

**HOLZER · UNTERSUCHUNGEN ZUM VERSCHLEISS
IM ZYLINDER VON VERBRENNUNGS-MOTOREN**

UNTERSUCHUNGEN ZUM VERSCHLEISS IM ZYLINDER VON VERBRENNUNGS-MOTOREN

**Eine Sammlung und Besprechung von Versuchen aus allen Gebieten,
die mit dem Zylinderverschleiß zusammenhängen**

VON

KARL A. HOLZER

MIT 106 ABBILDUNGEN



VERLAG VON R. OLDENBOURG

MÜNCHEN 1952

Copyright 1951 by R. Oldenbourg

Printed in Germany

Buchbinderarbeiten: R. Oldenbourg, Graphische Betriebe GmbH., München

INHALT

I. Vorwort	11
Einleitung	13
Die Verschleißfrage	16
II. Zylinderlaufbüchsen	20
Reibkräfte an der Zylinderwand	20
Die Form des Verschleißes am Zylinder	23
Konstruktive Einflüsse auf die Verschleißform	26
Zylinderbüchsenmaterial	27
Versuche über Zylinderverschleiß mit verschiedenem Material	31
Die Herstellung der Zylinderlaufbüchsen	33
Die Oberflächenbehandlung der Zylinderlaufbüchsen	34
III. Kolbenringe	38
Verschleiß der Kolbenringe	39
Form des Ringverschleißes und Temperaturabhängigkeit	40
Einfluß der Ringhöhe auf die Abdichtung und den Verschleiß	41
Einfluß der Kantenabrundung am Kolbenring	43
Art der Ringabnutzung	45
Flutternde Kolbenringe	46
Ringeigenschaften	47
Der Radialdruck am Ringumfang	47
Der Anpressungsdruck der Kolbenringe	48
Die Dichtheit am Ringstoß	49
Herstellung der Kolbenringe	49
Kolbenringmaterial	49
Herstellungsverfahren	50
Oberflächenbehandlung	51
IV. Kolben	57
Kolbenschäden	57
Kolbenverschleiß	59
Vergleich des Verschleißes von Aluminium- und Graugußkolben	60
Feingefüge und Laufeigenschaften	62
Notlaufverhalten	62
Charakteristik der Kolbenwerkstoffe	63
Verschleißwiderstand	63

Reibungswiderstand	63
Grauguß- und Leichtmetall-Legierungen	63
Aushärtung der Aluminium-Legierungen	66
Verhalten in der Wärme	68
Wärmeleitfähigkeit	69
Warmfestigkeit	69
Warmhärte	70
Oberflächenbehandlung hochbeanspruchter Kolben	71
 V. Einfluß der Oberfläche auf den Verschleiß	 73
Die Oberfläche metallischer Körper	73
Rauigkeitsgrad bearbeiteter Flächen	74
Rauigkeit der Motorflächen	76
Die Abnützung bearbeiteter Oberflächen	77
Der Gefügebau metallischer Oberflächen	78
Werkstoffhärte	80
Die Bedeutung der Brinellhärte	82
Wechselwirkung zwischen Werkstoffhärte und Oberflächenbearbeitung	83
Einfluß der Vorbearbeitung	84
Tiefenwirkung der Verspannung	84
Zylinder-Büchsen-Bearbeitung	85
 VI. Temperaturen und Ölfilm an Kolben und Zylinder	 89
Kolbentemperaturen	91
Ölfilm am Kolben	94
Zylinderwandtemperaturen	95
Der Ölfilm an der Zylinderwand	97
Die Neubildung des Ölfilms	99
 VII. Rückstände im Motor	 101
Der Metallabrieb	101
Staub im Motor	102
Einfluß des Kraftstoffes auf die Rückstandsbildung	106
Kraftstoff im Schmieröl	108
Wasser im Schmieröl	111
Ruß im Schmieröl	112
Schwarzwerden von Autoöl im Gebrauch	114
Rückstände im Verbrennungsraum	115
Die Verkokung bzw. die Ölkohlebildung	115
Oxydationsprodukte des Schmieröles	116
Der Vorgang der Harzbildung	119
Darstellung der Oxydationsprodukte	120
Schlamm im Motor	122
Versuche des Research Committee	125
Versuche von Prof. Dr. Georg Beck	126

VIII. Kolbenringkleben	127
Versuche von C. A. Bouman	129
Konstruktive Maßnahmen	130
Versuche von Dr. Ing. Kern	131
Kolbenringkleben bei Halblastlauf	132
Kolbenringkleben bei Flugmotoren	135
Die Klebkraft der Harze	138
IX. Untersuchung gebrauchter Motoröle	140
Ursache der Veränderung des Öles im Motor	140
Altöluntersuchungen	142
Wann ist ein gebrauchtes Öl unbrauchbar?	143
Entnahme von Schmierölproben	144
Die Neutralisationszahl bei gebrauchten Ölen	145
Die Verseifungszahl bei gebrauchten Ölen	145
Feste Fremdstoffe	145
Bestimmung der Gesamtverschmutzung nach Kadmer	146
Der Aschegehalt nach DIN DVM 3657	146
Conradson-test	147
Untersuchung auf Hartasphalt	148
Emulsionsfähigkeit der Öle	149
Schmierfähigkeit gebrauchter Schmieröle	149
Schlamm-löslichkeit der Schmieröle	151
X. Die Schmieröl-Untersuchung auf der Reichsfahrt für heimische Kraftstoffe 1935	152
Die Bewertung der Verschleißzahlen	152
Die Schmieröluntersuchung	153
Resultate der Untersuchungen	154
Erkenntnisse aus der Versuchsfahrt	164
XI. Der molekulare Aufbau der Schmieröle und die Einwirkung von Sauerstoff	167
Einleitung	167
Der molekulare Aufbau der Schmieröle	169
Einfluß des molekularen Aufbaus auf das Viskositätsverhalten	171
Einfluß des strukturellen Aufbaues auf die chemische Beständigkeit	174
Einfluß der Struktur auf die Schmierfähigkeit	174
Die Einwirkung des Sauerstoffes	176
Verhalten gegen Sauerstoff	177
Die Arten der Schmieröloxydation	178
Polymerisation	180
Einfluß der Raffinationsmethoden auf die Schmierölqualität	182
Einfluß der Raffinationsmethoden auf die Schmierfähigkeit	183
Zusammenhang zwischen Raffination und Oxydation	184
Die katalytische Wirkung der Metalle auf die Oxydation von Schmierölen	185
Einfluß des Gasdruckes auf die Oxydation	185
Einfluß der Temperatur auf den Oxydationsverlauf	185

XII. Schmieröl-Eigenschaften und Untersuchungen zur Ölauswahl	187
Auswahl der Schmieröle	187
Die Viskosität der Schmieröle	191
Ölzähigkeit und Anlaßwiderstand	193
Motoreinbeitsöl 1940 der Wehrmacht	195
Stockpunkt und Kälteverhalten der Öle	196
Die Auswahl der Viskosität	197
Mängel der Viskositätsmessungen	201
Neuere Methode der Schmieröluntersuchung	202
Die Temperaturabhängigkeit der Zähigkeit von Schmierölen	203
Zähigkeit bei niederen Temperaturen	204
Begriff der Polhöhe	205
Begriff des Viskositätsindex	206
Bedeutung der Flüchtigkeit im Motor	206
Die Flüchtigkeit der Schmieröle	207
Verdampfung von Schmierölen	208
Neutralisationszahl (NZ)	209
Verseifungszahl (VZ)	210
Spezifisches Gewicht	210
Flammpunkt und Brennpunkt	212
Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärme	213
 XIII. Schmieröl-Verbrauch	215
Verlustquellen	215
Einfluß des Motors auf den Ölverlust	216
Einfluß des Schmieröles	216
Ölpumpe und Schmierölmenge	219
Einfluß der Ölabstreifringe	221
 XIV. Wechselwirkung zwischen Schmieröl und Metall	222
Wechselwirkung im Grenzfilm zwischen Schmieröl und Metall	222
Die Definition der Reibungsarten	223
Physikalische Grundlagen der Grenzflächenaktivität	227
Temperaturabhängigkeit der Haftfestigkeit	229
Nachteile der aktiven Gruppen	229
Feststellung der Dipolmomente im Schmieröl	230
Compoundierte Öle	231
Technische Ausdrücke der Schmiereigenschaften	231
Oberflächenspannung	232
Zusammenstellung der Untersuchungsmethoden von Schmierölen	235
Bestimmung der Benetzungsfähigkeit von Schmierölen	237
Molekulargewichtsbestimmung	238
Erdenmethode nach Pöhl zur Bestimmung der Harze	240
Untersuchung der Klebfestigkeit der Harze	241

