

KfK 2371
Februar 1979

**Ein Beitrag zur Extrapolation
vom Kurzzeit- auf das
Langzeit-Verschleißverhalten
von Kolbenringauflfläche,
-flanke und Büchsenauflfläche**

**(Eine Untersuchung mit Hilfe der
Radionuklidtechnik)**

W. Lausch
Laboratorium für Isotopentechnik

Kernforschungszentrum Karlsruhe

Kernforschungszentrum Karlsruhe
Laboratorium für Isotopentechnik

KfK 2371

Ein Beitrag zur Extrapolation vom Kurzzeit- auf das
Langzeitverschleißverhalten von Kolbenringlauffläche,
- flanke und Büchsenlauffläche

(Eine Untersuchung mit Hilfe der Radionuklidtechnik) ⁺

Wolfram Lausch

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

⁺ von der Fakultät für Maschinenwesen der Universität
Hannover genehmigte Dissertation

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

EIN BEITRAG ZUR EXTRAPOLATION VOM KURZZEIT- AUF DAS LANGZEIT- VERSCHLEISSVERHALTEN VON KOLBENRINGLAUFFLÄCHE, -FLANKE UND BÜCHSENLAUFFLÄCHE

(Eine Untersuchung mit Hilfe der Radionuklidtechnik)

ZUSAMMENFASSUNG

Das praxisbezogene motortechnische Problem, Rückschlüsse von dem nur über kurze Zeiten kontinuierlich gemessenen Verschleißverhalten einiger kritischer Dieselmotorbauteile auf das sich nach langen Motorlaufzeiten einstellende Verschleißverhalten derselben Bauteile ziehen zu können, wird mit mathematisch statistischen Methoden behandelt.

Es wurde ein System entwickelt, das auf der Basis in der Literatur bekannter statistischer Verfahren aus den Ergebnissen eines Einzelversuchs die Höhe der oberen Grenze der Verschleißrate für berechnete Prozentsätze der gleichen Bauteile bestimmt, wie sie im Einzelversuch benutzt werden.

Des weiteren wird der Zusammenhang zwischen Kolbenringflanken-Verschleißbeschleunigung und Kolbenringbruch erörtert und ein Verfahren zur Lebensdauerabschätzung bezüglich des Bruches von Kolbenringen in Dieselmotoren angegeben.

Die Eignung der beschriebenen Verfahren für die Motorenentwicklung wird anhand praktischer Beispiele nachgewiesen.

CONTRIBUTION TO THE EXTRAPOLATION FROM SHORT TIME TO LONG TIME
WEAR BEHAVIOUR OF CYLINDER LINERS AND FACES AND FLANKS OF PISTON
RINGS

(An analysis using radionuclide techniques)

ABSTRACT

It is a problem frequently encountered in experiments with combustion engines that conclusions on the wear behaviour after long

periods of running should be drawn from the data of wear measurements over a short running interval only.

For diesel engines and the case of continuous wear measurements on critical engine components over a short period of time this problem was treated with mathematical statistics known in literature.

When the system developed in this work is applied to the results of a short time experiment, it is possible to calculate maximum wear niveaus for calculated percentages of engine components identical to those used in this single experiment.

A dependance of the fracture of piston rings on piston ring flank wear acceleration is discussed, and a method for life time predictions with respect to the fracture of piston rings in diesel engines is given.

With several practical examples the suitability of the methods presented ist demonstrated for work on engine development.

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

	Seite
1. PROBLEMSTELLUNG UND MOTIVATION	1
2. ERGEBNISSE DER LITERATURSTUDIE UND SCHLUSS- FOLGERUNGEN	2
2.1 Verschleißkurvenformen	3
2.2 Analytische Ansätze	14
2.3 Modellvorstellung charakteristischer Verschleißratenverläufe	19
3. ZIEL DES VORHABENS UND LÖSUNGSWEG	21
4. STATISTISCHE VERARBEITUNG DER VERSCHLEISS- MESSERGEBNISSE	27
4.1 Verarbeitung der Verschleißraten aus Bereichen sich über der Motorlaufzeit ändernder Verschleißraten	28
4.2 Verarbeitung der Verschleißraten aus Bereichen sich nicht über der Motorlauf- zeit ändernder Verschleißraten	37
4.3 Verarbeitung der Verschleißraten aus Test- versuchen	44
5. EINGESETZTE TECHNISCHE MITTEL	48
5.1 RNT-Methoden zur Ermöglichung von Ver- schleißmessungen	48
5.1.1 Konzentrationsänderungen des Ver- schleißes im Öl durch Ölnachfüllungen und Verschleißverlust durch Ölverbrauch	48
5.1.2 Aktivierung der verwendeten Maschin- teilen	56
5.2 Verschleißmeßverfahren	57
5.3 Versuchsmotore und -teile	62

	Seite
6. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND -ERGEBNISSE	66
6.1 Versuche zur Ermittlung der Grundgesamtheiten	66
6.1.1 Langzeitversuche	66
6.1.2 Kurzzeitversuche	72
6.2 Testversuche	76
6.2.1 Langzeitversuche	76
6.2.2 Kurzzeitversuche	80
6.3 Versuche mit künstlich verändertem Kolbenringflankenspiel	83
6.4 Vergleichende Betrachtung	90
7. STATISTISCHE AUSWERTUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE	102
7.1 Auswertung der Verschleißraten aus Bereichen sich über der Motorlaufzeit ändernder Verschleißraten	102
7.1.1 Kolbenringlauffläche und Büchsenlauffläche (OT)	102
7.1.2 Kolbenringflanke	113
7.2 Auswertung der Verschleißraten (OT) der Bauteile Kolbenringlauffläche und Büchsenlauffläche aus Bereichen sich nicht über der Motorlaufzeit ändernder Verschleißraten	117
7.3 Auswertung der Verschleißraten aus Testversuchen	123
7.3.1 Kolbenringlauffläche und Büchsenlauffläche (OT)	123
7.3.2 Kolbenringflanke	126
7.4 Auswertung der Ringflanken-Verschleißraten aus Versuchen mit künstlich verändertem Kolbenringflankenspiel	129
7.4.1 Ringflankenverschleißbeschleunigung in Abhängigkeit des Kolbenringflankenspiels	129
7.4.2 Verfahren zur Lebensdauerabschätzung von Kolbenringen	132

	Seite
8. HINWEISE ZUR FORTFÜHRUNG DER ARBEIT	136
8.1 Einbeziehung von Feldtests	137
8.2 Anwendung des Systems auf andere Bauteile	138
9. ZUSAMMENFASSUNG	140
10. LITERATUR	144
11. ANHANG	

1. P R O B L E M S T E L L U N G U N D M O T I V A - T I O N

Ziel der Motorenbauer ist es, betriebssichere Motoren aus Materialien günstiger Verfügbarkeit zu erstellen. Die Situation auf dem Rohstoffsektor zwingt die einschlägige Industrie, Materialien zu verwenden, die auch in Zukunft ausreichend vorhanden und wiederverwendbar sind. Problemlösungen mit Hilfe ausreichend guter, aber seltener oder schwer zugänglicher Werkstoffe stellen auf die Dauer keine Lösung dar, sondern es wird versucht werden, die genügend vorhandenen Materialien so zu behandeln, daß sie den spezifischen Anforderungen genügen. Dazu gehört neben der Entwicklung geeigneter Materialzusammensetzungen und ihrer Behandlung die Anpassung der Bauteilformen an die spezifischen Anforderungen.

Die Güte der entwickelten Materialzusammensetzungen und -behandlungen und Bauteilformänderungen muß hinsichtlich verschiedenster Kriterien beurteilt werden. In der Vergangenheit hat sich allgemein im Motorenbau gezeigt, daß die Kenntnis des Verschleißverhaltens der sogenannten kritischen Verschleißmotorbauteile entscheidende Rückschlüsse auf die Betriebssicherheit der Motoren erlauben.

Die herkömmlichen Methoden zur Verschleißmessung erlauben Messungen an Motoren nur, wenn diese zerlegt sind. Dies wird im Laufe eines Versuches oder einer Motorstandzeit wegen des Aufwandes der damit verbunden ist und wegen der sich ergebenden Montageeinflüsse sehr selten durchgeführt. In der Regel wird die Vermessung der interessierenden Verschleißmotorbauteile nur in Ausnahmefällen öfter als vor Versuchsbeginn und nach Versuchsende vorgenommen. Für eine Reihe von Verschleißmotorbauteilen, deren Einfluß auf die Betriebssicherheit und Motorstandzeit gering ist, genügt die Erfassung des Verschleißzustandes am Ende des Versuchs, wenn der Motor sowieso zerlegt ist. Eine wichtige Begrenzung der Motorstandzeit ist durch den Ausfall einiger weniger, sogenannter kritischer Verschleißmotorbauteile gegeben.

Wenn der Zusammenhang zwischen dem Verschleiß dieser Bau-

teile über ihrer Betriebszeit bis zum Ausfall bekannt und dieser Zusammenhang sich mit einer bestimmten, quantitativ anwendbaren mathematischen Theorie darstellen lassen könnte, wäre eine notwendige Information vorhanden, zukünftig den Verschleißverlauf dieser kritischen Motorbauteile bis zum Ausfall zu berechnen. Um allerdings von einzelnen Kurvenverläufen über geeignete statistische Methoden auf das Verhalten der Grundgesamtheit dieser kritischen Motorbauteile schließen zu können, muß der Verschleißverlauf über der Zeit für diese Motorbauteile charakteristisch sein, d.h., die Wiederholung von Versuchen mit gleichen Bauteilen muß gleichartige Kurvenverläufe ergeben. Die Beurteilung der Gleichartigkeit ist nur möglich, wenn für eine genügend große Zahl von Versuchen die Kurvenverläufe genau genug erfaßt worden sind. Die herkömmliche Art der Verschleißkurvenermittlung von Motorbauteilen erfolgt günstigstenfalls in Abständen von mehreren hundert Stunden durch eine Längenmessung oder Wägung und ist für diesen Anwendungsfall zu ungenau. Ausreichend genau wäre natürlich ein Meßverfahren, das eine kontinuierliche Erfassung des Verschleißzustandes der Motorbauteile erlaubt.

Die einzigen Verfahren, Verschleiß an bestimmten Bauteilen einer Vollmaschine während des Betriebs zu messen, ohne einen störenden Einfluß auf den Betrieb selber zu nehmen, bietet die Radionuklidtechnik (RNT).

2. E R G E B N I S S E D E R L I T E R A T U R - S T U D I E U N D S C H L U S S F O L G E R U N G E N

Die Literaturstudie soll Auskünfte darüber geben, ob von Verschleißbauteilen von Verbrennungsmotoren, die im Rahmen der

vorliegenden Arbeit untersucht werden sollen, bereits Langzeitverschleißkurven vorliegen.

Das auszuwertende Material ist nicht sehr umfangreich; kontinuierlich gemessene Langzeitverschleißkurven von Verbrennungsmotorbauteilen konnten nicht gefunden werden. Die einzige Kurve eines Bauteils, das auch in Verbrennungsmotoren eingesetzt wird, stammt aus Lit.1 und gibt ein Versuchsergebnis über etwa 12 000 h der Lauffläche des 1.Kompressionsringes eines kleinen Luftkompressors wieder. Das vorhandene Material setzt sich aus konventionell ermittelten Kurven zusammen. Es werden in den Verschleißdiagrammen der Literatur auch häufig Kurvenverläufe wiedergegeben, aber aus den schon erwähnten Gründen sind diese zu ungenau, um für das zu erstellende System verwendet werden zu können. Sie deuten aber darauf hin, daß das Vorhandensein charakteristischer Verschleißkurven zumindest für die Zylinderlauffläche sehr wahrscheinlich ist, denn die veröffentlichten Verschleißkurven haben untereinander eine große Ähnlichkeit.

Die Literaturlauswahl und -darstellung hat also zum Schwerpunkt, eventuell mögliche charakteristische Verschleißkurven für die zu untersuchenden Motorbauteile zu beschreiben. Es wurde kein Wert auf die Unterscheidung konstruktiver Einzelheiten der verwendeten Motoren gelegt, was auch sehr häufig wegen der unzureichenden Beschreibung der Motore in der Literatur nicht möglich gewesen wäre.

2.1 Verschleißkurvenformen

a) Kolbenring-Langzeitverschleißkurven

Bei der Ermittlung des Verschleißes von Kolbenringen ist es schwierig, den Verschleißanteil zwischen Kolbenringlauffläche und -flanken auseinanderzuhalten, wenn kein radionuklidtechnisches Verschleißmeßverfahren zur Anwendung kommt. Die Messung des Ringlaufflächenverschleißes aufgrund der Stoßspielerweiterung ist nicht ausreichend genau, um den geringen prozentualen Anteil des Laufflächenverschleißes am Gesamtringverschleiß von diesem zu trennen (vgl. Tab.2). Die Erfassung des Laufflächenverschleißes durch eine Schichtdickenmessung bei beschichteten Kolbenringen

ist genauer, wurde aber in der vorliegenden Literatur nicht praktiziert. Deshalb kann über den Verlauf des Ringlaufflächenverschleißes keine Angabe gemacht werden, denn die durch die Wägung ermittelten Ringverschleißkurven geben eine Mischung aus Ringflanken- und Ringlaufflächenverschleißverlauf wieder.

Fig.1 zeigt den Gesamtverschleiß des schon erwähnten gußeisernen 1.Kompressionsringes eines kleinen Kompressors. Nach 150 h stellte sich eine konstante Verschleißrate ein, die ab 10 000 h leicht ansteigt. Da keine Meßpunkte eingezeichnet sind, kann über die Streuung der Meßergebnisse und damit über die Güte der Anpassung derselben an die gezeichnete Gerade nichts ausgesagt werden.

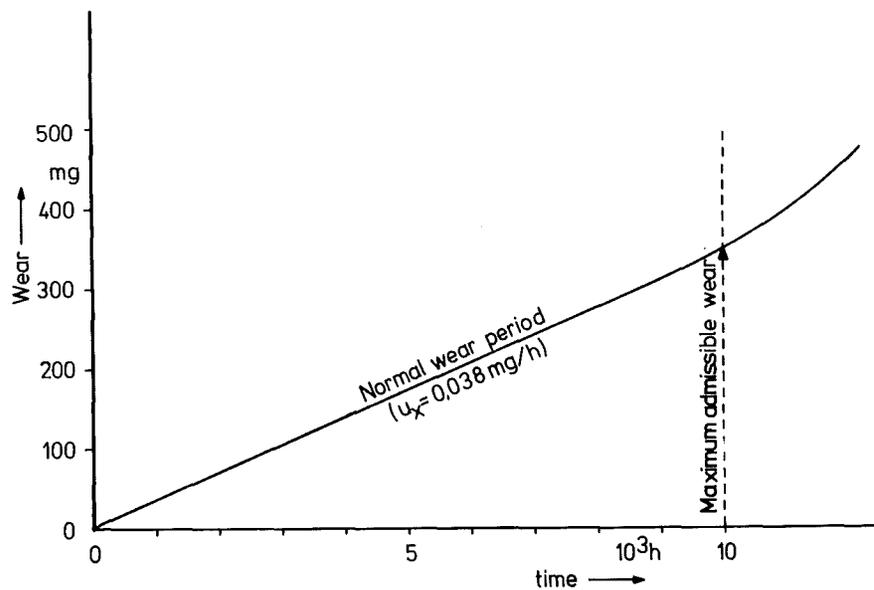


Fig.1: Verschleiß über der Betriebszeit des 1.Kompressionsringes eines Kompressors mit einem Bohrungsdurchmesser von 65 mm, einem Hub von 55 mm, Drehzahl 575 min⁻¹ /1/

In Lit.2 sind Langzeitverschleißversuche an einem sechs-zylindrigen 2 l-Motor beschrieben. Fig.2 zeigt ein typisches Versuchsergebnis. In Bereichen konstanter Betriebsbedingungen wird über lange Kolbenwege (Gleitgeschwindigkeit mal Zeit) eine nahezu konstante Ringverschleißzunahme beobachtet. Kurven ähnlicher

Art werden in derselben Literatur bei Vergleichsversuchen mit verschiedenen Schmierölen angegeben.

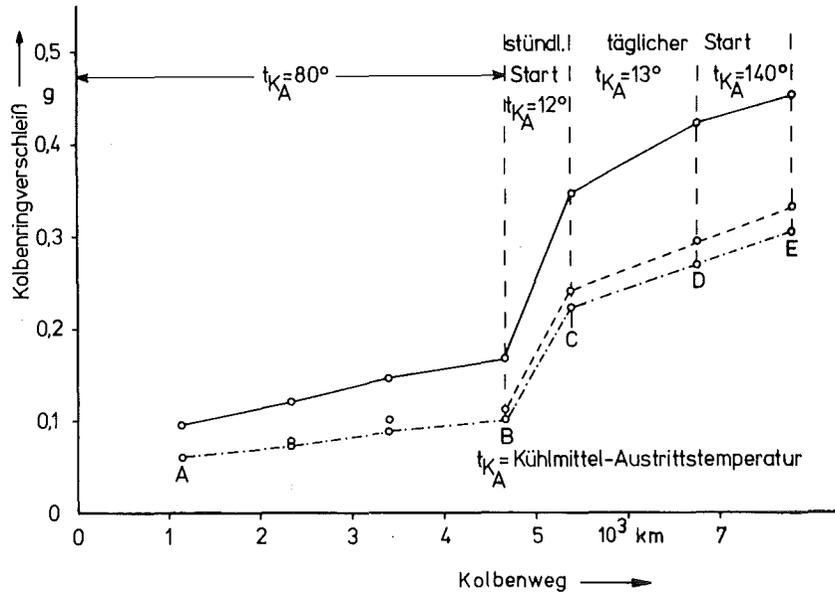


Fig. 2: Kolbenringverschleiß über der Betriebszeit bei mehrfach geänderten Betriebsbedingungen (Kühlmittelaustrittstemperatur und Starthäufigkeit) /2/

Den Einfluß konstanter und wechselnder Last über 2500 h auf den Gesamtverschleiß der Kolbenringe eines einzylindrigen Dieselmotors mit 3,7 kW bei 1500 min^{-1} gibt Lit. 3 wieder. Fig. 3 zeigt das Meßergebnis und veranschaulicht den über lange Zeiten linearen Verschleißverlauf.

Am Motor C und D (siehe Tafel 1 und 2, Seite 63 u. 64) wurden eine Reihe von Langzeitversuchen im Rahmen von Firmenabnahmeläufen absolviert, deren Ergebnisse zur Verfügung gestellt wurden /4/. Die Versuche dauerten in der Regel etwas mehr als 2000 h und wurden bei Nennleistung betrieben. Nach etwa 1000 h erfolgte in der Regel eine Zwischenvermessung der Verschleißmotorbauteile. Da für jedes Bauteil also nur 3 Meßpunkte vorliegen, kann über die Verschleißkurvenform nicht viel ausgesagt werden. Die graphische Auftragung der Meßergebnisse läßt aber vermuten, daß der Ringverschleißverlauf ähnlich denen in der erwähnten Literatur ist.

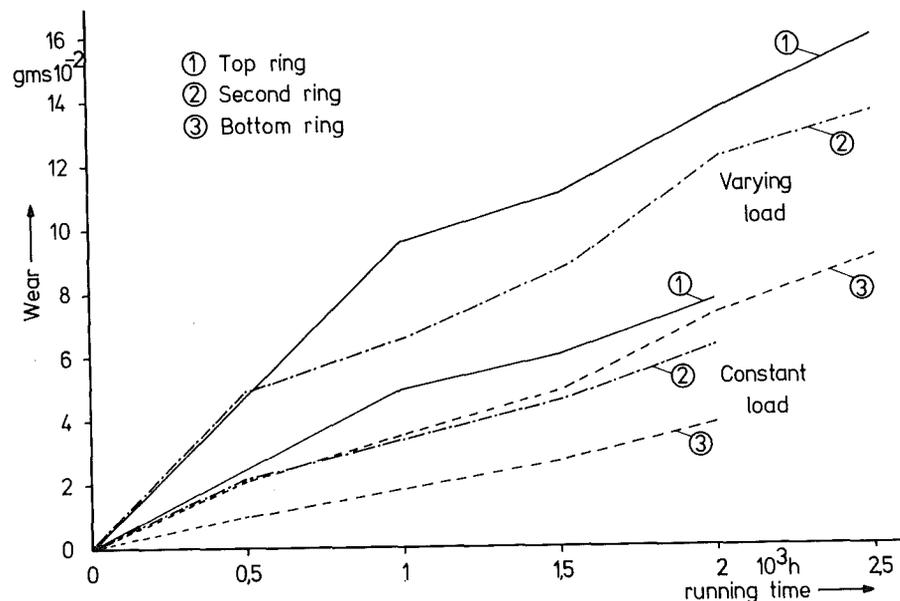


Fig.3: Verschleiß über der Betriebszeit von Kolbenringen /3/

Einige weitere Literaturstellen zeigen Kurven, in denen der Ringverschleiß in g/10 000 km über der Fahrstrecke bis 130 000 km aufgetragen ist /5/ (kontinuierliche Abnahme der Verschleißrate bis zum Versuchsende), die Chromlaufschichtdickenänderung in inch/1000 miles über der Fahrstrecke bis 20 000 miles /6/ (kontinuierliche Zunahme der Schichtdickenabnahmerate bis zu Versuchsende) und radionuklidtechnisch durchgeführte Versuche an einem vierzylindrigen Motor zum Einfluß des Staubgehaltes auf das Verschleißverhalten des 1. Kompressionsringes /7/ bis zu etwa 30 Motorlaufstunden. Nach dem Einlauf stellte sich bei dem Motor eine konstante Verschleißrate ein.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß wegen der bisher nicht getrennten Erfassung des Verschleißes der Ringlauffläche und Ringflanken, der aber durchaus bestehenden Möglichkeit eines signifikanten Unterschiedes im charakteristischen Verschleißverlauf derselben, das vorliegende Datenmaterial keine gesicherten Rückschlüsse auf die möglichen Verläufe der charakteristischen Verschleißraten zuläßt.

b) Zylinderlaufflächen-Langzeitverschleißkurven

Der Zylinderlaufflächenverschleiß wird konventionell hauptsächlich auf 2 Arten erfaßt. Die einfachste Art besteht in der Erfassung der Durchmessererweiterung an ausgesuchten Stellen (liegt allen folgenden Figuren zugrunde), in der Regel im Bereich des oberen Umkehrpunktes des 1. Kompressionsringes (Büchse (OT)). Da in diesem Fall das Meßergebnis auf der Differenz großer Zahlen beruht und es schwierig ist bei zeitlich weit auseinanderliegenden Messungen, stets dieselben Meßbezugspunkte genau zu treffen und auch sicher häufig nicht derselbe Mann die Messungen ausführt, ist diese Erfassung des Verschleißergebnisses sehr ungenau und muß große Streuungen der Meßwerte mit sich bringen. Das zweite, aufwendigere Verfahren beruht auf der graphischen Auswertung von Mantellinienschrieben. Auch dieses Verfahren ist nicht befriedigend für die Verschleißerfassung an der Zylinderlauffläche, denn plastische Verformungen und bleibende Verzüge überlagern sich dem Verschleiß; darüberhinaus gibt es zwischen Benutzern keine einheitlichen Regeln, welcher Zylinderlaufflächenbereich ausgewertet werden soll und auch dort, wo einheitlich die Auswertung des "Zwickelverschleißes" (entspricht in der Regel auch dem radionuklidtechnisch erfaßten Bereich) vorgenommen wird, herrscht keine Übereinstimmung in der graphischen Abgrenzung des Bereichs. Zwar herrscht zwischen den Firmen keine Übereinstimmung in der Auswertungsart; da diese aber innerhalb einer Firma immer gleich gehandhabt wird, ist dieses Verfahren geeigneter, Verschleißverläufe gegebener Zylinder aufzuzeigen.

Lit.8 enthält eine Zusammenstellung gemessener Langzeitverschleißverläufe verschiedener Motorbauteile, die der Literatur entnommen worden sind. U.a. werden auch Zylinderlaufflächenverschleißkurven verschiedener Motortypen angeführt.

Fig.4 zeigt die Verschleißkurve (Durchmessererweiterung in mm) und die Verschleißratenkurve (Durchmessererweiterung pro 100 Betriebsstunden) über der Betriebszeit. Die Meßergebnisse stammen von zwei sechszyindrigen Schiffsdieselmotoren von 3088 kW. Auffallend ist die konstante Verschleißzunahme bzw. die konstante Verschleißrate fast über der ganzen Betriebszeit (der Ver-

schleißratenverlauf ist in Bezug auf die eingezeichneten Meßergebnisse nicht optimal wiedergegeben). Der gleiche Verschleißratenverlauf wurde an einem etwa halb so großen Schiffsdieselmotor über einen Zeitraum von 12 Jahren (etwa 34 800 Betriebsstunden) beobachtet. Der Aufwand, einen solchen Kurvenverlauf zu ermitteln, ist sehr groß und obwohl mehrmals der Verschleißzustand des Zylinders festgehalten worden ist, ist das Meßergebnis für das hier zu erstellende System zu ungenau, da zwischen zwei Messungen bis zu 6000 h liegen.

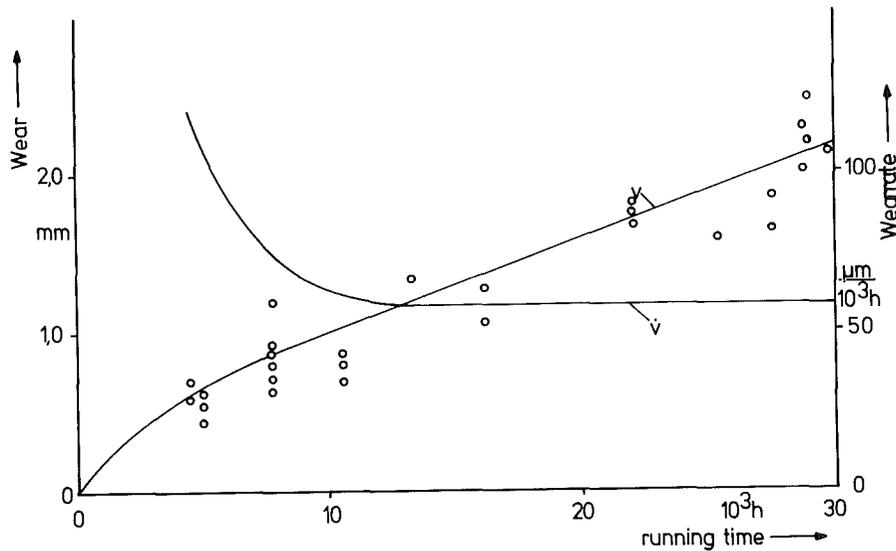


Fig.4: Verschleiß und Verschleißraten über der Betriebszeit der Zylinder eines Schiffsdieselmotors /4/

Neben Verschleißkurven von Schiffsdieselmotoren enthält Lit.8 auch solche von PKW-Motoren. Fig.5 zeigt ein als typisch bezeichnetes Meßergebnis. Aufgetragen ist die Verschleißrate (Durchmessererweiterung in μm pro 1000 km) über der Betriebszeit bis etwa 80 000 km. Ab etwa 40 000 km stellt sich eine konstante Verschleißrate ein.

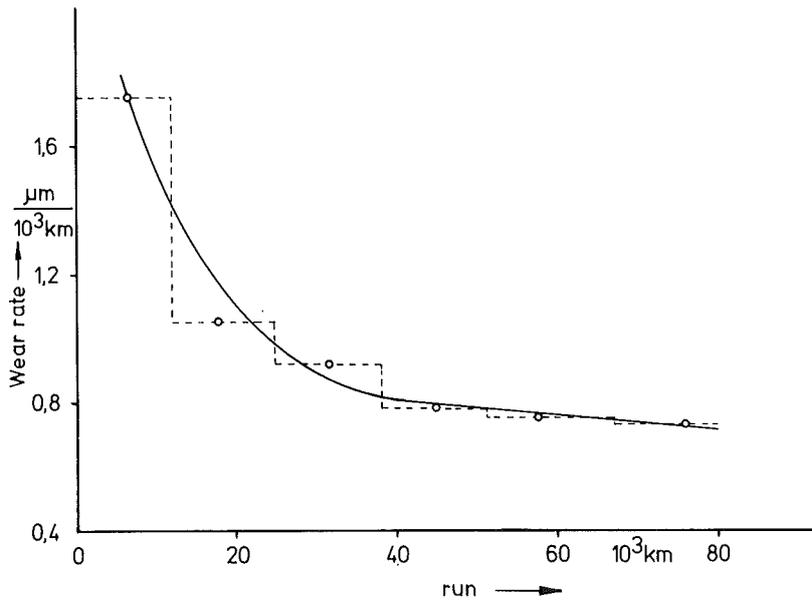


Fig.5: Verschleißraten über dem zurückgelegten Weg der Zylinder eines PKW-Motors /8/

Die Verschleiß- und Verschleißratenkurven neun verschiedener Motortypen gibt Lit.9 wieder. Gemessen wurde die Durchmessererweiterung im Bereich Büchse (OT). Fig.6 gibt die Verschleißratenverläufe wieder, wobei jede Kurve für einen Motortyp steht. Die Kurvenzuordnung zu den Motortypen wurde hier weglassen, da sie in diesem Zusammenhang nicht interessiert. Auffallend ist die Gleichartigkeit der Kurvenverläufe, die einer Gesetzmäßigkeit zu unterliegen scheinen. Das diesbezügliche analytische Modell des Autors wird in Kapitel 2.2 erwähnt.

