspruchte Teile neuzeitlicher Brennkraftmaschinen	Dr.-Ing. P. Sommer	Brennstoff und Wärme-wirtschaft, Halle (Saale)	1937 Heft 6
Weiterentwicklung von Kolbenlegierungen	Dr.-Ing. E. Koch und Dr.-Ing. E. Meyer-Rässler	Jahrbuch der deutschen Luftfahrtforschung, Berlin	1937
Kolbenschäden und daraus folgende neue Anforderungen	Dr.-Ing. P. Sommer	Jahrbuch der deutschen Luftfahrtforschung, Berlin	1938
Oberflächenbehandlung von Leichtmetallkolben	Dr.-Ing. E. Meyer-Rässler	Metallwirtschaft, -wissenschaft, -technik, Berlin	1939 Heft 7
Verschleiß und dessen Verminderung bei Kolben, Kolbenringen und Zylindern von Kraftfahrzeugen	Dipl.-Ing. A. Moser	Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung, Stuttgart	1939 Heft 9
Erforschung und Erprobung neuerer Kolbenbaustoffe	Dr.-Ing. E. Meyer-Rässler	Jahrbuch der deutschen Luftfahrtforschung, Berlin	1939
Die Eignung von Werkstoffen auf Aluminium-Magnesium-Basis für Motorenkolben	Dr.-Ing. E. Meyer-Rässler	Metallwirtschaft, -wissenschaft, -technik, Berlin	1940 Heft 33
Neuere Kolbenversuche	Dr.-Ing. E. Koch	Jahrbuch der deutschen Luftfahrtforschung, Berlin	1940
Kolbentemperaturen in Ottomotoren	Walther Brecht	R. Oldenbourg, Berlin und München	1940
Gaslässigkeitverluste bei Kraftfahrzeugmotoren	Dipl.-Ing. H. Schwarz	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1940 Heft 22
Mikrohärteprüfung im Industrie-Laboratorium	Dr.-Ing. P. Sommer und U. v. Zoepffel	Metallwirtschaft, -wissenschaft, -technik, Berlin	1941 Heft 49/50
Über das Kriechverhalten einiger Aluminiumlegierungen bei erhöhter Temperatur	F. Bollenrath H. Gröber	Vorgetragen vor der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung im Mai 1942	

Titel	Verfasser	Erscheinungsort	Erscheinungszeit
Festigkeitsfragen bei Leichtmetallkolben	Dipl.-Ing. E. Mickel und Dr.-Ing. P. Sommer	Motortechnische Zeitschrift (MTZ), Stuttgart	1943 Heft 10
Über die Widerstandsfähigkeit von Leichtmetall-Kolbenlegierungen gegen Tropfenschlag	Dr.-Ing. P. Sommer und Dipl.-Ing. W. Uthemann	Technische Betriebe, Berlin	1943 Bd. 10
Ölstrahl-Schlagversuche an Kolbenlegierungen	Dipl.-Ing. K. Hörstke und Dr.-Ing. P. Sommer	Technische Berichte, Berlin	1943 Heft 8
Prüfung von Leichtmetallen bei höherer Temperatur unter ruhender Belastung	Dr.-Ing. habil. K. Wellinger und Dipl.-Ing. E. Keil	Zeitschrift für Metall- kunde, Berlin	1943 Heft 9
Verhalten von Leichtmetall- Kolbenwerkstoffen bei betriebsähnlicher Beanspruchung	Dr.-Ing. habil. K. Wellinger und Dr.-Ing. G. Stähli	VDI-Zeitschrift, Berlin	1943 Heft 41/42
Klopfschäden an Kolbenböden und ihre Bekämpfung	Ing. K. Baumann	MAHLE-Druckschrift Nr. 5172	1943
Änderung der Festigkeitseigenschaften einiger Aluminiumlegierungen durch langzeitiges Erwärmen	Prof. Dr.-Ing. habil. F. Bollenrath und Dr.-Ing. H. Gröber	Luftfahrtforschung, Berlin	1943 Heft 10
Verfestigungserscheinungen bei der Schwingungsbeanspruchung von Leicht- metall-Legierungen in der Wärme	Dr.-Ing. habil. K. Wellinger und Dr.-Ing. G. Stähli	TZ für praktische Metall- bearbeitung, Berlin	1943 Heft 1/2
Kolben für Gasmotoren	Ing. K. Baumann	MAHLE-Druckschrift Nr. 5175	1944
Seigerungen von Eisen, Mangan und Titan in Aluminium-Kolbenlegierungen	Dr.-Ing. E. Meyer-Rässler und Dr.-Ing. L. Laurs	Metallwirtschaft, -wissenschaft, -technik, Berlin	1944 Heft 44/47
Leichtmetall als Werkstoff für Kolben und Lager	Dipl.-Ing. E. Mahle	Berg- und Hütten- männische Monatshefte, Wien	1948 Heft 8/11
Leichtere Kolbenwerkstoffe	Dr.-Ing. E. Meyer-Rässler	Entwicklungsarbeiten an Kolben (MAHLE K.G.)	1949 Heft 11
Die Festigkeitseigenschaften der gepreßten Kolbenlegierungen »RR 59« und »Y« im Vergleich zu »MAHLE 124«	Dr.-Ing. P. Sommer	MAHLE-Druckschrift Nr. 5566	1949
Berechnung von Kolbentemperaturen	K. Steinbuch	Ingenieur-Archiv, Berlin	1949 Heft 5
Zur Kinematik der Kolbengeräusche	Dipl.-Ing. A. Meier	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1952 Heft 6
Der Aluminiumkolben im Zylinder des Fahrzeugmotors	Dr.-Ing. E. Koch	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1954 Heft 7