XV. Korrosionsverschleiß und seine Bekämpfung	242
Korrosion	242
Verhalten der Metalle gegenüber Korrosion	245
Einfluß des Korrosionsmittels	249
Einfluß der Zylinderwandtemperatur auf den Verschleiß	252
Angriffsvermögen von Schmierölen auf Metalle	253
Der Einfluß der Dieselmotorenstoffe auf den Verschleiß	255
Der Schwefel im Kraftstoff	257
Inhibitorwirkung im allgemeinen	259
Inhibitoren	262
Die Verwendung von Graphit als Schutzmittel	264
Zusatzmittel zu Motorschmierölen	266
Detergierende und dispersierende Zusätze	267
Oxydation von Schmierölen	268
Antioxydationsmittel	269
Einfluß der Temperatur auf die Oxydation	269
Einfluß der Metalle auf die Oxydation der Schmieröle	270
Stockpunkterniedriger	271
Zusätze zur Verbesserung des Viskositätsindex	271
Die Entwicklung der Motorenöle	272
Hochleistungsöle	273
Prüfung der Hochleistungsöle	275
Versuche mit Motorschmierölen der PTT-Verwaltung in der Schweiz	277
 XVI. Ein Vorschlag zur Untersuchung der chemischen Vorgänge im Motor- zylinder	 279
 XVII. Autorenverzeichnis	 286
 XVIII. Sachregister	 288

VORWORT

Vorliegende Sammlung von Versuchen zum Zylinderverschleiß und deren Besprechung sind aus dem Bedürfnis des praktisch tätigen Ingenieurs entstanden, alle denkbaren Einflüsse auf den Zylinderverschleiß in Verbrennungsmotoren gegenwärtig zu haben.

Entsprechend der gestellten Aufgabe wurde aus allen Wissensgebieten nur das in kürzester Form herausgehoben, das den Motoringenieur unmittelbar interessiert. Über gewisse Themen konnten nach dem heutigen Stand der Forschung nur Anhaltspunkte gegeben werden, die naturgemäß der weiteren Ergänzung bedürfen.

Wenn man die einschlägige Literatur studiert, stößt man auf so viele Widersprüche, daß man den Eindruck gewinnt, man könne überhaupt für die praktischen Tagesfragen des Motoreningenieurs keine zuverlässigen Angaben finden.

Aber nicht nur in der Literatur wird der Ingenieur solche Widersprüche finden, sondern auch in seiner eigenen Praxis. Aus anscheinend völlig unerklärlichen Gründen leidet der eine Motor an starkem Zylinderverschleiß, der andere nicht, oder eine lang erprobte Ölsorte versagt plötzlich, und ein Wechsel der Ölsorte führt zum Erfolg.

Gerade die in der Praxis sich ergebenden Widersprüche haben den Verfasser veranlaßt, sein Möglichstes zur Klärung beizutragen und den vorliegenden Erfahrungsschatz zu ordnen.

Es ist noch nicht gesagt, daß einzelne Versuchsergebnisse, welche Widersprüche ergeben, falsch sind; meist betreffen sie nur einen nicht vergleichbaren Zustand des Motors; der Fehler, der gemacht wird, ist der, daß die sich aus einzelnen Versuchen oder praktischen Erfahrungen ergebenden Resultate verallgemeinert werden.

Die Fehltritte in den mit dem Verschleiß zusammenhängenden Fragen entstehen vielfach daraus, daß der betreffende Motorzustand nicht genügend erforscht wurde.

Wenn dieses Buch zur Erkenntnis des tatsächlichen Betriebszustandes eines Motors beitragen kann, oder die Möglichkeit bietet, bei Motorversuchen alle möglichen Einflüsse auf das Versuchsergebnis leichter zu überschauen, so ist der Zweck dieser Arbeit vollkommen erfüllt.

Der Verschleiß in den Motorlagern bedarf einer gesonderten Behandlung in einer weiteren Ergänzung.

Karl A. Holzer

EINLEITUNG

Motorschäden

Die Sammlung und Auswertung von Motorschäden, etwa geordnet nach den einzelnen Motorteilen, wie Zylinderkopf, Triebwerksteile, oder nach den Schadensursachen, wie Konstruktions- und Materialfehler usw., wäre sicherlich eine reizvolle Aufgabe. Es gibt Motorschäden, die von großem allgemeinem Interesse sind, und andere, die durch ihre besondere Eigenart hervorstechen; so zum Beispiel, brannten bei einem Fahrzeugdieselserienweise die Vorkammern durch; es zeigte sich nach langem Suchen, daß die Abdichtung der Vorkammer gegenüber dem Wasserraum des Zylinderkopfes ungenügend war und dadurch Wasser in kleinen Tropfen in die Vorkammer eintrat. Dieses Wasser wurde dort infolge der hohen Temperatur in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten, und der Sauerstoff im status nascendi greift die Metallwände an. Eine Änderung der Abdichtung behob den Schaden. Ein anderer Fall, der monatelanges Kopfzerbrechen machte, ist der, daß sich bei einem Otto-Motor serienmäßig plötzlich starke, aber ganz unregelmäßige Schläge zeigten. Die Ursache wurde schließlich in einem hohlgebohrten Kompressionshahn entdeckt, in dem sich zündfähige Gase sammelten, die dann zu unregelmäßigen Fehlzündungen Anlaß gaben. Ein dritter Fall aus dem Großmotorenbau betrifft die Korrosionserscheinung an wassergekühlten Kolbenstangen von Schiffsmotoren. Derartige Schäden, die immer wieder in völliger Neuartigkeit auftreten, sind jedem Ingenieur bekannt und werden bei einem Erfahrungsaustausch oft besprochen.

In dem vorliegenden Buch besteht aber eine andere Absicht. Neben den interessanten Fällen, die den Motorbauer außerordentlich fesseln mögen, gibt es an sich weniger interessante, dafür aber in ihrer wirtschaftlichen Bedeutung sehr viel wichtigere Schäden. Das sind jene, die durch den normalen oder abnormalen Verschleiß von Motorteilen entstehen. Diese Art der Schäden, die in Form von Leistungsverlust oder übermäßigem Kraftstoff- und Schmierölverbrauch ihre erste wirtschaftliche Auswirkung finden und mit völlig verschlissenen Kolben, Kolbenringen, Laufbüchsen und Motorlagern enden, haben an sich gegenüber den obengenannten Schäden die positive Seite, daß sie vermieden werden können, während die ersteren Schäden schwer vorzusehen sind.

Die Aufgabe des Buches ist es, die wirtschaftlich so bedeutenden Verschleißschäden zu behandeln.

Welche Wichtigkeit dieser Aufgabestellung zukommt, geht daraus hervor, daß mindestens 90% aller Motorschäden in diesen Bereich gehören.

Der Verschleiß im Motor tritt besonders an drei Stellen auf: im Zylinder, an den Lagern und in den Steuerungsorganen. Der Zylinderverschleiß ist der wichtigste. Hier ist das Gold zu gewinnen, denn der geringste Verschleiß im Zylinder ist eine Ursache auch für den Verschleiß in den Lagern und Steuerungsorganen. Sobald der Verbrennungsraum nicht mehr für sich abgeschlossen bleibt und seine heißen und chemisch aggressiven Verbrennungsprodukte in das Innere des Motors senden kann, ist dort ein Zustand der Unordnung geschaffen. Das Schmieröl, das bestimmt ist, in den edelsten Teilen des Motors als Verschleißschutz zu wirken, wird verschmutzt und zum Träger verschleißfördernder Produkte.

Zur wirksamen Bekämpfung des Verschleißes bedarf es einer möglichst genauen Kenntnis der wechselseitigen Einwirkungen der beteiligten Materialien, der Zylinderwand, des Kolbens und der Kolbenringe mit dem Brennstoff und dem Schmieröl.