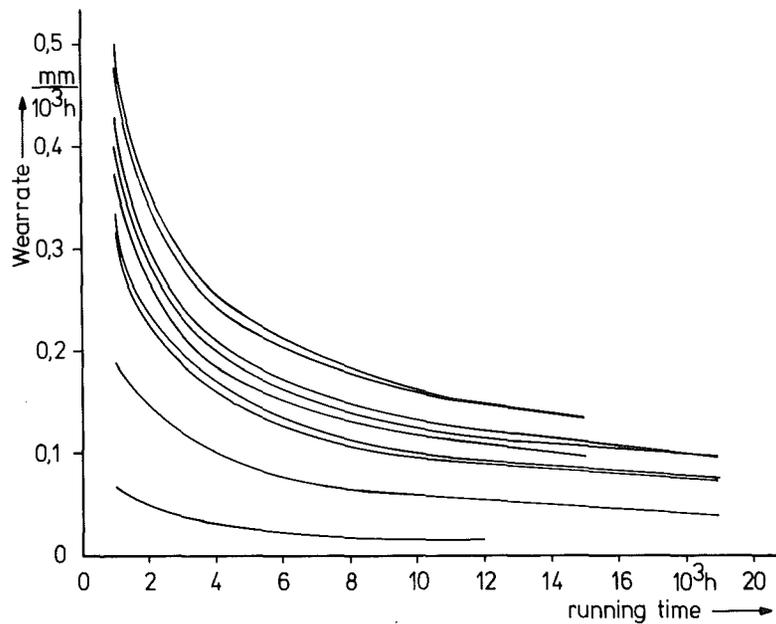


Fig.6: Verschleißraten über der Betriebszeit der Zylinder von verschiedenen Schiffsdieselmotoren /9/

In Lit.10 sind Messungen an Zylindern wiedergegeben, die zwar alle in Schiffsmotoren gleichen Typs eingebaut waren, aber die Meßergebnisse sind unterteilt in Gruppen, die den Routen der Schiffe entsprechen. Fig.7 zeigt ein typisches Ergebnis.

Die Kurven geben den Mittelwert von 36 Zylindern wieder. Aufgetragen ist die Durchmessererweiterung in mm über der Betriebszeit in h. Die Durchmessererweiterung wurde an den Stellen Q (Büchse (OT) in Längsrichtung), R (200 mm unterhalb OT in Längsrichtung), V (Büchse (OT) in Querrichtung) und X (200 mm unterhalb OT in Querrichtung) gemessen.

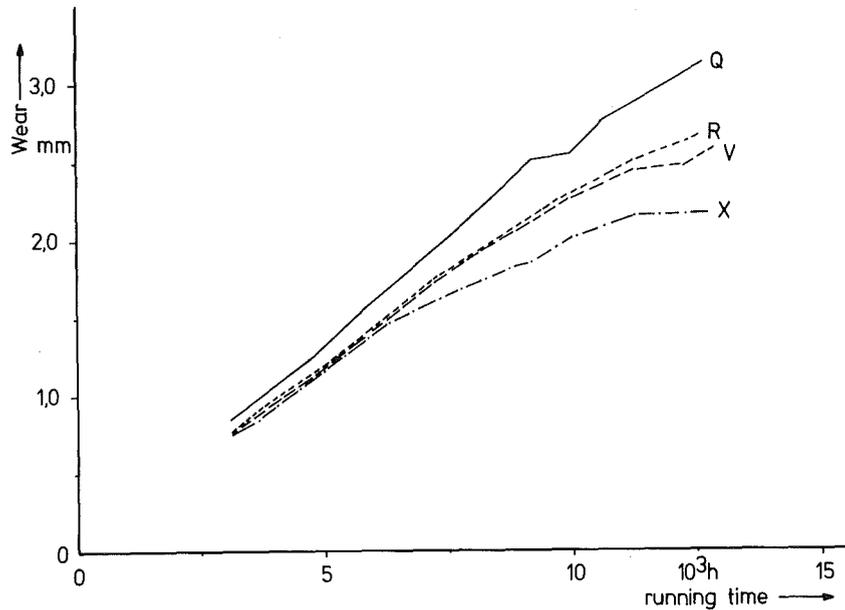


Fig.7: Verschleiß über der Betriebszeit von Zylindern gleicher Schiffsdieselmotoren aus 6 verschiedenen Schiffen, die alle gleiche Routen fahren /10/

Lit.11 beschreibt neben anderem auch den Zylinderver-
schleiß 64 luft- und wassergekühlter Ackerschlepper-Dieselmotore.
In Fig.8 ist im oberen Bild die Durchmessererweiterung in μm über
der Betriebszeit in h aufgetragen für den Bereich Büchse (OT).
Die obere Kurve gibt den Mittelwert der Messungen aller Motore
mit einem Bohrungsdurchmesser von 110 mm wieder, die untere Kur-
ve den der Motore mit 85 mm Bohrungsdurchmesser. Im unteren
Bild ist die Verschleißrate in $\mu\text{m}/1000\text{ h}$ über der Betriebszeit
in h aufgetragen. Die obere Kurve zeigt den Verschleißratenver-
lauf für den Zylinderbereich Büchse (OT) aller Motore zusätz-
lich markiert ist die Streuung der Verschleißratenmeßergebnisse.
Die untere Kurve gibt nur die Mittelwertskurve aller Motore in
Hubmitte wieder. Beide Bilder deuten auf die Existenz eines
charakteristischen Verschleiß(raten)verlaufes des Verschleiß-
motorbauteils Zylinderlauffläche hin.

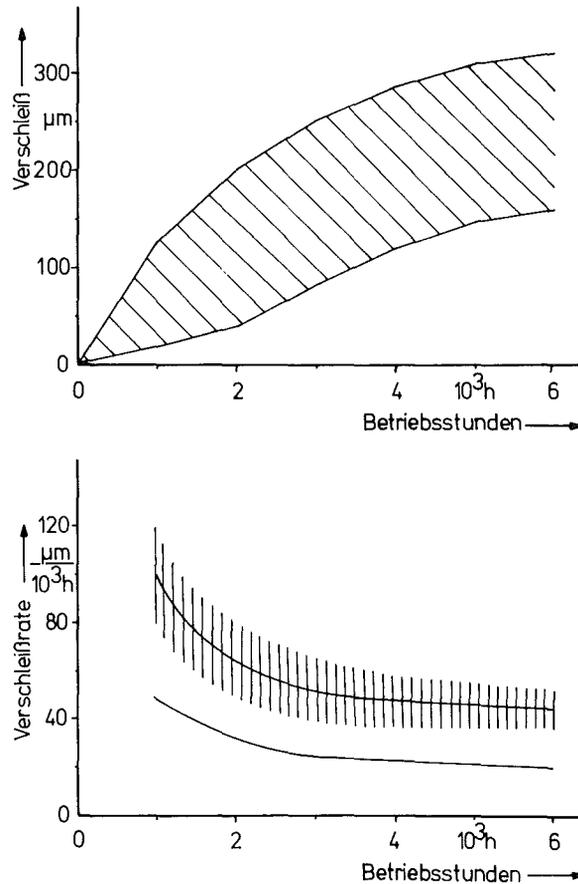


Fig.8: Verschleiß und Verschleißrate über der Betriebszeit von luft- und wassergekühlten Ackerschlepper-Dieselmotoren /11/

Lit.12 beschäftigt sich mit der Übertragbarkeit von Verschleißergebnissen, die an einer Modellverschleißprüfmaschine gewonnen wurden, auf solche im Motorbetrieb gemessenen. Ein Ergebnis, das an einem mit Nennleistung (176 kW bei 6000 min^{-1}) betriebenen Motor erzielt wurde, gibt Fig.9 wieder. Für jede Materialpaarung wurden zwei Versuche gefahren. Bei einigen mit Teillast betriebenen Paarungen scheint bis etwa 2000 h ein Einlauf vorzuliegen, während die anderen Kurven von Versuchsbeginn an konstant verlaufen. zwar unterschiedlich in der Steigung je nach Materialzusammensetzung, aber in gleicher charakteristischer Weise.

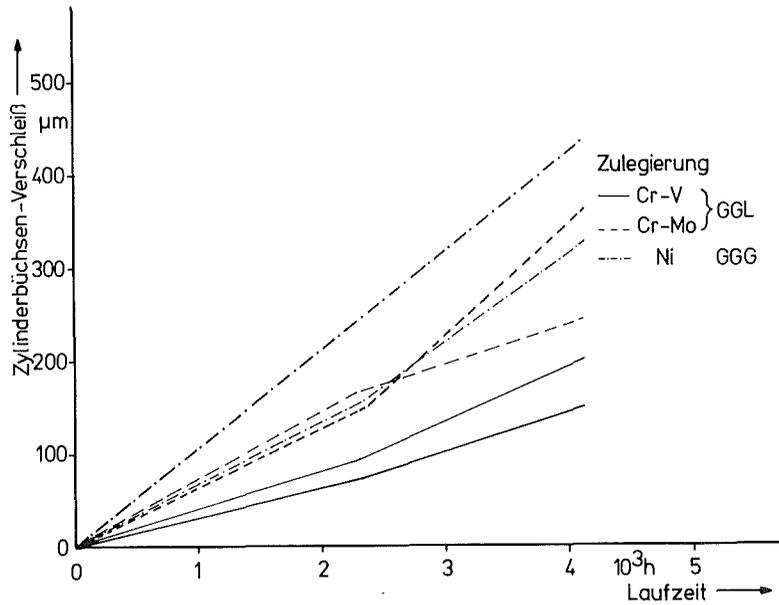


Fig.9: Werkstoffeinfluß im gleichen Motor bei hoher Beanspruchung (GGL = Gußeisen mit Lamellengraphit; GGG = Gußeisen mit Kugelgraphit) /12/

Zu a + b):

In diesem Kapitel wurden die Ergebnisse, soweit sie hier interessieren, einer Reihe repräsentativer Veröffentlichungen angeführt, die darauf hindeuten, daß es einen charakteristischen Verschleißverlauf der Zylinderlauffläche gibt, der sogar für unterschiedliche Motortypen für die Zylinderlauffläche im OT-Bereich gleichartig sein kann. Dies ist auch für den Ringlaufflächen- und -flankenverschleißverlauf zu vermuten, auch wenn das gesichtete Datenmaterial hier vorab keine endgültige Aussage erlaubt. Lit.8 enthält eine Zusammenfassung möglicher Verschleiß- und Verschleißratenkurvenformen von Verschleißmotorbauteilen, die in Fig.10 wiedergegeben werden. Aufgrund der gesichteten Literatur spricht viel dafür, daß die charakteristischen Verschleiß(raten)-kurven der meisten Motorbauteile durch eine dieser acht Kurventypen dargestellt werden können. Besonders häufig wurde der Typ 3 und 6 beobachtet.

Verschleißkurven

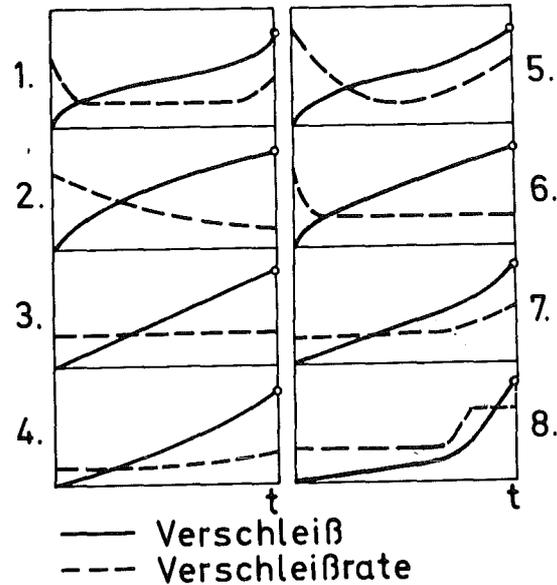


Fig.10: Mögliche Verschleiß- und Verschleißratenverläufe von Verschleißmotorbauteilen /8/

2.2 Analytische Ansätze

Die mathematische Behandlung des Problemkreises der Darstellung von Lebensdauerbegrenzungen von Verschleißbauteilen kann aufgrund der eingesehenen Literatur in zwei Lösungswege unterteilt werden. Der erste Weg führt über die analytische Darstellung der Verschleißkurvenformen, der zweite zu Aussagen über die Wahrscheinlichkeit des fehlerfreien Betriebs eines gegebenen Bauteiles. Es wird versucht, eine durchschnittliche Betriebszeit bis zum Ausfall bzw. bis zur ersten Überholung anzugeben. Dieses Verfahren setzt die Kenntnis einer Vielzahl von Ausfalldaten voraus, um die theoretischen Ansätze mit Hilfe der praktischen Daten zu überprüfen und um für gegebene Bauteile in gegebenen Maschinen die freien Parameter der mathematischen Ansätze zu gewinnen. Da dieser Weg in der vorliegenden Arbeit nicht besprochen wird, soll hier nur auf in diesem Zusammenhang interessante Literatur verwiesen werden /13,14,15,16,17/.

Für die analytische Darstellung der Verschleißkurvenformen wurden im wesentlichen drei verschiedene Ansätze gefunden.

a) Polynomansatz mit Verschleiß V als unabhängiger Variablen

In Lit.18 wird ein Polynomansatz vorgeschlagen, der später in der russischen Literatur für fast alle analytischen Darstellungen die Grundlage bildet. Dabei stellt der Verschleiß V die unabhängige Variable dar und die Verschleißrate \dot{V} die abhängige.

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = k + k_1 \cdot V + k_2 \cdot V^2 + \dots + k_n \cdot V^n \quad (1)$$

Die Berechnung des Ansatzes erfolgt durch Integration, nachdem die Reihe hinter dem 2.Glied abgebrochen wird.

$$t = \frac{1}{k_1} \ln (k + k_1 V) + F \quad (2)$$

Aufgrund spezieller Anfangsbedingungen und Umrechnungen, die darauf beruhen, daß hier Verschleiß Spielerweiterung bedeutet, lautet die Endgleichung:

$$t = A \log \frac{V+h}{V_0+h} \quad (3)$$

Mit Hilfe eines Nomogramms lassen sich die Konstanten A und h ermitteln. V_0 ist das Anfangsspiel.

Es wird häufig davon ausgegangen, daß das Maximalspiel V_{\max} eines Bauteils bekannt ist, dann läßt sich die maximale Lebensdauer D errechnen zu:

$$D = A \log \frac{V_{\max}+h}{V_0+h} \quad (4)$$

oder mit (3)

$$V = (V_0+h) 10^{\frac{D-\mathcal{T}}{A}} - h \quad (5)$$

\mathcal{T} = garantierte Lebensdauer; η = Sicherheitsfaktor; A, h = Konstante

Eine sinnvolle Anwendung dieses Ansatzes für das hier zu entwickelnde System ist aber nur dann gegeben, wenn die Verteilung des zum Ausfall führenden Maximalspiels V_{\max} sowie die des Anfangsspiels V_0 bekannt wäre und ein Streubereich für die Konstanten A und h angegeben werden könnte.

In weiteren Literaturstellen werden Anwendungsbeispiele erörtert /20,21,22,23/ oder tiefer auf die theoretische Darstellung dieses Ansatzes eingegangen einschließlich möglicher Verschleißdichtefunktionen zu Beginn der Laufzeit und zum Ende /24, 21/ sowie der Dichtefunktion über der Laufzeit des Bauteils /18, 24/, was schon einmal in /25/ ausführlich behandelt worden ist.

Ein Auswertbeispiel ist Lit.20 entnommen. Es wurde der Zylinderlaufflächenverschleiß eines Schiffsdieselmotortyps ausgewertet. Insgesamt standen 322 Verschleißmeßergebnisse zur Verfügung, wobei aus der Literatur nicht hervorgeht, ob es sich um 322 verschiedene Zylinder oder um weniger handelt (d.h. mehrere Meßergebnisse an einem Zylinder zu unterschiedlichen Zeiten. Falls dem so ist, müssen es mindestens 68 Zylinder gewesen sein).

In Fig.11 ist die Durchmessererweiterung über der Betriebszeit in h aufgetragen. Die Zahlen im Diagramm bedeuten die Zahl der Meßergebnisse mit dem an der Ordinate ablesbaren Spiel zu der auf der Abszisse ablesbaren Zeit. Die mathematische Auswertung mit Formel (5) (für dieses Beispiel ausführlich in /24/) ergibt eine in etwa mittlere Kurve, eine obere Kurve, unter der 95% aller Meßergebnisse liegen und eine untere Kurve, über der 95% aller Meßergebnisse liegen.

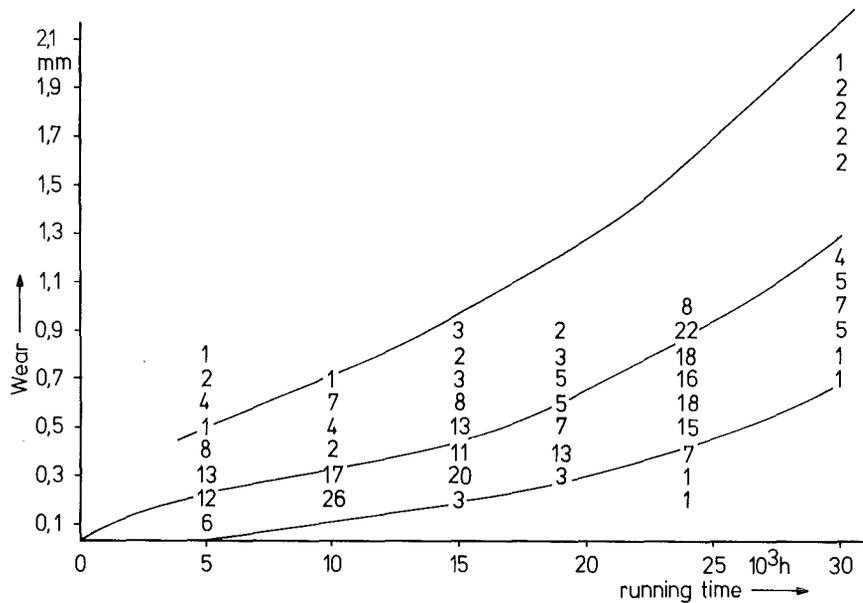


Fig.11: Mathematisch bestimmter Verschleiß über der Betriebszeit von Zylindern eines Schiffsdieselmotors /20/

b) Polynomansatz mit Laufzeit t als unabhängiger Variablen

In Lit.19 und besonders Lit.10 wird ein Polynomansatz vorgeschlagen bzw. in Lit.10 auf praktische Fälle angewendet, in dem die Laufzeit t die unabhängige Variable darstellt und der Verschleiß V die abhängige.

$$V = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + \dots + a_n \cdot t^n \quad (6)$$

In beiden Literaturstellen ist der Ansatz auf ein kubisches Polynom begrenzt. Da auch hier Verschleiß mit Spielvergrößerung gleichgesetzt wird, charakterisiert der Koeffizient a_0 die Fertigungstoleranzen des Maschinenteiles, a_1 den Einlaufbereich und $a_{2,3}$ den weiteren Verschleißkurvenverlauf. Die Ermittlung der Konstanten erfolgt mit üblichen mathematischen Methoden der Anpassung eines (hier) kubischen Polynoms an gegebene Meßwerte. Auch dieser Ansatz ist nur dann verwendbar, wenn die Verteilungsfunktionen für die Koeffizienten bekannt wären.

Die analytischen Ausdrücke der Kurven in Fig.7 sind in Lit.10 wiedergegeben.

c) Irrationaler Funktionsansatz mit Laufzeit t als unabhängiger Variablen

In Lit.9 wird ein irrationaler Funktionsansatz vorgeschlagen, der Form:

$$v = k \sqrt{t} \quad (7)$$

Mit Hilfe dieses Ansatzes sind die Kurven in Fig.6 gezeichnet worden, wobei in dem speziellen Fall die Verschleißrate über der Zeit aufgetragen ist, also:

$$\dot{v} = \frac{k}{2 \sqrt{t}} \quad (8)$$

Die Ermittlung der Konstanten k erfolgt mit üblichen mathematischen Methoden der Anpassung einer (hier) irrationalen Funktion an gegebene Meßwerte. Es wurde in /9/ aber auch versucht, die Konstante k theoretisch zu berechnen. In diese Rechnung gehen eine Reihe von Motor- und Betriebsdaten ein. Ein Ansatz ähnlich wie (8) erscheint am ehesten geeignet, auf einfache Weise eine Verknüpfung zwischen Kurvenparameter und Wahrscheinlichkeit mit Hilfe mathematisch statistischer Methoden herzustellen.

d) Multiple Regressionsanalyse

Die Methode der Verschleißberechnung mit Hilfe der multiplen Regressionsanalyse, wie sie besonders in /26/ und in /1,27/ beschrieben wird, unterscheidet sich wesentlich von den drei zuerst genannten analytischen Methoden. Da es sich um keine Methode handelt, analytische Aussagen über den Verschleißverlauf über der Betriebszeit zu gewinnen, soll sie hier nur kurz angesprochen werden. In der erwähnten Literatur wird versucht, mit Hilfe der multiplen Regressionsanalyse einen Zusammenhang zwischen der Zielgröße (hier: Verschleißrate) und den als am wichtigsten an-

gesehenen Einflußgrößen herzustellen.

$$\dot{V} = a_0 + a_1 \cdot P + a_2 \cdot \nu + a_3 \cdot u + a_4 \cdot HB + a_{11} \cdot P^2 + a_{22} \cdot \nu^2 + a_{33} \cdot u^2 + a_{44} \cdot HB^2 \quad (9)$$

Die Einflußgrößen sind:

P = Hertz'sche Pressung

ν = Viskosität des Schmiermittels an der Reibstelle

u = Gleitgeschwindigkeit

HB = Brinell-Härte

Bei der multiplen Regression geht es darum, die Wirkung aller Einflußgrößen simultan zu erfassen, wobei eine beliebige Konstante a den Einfluß der zugehörigen Einflußgröße auf \dot{V} wiedergibt unter Ausschluß aller anderen aufgeführten Einflußgrößen und unter Einschluß aller nicht aufgeführten Einflußgrößen. Die Handhabung dieser mathematischen statistischen Methode wird z.B. in /31/ abgehandelt.

Die Vor- und Nachteile dieser Methode sollen hier nicht diskutiert werden, es soll lediglich festgehalten werden, daß sich die Methode für Bestimmungen des Verschleißverlaufes über der Betriebszeit nur dann eignen würde, wenn bei nicht konstantem Verschleißratenverlauf über der Zeit die Zuordnungen der absoluten Werte der Einflußgrößen über der Zeit bekannt wären, was nicht realisierbar erscheint.

2.3 Modellvorstellung charakteristischer Verschleißratenverläufe

Die Durchsicht der Literatur und die dort angeführten Ergebnisse, die z.B. in den für repräsentativ angesehenen Figuren 4, Seite 8; 5, Seite 9; 6, Seite 10; 8, Seite 12 und den Kurven 3 und 6 in Fig.10, Seite 14 dargestellt sind, bekräftigen die Vermutung, daß ein horizontaler Verschleißratenverlauf (konstante Verschleißrate) über der Zeit nach dem Einlauf kein Sonderfall ist. Die umfangreichen Untersuchungen, die zu den in in /1,26,27/ beschriebenen theoretischen Ansätzen zur Be-

rechnung der Verschleißrate führten, gehen zunächst auch von einer konstanten Verschleißrate aus, was für den in Fig.1, Seite 4 dargestellten Fall nachgewiesen wurde. Ein konstanter Verlauf läßt sich leichter darstellen als eine sich über der Zeit ändernde Größe. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll bei der Ermittlung der charakteristischen Verschleißverläufe der Verschleißmotorbauteile, den Verschleißratenverlauf zu ermitteln und nicht den Verschleißverlauf. Falls sich der Verschleißratenverlauf nicht wie angenommen ergibt, so ist anhand der Kurven in Fig.10 zu sehen, daß sich die Verschleißratenkurven in diesen Fällen nicht schwieriger darstellen lassen werden als die Verschleißkurven.

Die Darstellung der Meßergebnisse als Verschleißraten hat im Falle konstanter Verschleißraten (im folgenden Normallaufbereich genannt) noch einen weiteren, entscheidenden Vorteil, der in Fig.12 verdeutlicht wird. Während die Parameter der Dichtefunktionen der Verschleißmeßwerte z.B. bei normal verteilten Meßwerten der Mittelwert μ und die Standardabweichung σ Funktionen der Zeit sind, sind sie für die Verschleißratenmeßwerte im Normallaufbereich konstant. Welche Voraussetzungen erfüllt sein müssen, um von einem Normallaufbereich sprechen zu können, wird in Kap. 4.2 dargelegt.

Anhand von dreidimensionalen Wahrscheinlichkeitsdichtediagrammen, wie sie für Verschleißkurvenverläufe (theoretisch) in Lit.18 oder 25 und für Verschleißratenverläufe (anhand praktischer Ergebnisse am Motor D) in Lit.28 veröffentlicht sind, ist der Vorteil der vorgeschlagenen Auftragung der Meßwerte ebenfalls deutlich zu erkennen.

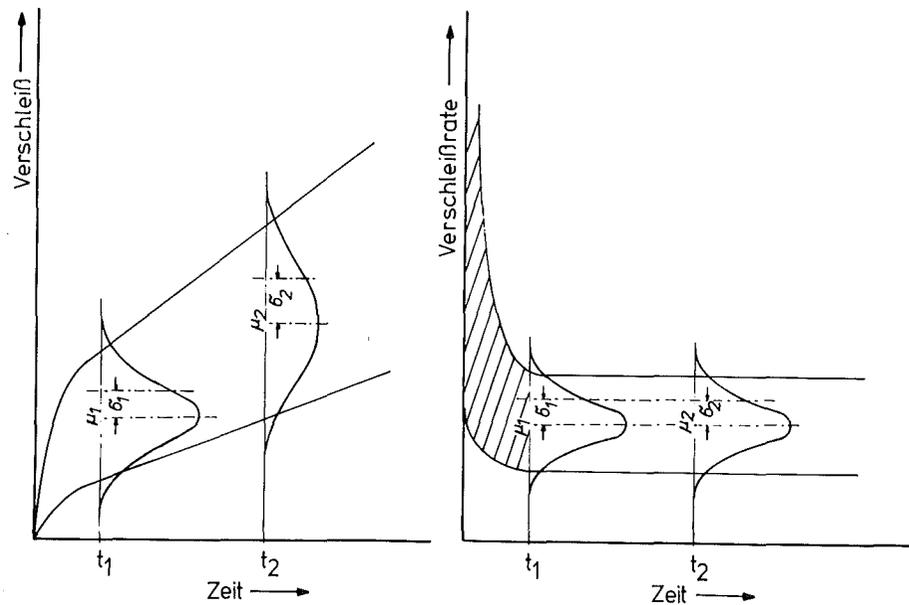


Fig.12: Verlauf der Dichtefunktionen bei der Auftragung des Verschleißes bzw. der Verschleißraten über der Betriebszeit

3. Z I E L D E S V O R H A B E N S U N D L Ö S U N G S W E G

a) Ziel des Vorhabens

Es erscheint gesichert, daß in einem Betriebsintervall bei konstanten Bedingungen jedes kritische Bauteil einen typischen Verschleißratenverlauf zeigt. Mit Hilfe der RNT sind diese Verschleißratenverläufe kontinuierlich erfaßbar. Aufgrund der Bedeutung, die der Kenntnis der Verschleißratenverläufe der in-

teressierenden kritischen Bauteile zugemessen wird, läßt sich folgendes Zielergebnis definieren:

Ein Verfahren zur Ermittlung des Langzeitverschleißratenverhaltens kritischer Motorbauteile in Verbindung mit einer statistischen Aussage über die Höhe der oberen Grenzen des Verschleißniveaus für bestimmte Prozentsätze der kritischen Motorbauteile.

Die Aussage, daß für i -% der kritischen Motorbauteile das Verschleißniveau höchstens den berechneten Wert hat, soll aufgrund der zu einer geeigneten Zeit mit Hilfe eines kurzzeitigen Motortests gewonnenen Kenntnis des Verschleißratenverlaufes des Motorbauteils gemacht werden können.

b) Statistische Überlegungen

Es wird die Hypothese aufgestellt, daß gleichnamige Bauteile ein gleichartiges Verschleißverhalten zeigen. Gleichnamig bedeutet hier, Verschleißmotorbauteile mit den gleichen Namen aus Otto- oder Dieselmotoren. Solche Bauteile können sein: Lauf- fläche oder Flanke des 1., 2. oder 3. Kompressionsrings, die Zylinderlauf- fläche im Bereich des Umkehrpunktes des 1., 2. oder 3. Kompressionsrings in OT oder UT, Ventilsitz eines Aus- oder Einlaßventils usw..

Gleichartigkeit bedeutet hier, daß der Verschleißverlauf aller gleichnamigen Bauteile durch einen gleichen mathematischen Formalismus beschreibbar ist, der aus Funktionen für die Darstellung des Verschleißverlaufes über der Zeit aufgebaut ist und für die Beurteilung der Gleichartigkeit Angaben über die Verteilungsfunktionen der Meßwerte enthalten muß. Es bietet sich bei dem derzeitigen begrenzten Kenntnisstand allgemein gültiger Zusammenhänge zwischen Verschleißerscheinungen, Bauelementen, Betriebsmitteln und Betriebsbedingungen an, nur solche Funktionsansätze in Erwägung zu ziehen, die zum einen in der Literatur für das gewählte Bauteil in gleicher oder ähnlicher Form schon erwähnt wurden und zum anderen möglichst wenige freie Parameter haben und somit auf einfache Gesetzmäßigkeiten hinweisen. So wurde, um es schon an dieser Stelle vorwegzunehmen, für die

gleichnamigen Bauteile Ring- sowie Büchsenlauffläche die Hypothese aufgestellt, daß im Bereich sich über der Zeit ändernder Verschleißraten ein linearer Zusammenhang zwischen dem Logarithmus der Verschleißrate und dem doppelten Logarithmus der Betriebszeit vorliegt.