Titel	Verfasser	Erscheinungsort	Erscheinungszeit
Der Leichtmetallkolben und seine Bedeutung für die Aluminiumindustrie	Dipl.-Ing. E. Mahle	Aluminium, Düsseldorf	1955 Heft 2
Über die äußere und innere Kühlung von Zweitakt-Motorradmotoren	Dr.-Ing. E. Kohl	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1957 Heft 7/8
Die deutsche Kolbenindustrie ist auf der Höhe!	Dr.-Ing. E. h. E. Mahle	Krafthand, Bad Wörishofen	1961 Heft 7
Autobau und Autoverteilung – Weltübersicht	Dr.-Ing. E. h. E. Mahle	Krafthand, Bad Wörishofen	1960 Heft 11
Geschichte und Geschichten vom Leichtmetallkolben	Dr.-Ing. E. h. E. Mahle	Automobil-Industrie, Wurzburg	1962 Heft 2
Die Bedeutung des Schmieröls für das Betriebsverhalten der Kolben in einem Verbrennungsmotor	Dipl.-Ing. H. Kleine	Mineralöl-Technik	1962 Heft 13

## II. Arbeiten über Kolbenkonstruktionen

Kolben für Kraftfahrzeugmotoren	Dipl.-Ing. E. Mahle	Deutsche Motorzeitschrift (DMZ), Dresden	1927
Zwei Ausführungsformen von Nelson-Bohnalite-Kolben	Dipl.-Ing. E. Koch	Motorkritik, Frankfurt a. M.	1928
Leichtmetallkolben	Prof. Dr.-Ing. Becker	Verlag Krayn, Berlin	1929
Mathematische Theorie von Leichtmetallkolben mit Invarstreifen	Dipl.-Ing. E. Mahle	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1929 Heft 33/34
Über die Veränderung von Kolbenspielen im Betriebszustand	Dipl.-Ing. E. Koch	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1929 Heft 24
Neuere Kolbenuntersuchungen	Dipl.-Ing. E. Koch	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1930 Heft 24
Beispiele aus dem Kolbenbau 1925–29	Dipl.-Ing. E. Mahle	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1930 Heft 6
Kolbenspiel für Fahrzeugmotoren	Dipl.-Ing. E. Mahle	Krafthand, Berlin	1930 Heft 7
Kolben im Kraftfahrzeugbau	Dipl.-Ing. E. Mahle	Deutsche Motorzeitschrift (DMZ), Dresden	1930
Neuere Kolbenuntersuchungen II	Dipl.-Ing. E. Koch	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1931 Heft 30
Zweimetall-Kolben	Dipl.-Ing. E. Mahle	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1931 Heft 9
Verbesserung der Lebensdauer von Zylinder, Kolben, Kolbenringen	Dipl.-Ing. E. Mahle	Verkehrstechnik, Berlin	1932 Heft 25