In den ersten drei Kapiteln — Zylinder, Kolbenringe, Kolben — ist das dem Motoringenieur Bekannte kurz zusammengefaßt, damit es für die späteren Schlußfolgerungen gegenwärtig ist. Es kann kein Verschleißproblem gelöst werden, ohne daß man nicht eingehend die Gestaltung der Materialflächen berücksichtigt, welche die Grundlage für die Vorgänge auf der Oberfläche bilden; denn Materialstruktur, Gasdruck und Temperatur beeinflussen nicht nur die mechanischen Reibvorgänge, sondern es spielen sich auf der Metalloberfläche auch die topochemischen Umwandlungen ab, die für die Verschleißfrage von mindestens gleicher Bedeutung sind.

Diese chemischen Umwandlungen lassen sich praktisch nur in der Art der Rückstände erkennen, die sich aus Metallabrieb, Verbrennungsrückständen und Schmierölalterungsprodukten zusammensetzen.

Aus der Veränderung dieser Rückstände kann man manches entnehmen: mehr Ruß — schlechtere Verbrennung, viel Staub — beschädigte Luftfilterung, starker Gehalt an Asphalt und Harzen — mangelhafte Kraftstoffsorte usw.

Von besonderer Bedeutung sind gerade diese klebrigen Rückstände für das Kleben der Kolbenringe, das im Kapitel VIII behandelt wird.

Die Rückstände sammeln sich im Ölsumpf und sind nur durch die Untersuchung des gebrauchten Öles zu erfassen. Hier wird das Schmieröl weniger wegen seiner selbst untersucht, sondern nur, um die für den Motorbetrieb charakteristischen Beimengungen zu erforschen.

Im Kapitel X werden als Beispiele derartige Auswertungen der Schmieröluntersuchungen gebracht, wie sie erstmalig auf der Reichsfahrt für heimische Kraftstoffe einheitlich für viele Wagen durchgeführt wurden.

Schon mit der Untersuchung der gebrauchten Schmieröle betritt man einen Bereich, in dem sich die Erfahrungen des Motoringenieurs mit denen des Chemikers treffen müssen. Beide müssen die Probleme des anderen soweit kennen, daß es ihnen möglich ist, ihr eigenes Gebiet auf das des anderen einzustellen und in die schöpferische Sphäre ihres Denkens einzuschließen. Der Chemiker

kann nichts Nützliches leisten, wenn er die Oberflächenstruktur von Zylinder und Kolben nicht kennt, wenn er in seiner Überlegung nicht die chemischen Möglichkeiten überschauen kann, die sich aus der Zusammensetzung der Metalllegierungen, der Temperaturen und Drücke ergeben. Umgekehrt kann der Ingenieur viele Erscheinungen des praktischen Betriebes nicht richtig beurteilen, wenn er sich über den chemischen Charakter des Schmieröles und seiner Oxydationsprodukte sowie der chemischen Umwandlungen der Verbrennung nicht im klaren ist. Der Ingenieur wird erstaunt sein, welch breiten Raum das Schmieröl in diesem Buche einnimmt, der ihm nicht zustünde, wenn es sich ausschließlich um die Schmierung handeln würde. Die große Rolle kommt ihm darum zu, weil das Schmieröl nicht nur als Mittel zur Verringerung der Reibung, sondern auch als Beförderer und Ablader von Rückständen dient. Auch das Schmieröl hat eine Art „Gefügestruktur“. Kyriopolus hat nicht mit Unrecht gesagt, daß der konstitutionelle Aufbau des Schmieröles einem Kristallhaufen schon wesentlich ähnlicher ist als dem Gefüge einer Flüssigkeit.

Auch diese Molekularstruktur der Schmieröle ist von wesentlicher Bedeutung für die chemischen und physikalischen Vorgänge an der Zylinderwand, weil mit ihr die mehr oder weniger feste Bindung einzelner Moleküle zusammenhängt, deren Losreißung die Bildung neuer, unter Umständen gefährlicher Produkte beeinflußt.

Die Wechselwirkung zwischen Schmieröl und Metall bringt Klarheit in das Gebiet der Grenzschmierung und gewährt einen Einblick in das so wichtige Gebiet der Schmierfähigkeit und Haftfestigkeit, zwei Begriffe, die in letzter Zeit umstritten waren.

Zu den motortechnischen Aufgaben, die das Schmieröl betreffen, gehört noch der Anlaßvorgang, besonders bei Fahrzeugmotoren. Sobald die Temperaturen des Motors etwa minus 7° unterschreiten, beginnen Anlaßschwierigkeiten, die nur durch eine besonders sorgfältige Auswahl der Ölsorte behoben werden können. Bei der Auswahl der Öle müssen überhaupt sehr viele alte Anschauungen durch neue ersetzt werden, die im Kapitel XII zusammengefaßt sind.

Es ist unmöglich, einen günstigen Ölverbrauch ohne Gefährdung des Motors zu erzielen, wenn man nicht die Zähigkeit des Öles den Erfordernissen des Motors in seinem gegebenen Betriebszustand anpaßt. Die Zusatzmittel, die dem Schmieröl beigegeben werden können, bedeuten eine Neuerung, deren spätere Ausnützung heute noch nicht überblickt werden kann. Die Ursache des mangelnden Erfolges bei der Verwertung von chemischen Zusätzen zur Oxydationsverhinderung, die auf anderen Gebieten mit großem Erfolg angewendet werden, liegt wohl zum großen Teil darin, daß der Motorenbauer noch nicht zu Untersuchungsmethoden gekommen ist, die mit Sicherheit gestatten, einzelne Vorgänge so herauszulösen, daß einerseits die motortechnischen Belange gewahrt sind, andererseits aber eine exakte Erforschung des einzelnen Vorganges möglich ist.

I. DIE VERSCHLEISSFRAGE

Noch im Jahre 1935 wies Karl Sipp darauf hin, daß die Verschleißfrage gleiten-der Flächen noch voll Widersprüche ist, und daß es auch an systematischer Untersuchung mangelt.

Inzwischen ist eine gewisse Klärung wenigstens von der metallurgischen und mechanischen Seite her eingetreten, in der sich verschiedene Forschungsarbeiten niedergeschlagen haben. Die Gießereifachleute sind in der Herstellung verschleißfester Metalle zu Erkenntnissen gelangt, die heute schon eine feste Grundlage bilden, und man hat den Eindruck, daß der Motorenbau dabei einen recht großen Anteil hat. Mit dem Aufkommen des Fahrzeugdiesels mit seinen starken Schlägen auf die engbegrenzten Kurbel- und Pleuellager trat die Notwendigkeit ein, nach neuen Lagerstoffen zu suchen, weil das altbewährte Weißmetallager dieser Beanspruchungsart zu wenig Widerstand entgegensetzen konnte. Man mußte nach härteren und weniger plastischen Legierungen suchen, was schließlich mit der allgemeinen Verwendung von Bleibronzen für diese Zwecke seinen Abschluß fand. Auch der Zinnmangel und die Suche nach gleichwertigen Ersatzstoffen hat wesentlich zur Klärung beigetragen. Gerade diese Forschungsarbeiten, die in den ersten Weltkrieg zurückreichen und damals die zinnarmen Lagerausgüsse für Fahrzeugmotoren zum Ergebnis hatten, führten zur richtigen Begriffsbildung, wie eine Metallstruktur für reibende Teile gestaltet werden muß, um sie verschleißfest zu machen. Es waren die Braunschweiger Metallwerke, die mit der Bezeichnung „Gittermetalle“ für ihren Lagerschalenausguß den richtigen Ausdruck prägten.

Ein gitterförmiges Netzwerk harter Metallkristalle ist kombiniert mit weichen Bestandteilen. Erstere sollen den Lagerdruck aufnehmen und gegen die Reibkräfte in der Bewegungsrichtung widerstandsfähig sein, letztere sollen dieses Gitterwerk harter Metalle elastisch betten und auch eine gewisse Plastizität wahren. Eine solche Kombination technologisch verschiedener Kristallarten ergibt die guten Laufeigenschaften.

Dieses Prinzip der strukturellen Gestaltung hat sich für Materialien, die einem Reibungsverschleiß unterworfen sind, allgemein bewährt. Beim Perlitguß der Zylinderlaufbüchsen sind es vor allem das Phosphidnetzwerk und die Zementitlamellen, die in der perlitischen Grundmasse das harte Netzwerk bilden. Bei den Kolbenmaterialien, z. B. KS 280, sind es die harten Siliziumkristalle in der weicheren eutektischen Grundmasse, bei der Bleibronze — die Einlagerung der weichen plastischen Bleikristalle in den härteren Kupferkristallen. Auch bei Bremsbelägen für Fahrzeuge und andere Zwecke hat sich dieses Prinzip be-

währt, man denke an die allgemein verwendeten Beläge, bei denen in einem Drahtnetz aus Messing weiche plastische Massen eingebettet sind.