Die Angaben über die Momente der Verteilungsfunktionen hängen in ihrer Genauigkeit von der Zahl der Meßwerte ab, die zu den Grundgesamtheiten gehören. Der Umfang der Grundgesamtheiten muß deshalb mindestens so groß sein, wie er für die Erreichung bestimmter endlicher Genauigkeiten für die Momente notwendig ist.

Die obige Abgrenzung des Begriffs der Gleichnamigkeit muß vorgenommen werden, weil es das Ziel dieser Arbeit ist, dem Praktiker eine Methode verfügbar zu machen, die Verbesserungen in der Bauteiloptimierung erlaubt.

Alle Verschleißbauteile einer Arbeitsmaschine zusammen als gleichartiges Bauteil zu betrachten, würde zwar exakte Extrapolationen erlauben, aber für das gleichnamige Bauteil im Sinne der gewählten Einschränkung mit beliebig großer Unschärfe.

Die genannten Einschränkungen bei der Beschreibung und Beurteilung der Gleichartigkeit beruhen darauf, daß nur eine endliche Zeit zur Verfügung steht, um die Hypothese "gleichnamig - gleichartig" nachprüfen zu können, d.h., im Rahmen der Überprüfbarkeit ob sich gleichnamige Bauteile gleichartig verhalten, steht nur eine endliche Zeit zur Bestimmung der Gleichartigkeit zur Verfügung. Liegt Gleichartigkeit vor, so wird der Verschleißverlauf als für dieses gleichnamige Bauteil charakteristischer Verschleißverlauf bezeichnet.

Die Ermittlung dieses Verlaufes erfolgt zunächst unter dem Gesichtspunkt, daß die Einflüsse, die Streuungen der Meßwerte hervorrufen, weitgehend ausgeschlossen werden. Solche Einflüsse sind z.B.: Bauteile mit Fertigungstoleranzen, die von den mittleren Fertigungstoleranzen weit abweichen, Wechsel der Betriebsbedingungen und Betriebsmittel während der Versuche, Verwendung des gleichnamigen Bauteils in Motoren verschiedener Hersteller.

Die ersten Versuche zur Ermittlung des charakteristischen Verschleißratenverlaufes eines gleichnamigen Bauteiles erfolgen mit Bauteilen größter Fertigungstoleranzdichte von einem Hersteller in einem Motortyp unter Verwendung gleicher Betriebsmittel und weitgehend konstanter Betriebsbedingungen. Auf diese Weise ist zu erwarten, daß für das gegebene gleichnamige Bauteil ein mittlerer Verschleißratenverlauf gewonnen wird. Anschließend werden Schritt für Schritt die Größen verändert, die Streuungen verursachen. Zunächst kommen statt mittlerer Bauteile solche mit bis zur maximal zulässigen Fertigungstoleranzdichte zur Anwendung in einer Häufigkeit, die die Ermittlung der Verteilungsfunktionen der Meßwerte über der Betriebszeit ermöglicht. Das so gewonnene Meßdatenkollektiv wird als "Grundgesamtheit" dieses gleichnamigen Bauteiles bezeichnet. Der Übergang von ausgesuchten zu nichtausgesuchten Bauteilen ermöglicht es, Extrapolationen für Bauteile beliebiger Fertigungstoleranzdichte durchzuführen.

Nach der Erstellung der Grundgesamtheiten wird für jedes gleichnamige Bauteil eine Hypothese aufgestellt, wie die funktionale Abhängigkeit zwischen den Verschleißratendaten der Menge aller Versuche und deren Laufzeit ist. Ob der gewählte Funktionsansatz den Verlauf der Verschleißratendaten der jeweiligen Grundgesamtheit genügend genau wiedergibt, läßt sich mathematisch statistisch auf der Basis einer vorgegebenen Irrtumswahrscheinlichkeit ausrechnen.

Die Grundgesamtheit jedes gleichnamigen Bauteiles läßt sich erweitern, wenn weitere Einflüsse berücksichtigt werden, die Streuungen verursachen. Das gleichnamige Bauteil kann z.B. in einen anderen Motortyp eingebaut werden. Ergibt die anschließende Überprüfung Gleichartigkeit zwischen dem Testversuchsergebnis und dem bekannten Ergebnis, d.h., die mathematisch statistische Überprüfung verneint nicht die Zugehörigkeit der Testdaten zur ursprünglichen Grundgesamtheit, so können diese Testdaten in die Grundgesamtheit aufgenommen werden. Erweiterungen sind so lange sinnvoll, bis die Streuungen Werte annehmen, mit denen der Praktiker nichts mehr anfangen kann.

Um nach Testversuchen für die verwendeten Bauteile An-

gaben machen zu können wie hoch der prozentuale Anteil der Bauteile für ein bestimmtes Verschleißrateniveau zu einer vorgegebenen Zeit höchstens sein wird, also das anfangs definierte Zielergebnis erreicht werden soll, muß für jedes gleichnamige Bauteil ein Wahrscheinlichkeitskennfeld vorhanden sein, in dem die gewünschten Größen abgelesen werden können.

Wahrscheinlichkeitskennfelder für die gleichnamigen Bauteile lassen sich erstellen, indem in jede Grundgesamtheit Kurvenscharen derjenigen Funktion eingezeichnet werden, die den Zusammenhang zwischen Verschleißrate und Zeit der jeweiligen Grundgesamtheit gemäß der überprüften Hypothese wiedergibt. Mit Hilfe einer geeigneten mathematisch statistischen Methodik läßt sich der Zusammenhang zwischen Kurvenparameter und Wahrscheinlichkeit berechnen.

Die bisher ausgeführten Überlegungen werden im folgenden schrittweise dargestellt.

c) Lösungsweg

Das System benötigt zunächst für ein gleichnamiges Verschleißbauteil eine genügend große Grundgesamtheit von Verschleißratendaten. Sie müssen aus Versuchen stammen, die vom Start mit dem Neuteil bis zum Ende der Beobachtungszeiträume (z.B. bis zum Ausfall der Teile oder vorgegebenen Grenzspielen) reichen oder/und aus Versuchen, die nur Zeitbereiche abdecken z.B. nur den Zeitbereich vom Start mit dem Neuteil bis 100 h Laufzeit o.ä..

Danach muß eine Hypothese über den funktionalen Verschleißratenverlauf aufgestellt und mit einer vorgegebenen Irrtumswahrscheinlichkeit nachgeprüft werden, wie der funktionale Zusammenhang zwischen den Verschleißratendaten des gleichnamigen Bauteiles und der Versuchszeit ist. Es wird für jedes gleichnamige Bauteil so ein charakteristischer Verschleißratenverlauf ermittelt. Es läßt sich nun für jedes gleichnamige Verschleißbauteil ein Wahrscheinlichkeitskennfeld zeichnen, nachdem mit Hilfe einer mathematisch statistischen Auswertemethode der Zusammenhang zwischen den Kurvenparametern der Verschleißratenverläufe und den mit Wahrscheinlichkeiten belegten Kurven des Wahrscheinlichkeitskennfeldes gefunden wurde.

Falls es Bereiche gibt, in denen die Verschleißraten über der Zeit konstant sind, vereinfachen sich die Wahrscheinlichkeitskennfelder zu Wahrscheinlichkeitslinien. Da jetzt für jeden solchen Bereich nur eine Verteilungsfunktion zur Beschreibung der Verteilung der Verschleißraten ausreicht, wird für jedes gleichnamige Bauteil auch nur eine Summenhäufigkeitskurve pro Bereich benötigt, um den Zusammenhang zwischen Verschleißraten und Wahrscheinlichkeit zu liefern.

Die Wahrscheinlichkeitsbelegung eines einzelnen Testversuches erfolgt in Anlehnung an bisher schon benötigte Rechenverfahren. Bevor allerdings von den Kurvenparametern des Einzelversuches zur Wahrscheinlichkeitsbelegung übergegangen werden kann, muß überprüft werden, ob die Daten des Testversuches zu denen der betreffenden Grundgesamtheit gehören. Dazu gehört eine weitere mathematisch statistische Auswertemethodik, die aus zwei Teilen besteht. Es wird überprüft, ob der funktionale Zusammenhang zwischen der Verschleißrate und der Zeit, wie er für die Grundgesamtheit gewählt wurde, auch für den Einzelversuch angewandt werden kann und es gehört ein statistischer Test dazu, der die Zugehörigkeit der Testdaten zur Grundgesamtheit überprüft. Erst danach kann bei positiver Überprüfung eine Wahrscheinlichkeitsbelegung erfolgen.

4. STATISTISCHE VERARBEITUNG DER VERSCHLEISSMESSERGEBNISSE

Der in Kap.3 in allgemeiner Form beschriebene Lösungsweg, mit Hilfe mathematisch-statistischer Methoden vom Kurzzeit- auf das Langzeitverschleißratenverhalten schließen zu können, soll in diesem Kapitel konkretisiert werden. Es werden alle mathematisch statistischen Methoden der Reihe nach genannt und beschrieben. Als Grundlage dient das Strukturdiagramm in Fig.13.

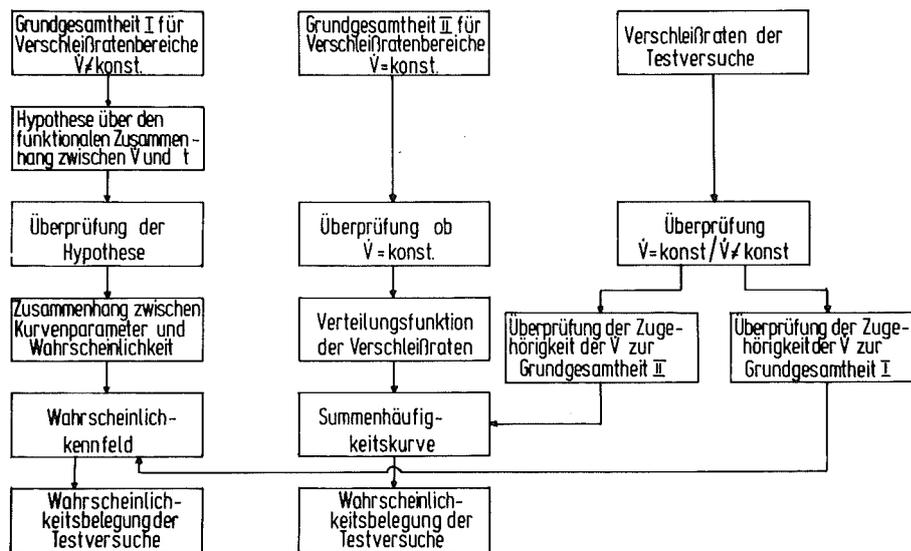
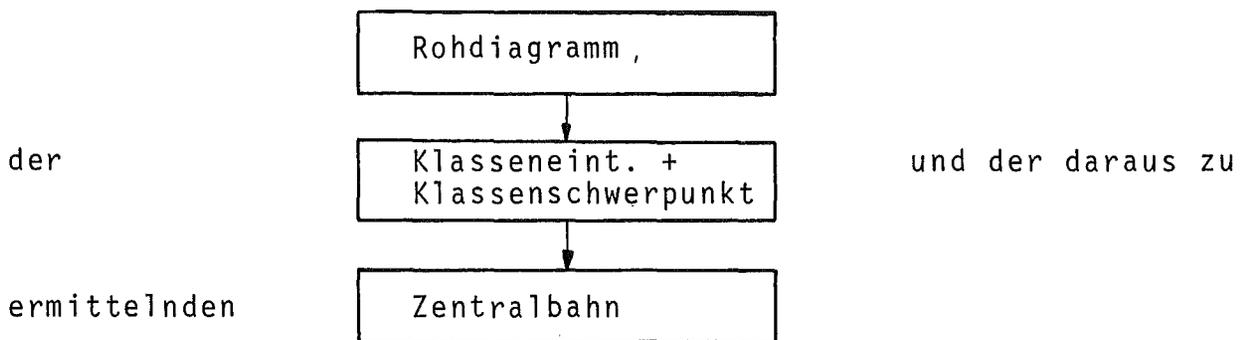


Fig.13: Prinzip der statistischen Verarbeitung der Verschleißmeßergebnisse

Das Strukturdiagramm zeigt im linken Ast die Verarbeitung der Verschleißratendaten aus Bereichen sich über der Zeit ändernder Verschleißraten vom Rohdiagramm bis zum Wahrscheinlichkeitskennfeld. Das gleiche gilt auch für den mittleren Ast für die Verschleißratendaten aus Bereichen sich nicht über der Zeit ändernder Verschleißraten. Der rechte Ast dient der Überprüfung, ob mit Hilfe der Daten von Testversuchen Angaben gemacht werden können, wie hoch für bestimmte prozentuale Anteile gleichnamiger Bauteile das Verschleißniveau zu beliebig vorgebbaren Zeiten höchstens sein wird.

4.1 Verarbeitung der Verschleißraten aus Bereichen sich über der Laufzeit ändernder Verschleißraten

Am Anfang stehen die Versuchsreihen mit den jeweiligen gleichnamigen Bauteilen zur Ermittlung einer genügend umfangreichen Grundgesamtheit von Verschleißratendaten. Danach muß eine Hypothese aufgestellt werden, welcher funktionale Zusammenhang zwischen den Verschleißratendaten eines bestimmten gleichnamigen Bauteiles und der Versuchszeit gilt. Die gewählte Vorgehensweise setzt sich zusammen aus dem



Die nach wachsender Laufzeit geordneten Daten der Grundgesamtheit stellen in einem Koordinatensystem eine Punktwolke dar, das Rohdiagramm, aus dem sich schon der Verlauf der Verschleißraten über der Zeit erkennen läßt. Das Rohdiagramm wird unterteilt, indem die Abszisse in gleichgroße Klassen aufgeteilt wird und in jeder Klasse die Klassenschwerpunkte gebildet werden. Statt des Rohdiagramms liegt jetzt eine Folge von Klassenschwerpunkten vor, durch die die gewählte Strukturfunktion gelegt wird. Es ist angebracht, diese Kurve Zentralbahn zu nennen, weil sie das Rohdiagramm derart unterteilt, daß im Mittel 50% der Verschleißraten über bzw. unter ihr liegen.

Ob die gewählte Strukturfunktion den Verschleißratenverlauf genügend gut wiedergibt, muß überprüft werden. Das gewählte Verfahren nennt sich Regressionsanalyse und besteht im Falle einer linearen Regression aus den in Fig.14 zu ersehenden Auswerteschritten.

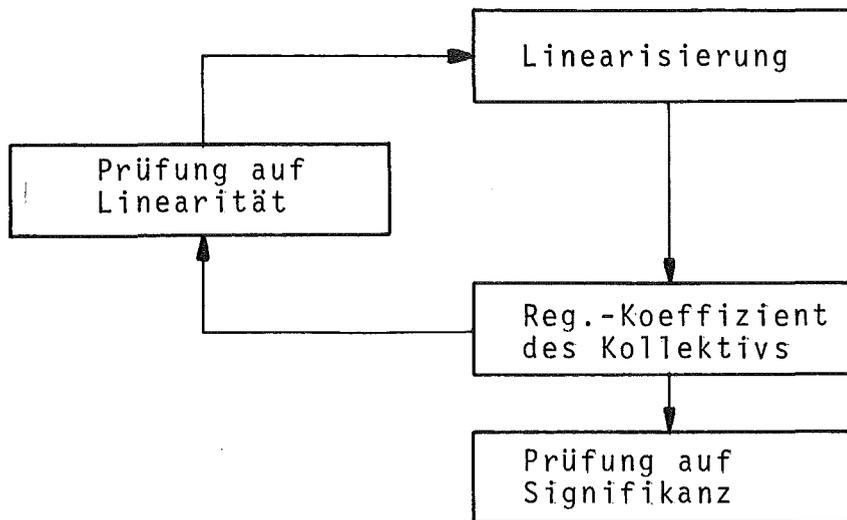


Fig.14: Auswerteschritte der linearen Regressionsanalyse

Das Verfahren hat gegenüber der üblichen Bestimmung des Bestimmtheitsmaßes der Korrelationsanalyse den Vorteil, nicht nur den Grad des Zusammenhangs zwischen 2 Zufallsvariablen zu bestimmen, sondern auch die Art der Abhängigkeit zwischen den Zufallsvariablen zu berechnen einschließlich der Überprüfung der angenommenen Gesetzmäßigkeit auf der Basis einer vorgegebenen Irrtumswahrscheinlichkeit.

Die einfachste Regressionsanalyse geht von paarweise vorliegenden Beobachtungsdaten aus. Es wird untersucht, ob zwischen den Datenpaaren eine Abhängigkeit besteht und welcher Art diese Abhängigkeit ist. Dabei wird im Unterschied zur Korrelationsanalyse die Verteilung der abhängigen Zufallsvariablen (hier: Verschleißrate Φ) bei gegebenen Werten der unabhängigen Zufallsvariablen (hier: Zeit T) betrachtet.

Als Regression bezeichnet man den Zusammenhang zwischen den durchschnittlichen Werten von Φ und den verschiedenen Zeitpunkten T_i oder allgemein:

Die theoretische Regressionslinie ist die Verbindungslinie der geometrischen Orte der wahrscheinlichsten Werte von Φ je T_i . Dabei muß die Varianz der Werte Φ je T_i nicht unbedingt konstant sein, es genügt, wenn die Varianz proportional einer

bekannten Funktion von T ist /30/. Die Schätzung der Parameter der theoretischen Regressionslinie $\eta = f(T)$ erfolgt nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate, d.h. durch Bestimmung der Parameter $\alpha, \beta, \gamma \dots$, welche die Summe

$$\sum_i^k \sum_v^{n_i} \varphi_{iv} - f(T_i; \alpha; \beta; \gamma \dots)^2 \quad (10)$$

zu einem Minimum machen. Läßt sich der vorgegebenen Punktwolke (T_i, φ_{iv}) eine Gerade anpassen, so spricht man von linearer Regression. Dabei ist zu beachten, daß es stets zwei Regressionsgeraden gibt, da die Abhängigkeit der beiden Variablen stets wechselseitig ist. Im Unterschied zur funktionalen Abhängigkeit sind die beiden Regressionsgeraden nur über das Bestimmtheitsmaß auseinander ableitbar /34/.

Es interessiert im allgemeinen jedoch nur die Regression einer Variablen bzw. hier die Regression der Verschleißratenwerte bezüglich der Laufzeit.

In vielen Fällen ist bei Vorliegen einer nichtlinearen Regression durch eine geeignete Transformation Linearität zu erreichen und dadurch eine Vereinfachung des Rechenganges. Dies soll im vorliegenden Fall versucht werden, da aufgrund der in Kap.2 und 3 genannten Aussagen eine Linearisierung möglich erscheint /29,31,34,35/.

Linearisierung

Die Ermittlung der Zentralbahn ergibt den Zusammenhang der Klassenschwerpunkte mit der Laufzeit. Durch eine entsprechende Teilung der Ordinate in Form des funktionalen Zusammenhanges zwischen Φ und T führt dies zu einem linearen Zusammenhang zwischen

$$\eta = f(\Phi) \text{ und } \Psi = f(T)$$

also:

$$\eta = a + b \psi \quad (11)$$

mit a = Achsenabschnitt der Regressionsgeraden

b = Regressionskoeffizient der linearen Regression

Im Falle einer nichtlinearen Regression der Meßwerte wird der Rechenaufwand größer. Die einzige zusätzliche Bedingung ist eine monoton verlaufene Regressionslinie.

Regressionskoeffizient

Die Berechnung des Regressionskoeffizienten erfolgt nach der Gleichung

$$\sum_i (\eta_i - (a + b \psi_i))^2 = \min \quad (12)$$

Durch Bildung der partiellen Ableitung nach a erhält man den Achsenabschnitt a:

$$a = \bar{\eta} - b \bar{\psi} \quad (13)$$

wobei:

$$\bar{\psi} = \frac{\sum \psi_i}{N}$$

und

$$\bar{\eta} = \frac{\sum \eta_i}{N}$$

N = Anzahl der Wertepaare

Die Ableitung nach b mit (13) ergibt den Regressionskoeffizienten b:

$$b = \frac{\sum \eta_i \sum \psi_i - \sum \psi_i \cdot \frac{\sum \eta_i}{N}}{\sum \psi_i^2 - \frac{(\sum \psi_i)^2}{N}} \quad (14)$$

Damit sind Regressionskoeffizient und Achsenabschnitt, die Bestimmungsgrößen der Regressionsgeraden, festgelegt.

Prüfen auf Linearität

Die Berechnung des Regressionskoeffizienten hat zur Voraussetzung, daß eine lineare Regression vorliegt.

Die Nachprüfung der Linearität kann jedoch nur erfolgen, wenn der Regressionskoeffizient bestimmt wurde, d.h., man prüft nachträglich die Anpassung der Regressionslinie an die vorgegebenen Meßpunkte. Dieses Prüfverfahren basiert auf der Prüfgröße F.

$$F = \frac{\text{Abweichung der Gruppenmittelwerte von der Regressionsgeraden}}{\text{Abweichung der Meßwerte von ihrem Gruppenmittelwert}}$$

Voraussetzung dafür ist, daß mehr η -Werte als ψ -Werte vorhanden sind. Da dies im Falle von Verschleißmessungen nicht der Fall sein kann, werden die Meßwerte zu Gruppen zusammengefaßt und die η -Werte einer Gruppe als Ordinaten des Gruppendurchschnitts $\bar{\psi}$ betrachtet.

Mit: k = Anzahl der ψ -Werte

n = Anzahl der η -Werte

$\bar{\eta}_i$ = Mittelwerte der zu einem $\bar{\psi}_i$ gehörenden Werte η_{ij}

$\hat{\eta}_i$ = $a + b \cdot \psi_i$ Funktionswerte der Regressionsgeraden

ergibt sich für die Prüfgröße

$$F = \frac{\frac{1}{k-2} \sum_i^k n_i (\bar{\eta}_i - \hat{\eta}_i)^2}{\frac{1}{n-k} \sum_i^k \sum_j^{n_i} (\eta_{ij} - \bar{\eta}_i)^2} \quad (15)$$

Erreicht oder übersteigt der errechnete F-Wert die Signifikanzschranke der theoretischen F-Verteilung auf einem vorgegebenen Niveau, so wird die Linearitätshypothese abgelehnt. Mit Hilfe einer geeigneteren Transformation kann dann neu versucht werden, eine lineare Regression zu erhalten /31/.

Prüfen des Regressionskoeffizienten auf Signifikanz

Spricht der Test nicht gegen die Linearität der Regression, so erfolgt als nächster Test die Prüfung des Regressionskoeffizienten gegen Null, d.h. es wird die Nullhypothese $b = 0$ getestet.

Eine Ablehnung der Nullhypothese bedeutet dann, daß der Regressionskoeffizient sich signifikant von Null unterscheidet und daß damit eine Regression vorliegt, die den Streuungen der Meßwerte überlagert ist.

Prüfgröße hierfür ist:

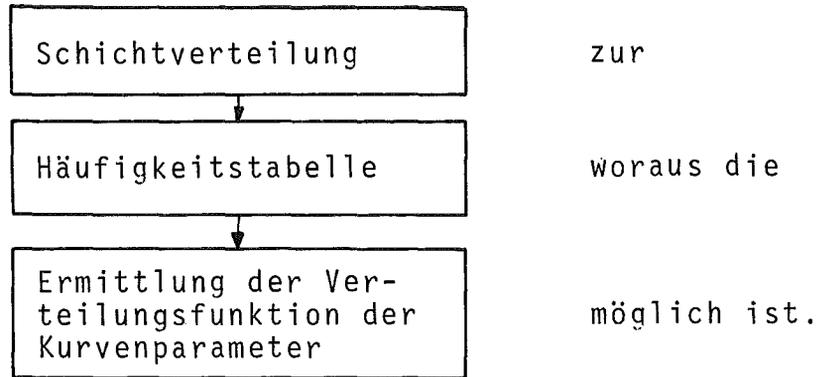
$$t = \frac{b_1}{S_p} \cdot \sqrt{\frac{\sum_i (\psi_i - \bar{\psi})^2}{\sum_i (\eta_i - \hat{\eta}_i)^2}} \quad (16)$$
$$S_p = \frac{\sum_i (\eta_i - \hat{\eta}_i)^2}{n-2}$$

Die Signifikanzschranke erhält man also aus der Student-t-Verteilung. Getestet wird auf dem 1%-Niveau.

Das Testniveau von 1% wird hier gewählt, weil das Ziel des Tests die Ablehnung der Nullhypothese ist. Das bedeutet, die Schranke für die Ablehnung wird zum schärferen Aussagebereich hin verschoben bzw., das Risiko, die Hypothese $b = 0$ beizubehalten obwohl sie falsch ist, wird verkleinert /31/.

Fallen alle Tests positiv aus, d.h., die gewählte Strukturfunktion gibt den Verlauf der Verschleißraten Daten genügend genau (entsprechend den gewählten Irrtumswahrscheinlichkeiten) wieder, so kann der Zusammenhang zwischen den Kurvenparametern der Funktion des nun charakteristisch zu nennenden Verschleißratenverlaufes und den mit Wahrscheinlichkeiten belegten Kurven

gesucht werden. Der Auswertegang führt über die Bildung der



Schichtverteilung

Setzt man voraus, daß alle Verschleißratenbahnen konstanter Wahrscheinlichkeit eines Kollektivs ähnlich sind, sie also alle die gleiche Strukturfunktion

$$\varphi(\mathcal{T}) = a \Phi(\mathcal{T}) \quad (17)$$

besitzen, so kann man eine Bahn von beliebiger Wahrscheinlichkeit "i" allgemeiner formulieren:

$$\Phi(\mathcal{T}, i) = A_k \cdot \varphi(\mathcal{T}) \quad (18)$$

Dabei ist: $0 \leq i \leq 1$

Die getroffene Voraussetzung ist deshalb begründet, weil die zugrunde liegende Strukturfunktion aus den Klassenschwerpunkten des Gesamtkollektivs gewonnen wurde und damit auch annähernd eine Bahn mittlerer Wahrscheinlichkeit darstellt.

$\Phi(\mathcal{T}, i) = A_k \cdot \varphi(\mathcal{T})$ verläuft im Rohdiagramm so, daß gerade $i \cdot 100\%$ aller gemessenen Verschleißraten über ihr zu erwarten sind bzw. mit $i \cdot 100\%$ Wahrscheinlichkeit werden Teile der untersuchten Art geringere Verschleißraten aufweisen als ein Teil auf der Bahn $\Phi(\mathcal{T}, i)$.

Man legt nun verschiedene Zahlenwerte A_k willkürlich fest, da die dazugehörigen i -Werte noch nicht bekannt sind und

zeichnet die Bahnen $A_k \cdot \mathcal{P}(\mathcal{P})$. Zwischen zwei benachbarten Bahnen liegen endlich viele Meßpunkte (Φ, Υ).

Häufigkeitstabelle

Die Zahl der Meßpunkte wird für jede Schicht ausgezählt und in eine Häufigkeitstabelle eingetragen. Punkte, die auf einer Bahn liegen, zählen zur Hälfte als über bzw. unter dieser Bahn liegend.

A_k	①	②	...	[1]
Δn				③		[Stück]
$n = \sum \Delta n$			④	⑤	⑥	[Stück]
$i = \frac{n}{n_{ges}}$	0			⑦	1	[1]

Tab.1: Häufigkeitstabelle für die Schichtverteilung

Bei ③ steht die Anzahl Δn der Meßpunkte, die unter Bahn ② und über Bahn ① liegen. Bei ⑤ steht die Summe n der Meßpunkte die unter Bahn ② liegen, also $⑤ = ④ + ③$. Bei ⑦ steht der Prozentsatz i , wenn die Summe aller Meßpunkte gleich 100% ist, also $⑦ = ⑤ : ⑥ \cdot 100\% / 32\%$.

Um i als stetige Funktion der A_k darstellen zu können, werden die Werte der Häufigkeitstabelle in einem Wahrscheinlichkeitspapier ausgewertet.

Verteilungsfunktion der Kurvenparameter

Die Auswertung der Häufigkeitstabelle kann theoretisch in jedem beliebigen Wahrscheinlichkeitspapier vorgenommen werden. Ist es aber möglich, in Wahrscheinlichkeitspapieren bestimmter Arten einen linearen Zusammenhang zwischen Wahrscheinlichkeit und Merkmal darzustellen, dann ist fast immer das Merkmal entsprechend

der der Teilung des Papiers zugrundeliegenden Dichtefunktion verteilt. Dadurch wird die mathematische Behandlung des Problemkreises Kurvenparameter-Wahrscheinlichkeit sehr vereinfacht.

Das Weibull-Papier bietet hier den Vorteil, daß aufgrund der Anpassungsfähigkeit der Weibull-Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion sich in sehr vielen Fällen dieser lineare Zusammenhang erzielen läßt.

Die Ordinate des Weibull-Papiers $F(x)$ ist über der Abszisse x im Maßstab

$$\log \left(\log \left(\frac{1}{1-F(x)} \right) \right) = f(\log x) \quad (19)$$

aufgetragen.

$F(x)$ ist die Summenverteilung zu einer Häufigkeitsverteilung $f(x)$.

$$F(x) = \int_0^x f(\xi) d\xi = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x-\alpha}{y}\right)^z\right) \quad (20)$$

Hat die vorliegende Summenverteilung $F(x)$ diese Struktur, so ergibt sich im Weibull-Papier eine Gerade und man kann die konstanten Parameter y und z graphisch ermitteln.

$$F(x) = 63\% \nearrow x_{63\%} = y \quad (21)$$

z ist die Steigung der Geraden, die durch Parallelverschiebung auf einer Nebenskala abgelesen wird, und ein Maß für die Streuung der Meßwerte.

Ergibt sich im Weibull-Papier keine Gerade, so kann häufig durch Einführung des Lageparameters α der Kurvenzug zur Geraden gestreckt werden.