Titel	Verfasser	Erscheinungsort	Erscheinungszeit
Kolben mit hartem Kolbenringträger	Dipl.-Ing. E. Mahle	Nickel-Berichte, Frankfurt a. M.	1932 Heft 6
Neue Wege im Kolbenbau	Dipl.-Ing. E. Mahle	Deutsche Motorzeitschrift (DMZ), Dresden	1933
Leichtmetallkolben mit Schirmringen	Dr.-Ing. Otto Steinitz	Deutsche Motorzeitschrift (DMZ), Dresden	1933 Heft 5
Leichtmetallkolben für Kraftmaschinen	Dipl.-Ing. E. Mahle	Werft – Reederei – Hafen, Berlin	1933 Heft 18
Arbeitsteilung im Motorkolben	Dr.-Ing. Otto Steinitz	Deutsche Motorzeitschrift (DMZ), Dresden	1934 Heft 7
Eloxal und Alumilite: der Leichtmetallkolben mit Oxydhaut	Dipl.-Ing. E. Mahle	Der Reparaturkolben, Frankfurt a. M.	1934 Heft 10/11/12
Neuerungen im Kolbenbau	Dipl.-Ing. E. Mahle	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1934 Heft 12
Neuzeitlicher Kolbenbau	Dipl.-Ing. E. Mahle	Der Reparaturkolben, Frankfurt a. M.	1934 Heft 12 1934 Heft 1
Vom »quergeschlitzten« Motorkolben	Pat.-Ing. G. Gressenich	Auto und Krafrtrad, Berlin	1935 Heft 1/2
Weiterentwicklung im Kolbenbau	Dipl.-Ing. E. Mahle	MAHLE-Druckschrift Nr. 401	1935
Neues Verbundgußverfahren für die Herstellung von Kolben, insbesondere »feuerfester« Kolben	Pat.-Ing. G. Gressenich	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1935 Heft 24
Kolben für Flugmotoren	Dr.-Ing. P. Sommer	Luftwissen, Berlin	1938 Heft 3
Die Vereinigung artverschiedener Werkstoffe bei Motorkolben	Pat.-Ing. G. Gressenich	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1938 Heft 12
Einige grundsätzliche Gesichtspunkte für die Gestaltung von Kolben- Baupformen	Dr.-Ing. P. Sommer	Motortechnische Zeitschrift (MTZ), Stuttgart	1939 Heft 1
Die Entwicklung der Flugmotor-Kolben	Dipl.-Ing. H. Schwarz	Der Flieger, München	1941 Heft 5/6
Fortschritte im Kolbenbau	Dipl.-Ing. E. Mahle	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1942 Heft 21
Neue Leichtmetallkolben mit Stahlstreifen	Ing. W. Kohler	VDI-Zeitschrift, Berlin	1942 Heft 9/10
Verbesserung von Kolben- Baupformen durch spannungsoptische Untersuchungen	Dipl.-Ing. E. Mickel	Entwicklungsarbeiten an Kolben (MAHLE K.G.)	1949 Heft 11
Bolzen – Büchsen – Löcher	Ing. Hänsel	Motorrad, Stuttgart	1954 Heft 18