Außer dem Prinzip der Gitterstruktur des Materials hat noch ein zweites Prinzip allgemeine Anerkennung gefunden. Es kann in dem Satz ausgedrückt werden: „Weicheres Material schleift härteres.“ Es wird also das härtere Material zweier reibender Flächen zuerst verschleifen. Demnach verschleifen am wenigsten zwei Reibflächen gleicher Härte. Außerdem gestattet dieses Prinzip, von zwei Reibflächen diejenige auszuwählen, die zuerst verschleifen soll, z. B. Kolbenringe gegenüber dem Zylinder.

Dieses Prinzip wurde wie das erste rein empirisch gefunden und ist in der Technik der Schleifmittel schon lange bekannt. Seine Begründung in bezug auf den Reibvorgang zweier Flächen ist aber recht schwierig, und der Versuch der Erklärung führt eigentlich dazu, daß dieses Prinzip, für sich betrachtet, nicht allgemein gelten kann. Die einfachste Vorstellung ist die, daß die Rauigkeitsspitzen des weicheren Materials an den härteren vorbeistreichen, ähnlich wie die Haare einer Bürste, und damit der Reibvorgang bei weichem Material sich auf die „lange Mantelfläche des Haares“ verteilt, während bei dem harten Material die einzelne Spitze durch den ganzen Reibvorgang belastet ist und so schneller abgetragen wird. — Eine zweite Vorstellung ist die, daß das weichere Material die harte Spitze durch den Reibdruck „umströmt“ und, ähnlich wie bei der Kavitation, die harten Spitzen aus dem Grundmaterial durch den Strömungsdruck oder molekulare Kräfte herausreißt bzw. abbaut. — Als Drittes kann man sich vorstellen, daß der Abbau der harten Spitze thermisch bedingt ist, indem infolge der auf sie stärker konzentrierten Reibwärme ihr Verband mit dem Grundmaterial gelockert wird und sie dadurch ausbricht.

Man muß aber bei dem Reibvorgang auch an die sogenannte Reiboxydation denken. Durch die Sauerstoffaufnahme wird die Materialspitze in das sprödere Metalloxyd umgewandelt und bricht dann aus diesem Grunde ab. Der Grad der Reiboxydation ist aber nicht härtebedingt, sondern chemisch, und es besteht darum die Möglichkeit, daß das weichere Material der Reiboxydation soviel mehr unterworfen ist, daß dies den Ausschlag gibt und dann das weichere Material mehr verschleißt. Damit wäre das Prinzip: „Der weichere Teil schleift den härteren“ in seiner Allgemeinheit eingeschränkt und chemischer Bedingtheit unterworfen.

Ein drittes Prinzip, das durch die Oberflächenforschung technischer Flächen in den letzten Jahren besonders zur Anerkennung kam, ist die Tatsache, daß „je härter die Reibflächen sind, sie einer um so feineren Oberflächenbearbeitung bedürfen“.

Dies hängt ohne Zweifel mit der geringeren Elastizität der Rauigkeitsspitzen zusammen, ebenso mit der geringeren Ausweichmöglichkeit infolge der größeren Härte nach dem Materialinneren.

Ein viertes Prinzip, das besonders im Motorenbau in jüngster Zeit stark zur Anwendung kommt, ist das Prinzip der „Ölhaltigkeit“ der Reibflächen. Es ist bekannt, daß die sogenannte flüssige Reibung, bei der die Metallflächen durch

eine Ölschicht voneinander getrennt bleiben und damit vor Verschleiß nahezu gesichert sind, im Motorenbau nur in sehr geringem Umfang zur Anwendung kommt, da sie einheitliche Dreh- und Druckrichtung erfordert. Im Gebiete der Grenzschmierung spielt aber der „Ölersatz aus der Fläche selbst“ eine große Rolle. Man ist darum dazu übergegangen, feinstbearbeitete Flächen mit Poren zu versehen, um in der Reibfläche die notwendigen Ölreservoirs zu schaffen. Diese Poren können entweder in der Oberfläche des Materials natürlich vorhanden sein — wie bei Gußeisen — oder die Flächen werden nach der Bearbeitung besonders präpariert, um diese Porosität zu erzeugen.

Mit der vereinten Anwendung dieser vier Prinzipien

1. Gitterstruktur der Reibflächen,
2. abgestimmte Härte der reibenden Teile,
3. Anpassung der Bearbeitungsfeinheit an die Materialhärte,
4. Ölhaltigkeit der Reibflächen,

ist die Verschleißfestigkeit reibender Motorteile wesentlich erhöht worden und in der Verschleißfrage von der metallurgischen und mechanischen Seite eine gewisse Ruhe eingetreten.

Die Lösung des Problems der Korrosion reibender Flächen steckt jedoch noch in den Anfängen. Die reine Reibkorrosion, wozu auch die oben bereits erwähnte Reiboxydation gehört, muß für trockene Reibflächen und für geschmierte Reibflächen getrennt behandelt werden. Für den Motoringenieur sind beide Korrosionsarten uninteressant, soweit es die Zylinder- und Lagerreibung betrifft. Es sei nur erwähnt, daß Versuche festgestellt haben, daß in reiner Stickstoffatmosphäre bei Scheiben fast kein Verschleiß auftrat und daß andererseits die Reibkorrosion durch den Schmierfilm wirkt.

Der Motorenbauer hat bei seinem Verschleißproblem immer auch mit Säuren zu tun, deren Vorhandensein nicht aus dem Reibvorgang geschmierter oder ungeschmierter Flächen herrührt, sondern die durch den Verbrennungsvorgang im Motorzylinder entstehen und von dort in die Reibflächen durch Schmieröl- oder Gastransport gelangen — dies gilt sowohl für Schmierung der Zylinder, als auch für die der Kurbellager.

Da der Korrosionsangriff durch Verbrennungsprodukte die eigentliche Reibkorrosion stark überlagert, hat es keinen Sinn mehr, den Korrosionsverschleiß im Motor mit den Reibvorgängen zu verquicken, sondern es führt viel eher zum Ziel, den Reibverschleiß mit den metallurgischen und mechanischen Belangen abzuschließen und den Korrosionsverschleiß als Problem gänzlich abzutrennen. Die Frage: Welche Verbrennungsprodukte führen zum Verschleiß? ist noch gar nicht zu beantworten, und es ist eine Hauptaufgabe dieses Buches, die Erörterung dieser Frage anzuschneiden und zu entsprechenden systematischen Versuchen anzuregen.

Will man diesem Problem nähertreten, so muß vorerst das Arbeitsgebiet festgelegt werden, das man in den Kreis der Erwägung ziehen muß.

Die chemischen Umsetzungen der Verbrennung und die anschließenden Umwandlungen in den Rückständen sind Kettenreaktionen, deren Ausgangspro-

dukte, genau genommen, nur in Form der beteiligten Elemente bekannt sind und deren Endprodukte durch Auspuffanalyse und Analyse der Rückstände festgestellt werden können.

Sicher ist aber, daß für die Korrosion im Motor auch die Zwischenprodukte der Kettenreaktionen von großer Bedeutung sind, da diesen sehr große Aktivität zukommt und ihre Reaktionsfähigkeit mit dem Metall vielfach größer ist als die zu den Elementen der Verbrennung. Die Anzahl der möglichen Zwischenprodukte innerhalb des Motors ist so groß, daß ihrer Erforschung sehr enge Grenzen gesetzt sind. Auch der große Temperaturbereich, der von 20° im kalten Kurbelgehäuse bis zu 2000° im Verbrennungsraum reicht, läßt jede Hoffnung schwinden, die chemischen Vorgänge jemals restlos klären zu können.