Das mittlere Fehlerquadrat der Abweichungen wird dabei minimiert, d.h., das Argument $(x-\alpha)$ der Summenfunktion wird solange variiert, bis die Meßpunkte auf einer Geraden mit geringster Streuung liegen /33/.

Im vorliegenden Fall entsprechen sich dann

$$\Delta n \approx f; i \approx F; A_k \approx x$$

mit $A_{63} = y$.

Die Zuordnung der Wahrscheinlichkeiten zu den Bahn-Parametern ist dann gegeben mit

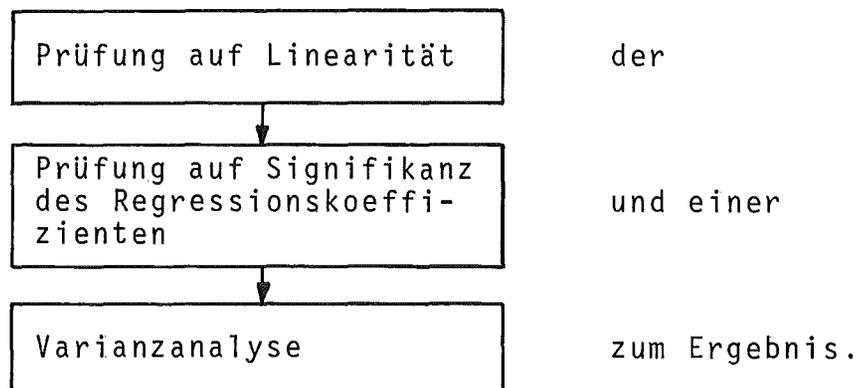
$$i = 1 - \exp \left(- \left(\frac{A_k - \alpha}{A_{63}} \right)^2 \right) \quad (22)$$

Nach dieser Auswertung ist es möglich, das Wahrscheinlichkeitskennfeld zu zeichnen.

4.2 Verarbeitung der Verschleißraten aus Bereichen sich über der Laufzeit nicht ändernder Verschleißraten

Es besteht die Möglichkeit, daß es Verschleißratenbereiche gibt, in denen sich die Verschleißraten mit der Laufzeit nicht ändern. In diesen Bereichen laufen die Linien gleicher Wahrscheinlichkeit des Wahrscheinlichkeitskennfeldes parallel. Deshalb ist es auch nur nötig, pro Bereich lediglich eine Verteilungsfunktion für die Verteilung der Verschleißratendaten anzugehen. Die Summenhäufigkeitskurve der gefundenen Verteilungsfunktion gibt dann unmittelbar den Zusammenhang zwischen Verschleißrate und Wahrscheinlichkeit wieder.

Die Überprüfung, ob in einem Bereich die Verschleißrate konstant ist und wie die äußeren Abgrenzungen gewählt werden sollen, führt über die



Die Prüfung auf Linearität entspricht der des linken Astes (Fig. 13, Seite 27). Es soll überprüft werden, ob die Meßwerte um eine Ausgleichsgerade zufällig streuen oder signifikant von ihr abweichen.

Die Prüfung auf Signifikanz des Regressionskoeffizienten unterscheidet sich ebenfalls nicht von der Prüfung, wie sie im linken Ast notwendig war im Rahmen der Regressionsanalyse. Nur muß hier als Testergebnis herauskommen, daß sich der Regressionskoeffizient nur zufällig von 0 unterscheidet, also keine Regression vorliegt.

Die Varianzanalyse hat die Aufgabe, die Abgrenzung des Normallaufbereiches zum Bereich sich über der Laufzeit ändernder Verschleißraten vorzunehmen. Dabei betrachtet man die Daten der Grundgesamtheit II als in "k"-Stichproben unterteilt und prüft, ob die Stichproben untereinander wesentlich oder nur zufällig verschieden sind. Auf diese Weise ergibt sich die Abgrenzung, denn Bereiche sich über der Zeit ändernder Verschleißraten würden als nicht zugehörig zur Grundgesamtheit erkannt werden.

Varianzanalyse

Betrachtet man die Verschleißratendaten des Normallaufes und der Testversuche, so haben sie die größtmögliche Varianz bezüglich des Durchschnitts. Diese Gesamtvarianz σ^2 wird in mindestens zwei Einzelvarianzen zerlegt: in die Varianz σ_1^2 zwischen den Klassen und die Varianz σ_2^2 innerhalb dieser Klassen. Durch Analyse dieser Varianzen wird die Frage nach dem Unterschied der Stichproben beantwortet. Für die Berechnung der einzelnen Varianzen geht man von den Summen der Quadrate der Abweichungen (SQ) aus. Rechnerisch werden nicht die Varianzen, sondern die Abweichungsquadrate zerlegt.

Es gilt:

$$SQ \text{ (insgesamt)} = SQ \text{ (innerhalb)} + SQ \text{ (zwischen)}$$

Die Rechenvorschriften für die Ermittlung der Abweichungsquadrate finden sich in Lit.31.

Neben den Quadratsummen müssen auch die Freiheitsgrade aufgeteilt werden.

Es gilt:

$$N - 1 = (N - k) + (K - 1) \quad (23)$$

Dabei ist:

$N-1$ Freiheitsgrad der Gesamtvarianz aller $N=k \cdot m$ Werte

$N-k$ Freiheitsgrad innerhalb der k Stichproben

$k-1$ Freiheitsgrad zwischen den k Stichproben

K Zahl der Stichproben

N Gesamtzahl der Meßwerte

m Zahl der Meßwerte pro Stichprobe

Damit ergeben sich die eigentlichen Varianzen aus den Quadratsummen durch Division durch die entsprechenden Freiheitsgrade.

$$\frac{SQ \text{ (insgesamt)}}{N-1} = \sigma^2 \text{ (insgesamt)} \quad (24)$$

$$\frac{SQ \text{ (innerhalb)}}{N-k} = \sigma^2 \text{ (innerhalb)} \quad (25)$$

$$\frac{SQ \text{ (zwischen)}}{k-1} = \sigma^2 \text{ (zwischen)} \quad (26)$$

Für die Beurteilung der Frage, ob die einzelnen Stichproben wesentlich oder nur zufällig verschieden sind, wird die F-Verteilung herangezogen.

$$F_{(\alpha; n_1; n_2)} = \frac{\sigma^2 \text{ (zwischen)}}{\sigma^2 \text{ (innerhalb)}} \quad (27)$$

Dabei sind α der Wert des Fehlschlußrisikos, $n_1=k-1$ und $n_2=N-k$ die Freiheitsgrade der beiden Varianzen. Dieser berechnete F-Wert wird mit den Werten der theoretischen F-Verteilung verglichen.

Die Werte der F-Verteilung sind in Abhängigkeit der beiden Freiheitsgrade n_1 und n_2 und des Fehlschlußrisikos α tabelliert /30/. Eine für die praktische Berechnung geeignete Tabelle findet sich in Lit.31.

Wenn der berechnete Wert von F kleiner als der Testwert ist, so entstammen die untersuchten Stichproben derselben Grundgesamtheit, die Unterschiede in ihren Parametern sind zufälliger Natur. Die Daten können insgesamt als eine Grundgesamtheit angesehen werden.

Verteilungsfunktion

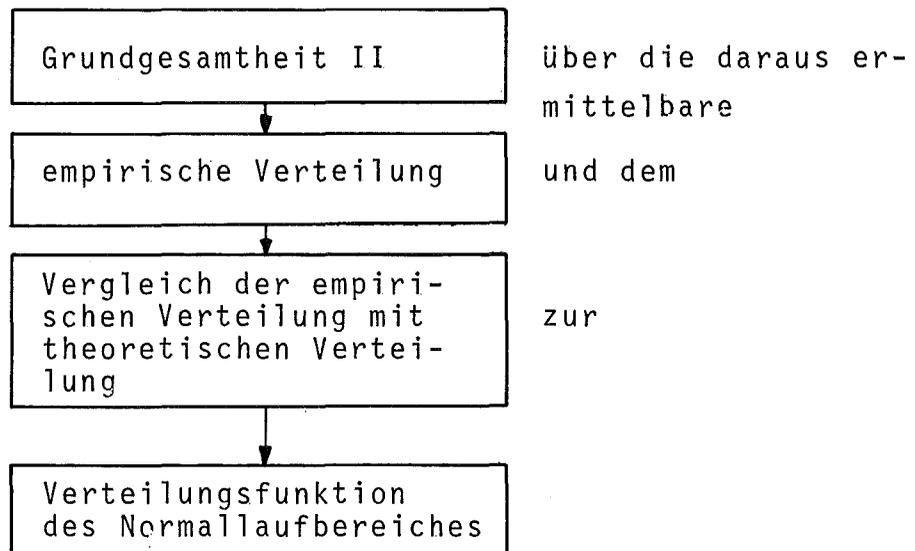
Um zur Summenhäufigkeitskurve der Verschleißraten Daten des Normalaufbereiches zu gelangen, muß die Art der Verteilung der Verschleißraten bekannt sein. Es wird davon ausgegangen, daß die beobachteten Verschleißraten Daten in einer bestimmten Weise verteilt sind. Die Art der Verteilung der Daten kann empirisch ermittelt werden. Mit Hilfe eines geeigneten Tests kann überprüft werden, ob eine gefundene empirische Verteilungsfunktion mit einer der bekannten theoretischen Verteilungsfunktionen übereinstimmt, d.h., ob die aufgrund der theoretisch bekannten Verteilungsfunktion berechenbaren hypothetischen Verschleißraten Daten von den beobachteten zufällig oder signifikant verschieden sind. Ein hierfür geeigneter Test ist der Chi-Quadrat-Test.

Bestätigt der statistische Test die getroffene Annahme, lassen sich die Parameter der Verteilungsfunktion endgültig berechnen und mit ihrer Hilfe eine Gerade in einem Wahrscheinlichkeitsnetz einzeichnen, dessen Ordinate nach der Summenfunktion zu der gefundenen theoretischen Verteilungsfunktion geteilt ist und dessen Abszisse linear das Merkmal (hier: Verschleißrate) trägt.

Fig.12 zeigt als Schema und Lit.28 für einen Teil der Daten, die dieser Arbeit zugrunde liegen, eine andere Möglichkeit der Darstellung der Daten des Normalbereichs. Anstelle der Summenhäufigkeitskurve für die Daten wird der Verlauf der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen gezeichnet, wenn man die Normalbereichsdaten in Klassen einteilt und für jede Klasse die Dichtefunktions-

werte berechnet. Ein solches Wahrscheinlichkeitsdichtediagramm hat für den Praktiker aber nur optische Vorteile, denn die Ableitung der Dichte des Einzelversuches hat für ihn ohne weitere mathematische Behandlung keinen unmittelbaren Nutzen.

Die Auswertungsschritte führen von der



Ermittlung der Verteilungsfunktion

Ist ein Datenkollektiv eine Zufallsstichprobe aus einer Grundgesamtheit bzw. eine wiederholte Realisation einer Zufallsgröße, so weist es eine ganz bestimmte Verteilung mit Mittelwert und Varianz auf. Die Methode der Summenhäufigkeitskurve erlaubt eine grobe Abschätzung, ob die Daten eines Kollektivs eine bestimmte Verteilung haben.

Zuerst werden die Daten in Verschleißraten-Klassen der Breite "b" eingeteilt. Da die Wahl der Klassenbreite einen Einfluß auf die zu bestimmenden Parameter hat, wird "b" nach der Regel von Sturges geschätzt:

$$b < \frac{R}{1 + 3,32 \lg n} \quad (28)$$

Mit der Spannweite $R = \Phi_{\max} - \Phi_{\min}$ und dem Stichprobenumfang n.

In einer Tabelle werden die absoluten und relativen Häufigkeiten zur Summenhäufigkeit schrittweise aufaddiert. Wird in einem rechtwinkligen Koordinatensystem die prozentuale Summenhäufigkeit über der Verschleißrate aufgetragen, so ergibt sich eine Kurve aus deren Form man die Art der Verteilung schätzen kann. Einer annähernd S-förmigen Kurve liegen z.B. Meßdaten einer symmetrischen, glockenförmigen Verteilung zugrunde. Die Schätzung der Verteilungsfunktion ermöglicht die Auswahl eines günstigen Wahrscheinlichkeitspapiers mit dem die Parameter der empirisch ermittelten Verteilungsfunktion bestimmt werden können.

Die Ordinate eines solchen Papiers ist nach der Summenfunktion der entsprechenden Verteilung geteilt und enthält Summenhäufigkeitsprozente, die Abszisse ist im allgemeinen linear geteilt. Auf ihr werden die Klassengrenzen des Merkmals eingetragen. Sind die Daten in der angenommenen Weise verteilt, so ergibt sich im Wahrscheinlichkeitspapier eine Gerade. Die Beurteilung der Linearität und die Ablesung der Parameter der Verteilungsfunktion erfolgt nach festgelegten Vorschriften. Am Beispiel normal verteilter Daten erfolgt die Linearitätsprüfung nach dem Verlauf der Kurve zwischen 10 und 90%. Die Parameter der Stichprobe werden mit Hilfe von Waagrechten ermittelt, die durch den 50%-, 16%- und 84%-Punkt der Ordinate mit der Geraden zum Schnitt gebracht und die Schnittpunkte auf die Abszisse projiziert werden. Auf diese Weise werden Mittelwert und Standardabweichung graphisch empirisch bestimmt.

Prüfung der Verteilungsfunktion

Die empirisch gefundene Verteilungsfunktion muß nun mit der hypothetischen Verteilungsfunktion verglichen werden. Ziel des Tests ist die Prüfung der Nullhypothese: Die beobachtete empirische Verteilungsfunktion ist eine ganz bestimmte Verteilungsfunktion z.B. Normalverteilung.

Eine hierzu geeignete Prüfoperation ist der χ^2 -Test. Das Ziel des Tests ist die Ablehnung der Hypothese. Erreicht oder übersteigt der berechnete Wert von χ^2 den theoretischen Wert, so wird die Hypothese abgelehnt, obwohl sie richtig sein kann

(siehe dazu Anhang). Ein Fehlschlußrisiko von $\alpha = 5\%$ ist deshalb in diesem Fall eine schärfere Bedingung als $\alpha = 1\%$. Die Durchführung des Tests kann der zahlreichen Literatur entnommen werden, z.B. /29,30,34,35/.

Mittelwert, Varianz und Variationskoeffizient

Da das Ziel die mathematische Berechnung notwendiger Momente der gefundenen Verteilungsfunktion ist, um die entsprechende Summenhäufigkeitskurve zeichnen zu können, müssen die Daten in Klassen eingeteilt und die Parameter der Verteilungsdichtefunktionen für die einzelnen Klassen berechnet werden.

a) Mittelwert:

Der Mittelwert der einzelnen Klassen berechnet sich zu:

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{n} \sum_i \Phi_i \cdot f_i \quad (29)$$

mit:

n = Anzahl der Meßpunkte einer Klasse

f_i = absolute Häufigkeit des i -ten Meßwertes Φ_i

b) Varianz:

Die Varianz ist "ungefähr" gleich dem Mittelwert der quadrierten Abweichungen, wobei sich "ungefähr" auf den Faktor $\frac{1}{n-1}$ bezieht.

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_i (\Phi_i - \bar{\Phi})^2 \cdot f_i \quad (30)$$

Der Faktor $\frac{1}{n-1}$ kommt dadurch zustande, daß s^2 eine Schätzung der Varianz der σ^2 ist, d.h. es gilt stets $s^2 \geq \sigma^2$. Bei kleinen Stichprobenumfängen wird die Varianz vorteilhaft berechnet nach /34/.

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum_i f_i \Phi_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_i \Phi_i \right)^2 \cdot f_i \right] \quad (31)$$

Falls es nötig werden sollte, die Verschleißratendaten zu transformieren oder zu normieren, weisen diese Daten die gleiche Standardabweichung auf, da gilt:

$$\sigma(kx) = |k| \cdot \sigma(x) \quad (32)$$

Analog gilt dies für empirische Verteilungen und damit für die geschätzte Standardabweichung S .

c) Variationskoeffizient:

Der Variationskoeffizient dient dem Vergleich von Stichproben einer Grundgesamtheit und ist definiert zu:

$$V = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (33)$$

Dabei sollte der Variationskoeffizient von Stichproben, die z.B. aus normalverteilten Grundgesamtheiten stammen, nicht größer sein als 33% vom Mittelwert \bar{x} .

Da die Art der Verteilungsfunktion und die Werte der Momente Mittelwert und Varianz sich nun berechnen lassen, läßt sich ebenfalls unmittelbar die Summenhäufigkeitskurve berechnen und zeichnen, die für den gewählten abgegrenzten Laufzeitbereich und das gewählte gleichnamige Bauteil gilt.

4.3 Verarbeitung der Verschleißraten aus Testversuchen

Entsprechend dem in Kap.3 definierten Ziel dieses Vorhabens dienen die Testversuche dazu, nach einem Einzelversuch die Höhe der oberen Grenzen des Verschleißniveaus für einen berechneten Prozentsatz von gleichnamigen Bauteilen zu beliebigen Laufzeiten angeben zu können.

Es muß gewährleistet sein, daß das untersuchte Bauteil den gleichen charakteristischen Verschleißratenverlauf zeigt wie die Menge aller Bauteile, mit denen die Grundgesamtheit aufgebaut wurde.

Die Verarbeitung der Testdaten ist aus Fig.15 zu entnehmen.

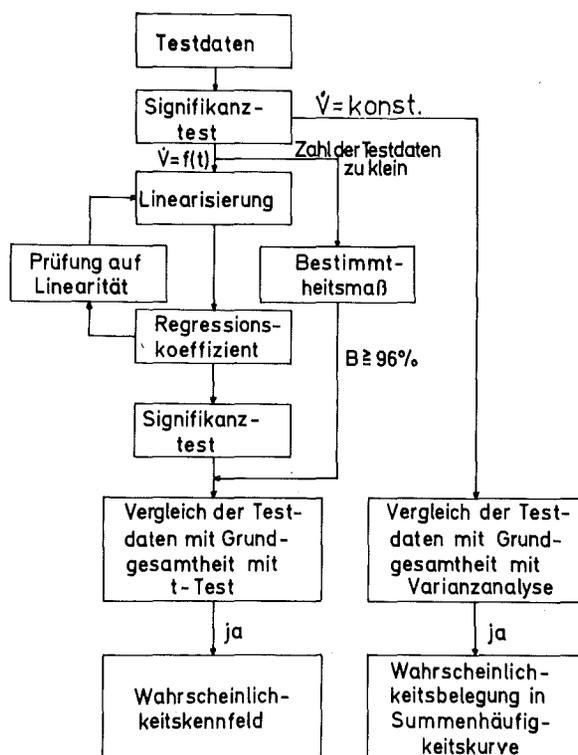


Fig.15: Vergleich der Daten der Testversuche mit den Daten der Grundgesamtheiten

Als erstes wird geprüft, ob $\dot{V} = \text{konst}$ ist. Dies erfolgt, wie schon beschrieben, bei der Prüfung des Regressionskoeffizienten auf Signifikanz.

Falls $\dot{V} \neq \text{konst}$ ist, muß nachgewiesen werden, daß der für die Grundgesamtheit angenommene charakteristische Verschleißratenverlauf gilt. Auch dieser Test unterscheidet sich in seinen einzelnen Schritten nicht von dem bei der Regressionsanalyse dargelegten Vorgehen. Voraussetzung ist allerdings, daß der Einzelversuch genügend viele Verschleißratenmeßwerte geliefert hat, um die Prüfung auf Linearität vornehmen zu können. Ist das nicht der

Fall, muß eine normale Anpassung der Strukturfunktion an die Meßwertfolge des Testversuches durchgeführt werden und das Bestimmtheitsmaß, d.h. die Güte der Anpassung der Strukturfunktion an die Meßwerte, als Bewertung herangezogen werden. Dies ist keine so günstige Methode, weil sich keine Fehlerschranken angeben lassen bzw. die Überprüfung der Hypothese der Gleichartigkeit nicht auf statistischer Basis verläuft. Wird das gerade noch zulässige Bestimmtheitsmaß hoch angesetzt, z.B. 96%, so kann allerdings davon ausgegangen werden, auf der sicheren Seite zu liegen.

Die Prüfung der Aussage, die Daten des Testversuches in die Grundgesamtheit aufnehmen zu können, erfolgt auf der Basis des Vergleiches zweier Regressionskoeffizienten.

Vergleich zweier Regressionskoeffizienten

Beim Vergleich zweier Regressionskoeffizienten geht es um die Frage, ob die beiden Regressionskoeffizienten wesentlich oder nur zufällig voneinander unterschiedlich sind, d.h. um die Frage, ob eine Testversuchsreihe der gleichen Regression unterliegt wie die Grundgesamtheit.

Eine hierfür geeignete Testgröße liefert die Student-t-Verteilung:

$$t = \frac{|b - b_1|}{s} \quad (34)$$

mit:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_i (\eta_i - H_i)^2 + \sum_i (\eta_{1i} - H_{1i})^2}{n_1 + n_2 - 4}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\sum_i (\psi_i - \bar{\psi})^2} + \frac{1}{\sum_i (\psi_{1i} - \bar{\psi}_1)^2}} \quad (35)$$

mit:

- b = Regressionskoeffizient des Kollektives
- b₁ = Regressionskoeffizient der Testreihen

- η_i = Verschleißraten des Kollektives
 H_i = Funktionswerte der Regressionsgeraden des Kollektives
 η_{1i} = Verschleißwerte der Testreihen
 H_{1i} = Funktionswerte der Regressionsgeraden der Testreihen
 ψ_i = Laufzeit des Kollektives
 ψ_{1i} = Laufzeit der Testreihen
 n_1, n_2 = Stichprobenumfang

Die Signifikanzschranke erhält man aus der Student-Verteilung mit $\nu = n_1 + n_2 - 4$ Freiheitsgraden.

Die Nullhypothese lautet:

$$b_1 = b \quad \text{bzw.} \quad b_1 - b = 0$$

Getestet wird auf dem 5%-Niveau, in diesem Fall die schärfere Bedingung. Ist der berechnete t-Wert $<$ als der Testwert, so ist der berechnete Regressionswert des Testversuches nur zufällig von dem der Grundgesamtheit verschieden oder die Stichproben entstammen der Grundgesamtheit mit gleichen Regressionskoeffizienten /31/.

Nun kann aufgrund der Kenntnis des Zusammenhanges zwischen Kurvenparameter und Wahrscheinlichkeit die Wahrscheinlichkeitsbelegung des Testversuches erfolgen.

Ergibt sich $\dot{V} = \text{konst.}$ bzw. der Signifikanztest hat zur Aussage, daß sich die Testmeßwertfolge nur zufällig von 0 aber nicht signifikant von 0 unterscheidet, so führt hier die Wahrscheinlichkeitsbelegung über den rechten Ast (Fig. 13, Seite 27). Mit der beschriebenen Varianzanalyse wird untersucht, ob die Testdaten sich hinsichtlich ihres Mittelwertes und ihrer Varianz zufällig oder wesentlich von den Daten der Grundgesamtheit unterscheiden.

Wesentlich unterscheiden bedeutet dann, daß die Meßwerte verschiedenen Grundgesamtheiten entstammen. Sind die Unterschiede nur zufälliger Art, so ist es erlaubt, die Daten in die Grundgesamtheit aufzunehmen und für diese die Wahrscheinlichkeitsbelegung des Testversuches anhand der Summenhäufigkeitskurve zu ermitteln.

5. E I N G E S E T Z T E T E C H N I S C H E M I T T E L

Nach dem Vorliegen der Konzeption zur Erreichung des durch die Aufgabenstellung definierten Ziels trat sehr klar zutage, daß einige Grundlagen und technische Hilfsmittel erst geschaffen werden mußten, um das Ziel zu erreichen. Da diese Arbeiten einen Großteil der Gesamtarbeit ausmachten, werden sie dort, wo sie für die Erreichung des Zieles besonders wichtig sind, ausführlich behandelt. Das gilt besonders für den Einfluß von Konzentrationsänderungen des Verschleißes im Öl durch Ölverbrauch und Verschleißverlust auf das Verschleißmeßergebnis.

5.1 RNT-Methoden zur Ermöglichung von Verschleißmessungen

Es gibt drei radionuklidtechnische Materialabtragsmeßverfahren: das Dünnschichtdifferenzmeßverfahren (DDV) /38,39/, das Durchflußmeßverfahren (DMV) /38,40/ und das Ölprobenmeßverfahren (ÖMV) /37/. Im Rahmen dieser Arbeit kamen aufgrund der ausgesuchten Motore nur die letzten beiden Verfahren zur Anwendung.

Das DMV mußte modifiziert werden, um auch mobile Einsätze durchzuführen. Das ÖMV wurde gänzlich neu konzipiert ebenso wie ein Filtermeßplatz, der die Verschleißanlagerung im Schmierölfilter der Motore kontinuierlich erfaßt. Die Aktivierung der Bauteile mußte unter dem besonderen Gesichtspunkt sehr langer Versuchszeiten ausgeführt werden. Die Ansprüche an die Aktivierung unterscheiden sich nicht bei beiden Verfahren.

5.1.1 Konzentrationsänderungen des Verschleißes im Öl durch Ölnachfüllungen und Verschleißverlust durch Ölverbrauch

Die ausgewählten radionuklidtechnischen Materialabtragsmeßverfahren beruhen darauf, die Konzentration des Abriebs in einem Trägermedium zu messen. Wenn Konzentrationsänderungen auftreten, die nichts mit dem Eintrag des Abriebs ins Trägermedium zu tun haben, erfordert dies eine rechnerische Korrektur der Meßergebnisse, wenn der Fehler einen vorgegebenen Wert übersteigt. Dies ist bei Ölnachfüllungen und längeren Versuchszeiten (z.B. > 20 h)

wegen des Verschleißverlustes durch Ölverbrauch bei Verbrennungsmotoren immer der Fall.

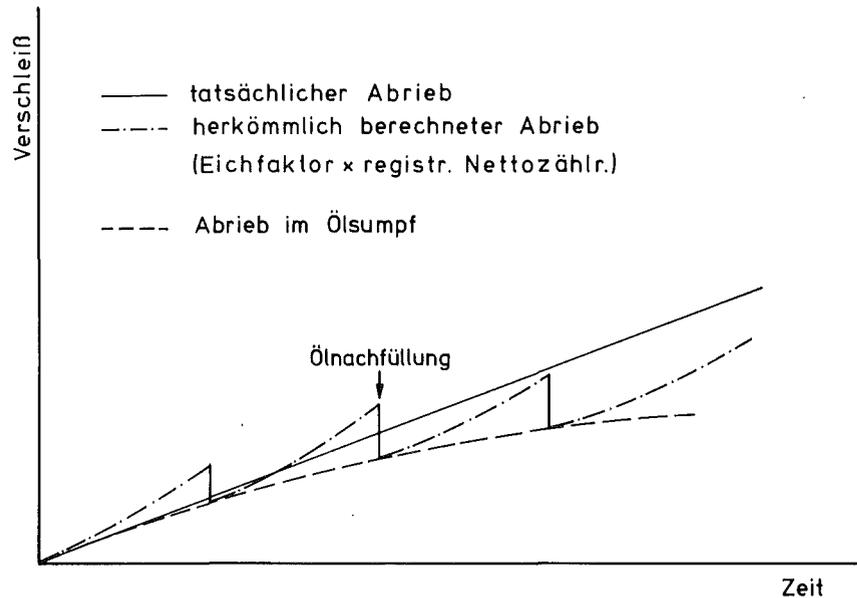


Fig.16: Tatsächlich abgeriebener, herkömmlich berechneter und im Ölsumpf befindlicher Abrieb bei konstanter Verschleißrate und konstantem Ölverbrauch

Fig.16 zeigt für eine angenommene konstante Verschleißrate und konstanten Ölverbrauch den ohne Berücksichtigung der genannten Einflüsse berechneten Verschleiß, den tatsächlich vom Bauteil abgeriebenen Verschleiß und den Verlauf des Verschleißes im Öl. Es wird nun eine Korrekturmöglichkeit gesucht, die vom gemessenen Verlauf des Verschleißes im Schmieröl zum Verlauf des tatsächlich vom Bauteil abgeriebenen Verschleißes führt.

Voraussetzungen

Um ein einfaches Rechenmodell zu erhalten, das nicht zu kompliziert wird, werden einige Voraussetzungen festgelegt, deren Gültigkeit und Fehler überprüft werden.

Voraussetzungen:

- 1) Die Konzentration des Abriebs im Ölverbrauchsvolumenstrom ist gleich der Konzentration des Abriebs im Ölsumpf.

- 2) Ölverbrauchs- und Abriebsrate sind für ein Betriebsintervall konstant, Ölnachfüllungen erfolgen nur an Intervallgrenzen.
- 3) Das Volumen des Abriebs im Öl ist gegenüber dem Ölvolumen vernachlässigbar klein.

Gültigkeit und Fehlerabschätzung:

Voraussetzung 3) wird nach Ermittlung des Korrekturmodells mit Hilfe einer Empfindlichkeitsanalyse geprüft. Das Rechenprogramm muß die Betriebsintervalle so einteilen, daß Voraussetzung 2) zutrifft. Im Falle kleinerer Schwankungen der Verschleiß- und Ölverbrauchsrate wird mit gemittelten Werten gearbeitet. Um Voraussetzung 1) zu bestätigen, wurden sehr umfangreiche sogenannte "Blindversuche" an den wichtigsten in Frage kommenden Motoren durchgeführt. Bei einem Blindversuch werden Motore über lange Zeit ohne aktive Bauteile, aber mit Öl, das radioaktiven Verschleiß enthält, betrieben. Da innerhalb der Ölwechselintervalle keine Konzentrationsänderungen größer 1% gemessen wurden und auch nach Ölnachfüllungen die sich neu einstellende Konzentration des Verschleißes im Öl weiter konstant blieb, ist die getroffene Voraussetzung erfüllt.