Titel	Verfasser	Erscheinungsort	Erscheinungszeit
MAHLE-Leichtmetall-Kolben für Großmotoren	Dipl.-Ing. H. Barth	Motortechnische Zeitschrift (MTZ), Stuttgart	1954 Heft 11
Der Leichtmetallkolben im Schiffsbetrieb	Dipl.-Ing. J. Gadow	Schiff und Hafen, Hamburg	1956 Heft 10
Leichtmetall-Großkolben mit Ölkühlung	Dipl.-Ing. J. Gadow	Motortechnische Zeitschrift (MTZ), Stuttgart	1957 Heft 11
Entwicklungsstand von Kolben, Kolbenringen und -bolzen der Personenwagenmotoren in USA	Dr.-Ing. E. h. E. Mahle und Dipl.-Ing. M. Röhrle	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1958 Heft 3 und 5
Technischer Stand der Kolben, Kolbenringe und -bolzen in deutschen Personenwagen	Dr.-Ing. E. h. E. Mahle und Dipl.-Ing. M. Röhrle	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1958 Heft 11 u. 12
Vergleich von Kolben, Kolbenringen und -bolzen in deutschen und amerikanischen Personenwagenmotoren	Dr.-Ing. E. h. E. Mahle und Dipl.-Ing. M. Röhrle	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1959 Heft 6
Autothermatik-Kolben	Dr.-Ing. A. Meier	Motortechnische Zeitschrift (MTZ), Stuttgart	1958 Heft 8
Leichtmetallkolben mit Ringträgern aus härteren Werkstoffen	Ing. W. Kohler	Metall, Berlin	1959 Heft 1
Temperaturverhältnisse bei Al-Kolben mit und ohne Kühlung für Dieselmotoren unter Berücksichtigung der wichtigsten Festigkeitsanforderungen	Dr.-Ing. A. Meier	CIMAC	1959
Amerikanische Kompaktwagen – Deutsche Sechszylinder-Personenwagen Ein Vergleich hinsichtlich der Motor- und Kolbendaten	Dipl.-Ing. M. Röhrle	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1960 Heft 8
Maßnahmen zur Regelung der Wärmeausdehnung bei Leichtmetallkolben	Ing. W. Kohler	Metall, Berlin	
<b>III. Arbeiten über Oberflächenbehandlung</b>			
Neue Kolbenoberflächen	Dr.-Ing. E. Koch und Dr.-Ing. E. Meyer-Rässler	Jahrbuch der deutschen Luftfahrtforschung, Berlin	1937
Leichtmetallgleitflächen	Dr.-Ing. P. Sommer	Maschinenbau / Betrieb, Berlin	1938 Heft 21/22
Gleitflächen- und Bodenschutzfragen bei Kolben	Dr.-Ing. P. Sommer	Jahrbuch der deutschen Luftfahrtforschung, Berlin	1939
Oberflächenbehandlung von Leichtmetallkolben	Dr.-Ing. E. Meyer-Rässler	Metallwirtschaft, -wissenschaft, -technik, Berlin	1939 Heft 7

Titel	Verfasser	Erscheinungsort	Erscheinungszeit
Laufflächenschutz für Leichtmetallkolben als Mittel gegen Drücken und Fressen	Dipl.-Ing. H. Schwarz	Motortechnische Zeitschrift (MTZ), Stuttgart	1941 Heft 12
Neuartige Laufflächenschutzverfahren für Kolben von Verbrennungsmotoren	Dr.-Ing. E. Meyer-Rässler	VDI-Zeitschrift, Berlin	1942 Heft 15/16
Galvanische Eisenschichten auf Aluminiumkolben	Dr.-Ing. E. Meyer-Rässler und K. O. von Kellenbach	Technische Berichte, Berlin	1944 Bd. 11
<b>IV. Arbeiten über Kolbenfertigung</b>			
Messung von Kolben auf Schiefelage	Dipl.-Ing. E. Mahle	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1929 Heft 30
Ein interessantes Gußstück	Dipl.-Ing. E. Mahle	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1929 Heft 22
Verlässliche Güte verlangt viel Kontrolle	Dipl.-Ing. E. Mahle	Der Werksleiter, Stuttgart	1931 Heft 8
Neue Kolbenoberflächen	Dr.-Ing. E. Koch und Dr.-Ing. P. Sommer	Jahrbuch der deutschen Luftfahrtforschung, Berlin	1937
Verbesserung der Laufeigenschaften der Kolben von Kraftwagenmotoren	Dr.-Ing. E. Koch	VDI-Zeitschrift, Berlin	1937 Heft 51
Die Kolbenringnut	Dipl.-Ing. E. Mickel	Luftwissen, Berlin	1939 Heft 12
Das Messen von Bohrungen an Kolben schnelllaufender Verbrennungskraftmaschinen	Dipl.-Ing. A. Moser	Werkstattechnik / Der Betrieb, Berlin	1943 Heft 5
Zur Bearbeitung von Kolben für Verbrennungsmotoren	Dipl.-Ing. H. Barth	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1952 Heft 4
<b>V. Arbeiten über Kolbenzubehör</b>			
Über Kolbenringprüfung	Dipl.-Ing. E. Koch	Deutsche Motorzeitschrift (DMZ), Dresden	1929 Heft 11
Prüfung der Kolbenringe auf Härte	Dipl.-Ing. E. Mahle	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1929 Heft 21, 23, 25, 27
Etwas über Ölabstreifringe	Dipl.-Ing. E. Mahle	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1929 Heft 35
Neue Untersuchungen über den Gütegrad von Kolbenringen in Abhängigkeit vom Herstellungsverfahren	Dipl.-Ing. N. Stern	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1931 Heft 4
Kolbenbolzen-Toleranzen	Dipl.-Ing. E. Koch	Maschinenbau, Berlin	1931 Heft 13