Der Motoreningenieur ist aber daran gewöhnt, empirische Lösungen zu finden, die schließlich den hohen Stand des heutigen Motorenbaues erreichen ließen. Für das Problem der Korrosionsforschung an der Zylinderwand kommt ihm der Umstand entgegen, daß es sich hier in erster Linie um topochemische Vorgänge handelt, also ausschließlich um Vorgänge im Bereich der Metallfläche und bei ihm bekannten Zylinderwandtemperaturen. Bei entsprechender systematischer Arbeit scheint es darum möglich, Licht in das Dunkel zu bringen. Es geht ja nicht darum, chemische Umsätze genau zu definieren, sondern die Einwirkung der Verbrennungsgase auf die Zylinderwand der Reihe nach unter bestimmten Betriebsbedingungen rein empirisch festzustellen. In Anbetracht der außerordentlichen Wichtigkeit des Korrosionsverschleißes im Motorzylinder glaubt der Verfasser mit seinen Vorschlägen am Schluß des Buches einen nützlichen Beitrag geleistet zu haben.

II. ZYLINDERLAUFBUCHSEN

Reibkräfte an der Zylinderwand. Die Form des Zylinderverschleißes. Konstruktive Einflüsse auf die Verschleißform. Zylinderbüchsenmaterial. Versuche über Zylinderverschleiß mit verschiedenem Material. Die Herstellung der Zylinderlaufbüchsen. Oberflächenbehandlung von Laufbüchsen.

Reibkräfte an der Zylinderwand

Als Reibkräfte an der Zylinderwand wirkt in erster Linie der Druck der Kolbenringe, die durch ihre Vorspannung und den Gasdruck angepreßt werden, in zweiter Linie der Seitendruck des Kolbenschaftes. Dem Bild 1 ist das Verhältnis dieser Reibkräfte und die axiale Lage an der Zylinderlaufbahn zu entnehmen. Man sieht daraus den überragenden Anteil der Ringreibkräfte während des Expansionshubes. Die Verhältnisse sind gezeigt unter einem 90proz. Gasdruck, also unter der Annahme, daß der vollerechnete Gasdruck (verringert um den Druckverlust durch Undichtheiten) zur Wirkung kommt.

Da jeder Ring mit axialem Spiel in seiner Nute liegt, hat man im ganzen Umfang einen großen Verbindungsquerschnitt frei, der, wie Messungen zeigen, zu einem vollkommenen

Druckausgleich vor dem Ring und an der Rückseite des Ringes in der Nute führt. Die Abdichtung der Kolbenringe wirkt durch die Hintereinanderschaltung mehrerer Kolbenringe wie eine Labyrinthdichtung. Die Druckverhältnisse vor dem ersten, zweiten und dritten Ring usw. zeigt Bild 2 nach den Messungen von Eweis.

Bild 3 zeigt das Absinken der Undichtigkeitsverluste mit Ringzahl und

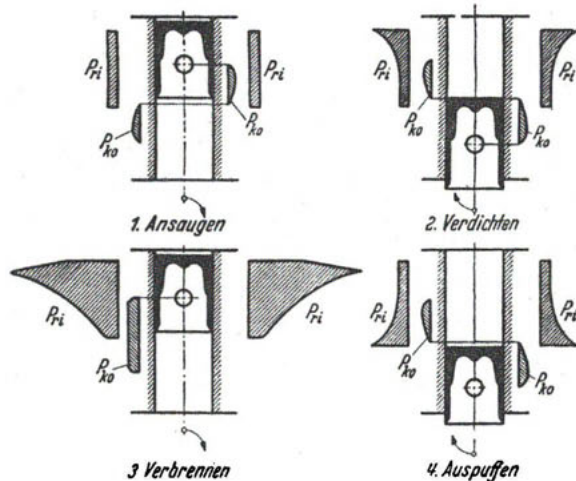


Bild 1. Schematische Darstellung der Ring- und Pleuellringpressung P_{Ri} und der Pleuellringpressung P_{Ko} Unter Annahme eines 90proz. zusätzlichen Gasdruckes in den Ringen. Versuch von Prof. Wallich und Dipl.-Ing. Gregor, „Gießerei-Ztg.“, S. 517 (1933).

Kolbengeschwindigkeit, wie sie sich bei Messungen an einem Verdichter ergeben haben.

Aus den Reibungszahlen von vollbelastet laufenden Motoren ergibt sich, daß nicht der volle Gasdruck als Reibkraft zur Auswirkung kommen kann, sondern nur ein Teil.

Nach Dr. Tischbein steht der Schmierfilm zwischen Zylinderwand und Kolbenring unter der Druckdifferenz, die sich durch den Gasdruck über dem Ring und

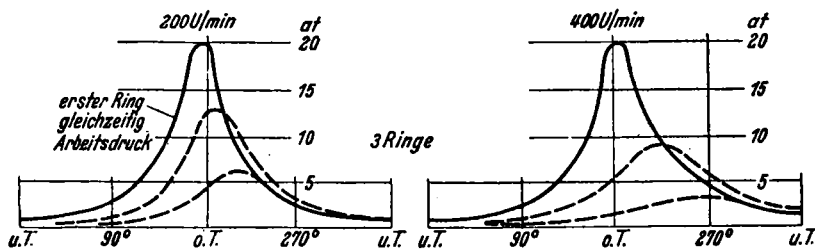


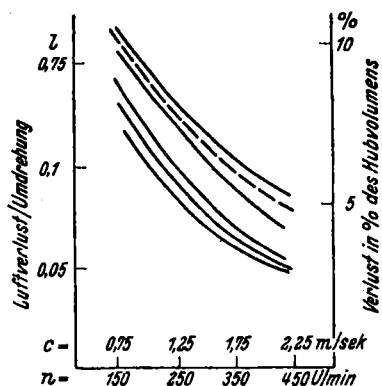
Bild 2. Gemessene Druckverteilung hinter den Ringen.
Druckmessung bei 20 atü

Die Schaubilder zeigen ein rasches Abklingen der für die einzelnen Ringe ermittelten Druckkurven unter gleichzeitiger Phasenverschiebung in Richtung der Gasströmung.

Die größten Drucksprünge, die für die Belastung und damit für die Abnutzung maßgebend sind, finden sich bei dem ersten Ring. Dies trifft besonders bei hoher Drehzahl zu, wo andererseits hinter den letzten Ringen schon fast gleichbleibender Druck herrscht.

Dr.-Ing. M. Eweis, Forschungsheft VDI Nr. 371 (1935)

unter dem Ring ergibt. Dadurch entsteht eine Entlastung des Ringes, so daß sich der als Reibungskraft ergebende Druck mit einem Viertel des Gasdruckes errechnet. Zu demselben Resultat kommt auch Ricardo, der für die gesamten Reibverluste im Zylinder (H. R. Ricardo: Schnell-



laufende Verbrennungsmotore, Berlin 1922) die Reibkraft mit einem Viertel Gasdruck plus zwei Drittel mittlerem Massendruck plus Konstante angibt.

Bild 3. Absinken der Undichtigkeitsverluste mit Ringzahl und Kolbengeschwindigkeit gemessen an einem Hilfsverdichter. Bohrung 116, Hub 150. Verdichtungsdruck 28 at. Ringbreite 5 mm, 0,5 Spiel. Schloßspiel 0,7.

Bei rasch laufenden Motoren wird man kaum mehr als 2 bis 3 Ringe brauchen. Bei 450 n/min sind die Verluste bei 3 bis 4 oder 5 Ringen fast die gleichen.

Dr.-Ing. Eweis, Forschungsheft VDI Nr. 371 (1935)

Inwieweit sich diese Reibkraft auf den Verschleiß auswirkt, ist eine Frage der Schmierung.

In Bild 4 sind Versuche von Prof. Gabriel Becker wiedergegeben, die zeigen, wie die Verlustleistung bei einem Motor steigt, wenn die Umdrehungszahl erhöht wird. Diese Steigerung zeigt sich abhängig von der Zylinderwandtemperatur, die bei höheren Umdrehungen den Schmierfilm ungünstig beeinflusst. Ver-

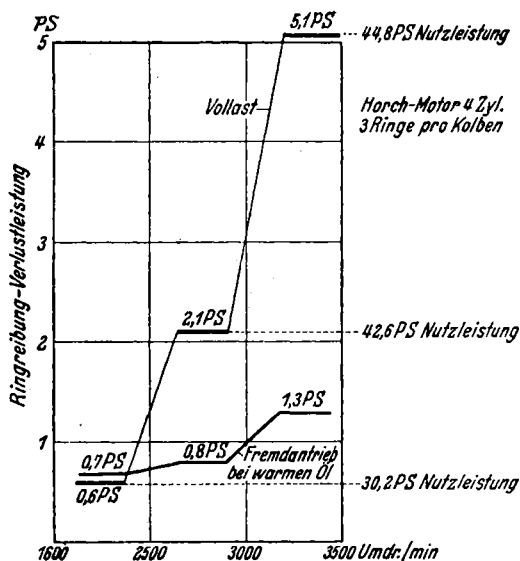


Bild 4. Vergleich der Ringreibung a) bei Fremdantrieb, b) bei Vollast

Im unteren Drehzahlbereich ($n=1600$): Kein Einfluß der Verbrennungsgase. Die Wärmeabfuhr ist so wirksam, daß der Ölfilm an der Zylinderwand wie bei Fremdantrieb erhalten bleibt.