Korrektur des Verschleißverlustes durch Ölverbrauch:

Es bedeuten:

- t = Zeit
- i = Indizierung des laufenden Intervalles
- i,o = Beginn des laufenden Intervalles
- i(t) = im laufenden Intervall zur Zeit t
- j = Indizierung der Intervalle
- $M_{\text{öl}}$ = Masse des Abriebs im Öl
- M_{ab} = Masse des Abriebs vom Maschinenteil
- $m = \frac{dM}{dt}$ = Verschleißrate
- M_v = Abriebsverlust
- V = Ölvolumen
- V_0 = Anfangsvolumen

- $v = \frac{dV}{dt}$ = Ölverbrauch
C = Konzentration
Z = Zählrate
 ρ = Dichte
c = Integrationskonstante

Die vom untersuchten Bauteil abgeriebene und in den Ölsumpf eingetragene Masse M_{ab}

$$M_{ab}(t) = M_Z(t) \cdot A(t) \quad (36)$$

wobei

$$M_Z(t) = k \cdot Z(t) \quad (37)$$

M_Z ist die mit Hilfe des radionuklidtechnischen Meßsystems über die Eichung berechnete "Ersatzmasse", die der Zählrate nach (37) proportional ist. M_Z wäre bei einem System ohne Ölverbrauch gleich M_{ab} . A ist der Korrekturfaktor, der den Unterschied zwischen M_{ab} und M_Z ausgleicht. In den Proportionalitätsfaktor k gehen Auslegungsdaten der Meßanlage und spezifische Bauteilbestrahlungen ein.

Mit Hilfe der Tatsache, daß M_Z proportional der Zählrate und damit der tatsächlichen Konzentration des Verschleißes im Ölsumpf ist, und aus einigen Randbedingungen, mit denen sich die Proportionalitätsfaktoren bestimmen lassen /70/, ergibt sich:

$$M_{ab}(t) = \frac{M_{öl}(t)}{V(t)} \cdot V_o \cdot A(t) \quad (38)$$

und der Korrekturfaktor

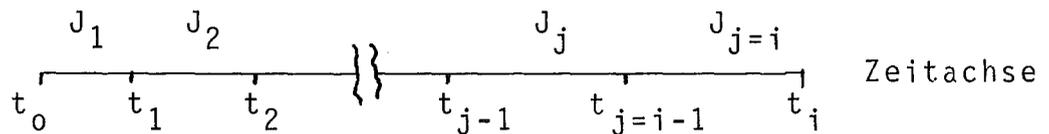
$$A(t) = \frac{M_{ab}(t)}{V_o} \cdot \frac{V(t)}{M_{öl}(t)} \quad (39)$$

A(t) ist also das Verhältnis von theoretischer Konzentration $C(t)_{th}$ (ohne Ölverbrauch) zu tatsächlicher Konzentration C(t) des Abriebes im Öl.

In der Regel werden bei Motorversuchen Wechsel der Betriebsbedingungen und Ölnachfüllungen vorgenommen, was zu betriebsartbeding-

ten Abriebseinträgen ins Öl und zu Konzentrationsänderungen im Öl führt. Die Korrekturrechnung soll deshalb den allgemeinsten Fall also die Aneinanderreihung beliebig vieler Betriebsintervalle beschreiben.

Um den Korrekturfaktor bestimmen zu können, muß die tatsächlich im Öl befindliche Abriebmasse $M_{\text{Öl}}$ bekannt sein. Diese läßt sich unter den in Kap. 5.5.1 gemachten Voraussetzungen mit den folgenden Gleichungen berechnen. Die Zeitachse, über der der Ölverbrauch betrachtet wird, wird in Intervalle J_j mit $j = 1, 2, 3, \dots$ eingeteilt.



Herleitung des Korrekturfaktors $A(t)$:

$$d M_{\text{Öl } i}(t) = d M_{\text{ab } i}(t) - d M_V i(t) \quad (40)$$

Es gilt Voraussetzung 1)

$$d M_V i(t) = C_{M_{\text{Öl } i}}(t) \cdot v_i \cdot dt \quad (41)$$

Nach üblicher Definition ist die Konzentration gegeben durch:

$$C_{M_{\text{Öl } i}}(t) = \frac{M_{\text{Öl } i}(t)}{V_i(t) + \frac{M_{\text{Öl } i}(t)}{\rho}} \quad (42)$$

Mit (42) in (41) unter Voraussetzung 3), die besagt, daß $V_{\text{Öl } i}(t) \cdot \rho_{\text{Öl}} \gg M_{\text{Öl } i}(t)$ ist, ergibt (41) mit $C_{M_{\text{Öl } i}}(t)$ aus (42)

$$d M_V i(t) = \frac{M_{\text{Öl } i}(t)}{V_i(t)} \cdot v_i \cdot dt \quad (43)$$

Im übrigen gilt:

$$d M_{ab} = m_i dt \quad (44)$$

Einsetzen von $dM_{V_i}(t)$ und dM_{ab} aus (43) und (44)

ergibt:

$$\frac{d M_{\text{öl } i}(t)}{dt} - \frac{M_{\text{öl } i}(t) v_i}{V_i(t)} = m_i \quad (45)$$

(45) ist eine DG des Typs

$$y' + P(t) \cdot y = \text{konst.}$$

Die Lösung der DG lautet /36/:

$$M_{\text{öl } i}(t) = V_i(t) \left(c - \frac{m_i}{v_i} \ln V_i(t) \right) \quad (46)$$

Es gelten die Anfangsbedingungen:

$$t = t_{i-1}; M_{\text{öl } i}(t) = M_{\text{öl } i,0} = M_{\text{öl } (i-1)}(t_{i-1}) \quad \text{und}$$

$$M_{\text{öl } i,0} = V_{i,0} \left(c - \frac{m_i}{v_i} \ln V_{i,0} \right) \quad (47)$$

Daraus läßt sich die Integrationskonstante c errechnen und in (47) einsetzen.

$$M_{\text{öl } i}(t) = M_{\text{öl } i,0} \cdot \frac{V_i(t) m_i V_i(t)}{V_{i,0} + \frac{m_i}{v_i} V_i(t)} \cdot \ln \frac{V_{i,0}}{V_i(t)} \quad (48)$$

In Gleichung (39) wird die tatsächliche Konzentration des Abriebs im Öl gesucht, die sich aus (48) ergibt zu:

$$C_i(t) = C_{i,0} + \frac{m_i}{v_i} \ln \frac{V_{i,0}}{V_i(t)} \quad (49)$$

sowie die Konzentration $C_i(t)_{th}$, die sich ohne Ölver-

brauch und Verschleißverlust ergeben würde zu

$$C_i(t)_{th} = C_{i,0th} \left(1 + \frac{m_i}{M_{ab\ i,0}} (t-t_{i-1}) \right) \quad (50)$$

Der Korrekturfaktor ergibt sich somit zu:

$$A_i(t) = A_{i,0} \cdot \frac{1 + \frac{m_i}{M_{ab\ i,0}} (t-t_{i-1})}{1 + \frac{m_i}{C_{i,0} \cdot v_i} \cdot \ln \frac{V_{i,0}}{V_i(t)}} \quad (51)$$

Mit Berücksichtigung von (49), der Tatsache, daß $M_{ab\ i,0}$ die Summe der Abriebe aller bisheriger Intervalle darstellt und die Konzentration C nur durch eine Konstante mit der Zählrate verbunden ist, ergibt sich der Korrekturfaktor in seiner endgültigen Form. Er enthält nur noch gemessene Größen.

$$A_i(t) = \frac{\ln \frac{V_{i,0}}{V_i(t)} \sum_{j=1}^{j=i-1} \frac{v_j (Z_{t_j} - Z_{t_{j-1}}) \cdot (t_j - t_{j-1})}{\ln \frac{V_{t_{j-1}}}{V_{t_j}}} + v_i (Z_i(t) - Z_{i,0}) \cdot (t - t_{i-1})}{V_{i,0} \cdot Z_i(t) \cdot \ln \frac{V_{i,0}}{V_i(t)}} \quad (52)$$

Damit ist der tatsächliche Abrieb in (36) mit (37) errechenbar:

$$M_{ab\ i}(t) = k \cdot Z_i(t) \cdot A_i(t) \cdot e^{\lambda t} \quad (53)$$

$e^{\lambda t}$ = Halbwertszeitkorrektur

Empfindlichkeitsanalyse:

Die entwickelten Grundlagen dieses Kapitels erlauben Empfindlichkeitsanalysen der Einflüsse verschiedener Parameter auf die Genauigkeit der radionuklidtechnischen Materialabtragsmes-

sungen. So sind Aussagen darüber möglich, welchen Einfluß Fehler in den angenommenen Ölverbrauchswerten, Nachfüllölmengen und Anfangsölvolumina haben. Es interessieren aber auch ganz allgemeine Fragen wie eine Angabe, wann und bei welchen Volumenverhältnissen der Verschleißmassenstrom im Ölverbrauchsstrom gleich dem zugeführten Verschleißmassenstrom ist, sowie die Funktionsverläufe der Konzentration des Abriebs und der Masse des Abriebs im Ölsumpf.

Welche Fehlinterpretationen von Messungen möglich sind bei Nichtbeachtung des Verschleißverlustes durch Ölverbrauch läßt sich mit (49) berechnen. So ist z.B. nach etwa 50 h an Motor D (siehe Tafel 1 und 2, Seite 63 und 64) der Verschleißmassenstrom im Ölverbrauchsstrom gleich dem durch Abrieb zugeführten Verschleißmassenstrom, wenn für den Motor D typische Werte zugrunde gelegt werden. Die allgemein gültigen Funktionsverläufe der Konzentration des Abriebs und der Masse des Abriebs im Öl über der relativ verbrauchten Ölmenge sind Anhang 1 zu entnehmen.

Die Empfindlichkeitsanalyse soll zwei Fragen beantworten:

- a) Wie groß ist der Unterschied zwischen tatsächlichem Abriebeintrag ins Öl und errechnetem Eintrag? Es muß einen Unterschied geben wegen der Vernachlässigung aufgrund der Voraussetzung 3).
- b) Wie groß ist der unter a) genannte Unterschied aufgrund falscher (anderer, als in der Korrekturrechnung angenommener) Anfangsölvolumina und Ölnachfüllungen?

Um diese Fragen beantworten zu können, wurden zwei Verschleißsimulationsrechenmodelle entwickelt. Die Programme sind so aufgebaut, daß der tatsächliche Abriebeintrag ins Trägermedium, der errechnete Abriebeintrag und die Konzentration des Abriebs im Trägermedium miteinander verglichen werden können. Strukturdiagramme, Rechenprogramme und Ergebniskurven werden in Lit. 41 ausführlich beschrieben. Es soll hier nur pauschal das wichtigste Ergebnis genannt werden. Die Vernachlässigung in (43) aufgrund Voraussetzung 3) hat keinen erwähnenswerten Einfluß auf das Meßergebnis. Eine Unterfüllung durch zu geringe Anfangsölvolumina oder Nachfüllmengen hat größere Meßfehler zur Folge als prozentual gleiche Überfüllungen.

5.1.2 Aktivierung der verwendeten Maschinenteile

Die Aktivierung der gewählten Bauteile (siehe Kap. 5.3) sollte so durchgeführt werden, daß die Komponenten "Zylinderlaufbüchse" sowie "Lauffläche" und "Flanken" des 1. Kompressionsringes gleichzeitig erfaßt werden können. Die Kolbenringe werden mit Neutronen im Reaktor aktiviert. Es entstehen dabei bei verchromten Ringen die Radionuklide ^{51}Cr für die Lauffläche mit einer Gamma-Energie von 320 keV und ^{59}Fe für die Flanken mit Gamma-Energien von 1100 und 1290 keV.

Aus wirtschaftlichen Gründen können die Büchsen nicht auf der gesamten von den Ringen überstrichenen Fläche aktiviert werden. Es erfolgt eine Beschränkung auf die Zone des größten Abriebs, also den Bereich in der Höhe des oberen Totpunktes des 1. Kompressionsringes. Die Aktivierung wird über den gesamten Umfang in einer Breite von 10 mm ausgeführt; ausgehend von 1 mm oberhalb der Oberkante des 1. Kompressionsringes in OT. Die Bestrahlung geschieht am Zyklotron mit Deuteronen. Es entsteht das Radionuklid ^{56}Co mit den Gamma-Energien 511, 847 und 1240 keV /65/. Ab dem Versuch KZ MWM 11 war es möglich, die Zylinderbüchsen am Zyklotron mit α -Teilchen zu bestrahlen. Es entsteht dabei das Radionuklid ^{58}Co mit den Gamma-Energien 511 und 810 keV. Die Verwendung dieses Radionuklids verringert die Problematik der "Einstreuung". Einstreueffekte sind ein radionuklidtechnisches Problem und werden z.B. in Lit.28 beschrieben oder in einer Reihe von internen Arbeitsberichten des LIT, in denen auch die Konsequenzen auf die Versuchsplanung geschildert werden, besonders bei sehr lange dauernden Versuchen /72/.

Die für die Erzielung einer bestimmten Meßgenauigkeit notwendigen spezifischen Bauteilaktivität kann unter Umständen nicht realisiert werden, da die Gesamtaktivitäten der Bauteile eine gesetzlich vorgeschriebene Grenze nicht überschreiten dürfen, was auch für die Aktivitätskonzentration im Motorenöl und im Abgas der Fall ist. Bei allen durchgeführten Versuchen wurden die erlaubten Freigrenzen der Aktivitätskonzentrationen mit großem Sicherheitsabstand eingehalten.

Bei den Langzeitversuchen war anfangs nicht bekannt, wie sich die Verschleißratenverhältnisse der aktivierten Bauteile zueinander einstellen würden (die Kenntnis ist wichtig für die Aktivierungsauslegung). Dies führte beim ersten derartigen Versuch (LZ MWM 2) dazu, daß bis zur Nachaktivierung der Büchsenverschleiß, aber nicht der Ringflankenverschleiß, gemessen werden konnte und nach der Nachaktivierung sich der umgekehrte Fall einstellte. In solchen Fällen kann immer nur eine obere Verschleißratengrenze angegeben werden, die noch nicht überschritten worden ist.

Wegen der sehr langen Versuchszeiten ändert sich durch die Abnahme der spezifischen Aktivität über der Zeit die anfängliche Genauigkeit der Verschleißratenmessung stark. Die Ringlaufflächenverschleißrate konnte so z.B. anfangs beim Versuch LZ MWM 2 mit einer Genauigkeit von etwa 3,5% ermittelt werden. Am Ende des Versuches betrug die Genauigkeit nur noch ca. 40%.

Bei den Versuchen LZ DB 1 und LZ KHD 4 wurde nur die Büchsenverschleißrate gemessen, da der 1. Kompressionsring mit einer Mo-Lauffläche versehen war und diese wegen zu kurzer Halbwertszeit der entstehenden Radionuklide und ungünstiger Einstreuverhältnisse nicht mitgemessen werden konnte /42/.

5.2 Verschleißmeßverfahren

a) Durchflußmeßverfahren

Das Durchflußmeßverfahren wurde für die Verschleißmessungen bei allen Kurzzeitversuchen herangezogen. Es ist z.B. in /38/ und /40/ ausführlich beschrieben worden.

Es war anfangs geplant, die Grundgesamtheit der Daten, die für die Erstellung des Systems zur Korrelation vom Kurzzeit- auf das Langzeitverschleißverhalten als nötig erachtet wurde, in einem Umfang zu erstellen, der neben Daten aus Prüfstandtests auch solche aus Straßentests umfaßte. Dazu mußte für die Straßentests ein völlig neues Durchflußmeßsystem entwickelt werden, da die herkömmlichen Anlagen für diesen Anwendungsfall nicht zu verwenden waren.

Die Entwicklung, der Bau und die sehr eingehende Erprobung des Systems waren langwierig und erst zu einem Zeitpunkt abgeschlossen, der es nicht mehr erlaubte, die damit geplanten Versuche im Rahmen dieser Arbeit durchzuführen. Die Entwicklung war deshalb so langwierig, weil ein mobiles Durchflußmeßsystem allein zur Gewinnung der erforderlichen Daten nicht ausreicht. Deshalb wurde das Meßsystem so konzipiert, daß in Zusammenarbeit mit der Daimler-Benz AG eine komplette Fahrzeugversuchsanlage erstellt und erprobt werden sollte, die neben den Verschleißdaten, die für eine Interpretation notwendigen Fahrzeugdaten on-line miterfaßte. Das LIT entwickelte die Verschleißmeßanlage, die DB-AG das System zur konventionellen Datenerfassung. Die Anforderungen an das System, die sich daraus ableitende Konzeption, die Realisierung und die Erprobung des Systems sind in /37,45,46,52/ und /71/ ausführlich beschrieben.

Die Langzeitversuche wurden bei den jeweiligen Firmen auf deren normalen Versuchsständen durchgeführt. Um den Verschleißratenverlauf bei verschiedenen Betriebspunkten über der Motorlaufzeit festhalten zu können, waren Meßeinsätze notwendig, die den Verschleißratenzustand des Motors über alle interessierenden Drehzahl/Lastbereiche erfaßten. Dazu waren Messungen nach dem DMV notwendig. Hierzu wurde der Radionuklid-Meßwagen des LIT eingesetzt, der mit allen Geräten ausgerüstet ist, um die hier geforderten Messungen durchzuführen und on-line auszuwerten /44/.

b) Ölprobenmeßverfahren

Neben dem DMV existiert als zweite Methode zur quantitativen Bestimmung von radioaktiv markiertem Abrieb in einem Trägermedium das Ölprobenmeßverfahren (ÖMV). Es hat den Vorteil des geringen apparativen Aufwandes am Meßobjekt, da Ölprobenziehung und Auswertung zeitlich und örtlich voneinander getrennt vorgenommen werden können. Die Probengewinnung erfolgt durch Ziehung einer Ölprobe in beliebigen Zeitintervallen. Bei geringen zeitlichen Abständen der Ziehungen ergibt sich eine quasikontinuierliche Kenntnis des Verschleißverlaufes. Die Ziehung der Probe muß so erfolgen, daß gewährleistet ist, daß die Konzentration des Verschleißes

im Probevolumen gleich der im Ölsumpf ist. Aus diesem Grunde und zum Zwecke der bedienungslosen Probenziehung wurde eine automatisch arbeitende Probenziehvorrichtung entwickelt und eingesetzt, die allen Anforderungen genügt und fast wartungsfrei über tausende von Stunden im Einsatz war. Die Vorrichtung wird ausführlich in /37/ und /41/ beschrieben.

Will man Messungen nach dem ÖMV optimal durchführen, so muß geprüft werden, wie groß die spezifischen Bauteilaktivitäten sein müssen, um einen bestimmten Verschleiß mit einem vorgegebenen Fehler nachweisen zu können. Dazu müssen eine Reihe von Fragen geklärt sein, die zum einen meßplatzspezifisch sind und zum anderen allgemein gelten. Neben der Kenntnis der zu erwartenden Verschleißrate und des Ölolumens, in das der Verschleiß eingetragen wird und der Auswahl des günstigsten Eichverfahrens, muß für den Auswertemeßplatz noch folgendes bekannt sein:

1. Abhängigkeit der Ansprechwahrscheinlichkeit der Strahlungsnachweiseinrichtung von der Energie der Gammastrahlung bei konstantem Ölprobenvolumen.
2. Abhängigkeit der Ansprechwahrscheinlichkeit vom Ölprobenvolumen bei konstanter Energie der Gammastrahlung.
3. Abhängigkeit der verschiedenen Einstreufaktoren bei Mehrkomponentenversuchen vom Ölprobenvolumen.
4. Sedimentation von Verschleißteilchen im Reagenzglas.

In /41/ wird berechnet, daß Sedimentation von Verschleißteilchen im Ölprobengefäß unter den vorliegenden Bedingungen nicht auftritt.

Aufgrund der Kenntnis der beschriebenen Abhängigkeiten und der Kenntnis der spezifischen Aktivitäten der bestrahlten Bauteile kann eine Zuordnung zwischen nachgewiesener Zählrate und abgeriebenem Verschleiß über eine Eichung hergestellt werden.

c) Filtermeßverfahren

Bei der Anwendung eines die Konzentration des Verschleißes im Motoröl messenden Verschleißmeßverfahrens stellen die im Ölkreis-

lauf befindlichen Ölfilter dann eine Fehlerquelle für die Verschleißmessung dar, wenn sich Verschleiß im Filter anlagert. Da dies bei den im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Filter der Fall war, wurde der Filterrückhaltegrad bei einer Vielzahl von Versuchen bestimmt, um abschätzen zu können, ob der Aufwand für die Konstruktion, den Bau und die Erprobung eines Filtermeßplatzes gerechtfertigt ist, der den Verschleißanteil im Filter kontinuierlich erfaßt. Der Filterrückhaltegrad "x" wurde definiert zu:

$$x = \frac{\text{Filterverschleißanteil}}{\text{errechneter Abrieb} + \text{Filterverschleißanteil}}$$

Der Mittelwert von x aus 12 Versuchen mit neuen Teilen, die im Mittel 33 h betrieben worden waren, betrug für den Ringlaufflächenverschleiß 16,1% (Standardabweichung s = 4,5%) und für den Ringflankenverschleiß 22,7% (s = 4,8%). Beim direkt anschließenden Betrieb derselben Teile über im Mittel 41 h betrug x für den Ringlaufflächenverschleiß 9% (s = 5%) und den Ringflankenverschleiß 10,4% (s = 4%). Bei den Langzeitversuchen mit Filtereinsatzzeiten über 2-3 Ölintervalle (230 h) betrug der Ringlaufflächenverschleißanteil im Filter im Mittel 22,3% (s = 10,7%) und der Ringflankenverschleißanteil 8,2% (s = 2,6%).

Der Filterverschleißanteil für den Büchsenlaufflächenverschleiß hatte etwa gleichen Mittelwert und Standardabweichung wie der Anteil für den Ringlaufflächenverschleiß. Die Meßergebnisse zeigen, daß der Aufwand für die Entwicklung eines Filtermeßplatzes, der den Verschleißanteil im Filter kontinuierlich erfaßt, gerechtfertigt ist. Ein solcher Filtermeßplatz wurde entwickelt, erprobt und ab dem Versuch KZ MWM 30 eingesetzt. Der Aufbau und die Eichverfahren des Meßplatzes sind in /54/ ausführlich beschrieben.

Beim Vergleich der Verschleißraten, die sich mit und ohne Berücksichtigung des Filtermeßergebnisses in einem bestimmten Betriebsintervall ergaben, zeigte sich, daß der Filterrückhaltegrad für den Verschleiß des untersuchten Bauteiles unabhängig von der Verschleißrate ist und unabhängig von der Lage des Vollastbetriebs-

punktes. Das heißt, von der insgesamt abgeriebenen Verschleißmasse wird ein fester Prozentsatz unmittelbar nach dem Abreiben herausgefiltert, während der andere Teil auch nach beliebig vielen Durchläufen im Öl verbleibt. Daraufhin vorgenommene Blindversuche am Vollmotor mit Filter und externe Filtrierungsversuche in einem Ölkreislauf mit gelaufenem Öl und Feinstfiltrierelementen erhärteten die Aussage /56/. Diese Ergebnisse, die darauf hinweisen, daß die Korngrößenverteilungen nach dem Einlauf konstant bleiben, werden durch /42/ für den hier verwendeten Motor anhand einiger Ergebnisse unterstützt.

Um eine Verschleißratenbezogene Größe des Filterrückhaltegrades zu erhalten, wurde die Größe α eingeführt. Wird die Differenz zwischen der Verschleißrate, die ermittelt wird, mit Berücksichtigung des Filtermeßergebnisses und der Verschleißrate ohne Berücksichtigung des Filtermeßergebnisses zu der Verschleißrate mit Filtermeßergebnis ins Verhältnis gesetzt, so ergibt sich für das Ringlaufflächenverschleißratenverhältnis $\alpha_L = 0,10$ ($s = 0,07$) und für das Ringflankenverschleißratenverhältnis $\alpha_F = 0,13$ ($s = 0,07$).

Die α -Werte wurden mit Hilfe der Verschleißraten nach dem 1. Ölwechsel (ca. 30 h) errechnet. Während des Grobeinlaufs, also etwa der ersten 10 Laufstunden, können die α -Werte sehr stark streuen, brauchen nicht konstant zu sein und können Werte bis zu 0,8 annehmen.

Da sich α hinreichend unabhängig von der Betriebsart und der Filtereinsatzzeit (untersucht bis ca. 50 h) zeigt, läßt sich der Verschleißverlust durch Filter direkt zusammen mit dem Verschleißverlust durch Ölverbrauch korrigieren, ohne daß ein Filtermeßplatz eingesetzt wird. Es gilt weiter (40). (41) muß um den Ausdruck $\alpha \cdot m_i \cdot dt$ ergänzt werden, so daß der konstante Faktor in (45) $m_i (1 - \alpha)$ ist. Der neue Korrekturfaktor $A_{(t)}^+$ unterscheidet sich von $A_{(t)}$ nur im Nenner, der nun lautet:

$$V_{i,0} (Z_{i,0} \cdot \alpha + Z_{i,t} (1 - \alpha)) \cdot \ln \frac{V_{i,0}}{V_{i(t)}}$$

Es muß nochmals betont werden, daß eine solche Korrektur nur erlaubt ist, wenn für einen bestimmten Motor und für den Abrieb eines bestimmten Bauteils $\lambda = \text{konst.}$ wird. Für den Motor D und die erwähnten Bauteile gilt dies hinreichend genau.

5.3 Versuchsmotore und -teile

Die Auswahl der Versuchsmotore richtete sich vor allem danach, welche der Mitgliedsfirmen der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) im fraglichen Zeitraum mehrere Langzeitversuche mit einem einfachen Betriebsprogramm durchführen würden. Die Wahl fiel auf den Motor D. Dieser Motor hat für den praktischen Versuchsbetrieb eine Reihe von Vorteilen, wie geringe Größe, leichte Montierbarkeit und geringen spezifischen Kraftstoffverbrauch. Außerdem lagen aus früheren Langzeitversuchen eine Vielzahl konventionell ermittelter Verschleißdaten und Teile vor, die im Rahmen der unter Kap.3. beschriebenen Aufgabenstellung benötigt wurden. Mit dem Motor D wurden daraufhin die Grundgesamtheiten von Daten der gleichnamigen Bauteile ermittelt.

Hinsichtlich des angestrebten Zieles, Testversuche durchzuführen und die Daten mit den entsprechenden Grundgesamtheiten zu vergleichen, konnten Testversuche mit den Motoren A und E verwertet werden. Eine noch aussagekräftigere Nachprüfung des angestrebten Zielergebnisses läßt sich mit Langzeitversuchen vornehmen. Aus diesem Grunde und zur Gewinnung zusätzlicher Informationen über den charakteristischen Verschleißratenverlauf der ausgesuchten Bauteile in völlig verschiedenen Motoren, wurden zwei Langzeitversuche mit den Motoren B und F durchgeführt. Die Tafeln 1 und 2 enthalten die wichtigsten Kenn- und Auslegungsdaten der verwendeten Motore.

Versuchsteile und ihre Auswahlkriterien

Die auszuwählenden Motorbauteile mußten für den Motor kritische Bauteile sein. Das heißt, daß ein Ausfall dieser Teile das Ende der Lebensdauer des Motors bedeutet oder eine Generalüberholung bedingt. Außerdem müssen die Teile gut aktivierbar sein. "Gut" bedeutet hier, daß im Reaktor oder im Zyklotron Radionuklide mit

Motortyp	Hubvolumen	Hub	Bohrung	Zylinderzahl	Eff.Leistung	Drehzahl	mittl.eff.Druck
	cm ³	mm	mm		PS/KW	1/min	kp/cm ² / bar
A	1988	83,5	87	4	55/40,5	4200	5,9/5,8
B	3005	92,4	91	5	80/59	4000	6,0/5,9
C	4160	120	105	4	65/48	2175	6,5/6,3
D	2826	120	100	3	55/40,5	2800	6,3/6,2
E	8482	125	120	6	170/125	2650	6,8/6,7
F	950	130	125	10	320/235	2650	7,1/7,0

Tafel 1: Auslegungsdaten der eingesetzten Versuchsmotoren

Motortyp	Zylinder- konstruktion	Verbrennungs- verfahren	Kühlung	Büchsenober- fläche	Kolbenring		Ölsorte
					Lauffläche	Form	
A	Block R	Vorkammer	Wasser	ungebondert	Chrom	Rechteck	HD-Dieselmotoren- öl SAE 10 W, SAE 30 W
B	Block R	Vorkammer	Wasser	ungebondert	Molybdän	Rechteck	SAE 10 W SAE 30
C	Block R	Direkt	Wasser	ungebondert	Chrom	Doppel- trapez	HD-Dieselmotoren- öl 20 W 20
D	Einzel R	Direkt	Luft	gebondert	Chrom- Standard- guß	Doppel- trapez	HD-Dieselmotoren- öl 20 W 20
E	Einzel V	Direkt	Luft	gebondert	Chrom	Rechteck	HD-Dieselmotoren- öl 20 W 20
F	Einzel V	Direkt	Luft	gebondert	Molybdän	Doppel- trapez	HD-Dieselmotoren- öl 20 W 20 SAE 30

R = Reihenmotor

V = V-Motor

Tafel 2: Wichtige Kenndaten der eingesetzten Versuchsmotoren

genügend hoher Ausbeute, Gamma-Energie und Halbwertszeit entstehen.

Da schon aufgrund der Arbeiten in Lit.57 und dem am LIT zur Verfügung stehenden know-how bei der Aktivierung von Fe und Cr ein großes Potential an Erfahrung mit den allgemein als kritisch angesehenen Motorbauteilen 1.Kompressionsring und Büchsenlauffläche (OT) vorhanden war, wurden diese ausgewählt.