Titel	Verfasser	Erscheinungsort	Erscheinungszeit
Technisches über Kolbenringe	Dipl.-Ing. H. Mundorff	MAHLE-Druckschrift Nr. 880	1939
Kolbenringe für Autobahnbeanspruchungen	Dipl.-Ing. H. Mundorff	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1939 Heft 3
Das Festwerden von Kolbenringen in einem luftgekühlten Zweitaktmotor und seine Beeinflussung durch verschiedene Maßnahmen	Dipl.-Ing. W. Gebhardt	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1939 Heft 18
Der Sitz des Kolbenbolzens im Kolben bei schnellaufenden Verbrennungskraftmaschinen	Dipl.-Ing. A. Moser	Motortechnische Zeitschrift (MTZ), Stuttgart	1941 Heft 12
Zur Festigkeit von Kolbenbolzen	Dr.-Ing. P. Sommer und Dipl.-Ing. E. Mickel	Motortechnische Zeitschrift (MTZ), Stuttgart	1941 Heft 12
Das Messen von Kolbenbolzen-durchmessern	Dipl.-Ing. A. Moser	Werkstattstechnik und Werksleiter, Berlin	1942 Heft 23/24
Abdichtung von Kolben durch Stahlbandkolbenringe	Dipl.-Ing. H. Mundorff	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1943 Heft 4
Die Werkstofffrage beim Kolbenbolzen	Dipl.-Ing. E. Mickel und Dr.-Ing. P. Sommer	Motortechnische Zeitschrift (MTZ), Stuttgart	1944 Heft 1
Einfluß des Stahles auf die Haltbarkeit von Kolbenbolzen	Dipl.-Ing. E. Mickel und Dr.-Ing. P. Sommer	Archiv für das Eisen- hüttenwesen	1944 Heft 9/10
Weshalb verwendet man verchromte Kolbenringe?	E. Nitzsche und E. W. Portmann	Motortechnische Zeitschrift (MTZ), Stuttgart	1950 Heft 2
Verchromte Kolbenringe im amerikanischen Motorenbau	Dipl.-Ing. H. Barth	Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Stuttgart	1951 Heft 11

#### VI. Arbeiten über Leichtmetallzylinder

Verchromen von Leichtmetallzylindern	Dr.-Ing. E. Meyer-Rässler	Metalloberfläche, München	1951 Heft 3
Leichtmetallzylinder mit hartverchromter Lauffläche	Dr.-Ing. E. Meyer-Rässler	Aluminium, Düsseldorf	1952 Heft 1/2
Hartverchromung von Aluminium	Dr.-Ing. E. Meyer-Rässler	Metall, Berlin	1952 Heft 17/18
Verchromte Aluminiumzylinder in luftgekühlten Motoren und Weitere Fortschritte mit verchromten Leichtmetallzylindern	Dipl.-Ing. E. Mahle und Dr.-Ing. A. Meier	Motortechnische Zeitschrift (MTZ), Stuttgart	1953 Heft 3



**MAHLE stellt her**

**Kolben**

**Zylinder und Büchsen**

**Gußteile aus Leichtmetall**

**Schmiedestücke aus Leichtmetall**

**Zylinderköpfe aus Leichtmetall**

**Pleuelbüchsen aus Leichtmetall**

**Druckguß**

in den Werken  
Stuttgart-Bad Cannstatt, Rottweil a. N.  
und Markgröningen  
der MAHLE Komm.-Ges.:

für alle Verbrennungsmotoren und  
Kompressoren in zahlreichen Bauarten,  
gegossen und geschmiedet,  
aus Leichtmetall-Speziallegierungen,  
Grauguß und Sondergußeisen

aus Leichtmetall mit verchromter Lauffläche  
(Cromal-Zylinder),  
aus Leichtmetall mit Gußeisenbüchsen,  
mit und ohne AL-FIN-Bindung,  
aus Leichtmetall mit aufgespritzter  
Spezial-Lauffläche (Ferral-Zylinder),  
aus Leichtmetall mit mechanisch verankerter  
Gußeisenbüchse (Biral-Zylinder).

in Niederdruckguß, Sand-, Kokillen-,  
Verbund- und Densalguß nach besonderen  
Herstellungsverfahren.

im Werk Fellbach bei Stuttgart  
der MAHLE-Werk GmbH.:

für alle Industriezweige aus Aluminium-,  
Magnesium- und Zinklegierungen