Bei $n=2500$ steigt der Reibungswiderstand der Kolbenringe schon auf das $1\frac{1}{2}$ -fache desjenigen bei gutem Schmierzustand. Die größere Zahl der Verbrennungshübe pro Zeiteinheit überhitzt bereits den Ölfilm. Bei $n=3000$ steigt der Reibungswiderstand der Kolbenringe auf den dreifachen Betrag der Reibung bei gutem Schmierzustand. Die Schmierung der Ringe im oberen Totpunkt ist unzulänglich. — Daher starker Verschleiß!

Prof. Gabriel Becker, „Leichtmetallkolben“, 1929.

gleicht man Motore gleicher Art, aber ungleicher Größe unter gleichen Betriebsbedingungen, so ergibt sich (am Verbrauch von Zylinderbüchsen gemessen) der Verschleiß praktisch ungefähr in einer linearen Beziehung zur Umdrehungszahl. Bild 5a zeigt zur allgemeinen Orientierung die Verlustleistungen und Bild 5b den aufzuwendenden mittleren Reibungsdruck bei einem Vierzylinder-Lastwagenmotor.

Keinesfalls ist der Verschleiß verhältig dem mittleren Druck mal der mittleren Kolbengeschwindigkeit.

Die Seitenkräfte der Kolben spielen im Vergleich zu den Ringreibungskräften nur eine untergeordnete Rolle.

In Bild 1 ist das Verhältnis der Ringreibkräfte zu den Kolbenseitenkräften dargestellt.

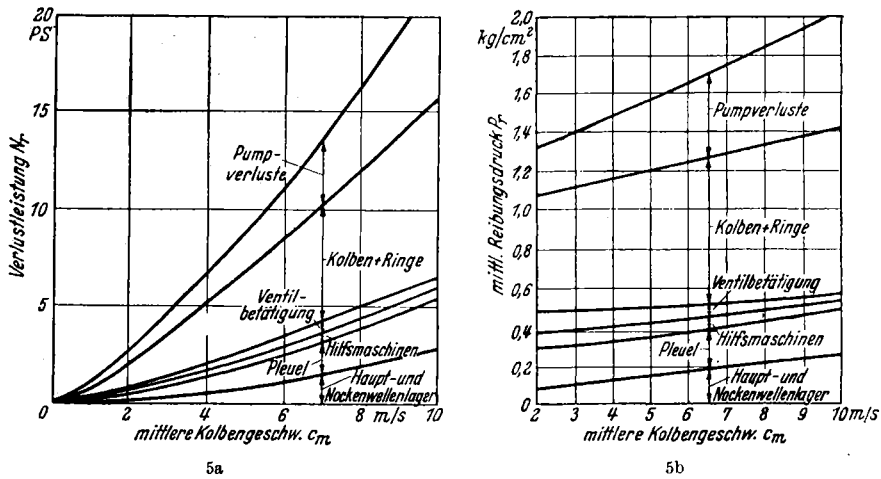


Bild 5a und b. Leistungsverluste eines Vierzylinder-Lastwagenmotors (5,36 l Hubraum) nach Lichty und Carsons.

Die Form des Verschleißes am Zylinder

Übereinstimmend ergibt sich aus allen Verschleißmessungen folgendes:

Der Verschleiß ist im Ringansatz des obersten Kolbenringes am stärksten, nimmt dann rasch ab und zieht sich in geringem Maße bis zum unteren Totpunkt hin. Der Einfluß der Kolbenringreibung ist deutlich ersichtlich.

Am genauesten erscheinen die Messungen von Prof. A. Walichs und Dipl.-Ing. Joh. Gregor, Aachen (Bild 6).

Als nächste zuverlässige Arbeit kann die von Dr.-Ing. Friedr. Hanft, Königsberg, gelten (Bild 7).

Die Versuche von Sheepbridge Stokes Centrifugal Castings Co. Ltd. zeigen deutlich eine Übereinstimmung der Verschleißform mit obigen Arbeiten (Bild 8).

Von einiger Wichtigkeit ist ein Nebenversuch mit unlegierten Schleudergußbüchsen, der ein völlig ungleiches Resultat in den Zylindern ergab.

Bohrung:	1	2	3	4
Abnützung in mm:	0,0775	0,05	0,05	0,04

Bohrung 1 ist der vorderste Zylinder am Kühler. Die Laufzeit des Versuches betrug 40 Mill. Umdrehungen = 14000 km.

Diese Ungleichheit kann entweder auf die Brennstoffzusammensetzung in den einzelnen Zylindern zurückgeführt werden bzw. auf die verschiedenen Temperaturverhältnisse an der Zylinderwand infolge der ungleichen Verbrennung, oder es können an den einzelnen Büchsen verschiedene thermische Verformungen eingetreten sein.

C. Englisch weist auf der Verschleißtagung VDI 1938 darauf hin, daß öfters, besonders bei Zweitaktmotoren mit Schlitzsteuerung, auch ein tonnenförmiger Verschleiß vorkommt (Bild 9).

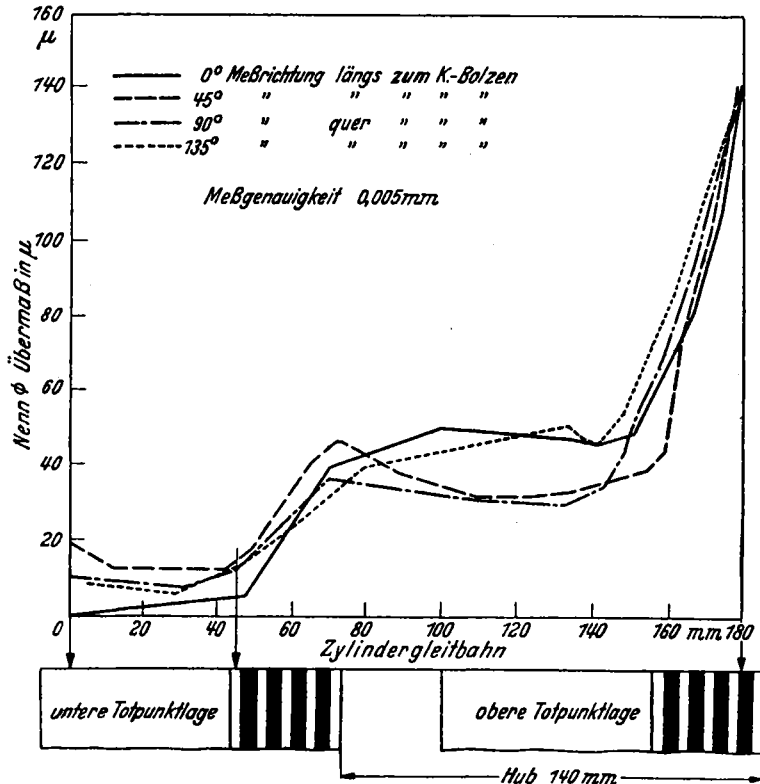


Bild 6. Obere Ringzone steile Verschleißkurve bis zum Höchstwert am oberen Ringansatz. Verschleißkurve für die 4 Meßrichtungen ähnlich — und bestätigt damit die Abhängigkeit des Verschleißes vom Gleitvorgang der durch Gasdruck an die Wand gepreßten Kolbenringe.

Versuche von Prof. Wallichs und Dipl.-Ing. Gregor, Gießerei-Ztg., 5517 (1933).

A. Moser, Stuttgart MTZ. IX, 1942, führt diese Verschleißform auch auf unreines Schmieröl zurück; Honstaub oder durch den Entlüfter eingedrungener Staub machen ständig die Hubbewegung des Kolbens mit, sie schwingen sozusagen um die Mitte des halben Hubweges und können dort in erstaunlich kurzer Zeit die Zylinderlaufbahn restlos unbrauchbar machen.