Für die Langzeitversuche wurden Teile ausgesucht, die in der Mitte der von den Firmen oder in DIN-Blättern angegebenen Toleranzen lagen. Damit erhoffte man sich bei der Ermittlung des charakteristischen Verschleißratenverlaufes ungefähr eine mittlere Kurve zu erzielen (siehe dazu Kap.3.). Diese Annahme wurde später bestätigt (siehe Kap. 7.3.1).

Die in den Kurzzeitversuchen verwendeten Bauteile wurden nicht speziell ausgesucht. Sie entstammten zufälligen Stichproben. Damit sollte gewährleistet werden, daß die Grundgesamtheit der Daten den Verhältnissen der Wirklichkeit entspricht.

Gelaufene Bauteile für die entsprechenden Kurzzeitversuche kamen so zur Anwendung wie sie zufällig in der betreffenden Firma vorhanden waren. Verwendet wurden aber auch die nichtaktivierten Bestückungen der abgeschlossenen Langzeitversuche.

6. V E R S U C H S D U R C H F Ü H R U N G U N D - E R G E B N I S S E

Es sollen die wichtigsten Versuchsergebnisse aufgeführt und diskutiert werden. Durch die Vielzahl und Dauer der Versuche bzw. die Fülle von kontinuierlich gewonnenen Verschleißergebnissen konnten Einblicke in das Verschleißverhalten der untersuchten Bauteile erzielt werden, die lohnend sind, in einem größeren Umfang angeführt zu werden, wie es allein für die statistische Betrachtung der Verschleißdaten nötig wäre. Während in Kap.7. die Auswertung der Versuchsergebnisse unter statistischen Gesichtspunkten und damit nur das Kollektiv aller Versuche betrachtet wird, wird hier auf Ergebnisse der Einzelversuche eingegangen.

6.1 Versuche zur Ermittlung der Grundgesamtheiten

Alle Versuche zur Ermittlung der Grundgesamtheiten wurden am Motor D vorgenommen.

6.1.1 Langzeitversuche

a) LZ MWM 2

Bei dem Dauerlauf LZ MWM 2 handelt es sich um einen Abnahme-
lauf für einen Kunden des Motorherstellers. Die aktive Bestückung
erreichte 6414 h. Die Versuchsdauer betrug 1 Jahr und 4 Tage,
der 1.Kompressionsring war aus Standard-Material gefertigt /60/.

Programm des Dauerlaufs:

Bis 1580 h wurde nur der Nennleistungsbetriebspunkt 2350/Voll-
last gefahren. Ab 1580 h Vollast bei wechselnden Drehzahlen in
der Reihenfolge 2350 - 1800 - 2350 - 1500 - 2350 - 1200 - 2350 -
 min^{-1} usw. Jedem Betriebspunkt wurde immer ein Ölintervall (im
Mittel 75 h) beibehalten, der Filter (Mann N 930) alle 2 Ölinter-
valle gewechselt. Bei den 8 Meßwageneinsätzen wurden ebenfalls
die obigen Betriebspunkte gefahren.

Nach 4010 h mußte die gesamte Bestückung des 1.Zylinders we-
gen Bruchs des 1.Kompressionsringes ausgewechselt werden. Das
gleiche wiederholte sich nach 5320 h am 2.Zylinder und nach

6414 h am 3.Zylinder mit der aktivierten Bestückung. Daraufhin wurde der Versuch beendet.

Fig.17 gibt das registrierte Verschleißverhalten wieder. Um das Diagramm nicht zu unübersichtlich werden zu lassen, sind nur bei der Ringflanke alle zur Verfügung stehenden Meßpunkte eingetragen, wobei bei den Langzeitversuchen ein Meßpunkt die mittlere Verschleißrate über 50-100 h wiedergibt und somit durch viele Einzelmessungen gewonnen worden ist (Diagramme für weitere Vollastdrehzahlen siehe Lit.59).

Nach 1580 h mußten die Versuchsteile nachaktiviert werden. Bis zu diesem Zeitpunkt konnte die Büchsenlauffläche (OT), aber nicht die Ringflanke mitgemessen werden. Nach der Nachaktivierung konnte auch die Ringflanke mitgemessen werden. Dadurch verschlechterte sich aber die Meßempfindlichkeit für die Zylinderlaufbüchse so, daß nur ab einer Büchsenverschleißrate von $40 \mu\text{g/h}$ eine Differenzierung möglich gewesen wäre. Sie lag während des gesamten Versuches unterhalb dieser Grenze.

Das wichtigste Ergebnis ist die konstante Verschleißrate der Ringlauffläche und der Büchse (OT) nach dem Einlauf bis zum Ausfall der Paarung durch Ringbruch. Dies gilt für alle untersuchten Betriebspunkte. Die parallel zu dieser Arbeit vorgenommenen Einlaufuntersuchungen /58/ haben ergeben, daß für diesen Motor der Schlüsselbetriebspunkt (Definition siehe Lit.58) 2350/Vollast ist. Der Motor erreicht bei diesem Betriebspunkt die über die ganze Laufzeit gleichbleibende konstante Verschleißrate am schnellsten (Diagramme siehe Lit.59). Vollastpunkte bei geringeren Drehzahlen haben zwar absolut gesehen höhere Verschleißraten, erreichen aber die endgültigen Werte später.

Der bevorstehende Ausfall des Ringes macht sich nur im Verschleißverhalten der Ringflanke bemerkbar. Bereits 500 h vor dem Erkennen des Ringbruches anhand der steil ansteigenden Durchblasegasmenge deutet sich der Ausfall des Teiles durch ein Ansteigen der Verschleißrate an. Im Gegensatz zu den Ausfällen in den Zylindern 1 und 2, wo die Durchblasegasmenge von normalen Werten aus plötzlich anstieg, zeigt sich, vermutlich verursacht durch Zylinder 3, allerdings schon ab 6250 h eine erhöhte Durchblasegasmenge.

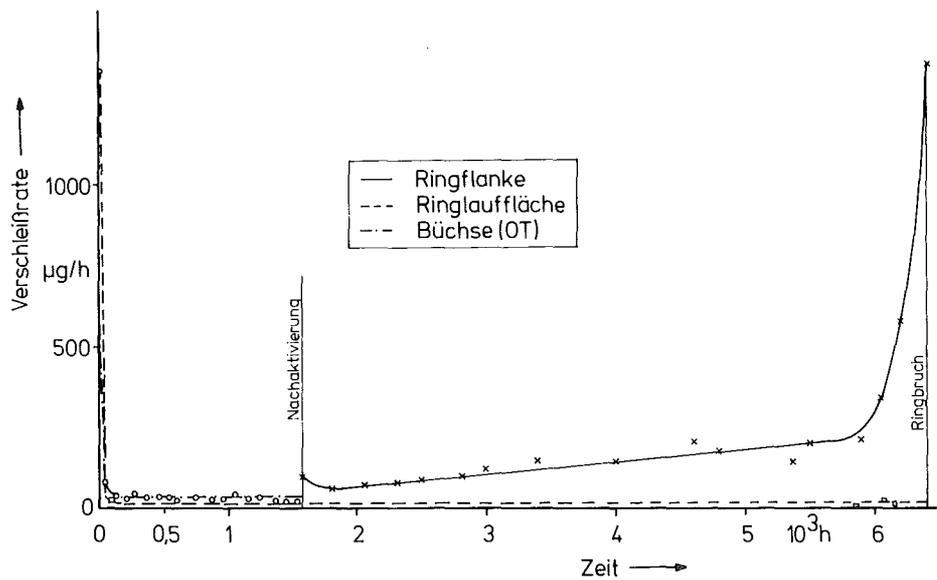


Fig.17: LZ MWM 2-Langzeitversuchsergebnis für den Nennleistungsbetrieb 2350/Vollast

Es ist aufgrund der in Kap.6.2 beschriebenen Ergebnisse und Überlegungen nicht anzunehmen, daß der Ring zu diesem Zeitpunkt bereits gebrochen ist. In Lit.59 ist der Leistungsverlauf des Motors wiedergegeben. Dieser zeigt zwar sehr deutlich, wie ab etwa 4800 h der Motor langsam an Leistung verliert, erlaubt aber keine eindeutige Korrelation zwischen Leistung und Ringbruch (Durchblasegasmenge).

Festzuhalten bleibt, daß die Verschleißrate von 2 der 3 als kritisch angesehenen Bauteile über 100% der Laufzeit auf dem nach dem Feineinlauf (Definition siehe Lit.58) erreichten Niveau blieb.

Der Verschleißratenverlauf der Ringflanke ist nicht so eindeutig, auf ihn soll näher in diesem Kapitel unter b) und c) sowie ausführlich in Kap.6.2 und 6.4 eingegangen werden.

Die konventionelle Büchsen- und Kolbenringverschleißauswertung wurde bereits ausführlich in Lit.59 beschrieben. Die dort aufgeführten Tabellen lassen erkennen, daß die Verschleißraten der unbeschädigten Bauteile der nichtaktivierten Bestückungen im Bereich der mitgemessenen Bestückungen liegen.

b) LZ MWM 4

Der Versuch LZ MWM 4 erreichte eine Laufzeit von 2733 h. Die Versuchsdauer betrug 8 Monate, der 1. Kompressionsring war aus Standard-Material gefertigt.

Programm des Dauerlaufs:

2800/Vollast. Während der 4 Meßwageneinsätze wurden Vollastpunkte bei 1200, 1500, 1800 und 2350 min^{-1} gefahren. Die Ölintervalle betragen im Mittel 71 h, der Filter wurde bei jedem 2. Ölwechsel ausgetauscht.

Es konnten bei diesem Versuch die bei Versuchsbeginn vorliegenden Erfahrungen des Langzeitversuchs LZ MWM 2 bei der Bauteilaktivierung genutzt werden. So wurden die Verschleißratenverhältnisse Ringflanke : Büchse : Ringlauffläche und die absoluten Verschleißraten vom 1. Dauerlauf zugrunde gelegt. Da sich später dann tatsächlich die gleichen Verschleißcharakteristiken einstellten, war nach dem Feineinlauf eine 3-Komponentenmessung möglich.

Fig.18 gibt das Langzeitversuchsergebnis wieder. Die Ringlauffläche und die Büchse (OT) zeigen eine konstante Verschleißrate bis zum Ausfall der Paarung.

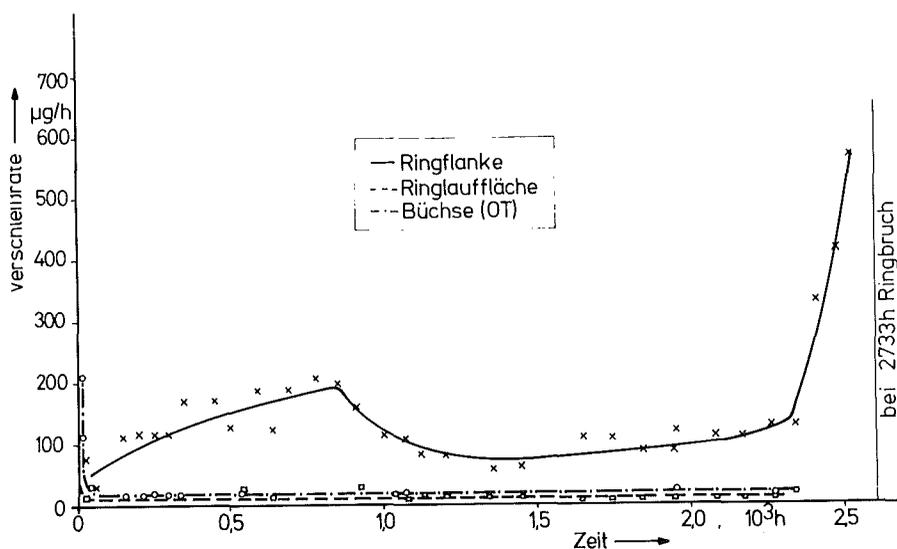


Fig.18: LZ MWM 4-Langzeitversuchsergebnis für den Nennleistungsbetriebspunkt 2800/Vollast

Fig.19 verdeutlicht, daß die Ringlauffläche nach etwa 12 h bereits die während der gesamten Laufzeit beibehaltene Verschleißrate für den Schlüsselbetriebspunkt für den Einlauf (2800/Vollast) erreicht hat. Die Büchse benötigte etwa 30 h. Die Ringflanke konnte während des Einlaufs nicht mitgemessen werden.

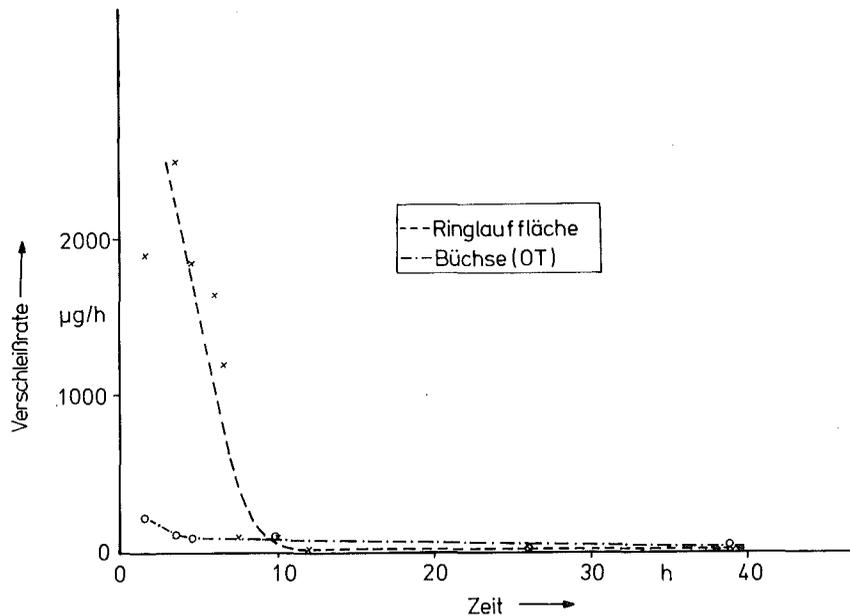


Fig.19: LZ MWM 4-Feineinlauf für den Nennleistungsbetriebspunkt 2800/Vollast

Der Ringflankenverschleißratenverlauf unterteilt sich in vier Abschnitte (siehe dazu Schema in Fig.33), wobei die letzten drei auch schon beim Versuch LZ MWM 2 beobachtet worden sind. Eine Erklärung für diesen Verlauf kann nicht gegeben werden. Daß es sich aber sehr wahrscheinlich um einen charakteristischen Verlauf handelt und bisher unbekannt Zusammenhänge bestehen müssen, läßt sich auch aus dem Langzeitversuch LZ MWM 10 ableiten. Weitere Hinweise gibt Tabelle 5 und deren Erklärung in Kap. 6.4.

400 h vor dem Erkennen des Ringbruchs anhand der Durchblasegasmenge deutet sich der Ausfall des Teiles anhand des Ringflankenverschleißratenverlaufes an. Die Durchblasegasmenge erreicht 30 h vor dem steilen, plötzlichen Anstieg den doppelten Normalwert. Es ist keine Korrelation ersichtlich zwischen Leistungsverlauf und Ringflankenverschleißrate. Auch bei diesem Versuch

blieb das Verschleißverhalten von zwei der drei Komponenten über mindestens 93% der Laufzeit so, wie es sich nach dem Feineinlauf eingestellt hatte.

c) LZ MWM 10

Der Versuch LZ MWM 10 erreichte eine Laufzeit von 2733 h. Die Versuchsdauer betrug 6 Monate, der 1. Kompressionsring war aus IKA-Material gefertigt /66/.

Programm des Dauerlaufs:

Wie LZ MWM 4, die Ölintervalle betragen im Mittel 87 h, der Filter wurde bei jedem 2. Ölwechsel ausgetauscht.

Bei diesem Versuch mußte auf eine Büchsenverschleißmessung verzichtet werden, was aber den Vorteil hatte, die Ringflankenverschleißrate mit größerer Genauigkeit erfassen zu können. Das Versuchsergebnis (Fig.20) deckt sich weitgehend mit den anderen Langzeitversuchen an diesem Motortyp.

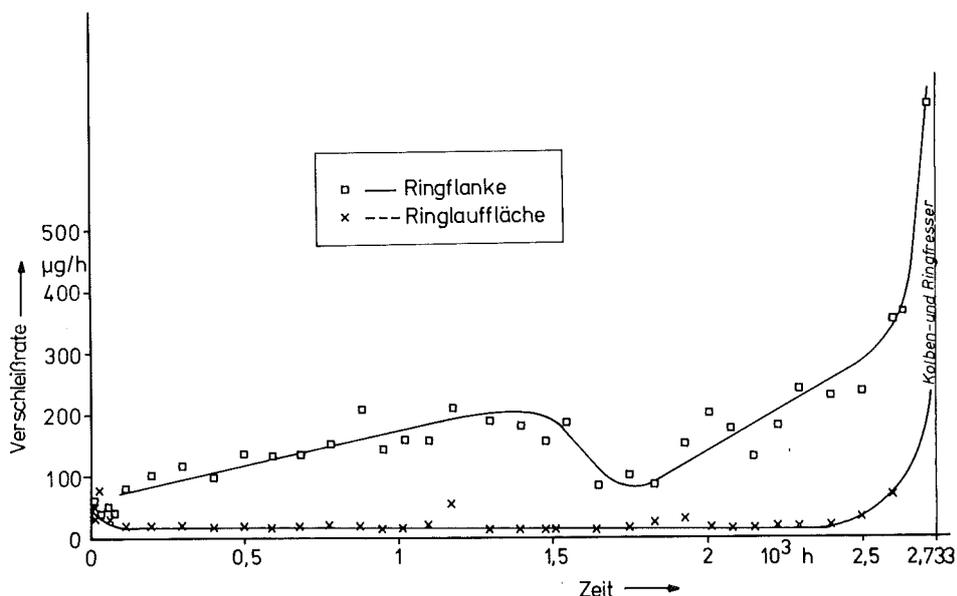


Fig.20: LZ MWM 10-Langzeitversuchsergebnis für den Nennleistungsbetriebspunkt 2800/Vollast

Das Ansteigen der Ringlaufflächenverschleißrate ab etwa 2550 h ist auf die Ausfallart der Paarung durch Kolben- und Ringfresser

und Kolbenhemdbruch zurückzuführen. Es ist anzunehmen, daß eine derartige Schädigung der Paarung, die auch zum Ausfall des Ringes durch Fresser führte, die erhöhte Ringlaufflächenverschleißrate bewirken konnte.

Bei den Ausfällen von Paarungen durch Ringbruch konnten weder bei den beschriebenen Langzeitversuchen noch bei den zahlreichen Versuchen zum Ringbruch (siehe Kap. 6.3) vor dem Bruch erhöhte Ringlaufflächenverschleißraten beobachtet werden. Die Ringflankenverschleißrate unterteilt sich auch bei diesem Versuch in vier Bereiche. Der Ausfall des Ringes kündigt sich, wie bei den Versuchen zuvor, anhand des Ringflankenverschleißratenverlaufes an. Der Übergang vom Bereich langsam abnehmender in den Bereich konstanter Verschleißraten deckt sich mit den an diesem Motor gemachten Erfahrungen, die Kurvenverläufe entsprechen denen in Fig.21 und 22.

6.1.2 Kurzzeitversuche

Die Kurzzeitversuche wurden mit neuen und gelaufenen Bauteilen am Motor D durchgeführt. Im Gegensatz zu den Langzeitversuchen kamen keine ausgesuchten Bauteile zum Einsatz, die Gründe dafür wurden in Kap. 3. dargelegt.

Neue Bauteile:

Die Versuchsprogramme waren für alle Versuche einheitlich. Nach einem Einlauf wurden Vollastpunkte verschiedener Drehzahlen gefahren, da es sich gezeigt hatte, daß Teillastpunkte nur sehr geringen, meist nicht mehr meßbaren Verschleiß erzeugten. Alle Versuchsergebnisse zeigen große Ähnlichkeit untereinander. Als Verdeutlichung sollen zwei der zahlreichen ermittelten Kurvenverläufe wiedergegeben werden.

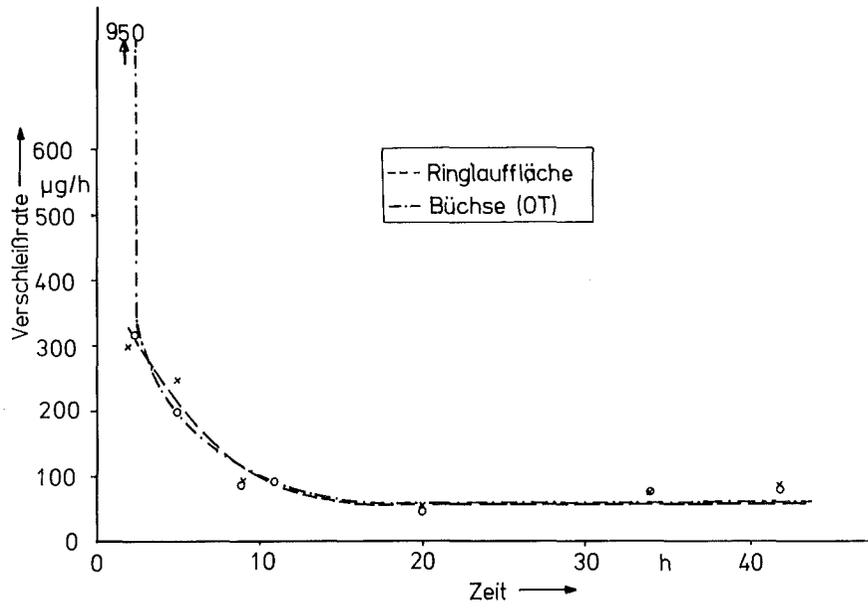


Fig.21: KZ MWM 3-Feineinlauf für den Nennleistungsbetriebspunkt 2350/Vollast

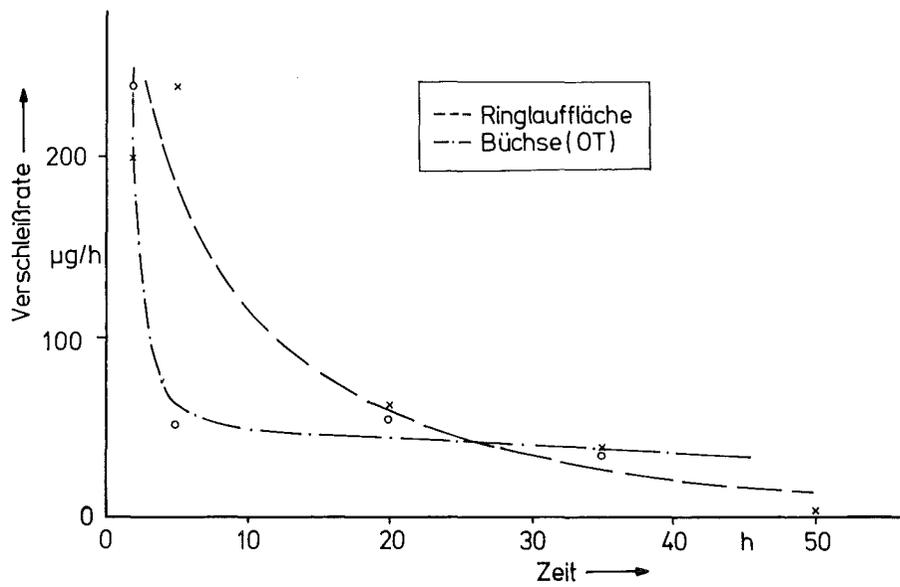


Fig.22: KZ MWM 5-Feineinlauf für den Nennleistungsbetriebspunkt 2800/Vollast

Drei Erscheinungen sind augenfällig:

1. Der Verschleißratenverlauf für die Büchse (OT) und die Ringlauffläche verläuft ähnlich (Fig.21 und 22).
2. Beim Schlüsselbetriebspunkt für den Grobeinlauf erreicht der Motor am schnellsten konstante Verschleißraten. Je weniger ein Betriebspunkt zum Gesamteinlauf beiträgt, desto später werden konstante Verschleißraten für diesen Punkt erreicht. Beim Motor D ist der Schlüsselbetriebspunkt je nach Blockierung der Einspritzpumpe 2350 bzw. 2800 min⁻¹ bei Vollast.
3. Ein Einlauf der Ringflanken im Sinne von über der Zeit abnehmenden Verschleißraten kann nicht beobachtet werden. Die Verschleißraten der Ringflanken haben zu Beginn die niedrigsten Werte und nehmen mit der Laufzeit zu, wie auch anfangs bei den Langzeitversuchen (Fig.17, Seite 68, 18, Seite 69, 20, Seite 71) zu sehen ist.

Gelaufene Bauteile:

Die Verschleißmessungen an gelaufenen Bauteilen hatten zum Ziel, Werte für die Streuungen der Verschleißraten nach dem Einlauf zu erhalten, ohne Langzeitversuche durchführen zu müssen. Zwar ließen sich diese Werte am genauesten mit Hilfe von genügend vielen Langzeitversuchen ermitteln, aber aus Kosten- und Zeitgründen konnte nur eine begrenzte Anzahl Langzeitversuche gefahren werden. Um dennoch beurteilen zu können, ob die Verschleißraten der für die Langzeitversuche ausgesuchten "mittleren" Bauteile auch mittlere Werte sind und wie groß die Streuungen der Verschleißraten zu einer gegebenen Laufzeit sein können, boten sich Kurzzeitversuche mit gelaufenen Bauteilen an. Die Versuche mit solchen Paarungen waren als durchführbar angesehen worden, da der reine Montageeinfluß eines Bauteiles auf denselben Motor, in dem es zum Einsatz kam, beim Motor E getestet worden war und der Motor D im Zylinderbereich sehr ähnlich aufgebaut ist wie der Motor E. Es muß darauf geachtet werden, daß die Bauteile zusammen mit ihren ursprünglichen Reibpartnern in den Testmotor eingebaut werden. In Lit.57 werden Standardabweichungen für die Reproduzierbarkeit der Ringlaufflächen- und Ringflankenverschleiß-

raten für den Motor E von 12,1 bis 14,1% angegeben.

Die Bestückungen für die Versuche KZ MWM 11 und 12 stammen aus dem Langzeitversuch LZ MWM 2 und waren 2404 bzw. 1194 h gelaufen. KZ MWM 13 hatte eine 1589 h alte Paarung, die nur bei 2800/Vollast betrieben worden war. KZ MWM 14 und 15 hatten Paarungen aus dem Langzeitversuch LZ MWM 4 mit 1144 h Laufzeit. Die Bestückungen für KZ MWM 16 und 17 waren 1220 h gelaufen und aus einem Dauerversuch mit dem einzigen Betriebspunkt 2350/Vollast. Die Verschleißraten der Büchse (OT) sind nur bei den Versuchen 11-13 erfaßt worden. Wegen des sich abzeichnenden negativen Ausgangs der Versuche hinsichtlich des angestrebten Zieles wurde für die folgenden Versuche wegen der hohen Aktivierungskosten auf die Büchsenverschleißratenmessung verzichtet.

Die Versuche verliefen bis auf KZ MWM 11 (nicht auswertbar) in sofern normal, als sich nach kurzen Einläufen konstante Verschleißraten bei den jeweiligen Volllastpunkten verschiedener Drehzahlen einstellten und diese reproduzierbar waren. Bei den Versuchen KZ MWM 12 und 13 lag jedoch das Verschleißratenniveau der Ringflanke und der Ringlauffläche wesentlich über den üblichen Werten. Für die Ringlauffläche etwa 5 mal so hoch und 2-3 mal so hoch für die Ringflanke. Die zu erwartenden Werte stützten sich nicht nur auf die genaue Kenntnis des Verschleißratenverlaufs dieser Bauteile über lange Zeit im Motor D, der Ring aus dem Versuch KZ MWM 12 war zudem vermessen worden, so daß mittlere Verschleißraten über 1194 h für ihn angegeben werden konnten. Die Büchsenverschleißraten lagen für den Versuch KZ MWM 12 im Erfahrungsbereich, für Versuch KZ MWM 13 waren sie wegen der zu hohen Ringflankenverschleißraten nicht auswertbar. Wesentlich günstiger verliefen die Versuche KZ MWM 14-17. Das Verschleißratenniveau für die Ringflanke deckte sich mit den Erfahrungswerten, während das der Ringlauffläche noch etwa doppelt so hoch wie erwartet war. Der statistische Vergleich der Daten der alten Paarungen mit den Daten der bis dahin aufgestellten Grundgesamtheit II ergab, daß zwischen ihnen ein signifikanter Unterschied besteht, also nicht mehr von zufälligen Abweichungen gesprochen werden kann (siehe Kap. 7.2). Dies hatte zur Folge, daß

die Versuchsergebnisse dieser Versuche nicht in die Grundgesamtheit II einbezogen werden konnten. Daraufhin wurde der Entschluß gefaßt, die Versuche mit alten Paarungen nicht fortzusetzen, da eine Demontage, längere Lagerzeit und Montage der alten Bestückungen auf einen anderen Grundmotor einen nicht vernachlässigbaren Einfluß zumindest auf das Verschleißratenniveau der Lauffläche des 1. Kompressionsrings hat; für die Büchse (OT) ist dies nicht endgültig geklärt.

6.2 Testversuche

6.2.1 Langzeitversuche

a) LZ KHD 4

Nach der Erstellung der Grundgesamtheiten mit den Verschleißratendaten, die am Motor D gewonnen worden sind, wurden, wie in Kap.3. angestrebt, Verschleißversuche an anderen Motortypen durchgeführt, um Daten zur Überprüfung zu erhalten, ob die gleichnamigen Bauteile gleichartig verschleifen, zur selben Grundgesamtheit gehören und ob die bei positiver Übereinstimmung errechenbaren Wahrscheinlichkeitsangaben über das Verschleißverhalten eines bestimmten Prozentsatzes sinnvolle Werte ergibt. Die statistische Auswertung aller Testversuchsergebnisse erfolgt in Kap.7.3, in diesem Kapitel werden einige typische Einzelversuchsergebnisse beschrieben.