Diese gänzlich andere Verschleißform kann nach Ansicht des Verfassers auch in Korrosionsbedingungen ihre Ursache haben oder infolge von Verformungen der Büchsen auftreten. Aus diesem Grunde muß dem Vorkommen dieser Verschleißform mehr Beachtung geschenkt werden, denn es ist zu erwarten, daß sie unter Umständen bei Generatorgasmotoren infolge der Korrosionserscheinungen öfter auftritt (Bild 10). Wenn Verformungen der Büchsen vorliegen, handelt es sich nicht um echten Verschleiß, was besonders zu beachten ist.

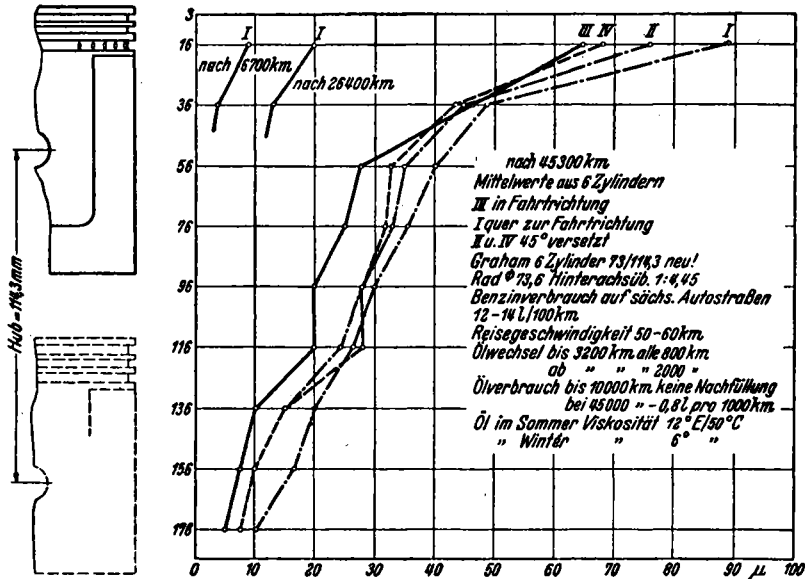


Bild 7. Verschleißmessungen an einem Fahrzeugmotor.
Von Dr. Friedrich Hanft. ATZ (1/1936).

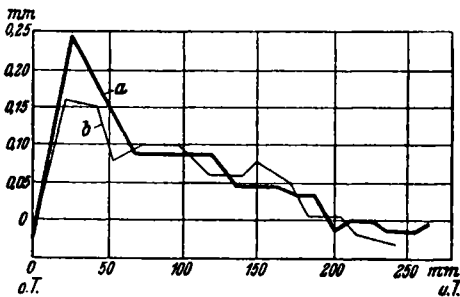


Bild 8.

Verteilung der Abnutzung über die Zylinderlänge. Im Schleudergußverfahren hergestellte Zylinderlaufbüchsen, trocken eingepreßt. — Unter tatsächlichen Betriebsbedingungen laufend. Verschleißkurve *a* im rechten Winkel zur Kurbelwelle. Verschleißkurve *b* parallel zur Kurbelwelle.

Versuche von Sheepbridge Stokes Centrifugal Castings Co LTD. I. E. Hurst. Autom. Engen. Bd. 23, 1933; ATZ. Heft 24, 1934.

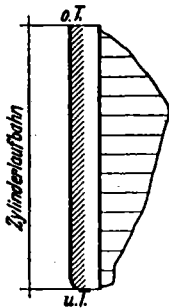


Bild 9. Tonnenförmiger Verschleiß, im allgemeinen seltener festzustellen. Bericht: C. Englisch — Verschleißtagung VDI 1938.

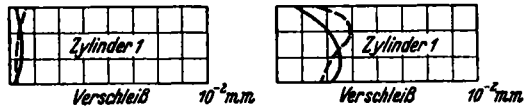


Bild 10. Beispiele für tonnenförmigen Verschleiß aus der Versuchsfahrt 1935.

— Abnutzung in Längsrichtung
--- Abnutzung in Querrichtung

Fahrzeug 66
Treibstoff: Holz
Generatorbetrieb
gef. Kilometer 14000

Fahrzeug 77
Treibstoff: Holzkohle
Generatorbetrieb
gef. Kilometer 11500

Sind zwei Zündkerzen auf beiden Seiten der Zylinderbohrung vorhanden und hängen die Ventile in der Mitte der Längsrichtung, so ist der Verschleiß zentraler als bei stehenden Ventilen.

Bei Kompressoren für Luft und andere Gase ist der muldenförmige Verschleiß im oberen Totpunkt trotz der entstehenden sehr hohen Drücke und Temperaturen nicht vorhanden.

Ricardo berichtet darüber, daß der Verschleiß der Laufbahn an Schiebermotoren bedeutend geringer ist als an normalen Zylindern mit und ohne festen Laufbüchsen. Die Ursache hierfür mag darin liegen, daß bei Ventilmotoren der Kolben im oberen Totpunkt zum Stehen kommt und der Ölfilm an der Lauffläche abgerissen wird, während beim Schiebermotor eine dauernde Bewegung des Schiebers bzw. Kolbens auf der Laufbahn vorhanden ist, der Ölfilm also nicht abreißen kann und somit keine trockene Reibung entsteht.

Einflüsse der Zylinderblockform

Bei der Untersuchung von Georg Becker ergibt sich der Einfluß des Wassermantelansatzes bei einem älteren Buickzylinder (Bild 12). Die Verschleißmes-

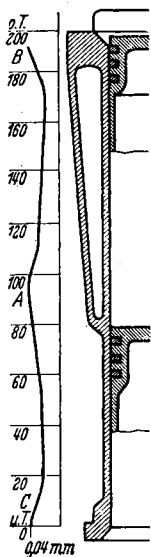


Bild 12.

sung an einem Wanderer-Motorradzylinder den Einfluß des Befestigungsflansches des Zylinders auf den Verschleiß im unteren Totpunkt (Bild 13). Über mögliche Formänderungen von Zylindern bzw. Zylinderbüchsen verdient auch eine Arbeit von Sulzer A.G. Beachtung, die an einem langsam laufenden Motor die mögliche Verformung eines Zylindereinsatzes infolge der Wärmespannungen rechnerisch ermittelt (Bild 14). Auf die Möglichkeit derartiger Verformungen der Zylinderwand soll an dieser Stelle besonders hingewiesen werden. Sie müssen bei Verschleißmessungen beachtet werden, da sie die Ausmessung wesentlich beeinflussen können. Es kann durch sie ein falsches Verschleißbild entstehen.

Bild 12. Einfluß der Flanscheinschnürungen auf die Abnutzung eines Buick-Zylinders nach 1600 km Laufstrecke. Die Kolben suchen die Einschnürung der Wärmeausdehnung bei A, B, C in der ersten Laufzeit rasch abzuschleifen. Der Buick-Zylinder zeigt an den Flanschstellen eine erhöhte Abnutzung von 0,02 mm; diese kann sich bei thermisch hoch beanspruchten Kolben auf 0,06 mm erhöhen. Infolge dieser Einschnürung hat der Graugußkolben nach 1600 km noch zu geringes Spiel. Erst nach 8800 km wird der Motor klemmfrei. Der Brennstoffverbrauch sinkt von 15,6 auf 14 Liter bei 50 km/Std. Geschwindigkeit.

Versuche von Prof. Gabriel Becker. „Leichtmetallkolben“.

Zylinderbüchsenmaterial

Von den Verschleißversuchen der Gießereifachleute sind die meisten nur mit Verschleißmaschinen erfolgt und sehr oft ohne Anwendung einer Schmierung. Es erscheint darum nicht zweckmäßig, diese Resultate im einzelnen aufzu-

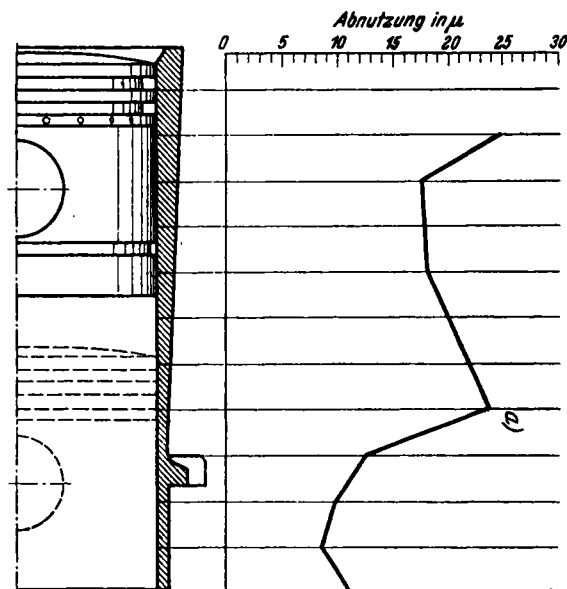


Bild 13. Verschleiß in einem Wanderer-Motorrad, 62 mm Zylinderbohrung, während der ersten 18 000 km. Die stärkste Abnutzung macht sich in der Totpunktlage geltend. Der Grund des Verschleißes an der Stelle *a* ist der Befestigungsflansch, der die Wärmeausdehnung verhindert.