Versuchsmotor war der Motor F. Der Motor erreichte planmäßig 3100 h. Die Versuchsdauer betrug 6,5 Monate.

Programm des Dauerlaufs:

600-h-Programm der Herstellerfirma 5 mal durchfahren. Es werden im Prinzip 2 Ölintervallängen eingehalten, deren Länge bei scharfen Betriebspunkten im Mittel 65 h und bei weniger scharfen im Mittel 210 h betrug. Öl- und Filterwechsel erfolgten gleichzeitig.

Für Langzeitverschleißmessungen mit Hilfe der RNT liegen an diesem Motor ungünstige Bedingungen vor.

Das Ölvolumen ist mit fast 30 l etwa 3,5 mal so groß wie das

des Motors D. Außerdem hat der Motor bedingt durch die 5,82-fach höhere Leistung bei etwa gleichem spezifischen Ölverbrauch einen hohen Ölverbrauch bezogen auf das eingefüllte Ölvolumen ebenfalls im Verhältnis zum Motor D. Das erfordert häufiges Ölnachfüllen und das Ziehen zahlreicher Ölproben, um den Verschleißverlust durch Ölverbrauch richtig zu erfassen (etwa alle 6 h 2 Proben). Wegen gesetzlicher Bestimmungen durfte die Gesamtaktivität der Bauteile nicht über denen der Versuche am Motor D liegen, was aufgrund größerer Bauteilabmessungen geringere spezifische Bauteilaktivitäten bedeutete.

Um Daten für die Zugehörigkeiten zu den Grundgesamtheiten der gewählten gleichnamigen Bauteile zu erhalten, wurde der Büchsenverschleiß (OT) sowie anfangs der Ringflankenverschleiß (Materialart KV 1) /26/ des molybdänbeschichteten 1. Kompressionsringes gemessen. Die Art des Laufflächenmaterials erlaubte wegen der Kurzlebigkeit der erzeugbaren Radionuklide keine Verschleißmessung der Ringlauffläche über der gesamten Versuchszeit.

Beide Komponenten konnten nur am Anfang mitgemessen werden. Später reichte die Aktivität nur noch zur Erfassung der Büchsenverschleißrate (OT) bei den Vollastbetriebspunkten 2800, 2650 und 1600 min^{-1} . Fig. 23 zeigt das Versuchsergebnis des Langzeitversuches. Der am meisten gefahrene Betriebspunkt "Wechselast" lag mit etwa 15 $\mu\text{g/h}$ Abtrag an der Grenze der Meßempfindlichkeit. Diese Verschleißrate blieb von Beginn bis etwa 2800 h konstant, um dann bis 3000 h auf etwa 85 $\mu\text{g/h}$ anzusteigen.

Sehr auffällig ist der Sprung in der Büchsenverschleißrate bei 2650/Vollast und 2800/Vollast nach 1209 h. Als Erklärung bietet sich der Wechsel von der Ölsorte SAE 20 W 20 auf SAE 30 an.

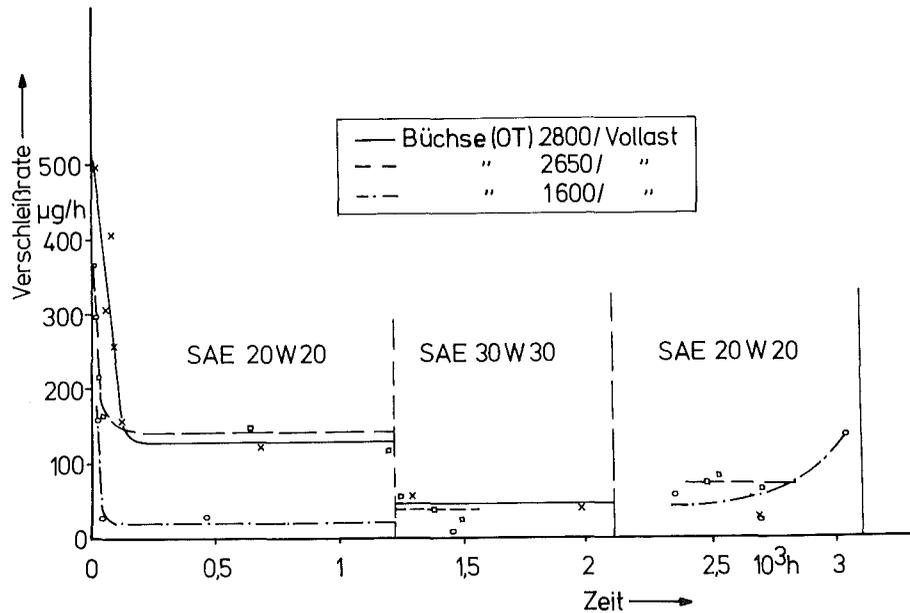


Fig.23: LZ KHD 4-Langzeitversuchsergebnis für die Betriebspunkte 2800/Vollast, Nennleistungsbetriebspunkt 2650/Vollast und 1600/Vollast

Der Büchsenverschleißratenverlauf dieses Motors ähnelt sehr stark dem des Motors D. Der Übergang vom Grob- in den Fein-einlauf (Definition siehe Lit.58) und den Normallauf erfolgt in gleicher Weise und zu etwa gleichen Zeiten.

Nach dem Zerlegen des Motors waren keine Schäden an der Zylinderbüchse oder am Ring zu beobachten.

b) LZ DB 1

Versuchsmotor war der Motor B. Der Dauerversuch mußte wegen eines Schadens nach 532 h abgebrochen werden. Die Versuchsdauer betrug 9,5 Wochen.

Programm des Dauerlaufs:

DB-Kombitest. Der Filterwechsel erfolgte mit jedem Ölwechsel.

Es konnte nur der Büchsenverschleiß (OT) gemessen werden, da der 1.Kompressionsring, ebenso wie der Ring des Motors F, eine Molybdänlauffläche besaß und der Verschleiß der Lauffläche aus den gleichen Gründen wie unter a) genannt nicht mitgemessen werden konnte.

Der Versuch gibt einen Hinweis, daß das in Lit.58 gefundene Untermengenverhalten vielleicht auch dann gilt, wenn der Schlüsselbetriebspunkt für einen gegebenen Motor erst nach langer Zeit (hier 108 h) zum 1. Mal angefahren wird und kein stationärer Betriebspunkt ist. Das Untermengenverhalten wurde in Lit.58 nur für stationäre Betriebspunkte untersucht. Fig.24 zeigt sehr deutlich den starken Einlaufeffekt für den Betriebspunkt Kalt/Warm.

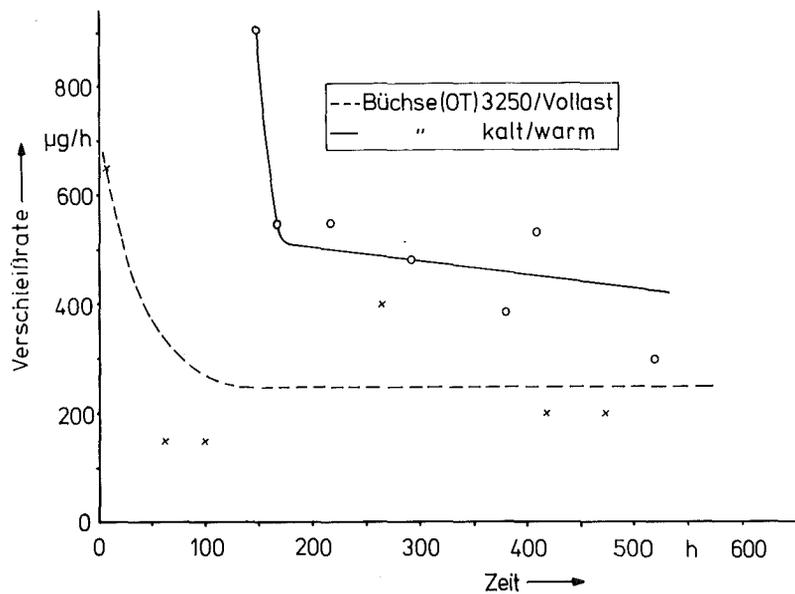


Fig.24: LZ DB 1-Langzeitversuchsergebnis für die Betriebspunkte Kalt/Warm und 3250/Vollast

Das Ergebnis des Verschleißratenverlaufs 4350/Vollast (Fig. 25) zeigt wie auch das des Kalt/Warm-Testes, daß die Verschleißraten bei den für den Motor scharfen Betriebspunkten bis zum Ausfall des Motors noch leicht fallende Tendenz haben. Für den unkritischen Betriebspunkt 3250/Vollast (Fig.24) gilt das nicht.

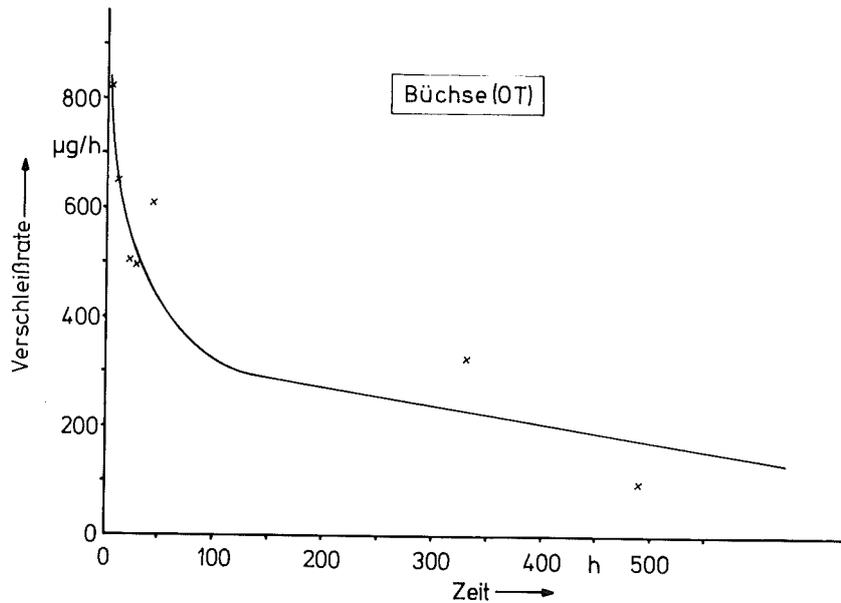


Fig.25: LZ DB 1-Langzeitversuchsergebnis für den Nennleistungsbetriebspunkt 4350/Vollast

Die Schwankungen der Verschleißratenwerte aller drei Betriebspunkte sind ungewöhnlich groß und konnten an den anderen Motortypen innerhalb eines Versuchslaufes nicht beobachtet werden. Dies deutet auf eine Abhängigkeit der Verschleißrate von der Reihenfolge der gefahrenen Betriebspunkte bzw. auf die Kombination derselben bei diesem Motor hin. Die Verschleißratenwerte des Kalt/Warm-Tests sind etwas geringer als die am Motor A gemessenen und in Lit.60 beschrieben.

6.2.2 Kurzzeitversuche

a) Motor E

Die Versuchsprogramme am Motor E waren einheitlich und glichen den Testprogrammen am Motor D.

Der charakteristische Verschleißratenverlauf für die Büchse (OT) ist der gleiche wie beim Motor D, obwohl die Ringform des 1. Kompressionsringes eine andere ist.

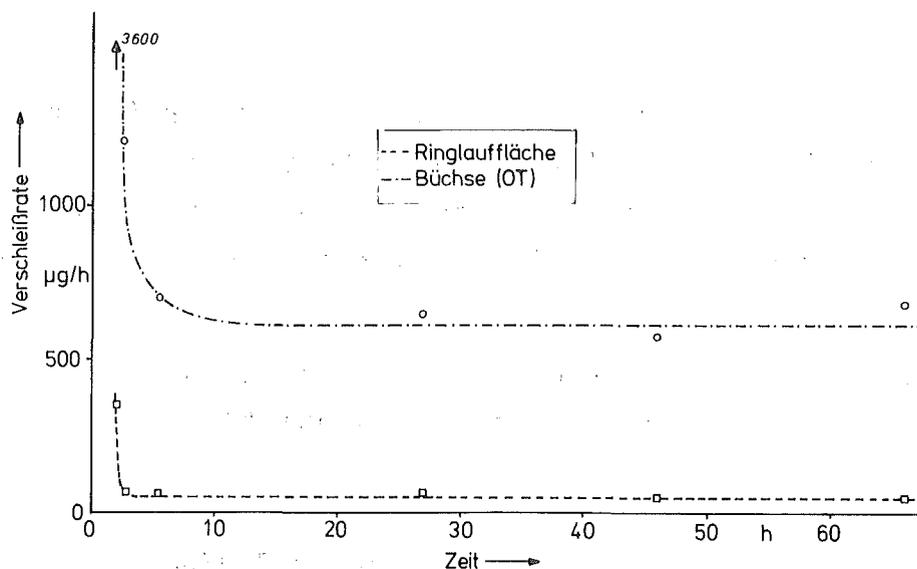


Fig.26: KZ KHD-3-Feineinlauf für den Nennleistungsbetriebspunkt 2650/Vollast

Im Gegensatz zu den Doppeltrapezringen wurden bei den Versuchen KZ KHD 1 und 3 Rechteckringe verwendet. Nicht nur diese Versuche, auch die in Lit.57 und 58 beschriebenen, die am selben (!) Motor durchgeführt worden waren, weisen darauf hin, daß der Grobeinlauf für die Ringlauffläche bei Rechteckringen an diesem Motortyp bereits während des etwa 2 1/2-stündigen Firmeneinlaufprogrammes erfolgt. Wertet man die Verschleißmeßergebnisse in Lit.57 in der in der vorliegenden Arbeit üblichen Form aus, so zeigt sich, daß der Verschleißratenverlauf für die Lauffläche doppeltrapezförmiger Kolbenringe sehr ähnlich dem des Motors D ist. Es kann festgestellt werden, daß der Übergang vom Grob- in den Feineinlauf bei den Doppeltrapezringen viel länger dauert als bei den Rechteckringen. Die am Motor D gemachten Erfahrungen deuten darauf hin, daß die Feineinläufe bei den Doppeltrapezringen des Motors E in Lit.57 noch nicht abgeschlossen sind und es durchaus möglich sein kann, daß sich bei diesen Ringen im Normallauf die gleichen oder ähnlich niedrigen Verschleißraten einstellen wie bei den Rechteckringen. Die Frage könnte durch

länger dauernde und etwas anders strukturierte Versuche, als sie in Lit.57 durchgeführt worden sind, beantwortet werden.

b) Motor A

Die Versuchsprogramme der Versuche am Motor A waren einheitlich und bestanden aus Vollastbetriebspunkten wie sie im Kombitest vorkommen. Das Versuchsprogramm enthielt bis auf den Kalt/Warm-Betriebspunkt alle Belastungsarten wie sie beim Versuch LZ DB 1 vorkamen.

Fig.27 gibt ein typisches Versuchsergebnis für einen Betriebspunkt wieder, der oberhalb der Nenndrehzahl lag.

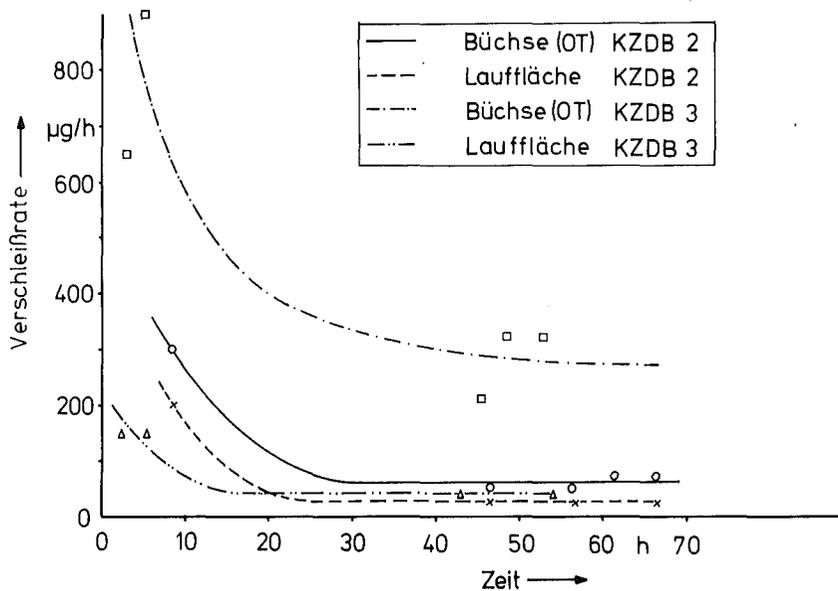


Fig.27: KZ DB 2- und 3-Feineinläufe für den Überdrehzahl-Betriebspunkt 4500/Vollast

Auch an diesem Motor ist der Verschleißratenverlauf zwischen Ringlauffläche und Büchse (OT) ähnlich. Der Übergang vom Grob- in den Feineinlauf erfolgt für beide Bauteile im gleichen Zeitbereich (8-10 h). Im Gegensatz zum Rechteckring des Motors E, dessen Grobeinlauf sehr schnell schon während des Firmeneinlaufprogrammes erfolgt, ist er beim Rechteckring dieses Motors sehr deutlich ausgeprägt und entspricht dem des Doppeltrapezringes im

Motor D, was sich auch dadurch ausdrückt, daß die Ringverschleißratenmeßwerte der mit den Meßwerten der Bauteile des Motors D aufgestellten statistischen Grundgesamtheit angehören (siehe Kap. 7.3.1).

6.3. Versuche mit Bauteilen künstlich veränderten Spiels

Bei den Langzeitversuchen am Motor D konnte ein Zusammenhang zwischen dem Ausfall der Ringe und dem Ringflankenverschleißratenverlauf beobachtet werden. Eine bestimmte Verschleißratenänderung bzw. Verschleißbeschleunigung ging dem Ausfall des Teiles durch Bruch voraus. Da bis zum Ausfall des Teiles der Verschleißratenverlauf der Büchse (OT) und der Ringlauffläche sich nicht änderte, also unabhängig vom während der Laufzeit zunehmendem Spiel des 1. Kompressionsringes in der Kolbennut war, bestanden berechnete Aussichten, die Lebensdauergrenze des Bauteiles relativ einfach anhand des Ringflankenverschleißratenverlaufes angeben zu können, wenn dieses Ende durch ein bestimmtes Axialspiel des Ringes in der Kolbennut hervorgerufen wird. Um diese Grenzen des "zulässigen" Axialspiels einzuengen, ist eine zusätzliche Versuchsserie durchgeführt worden, bei der die Ringhöhe und Nuthöhe durch mechanische Nacharbeit stufenweise verändert wurde.

Um die Grenzen des Axialspiels für den Motor D angeben zu können, wurden die Spiele der Ringe in der Kolbennut bei den Versuchen LZ MWM 2, 4 und 10 zum Zeitpunkt des Ausfalls ermittelt. Dies geschah bei den Ringen durch Umrechnung des über die Laufzeit erfaßten Gesamtabtriebs in einen Spielerweiterungsanteil durch den Ringflanken-, den Ringlaufflächen- und Büchsenverschleiß sowie Vermessungen der 1. Kolbennut vor und nach den Versuchsläufen. Durch die Verwendung von Doppeltrapezringen als 1. Kompressionsring trug auch der Ringlaufflächen- und der Büchsenverschleiß zum Gesamtaxialspiel bei, deren Einfluß auf dieses Spiel aber, wie in Tabelle 2 zu sehen, unerheblich ist.

Versuch	Ausfall- art des Kolben- ringes	Laufzeit (h)	Spielerweiterung durch				Gesamt- spieler- weite- rung (μm)
			Ringfl.- Verschl. (μm)	Nutfl.- Verschl. (μm)	Büchsen- Verschl. (μm)	Ringlauf- flächen- verschl. (μm)	
LZMWM 2	Bruch	6414	92	126	1,6	2,3	221,9
LZMWM 4	Bruch	2733	47,5	152	0,4	0,8	200,7
LZMWM 10	Fresser	2733	45	60	2	1	108

Tab.2: Spielerweiterung des 1.Kompressionsringes in der Kolbennut bei 3 Langzeitversuchen

1. Versuchsserie:

Da das Ringgesamtspiel in der Kolbennut durch einen Ringflanken- und einen Nutflankenverschleißanteil gebildet wird, bestand die erste Versuchsserie aus zwei Teilen. Beim ersten Versuchsteil wurde das Gesamtspiel nur auf den Kolben durch stufenweise Erweiterung der 1.Kolbennut aufgebracht, beim zweiten Teil nur auf den Ring durch stufenweise Verringerung der Ringhöhe. Aufgrund der Meßergebnisse in Tab.2 war die größte Spielerweiterung (d.h. zusätzlich zum im Normalfall vorhandenen Spiel) ca. 200 μm . Die Zwischenmaße sind Tab.3, Seite 88 zu entnehmen. Bei den Langzeitversuchen blieb die Ringlaufflächenverschleißrate bis zum Ausfall des Ringes konstant, deshalb war es wahrscheinlich, daß sich bei den Spielversuchen auch keine Abhängigkeit der Ringlaufflächenverschleißrate von der Spielerweiterung zeigen würde.

Fig.28 und 29 zeigen für den Nennleistungsbetriebspunkt (2800/Vollast)(für Vollastbetriebspunkte niedriger Drehzahlen, die zwischen den Nennleistungsbetriebspunkten auch gefahren wurden, gelten die gleichen Ergebnisse), daß unabhängig davon, auf welches Bauteil das Spiel aufgebracht worden war und welchen Betrag es hatte, die Ringlaufflächenverschleißratenkurven über der Zeit den mit den Kurzzeitversuchen an neuen Bauteilen normalen Spiels gefundenen Verlauf haben und mit unterschiedlichen Spielen als Kurvenparameter in einem sehr engen Verschleißratenstrebereich liegen.

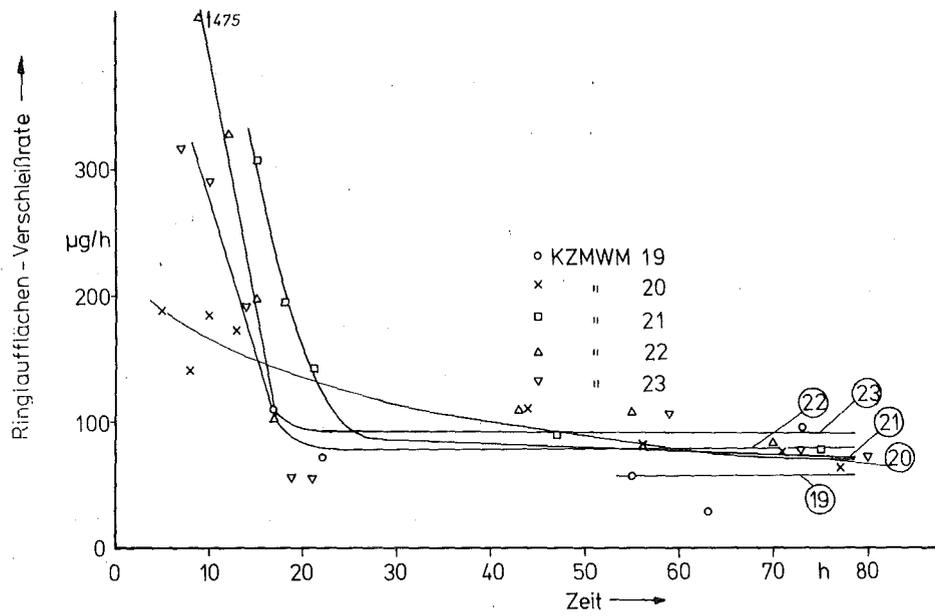


Fig.28: Ringlaufflächenverschleißratenverläufe bei Paarungen mit erweitertem Kolbennutspiel der 1. Nut für den Nennleistungsbetriebspunkt 2800/Vollast an Motor D

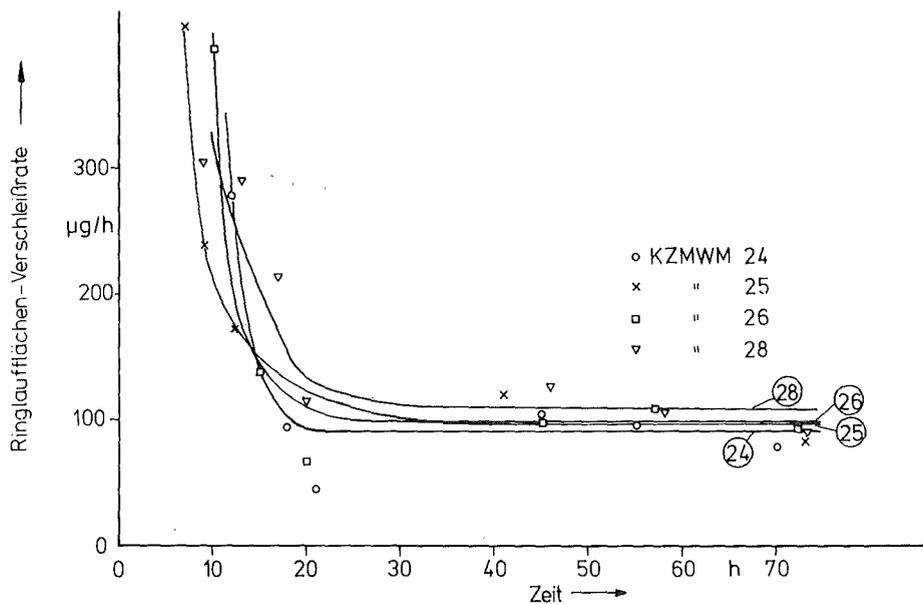


Fig.29: Ringlaufflächenverschleißratenverläufe bei Paarungen mit verringerter Ringhöhe des 1. Kompressionsringes für den Nennleistungsbetriebspunkt 2800/Vollast an Motor D

Das Versuchsprogramm war für alle Versuche gleich und dauerte etwa 73 h. Es umfaßte nur Vollastbetriebspunkte; zum größten Teil bei Nennleistung.

In Tab.5, Seite 96 sind die Verschleißbeschleunigungen der Ringflanken bei den Langzeitversuchen des Motors D aufgeführt. In der Spalte 4. Kurventeil (Erklärung siehe Fig.33, Seite 94) sind die Verschleißbeschleunigungen aufgeführt, die sich vor dem Ausfall des Ringes einstellten. Eine ähnlich hohe Verschleißbeschleunigung trat nur beim Versuch KZ MWM 23 (normaler Ring, Nutbreite + 200 μm) auf. Nach Beendigung der 1. Versuchsserie wurde die völlig intakte Bestückung dieses Versuches neu montiert und der Versuch fortgesetzt. Nach etwa 10 h brach der Ring. Da das gleiche Spiel auch beim Versuch KZ MWM 28 verwendet worden war, wurde auch diese Bestückung nochmals montiert und der Versuch fortgesetzt, obwohl die Verschleißbeschleunigung bis dahin nur bei etwa $70 \frac{\mu\text{g/h}}{100\text{h}}$ lag. Das Versuchsergebnis zeigt Fig.30. Nach einer Laufzeit von 184 h wurde der Versuch abgebrochen, da sich, wie zu sehen ist, die Verschleißbeschleunigung der Ringflanke nicht änderte. Der Versuch zeigt auch sehr deutlich die konstante Ringlaufflächenverschleißrate bis zum Abbruch des Versuchs.

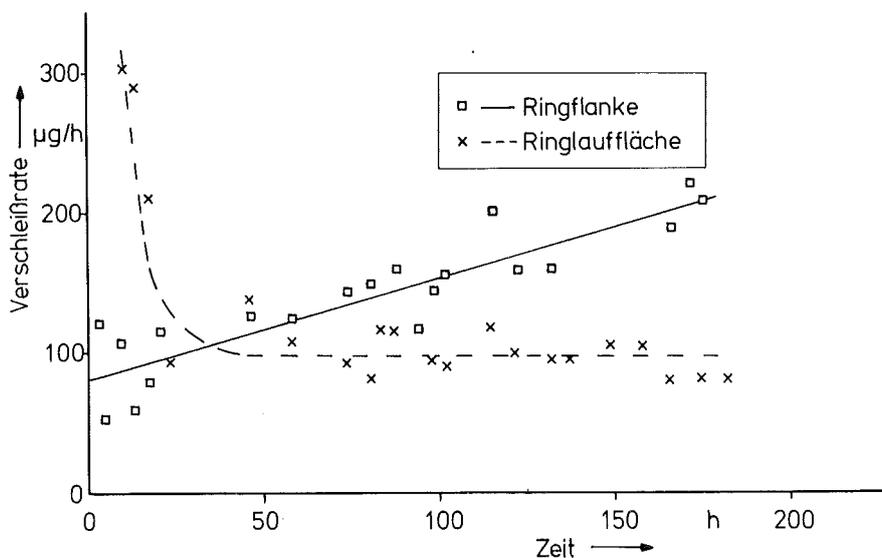


Fig.30: KZ MWM 28-Verschleißratenverläufe für die Ringflanke und die Ringlauffläche für den Nennleistungsbetriebspunkt 2800/Vollast am Motor D

2. Versuchsserie:

Die 1.Versuchsserie gab einen Hinweis, daß es möglich sein kann, durch künstlich aufgebrachtetes Spiel Ringflankenverschleißbeschleunigungen zu erzielen, die in der gleichen Größenordnung liegen wie die in dem 4.Kurvenbereich der Langzeitversuche, bei denen dann auch der Ausfall auftrat. Um diese Beobachtung zu erhärten, wurde eine 2.Versuchsserie durchgeführt mit Teilen, die alle etwa zusätzlich 200 μm Spiel im Kolbennut - Ringbereich aufwiesen. Vier Bestückungen mit verminderter Höhe des 1.Kompressionsringes und vier Bestückungen mit erweiterter 1.Kolbennut. Der 1.Versuch KZ MWM 31 bestätigte die bisherigen Vermutungen, daß eine bestimmte Verschleißbeschleunigung zum Ausfall des Ringes führt, wenn auch der Betrag von \ddot{V} in diesem Versuch niedriger lag als bei den bisher beobachteten Paarungen, die zum Ausfall führten.