Versuche von Dr.-Ing. Friedr. Hanft, Königsberg, ATZ. Heft 1, 1946.

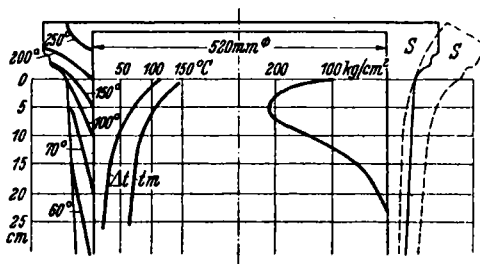


Bild 14. Verformung (100fach) und Wärmespannungen einer Zylinderbuchse bei gegebener Temperaturverteilung.

Versuche von Sulzer A. G., VDI Zeitschrift Nr. 13, März 1926.

führen, da sie die Verhältnisse im Motor zu wenig berücksichtigen und teilweise sehr widersprechende Ergebnisse geliefert haben.

Bei Verschleißversuchen auf Verschleißmaschinen hat sich unter anderem ergeben, daß eine Verbesserung der Schmierung die Laufeigenschaften verschiedenen Zylindermaterials überdeckt.

Im praktischen Motorenbau darf aber als erwiesen gelten, daß der Einfluß des Buchsenmaterials und auch des Kolbenringmaterials von größter Bedeutung ist. Beim laufenden Motor hat man eben die Regelung des Schmierfilms nicht so sehr in der Hand wie bei einer Verschleißmaschine.

Grundsätzlich muß das Kolbenringmaterial mit dem Zylindermaterial auch im Gefüge aufeinander abgestimmt sein.

Auf Grund der Ergebnisse der VDI-Verschleißtagung 1938 gelten die unter Kolbenringmaterial gemachten Ausführungen (S. 50) auch für Zylindermaterial.

Zylinderbüchsen im Groß-Dieselmotorenbau

A. Jünger führt aus, daß man im Groß-Dieselmotorenbau im allgemeinen die völlig gleichen Erfahrungen in Art und Bedeutung der Gefügestruktur gemacht hat. Er hat jedoch etwas abweichend gefunden, daß die Art der Perlitausbildung hinter dem Einfluß der Graphitausbildung und des Phosphideutektikum stark zurücktritt.

- a) Eine gewisse Graphitmenge und eine verhältnismäßig größere Ausbildung der Graphitadern und Blättchen ist wünschenswert.
- b) Eutektischer Graphit ist im Dieselmotorenbau für Zylinder und Ringe äußerst schädlich.
- c) Ein zusammenhängendes Netzwerk des Phosphideutektikums gibt die beste Verschleißfestigkeit.

Ein Phosphorgehalt von 0,6 bis 0,8% ist am günstigsten. Der im Betrieb entstandene Spiegel von Zylinderbüchsen, die über 20 Jahre gelaufen waren, wird durch das etwas erhabene Phosphidnetzwerk gebildet.

Alte, gut gelaufene Büchsen, die Anfang des Jahrhunderts gegossen wurden, sind ebenfalls rein perlitisch und zeigen auch eine kräftige Graphitausscheidung und viele Phosphide.

Legierungszusätze

Die chemische Zusammensetzung des Gußeisens hat nach allen bisherigen Forschungsarbeiten nur insofern Einfluß auf die Verschleißfestigkeit, als sie sich in einer bestimmten Art auf das Gefüge auswirkt. Dies gilt auch für solche Zusätze, die gemeinhin in Gußeisen seltener vorkommen als Nickel, Chrom, Molybdän usw.

Es sei darum der Einfluß verschiedener Legierungszusätze nach einem Überblick von Karl Sipp, Mannheim, ATZ. Heft 11, 1935, im Auszug wiedergegeben.

Perlitisches Grundgefüge

Am eindeutigsten ist der Einfluß des perlitischen Grundgefüges geklärt. Übereinstimmend wird festgestellt, daß es verschleißhemmend wirkt.

Ferrit hat demgegenüber nur eine Verschleißfestigkeit von einem Zehntel.

Graphiteinschlüsse

Der Graphitgehalt ist vom Kohlenstoffgehalt des Gußeisens abhängig.

Der Ferrit enthält 0,05% Kohlenstoff in Lösung.

Der Perlit hat 0,9%, aller übriger Kohlenstoff tritt im allgemeinen in Form von Graphit auf.

Die Ausbildung des Graphites steht in ursächlichem Zusammenhang mit der Perlitbildung:

Trifft mit hohem C-Gehalt langsame Erstarrung zusammen, so ist mit grober und reicher Graphitbildung die Neigung zur Ferritbildung gegeben.

Hoher C-Gehalt und rasche Erstarrung bringen weniger Graphit, jedoch in feinerer Form, und neigen zur Bildung von Perlit.

Niedriger C-Gehalt und langsame Erstarrung dagegen haben wenig Graphit, aber in gröberer Form und gut ausgereiftes Perlitgefüge. Wenn nun aus den Forschungsergebnissen gefolgert wird, daß wenig Graphit in gröberer Ausbildungsform mit dünnen Plättchen die Verschleißfestigkeit erhöht, so ist dies verständlich, weil es sich dann um ein gut ausgereiftes Perlitgefüge handelt, dessen Erstarrungsvorgang durch den Graphitzustand belegt wird. Für das gute Verhalten eines derartigen Gefüges gegen Verschleiß ist deshalb in Wirklichkeit nicht der Graphitzustand allein, sondern das damit einhergehende höherwertige Perlitgefüge die Ursache.

Der Graphit hat aber noch andere Bedeutung. Die Tatsache, daß Stahl weniger gute Verschleißigenschaften aufweist als Gußeisen, kann nur auf den Graphit zurückgeführt werden. Im Grundgefüge zwischen Stahl und Gußeisen herrscht so weitgehende Übereinstimmung, daß darin eine Ursache für das unterschiedliche Verhalten nicht gesehen werden kann.

Die Graphitadern an der Oberfläche haben eine besonders günstige Adhäsionswirkung für das Schmieröl und werden also den Ölfilm mehr festhalten als das Metall und infolgedessen wesentlich zur Schmierung beitragen. (Siehe auch Seite 81 die Arbeit von Prof. Wallichs.)

Einfluß des Siliziums

Silizium begünstigt im allgemeinen die Graphitbildung. Der Umstand aber, daß Silizium als Stoff im Grundgefüge als Silikoferrit enthalten ist, läßt die Möglichkeit offen, daß die Abnutzung mit steigendem Siliziumgehalt steigt.

Mangan

Mangan wirkt im Gegensatz zu Si der Graphitbildung entgegen und trägt zur Verfeinerung des Grundgefüges bei. Dadurch wird die Verschleißfestigkeit in mäßigen Grenzen verbessert. Die Gefügebildung MnS (Manganschwefel) scheint wenig Einfluß auf den Verschleiß zu haben.

Phosphor

Der Phosphor bildet den besonderen Gefügebestandteil Phosphideutektikum, bestehend aus P, C und Fe. Die vorliegenden Versuchsergebnisse lassen ziemlich übereinstimmend erkennen, daß bis zu 0,7% Phosphorgehalt der Verschleiß verbessert wird, von da ab der Einfluß nur noch wenig wächst. Mit steigendem Phosphidgehalt wächst die Sprödigkeit des Gußeisens stark (geringe Stoßfestigkeit). Die Tatsache, daß Klingenstein wohl beim ferritischen Gefüge durch die Anwesenheit von Phosphid eine Steigerung des Verschleißwider-