Während des 2.Versuches dieser Serie (KZ MWM 32) verlor der Motor nach 96 h durch einen Defekt ca. 80% seiner Ölfüllung, was Überhitzungen im Kolben-Zylinderbereich zur Folge hatte und zu Fressern in diesem Bereich führte. Alle 3 Bestückungen wurden komplett ausgewechselt und der Motor weiter betrieben, nachdem eine Sichtkontrolle der wichtigsten Lager keine Schäden erkennen ließ. Der Motor hatte aber einen bleibenden Schaden erlitten, der sich leider erst später so bemerkbar machte, daß er auffiel. Der Meßzylinder war ein "Schrägläufer" (die Pleuelachse stand nicht senkrecht auf der Kurbelzapfenlängsachse), was sich über der Laufzeit verstärkt auswirkte. Die Versuche KZ MWM 33-38 wurden daraufhin nicht in die Auswertung einbezogen und eine 3.Versuchsserie aufgelegt. Bis zum Ausfall der Bestückung lag die Verschleißbeschleunigung des Versuches KZ MWM 32 mit $22 \frac{\mu\text{g/h}}{100\text{h}}$ sehr niedrig, allerdings streuten die Werte sehr stark, was an dem Bestimmtheitsmaß in Tab.3, Seite 88 zu sehen ist. Der Versuch wurde deshalb in keiner Auswertung berücksichtigt.

Verschleißbeschleunigung der Spielerweiterungsversuche bei 2800/Vollast

Tab.3: Übersichtstabelle für die Spielversuche

Versuch	Ringhöhen- abweichung μm	Nuthöhen- abweichung μm	Laufzeit h	Zeit bis Ringbruch h	\ddot{V} $\frac{\mu\text{g/h}}{100\text{h}}$	Bestimmtheits- ^{a)} maß %
KZ MWM 19	0	+ 75	74	-	48	30
KZ MWM 20	0	+ 100	78	-	29	92
KZ MWM 21	0	+ 122	149	-	78	79
KZ MWM 22	0	+ 155	109	-	135	83
KZ MWM 23	0	+ 200	96	83	190	94
KZ MWM 24	- 71	0	71	-	67	30
KZ MWM 25	- 107	0	75	-	84	40
KZ MWM 26	- 155	0	74	-	148	69
KZ MWM 28	- 196	0	184	-	72	78
KZ MWM 31	0	+ 202	102	96	146	68
KZ MWM 32	- 200	0	98	(b)	(22)	13
KZ MWM 33÷38	durch Schrägläufer der Meßbestückung nicht auswertbar					
KZ MWM 39	0	+ 200	12	11	(c)	
KZ MWM 40	- 200	0	141	132	144	78
KZ MWM 41	0	+ 200	110	71	215	74
KZ MWM 42	- 200	0	9,5	9,5	(c)	
KZ MWM 43	0	+ 200	11,5	11,5	(c)	
KZ MWM 44	- 200	0 0	5	5	(c)	

- (a) Bestimmtheitsmaß stellt Maß für die Güte der Anpassung der Meßwerte an die Regressionsgerade (hier \ddot{V} über Spielerweiterung) dar.
 (b) durch 80%-igen Ölverlust Motorschaden im Zylinderbereich aller 3 Zylinder und Kolben, die komplett ausgewechselt wurden.
 (c) \ddot{V} ist wegen der kurzen Laufzeit bzw. schnellen Ringbruchs nicht angebar.

3. Versuchsserie:

Das Programm der 3. Versuchsserie entsprach dem der 2., es wurden jedoch nur jeweils 3 Bestückungen gefahren. Alle 6 Kolbenringe fielen durch Bruch aus. Es konnten allerdings nur bei 2 Versuchen die Verschleißbeschleunigungen ermittelt werden, da die anderen Paarungen schon nach sehr kurzer Zeit ausfielen. Die Werte für \ddot{V} von 144 und 215 $\frac{\mu\text{g/h}}{100\text{h}}$ liegen im Bereich des bisher beobachteten. In Tab.3 sind alle angesprochenen Daten und Ergebnisse der Spielversuche zusammengefaßt. Fig.31 zeigt die Ergebnisse der Versuche mit 200 μm Spiel graphisch. Aus Gründen der besseren Übersicht sind keine einzelnen Meßwerte eingezeichnet. (Bestimmtheitsmaße der einzelnen Geraden siehe Tab.3.) Es zeigt sich deutlich, daß die Steigungen der Verschleißratenverläufe (Verschleißratenbeschleunigung) der zum Ausfall führenden Paarungen in einem engen Streubereich liegen, klar unterscheidbar vom Verlauf der Paarung des Versuches KZ MWM 28.

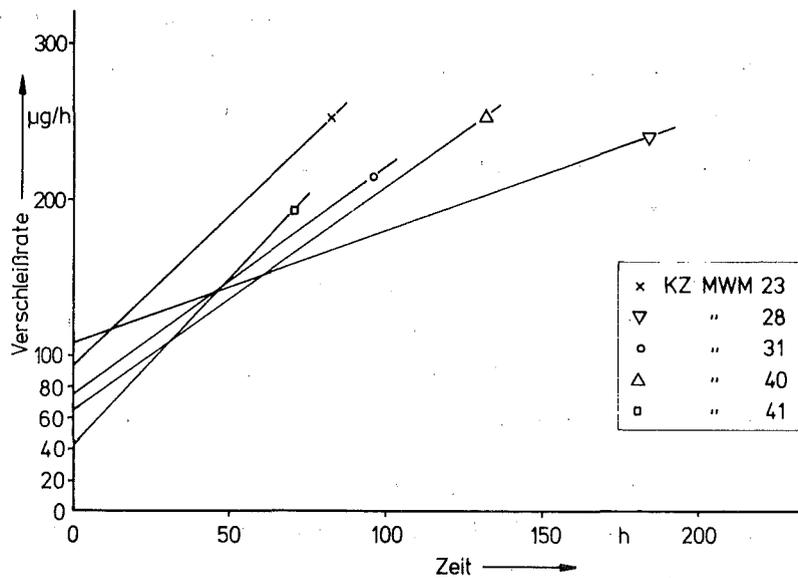


Fig.31: Ringflankenverschleißratenverläufe bei Paarungen mit um 200 μm erweiterter 1.Kolbennut bzw. verringerter Ringhöhe des 1.Kompressionsringes für den Nennleistungsbetriebspunkt 2800/Vollast am Motor D

6.4 Vergleichende Betrachtung

Verschleißratenverläufe

Die Langzeit- und Kurzzeitversuche haben vorher unbekannte Erkenntnisse hinsichtlich des Verschleißverhaltens der drei untersuchten Motorbauteile gebracht. Unbekannt war vorher die gleichartige Verschleißratencharakteristik für die Ringlauf- fläche und die Büchse (OT) während des Einlaufes mit dem sich daran anschließenden konstanten Verschleißratenverlauf bis zum Ausfall des Kolbenringes.

Für den ganzen Laufzeitbereich wurde das für beide Kom- ponenten am Motor D nachgewiesen; am Motor F (Motor E ist sehr ähnlich, siehe Tafel 1 und 2, Seite 62 und 64) nur für die Büch- se (OT), wobei der Versuch nicht bis zum Ausfall des Ringes be- trieben, sondern nach Ablauf des Firmenprogramms normal beendet worden war. Für den Bereich bis zum Beginn des Normallaufes konnte diese Charakteristik für beide Komponenten noch am Motor A und E beobachtet werden, nur für die Büchse (OT) am Motor B (Ring nicht mitgemessen) und nur für die Ringlauf- fläche am Motor C (Büchse (OT) nicht mitgemessen).

Das konstante Verschleißrateniveau wird für den im Grob- einlauf geltenden Schlüsselbetriebspunkt /58/ am schnellsten er- reicht, auch wenn der Betrag der Verschleißrate anderer Punkte höher ist als der für den schärfsten Betriebspunkt, wie dies am Motor D der Fall ist.

Der Verschleißratenverlauf des Motors D über der Dreh- zahl bei Vollast ändert mit wachsender Laufzeit für die Ringlauf- fläche und die Ringflanke seine Charakteristik. Dies wurde bei den Langzeitversuchen an diesem Motor beobachtet.

In Fig.32 ist dieser Zusammenhang zu sehen. Zu Beginn der Laufzeit hat die Ringlauf- fläche für die niedrigsten Drehzah- len die höchsten Verschleißraten. Mit wachsender Lebensdauer zeigt sich für die mittleren Drehzahlen ein Maximum, mit der Tendenz zu etwas höheren Drehzahlen mit wachsender Laufzeit. Bei den Ring- flanken kehrt sich die anfangs gezeigte Verschleißratencharak- teristik mit wachsender Laufzeit um. Gleichbleibende Charak-

teristik über der gesamten Lebensdauer wurde für die Büchsenverschleißrate (OT) für den Motor D sowie den Motor F gefunden, wenn auch die Charakteristik für die Motore verschieden ist.

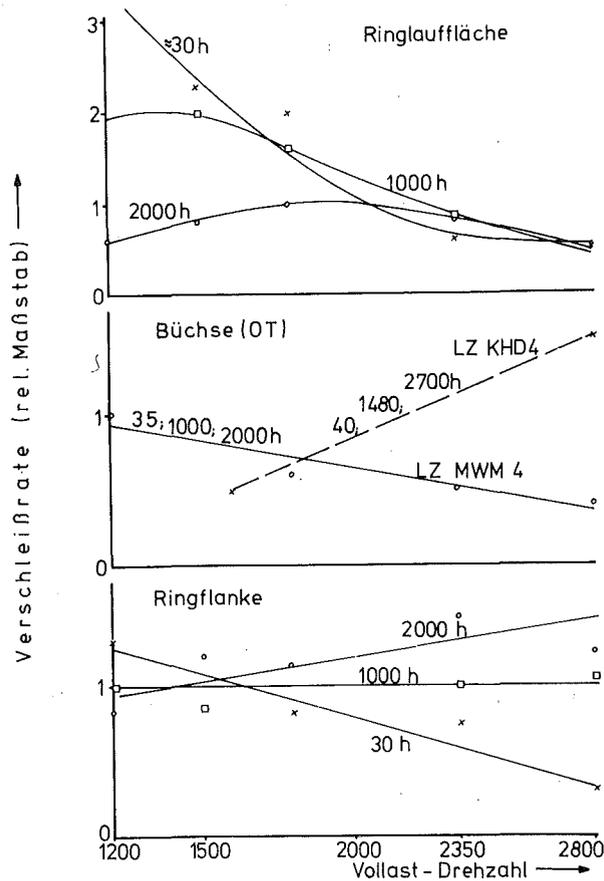


Fig.32: Verschleißratenverlauf der Ringlaufläche und Ringflanke an Motor D und der Büchse (OT) an Motor D und F in Abhängigkeit der Motordrehzahl bei Vollast zu verschiedenen Motorlaufzeiten

Besonders bemerkenswertes Ergebnis am Motor D ist der Ringflankenverschleißratenverlauf. Da der Verschleißratenverlauf in seiner Charakteristik bei allen 3 Langzeitversuchen gemessen worden ist, wird angenommen, ohne es bereits beweisen zu können, daß es sich um einen charakteristischen Verschleißratenverlauf handelt. Ein Hinweis, daß die zu Beginn der Laufzeit gemessenen Ringflankenverschleißraten deutlich unter denen über die gesamte Lebenszeit gemittelten liegen und damit genau umgekehrtes Verhal-

ten zeigen wie die Ringlaufflächen- und Büchsenverschleißraten (OT), ist auch aus Tab.4, Seite 93 zu entnehmen /62/. Hier wurde der bei drei verschiedenen Dauerläufen gewonnene Langzeitverschleiß am Motor E mit dem nach kurzer Zeit am gleichen Motortyp gemessenen und auf die Laufzeit der jeweiligen Langzeitversuche linear extrapolierten Verschleiß verglichen. Es zeigt sich, daß aufgrund der mit der Laufzeit multiplizierten Kurzzeitverschleißrate der Ringflanke ein im Mittel um den Faktor 4,23 zu niedriger Gesamtabrieb vorausgesagt werden würde. Die Verschleißrate über der Laufzeit muß also auch beim Motor E noch stark zunehmen.

Das gleiche gilt für die auch in Tab.4 angeführte Kolbennutflanke, jedoch nicht in dem gleichen Ausmaß. Hier würde aufgrund der Kurzzeitverschleißrate im Mittel ein um den Faktor 1,77 zu niedriger Gesamtabrieb vorausgesagt werden. Wird die unterschiedliche Dichte des Kolben- und Ringmaterials berücksichtigt, so ist das Ergebnis ein um das 1,7-fache höherer Beitrag der Kolbennuterweiterung zum Gesamtspiel des Ringes in der Nut gegenüber der geometrischen Veränderung der Ringhöhe aufgrund Ringflankenverschleiß (der Erfahrungswert der Kolbenhersteller für Einmetallkolben liegt bei 2:1). Bei den LZ MWM Versuchen wurde dieser Faktor an 3 Paarungen ermittelt und beträgt im Mittel 1,97.

Der Vergleich der Faktoren, die den Zusammenhang zwischen Kurzzeitverschleißrate und mittlerer Verschleißrate über der gesamten Lebensdauer für die Ringflanke wiedergeben, zeigt für die Versuche LZ MWM 4 und 10, wo sie ermittelt werden konnten, mit 3,48 und 3,0 Werte, die auch am Motor E beobachtet worden sind. Aufgrund dieser Ergebnisse läßt sich eine Laufzeitabschätzung vornehmen, die in Verbindung mit der Grenzspielerweiterung die Lebensdauer des Bauteiles voraussagbar macht. Eine dazu beispielhafte Rechnung siehe im Zusammenhang mit der statistischen Auswertung der Versuche mit verändertem Kolbenringspiel Kap. 7.4.2..

Motor ¹⁾	Nutflankenverschleiß (Einmetallkolben, Rechtecknut) :	Kurzzeitverschleißrate ²⁾ X Laufzeit	Ringflankenverschleiß (Rechteckring) :	Kurzzeitverschleißrate ³⁾ X Laufzeit	Ringlaufflächenverschleiß ⁴⁾ :	Kurzzeitverschleißrate ⁵⁾ X Laufzeit
1 (2778 h)	1,7	: 1	3,1	: 1	0,63	: 1
2 (2816 h)	2,3	: 1	4,9	: 1	nicht auswertbar	
3 (3048 h)	1,4	: 1	3,5	: 1	0,63	: 1

1) Motor E als 8-Zylinder. Meßwerte gemittelt über 8 Zylinder. Ausreißer nicht berücksichtigt (Fresser, Brandspuren). Fahrprogramm: Langzeitprogramm der Herstellerfirma

2) Kurzzeitverschleißraten am Motor E. Einmetallkolben-Rechtecknut, mittl. Verschleißrate nach 25 h 172 µg/h

3) Rechteckring. Mittlere Verschleißrate nach 25 h 115 µg/h

4) Aus Stoßspielerweiterung Abtrag berechnet.

5) Rechteckring in Ringträgerkolben. Mittlere Verschleißrate nach 15 h 90 µg/h

Tab.4: Verhältnis des konventionell gemessenen Langzeitverschleißes zum Produkt aus Laufzeit und mit Hilfe der RNT gemessener Kurzzeitverschleißrate /62/.

Kurvenbereiche des Ringflankenverschleißratenverlaufes

Bei Betrachtung der Ringflankenverschleißratenverläufe (Fig.17, Seite 68, Fig.18, Seite 69 und Fig.20, Seite 71) fällt auf, daß sie sich gut in vier Kurvenbereiche aufteilen lassen, was in Fig.33 schematisch dargestellt ist.

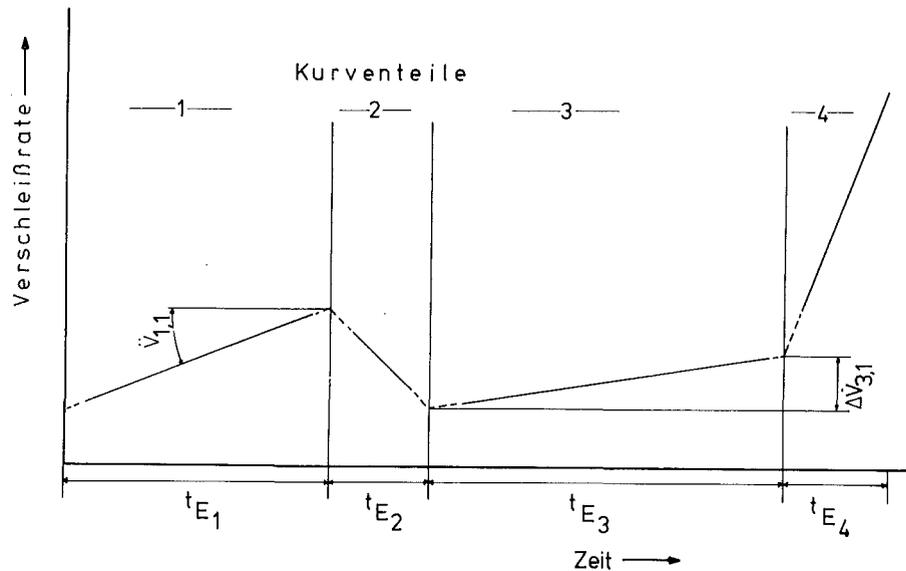


Fig.33: Schematische Darstellung des Ringflankenverschleißratenverlaufes

An einen Bereich konstanten Verschleißratenzuwachses (Verschleißbeschleunigung) schließt sich ein Bereich abnehmender Verschleißrate an, der wieder in einen Bereich zunehmender Verschleißrate übergeht, bis sich im 4. Bereich der Ausfall des Bauteiles ankündigt.

Eine Überprüfung der Kurventeile 3 und 4 bei drei und Kurventeil 1 bei zwei Langzeitversuchen auf Linearität, d.h. auf die Hypothese, daß die Verschleißrate mit der Versuchszeit innerhalb eines Kurventeiles linear zunimmt, führte mit Hilfe des F-Testes zu dem Ergebnis, daß die Hypothese selbst auf dem strengen Testniveau von $\alpha = 5\%$ nicht abgelehnt werden konnte (dies gilt nicht für die in Fig.33 gestrichelt gezeichneten Übergangsbereiche).

Ermittelt man die Änderung der Verschleißrate über der Versuchszeit in den einzelnen Kurvenbereichen und den Verschleißratenzuwachs zwischen Beginn und Ende des Kurventeiles, so deuten die drei Langzeitversuche und die Spielerweiterungsversuche, bei denen die Verschleißbeschleunigung des 4. Kurventeiles bestimmbar war, auf Gesetzmäßigkeiten hin, die in Tab.5 dargestellt sind.

Trotz unterschiedlicher Verschleißbeschleunigungswerte in den Kurventeilen 1 und 3 stellt sich mit einer Ausnahme nahezu der gleiche Verschleißratenzuwachs ein. Das heißt, daß ein Kurventeil so weit reicht, bis ein bestimmter Verschleißratenzuwachs erreicht ist. Dies kann je nach sich einstellender Verschleißbeschleunigung sehr verschiedene Laufzeiten bedeuten. Im Kurventeil 2 sind die Zahlenwerte der Verschleißratenzunahmen vergleichbar mit denen der Teile 1 und 3, hier allerdings mit negativem Vorzeichen. Die Motorlaufzeit, die der Länge eines Kurventeiles entspricht, wird Einwirkzeit t_E genannt.

Der Kurventeil 4 kündigt den Ausfall des Ringes an. Es stellt sich eine Verschleißbeschleunigung ein, die bei den Langzeit- und den Spielerweiterungsversuchen nach unterschiedlich langen Zeiten zum Ausfall des Ringes durch Bruch führt. Wurde der Motor bei den Spielversuchen nach dem plötzlichen, sprunghaften Ansteigen der kontinuierlich mitgeschriebenen Durchbläsegasmenge dank einer Sicherheitseinrichtung sofort automatisch abgeschaltet, so war der Ring in allen Fällen 1 mal gebrochen. Erfolgte die Abschaltung des Motors erst nach einigen Stunden, so zerlegte sich der Ring in mehrere Bruchstücke, deren Zahl in etwa der bei den ausgefallenen Ringen der Langzeitversuche gefundenen entsprach. Aufgrund der Erfahrungen mit den Spielerweiterungsversuchen ist zu vermuten, daß bei den Langzeitversuchen während des 4. Kurventeiles die Ringe noch intakt waren. Eine Oberflächenbegutachtung neuer und gelaufener Ringe von normalen Teilen und solchen mit künstlich aufgebrachtem Spiel sollte die Frage beantworten helfen, ob sich die Oberflächenstruktur der bearbeiteten und nichtbearbeiteten Ringe unterscheidet. Die gleiche Frage stellte sich bei den gebrochenen Ringen der Langzeitversuche und denen mit künstlich aufgebrachtem Spiel.

Versuch	Änderung der Verschleißrate über der Versuchszeit pro Kurventeil ($\frac{\mu\text{g/h}}{100\text{h}}$)				+ Gesamtverschleißratenzuwachs pro Kurventeil ($\mu\text{g/h}$)			
	1.Kurventeil	2.Teil	3.Teil	4.Teil	1.Kurventeil	2.Teil	3.Teil	4.Teil
LZ MWM 2	-	-17	3,1	210	-	-	141	1113
LZ MWM 4	17	-35	6,4	207	145	-124	63	793
LZ MWM 10	11	-28	20	218	154	-126	150	508
KZ MWM 23				190	gebr. nach 83 h; Nut + 200 μm			
KZ MWM 31				146	gebr. nach 96 h; Nut + 200 μm			
KZ MWM 40				144	gebr. nach 139h; Ring - 200 μm			
KZ MWM 41				215	gebr. nach 71 h; Nut + 200 μm			

⁺Der Gesamtverschleißratenzuwachs ist die Änderung der Verschleißrate in einem Kurventeil x der Länge (Zeit) des Kurvenbereiches (Einwirkzeit).

Tab.5: Ringflankenverschleißraten- und Verschleißbeschleunigungsverhalten ausgefallener Bauteile pro Kurventeil

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Ringflanken

Erklärungen dafür, warum es zum Bruch der 1. Kompressionsringe gekommen ist, finden sich zumindest in Form von Hypothesen in der Literatur. In Lit.68 werden eine Reihe von Ringbruchhypothesen zusammengestellt und auch in Zusammenhang mit dem Aussehen der Bruchstücke gebracht. Für Ottomotore gilt als sicher, daß einmalige Ringbrüche, die $\approx 180^\circ$ vom Stoß auftreten, also im Ringrücken liegen, ihre Ursache in der Wechselwirkung zwischen Beschleunigungs- und Gaskräften haben, also durch das Hin- und Herschlagen der Ringe zwischen den Kolbennutflanken infolge erhöhten Axialspiels der Ringe hervorgerufen werden. Da beim Dieselmotor der Anteil der Brüche mit vielen kurzen Bruchstücken wesentlich größer ist als beim Ottomotor, nimmt man an, daß hier andere Bruchursachen wirksam sind.

Die Form der Bruchstücke am Motor D scheint aber dafür zu sprechen, daß die Ursache zumindest an diesem Motor doch primär das Hin- und Herschlagen der Ringe ist. Der Unterschied zum Ottomotor liegt darin, daß der Ring sich sehr schnell innerhalb weniger Stunden weiter zerlegt, wenn der Motor nicht unmittelbar nach dem 1. Ringbruch abgestellt wird.

Schwingungsbrüche treten nach Lit.68 und aufgrund theoretischer Überlegungen über die Lage und den Abstand von Schwingungsknoten /69/ zuerst an den Ringenden auf. Eine solche Bruchform ist am Motor D nicht beobachtet worden.

Rasterelektronenmikroskopische (REM) Aufnahmen der Ringflanken der Ringe aus den Langzeitversuchen LZ MWM 2 und 4 zeigten eine nur bei diesen Ringen beobachtete Oberflächenstruktur, die eine Erklärung für die hohe Verschleißbeschleunigung vor dem Ringausfall bot.

Fig.34 und 35 zeigen flächenartige Abträge von bis zu 0,5 mm Durchmesser und Tiefen bis etwa $10 \mu\text{m}$. Diese Abträge scheinen durch Materialermüdung (und damit verbundenem Ausbröckeln des Materials) an der Oberfläche hervorgerufen worden zu sein. Wenn dieses Abtragsverhalten die Ursache für \ddot{V} des 4. Kurventeiles ist, müßten auch die Ringe der Spielerweiterungsversuche, bei denen

die gleiche Verschleißbeschleunigung wie bei den Langzeitversuchen aufgetreten ist und ebenfalls zum Bruch führte, dieselbe Oberflächenstruktur zeigen.

Bei keinem der Ringe war das jedoch der Fall – es wurde die gesamte Oberfläche betrachtet – auch nicht beim Ring des Versuches LZ MWM 10, der aus IKA-Material bestand. Die Ringe der Spielerweiterungsversuche zeigten das gleiche Oberflächenaussehen wie die Ringe der normalen Kurzzeitversuche mit vergleichbaren Laufzeiten. Dazu drei Beispiele, die Fig.36 bis 38.

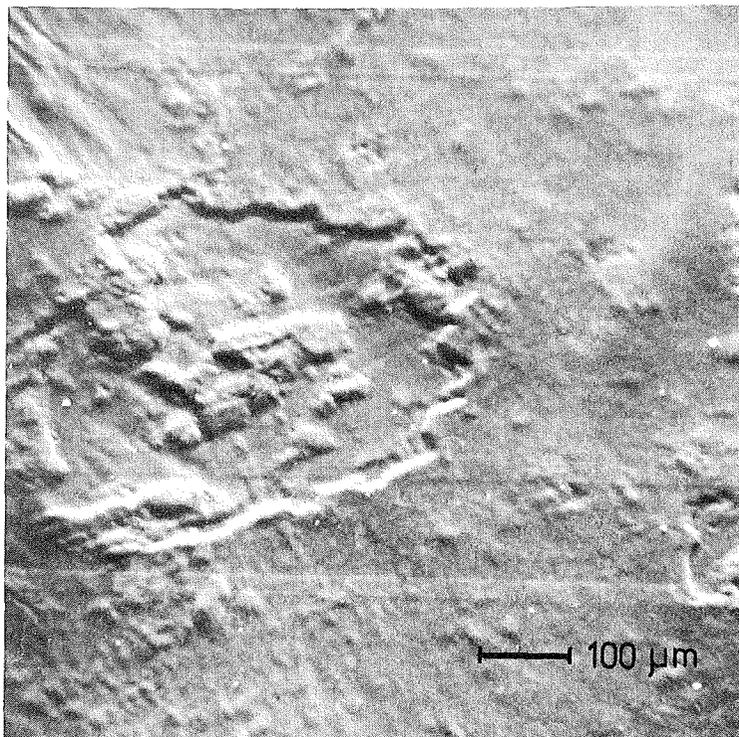


Fig.34: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Ringflanke eines 6414 h betriebenen 1. Kompressionsringes aus dem Versuch LZ MWM 2; Vergrößerungsverhältnis 120:1.

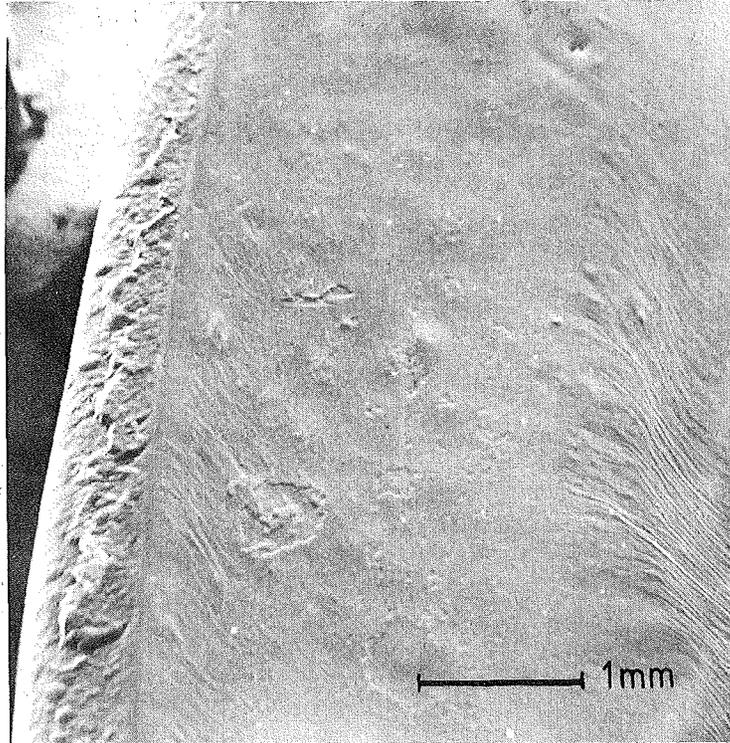


Fig.35: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Ringflanke eines 6414 h gelaufenen 1. Kompressionsringes aus dem Versuch LZ MWM 2; Vergrößerungsverhältnis 22:1.

Fig.36 zeigt die Oberfläche eines neuen Ringes, dessen Ringhöhe um $200\ \mu\text{m}$ verringert wurde. Sie ist repräsentativ für alle Neuteile, auch die Normalmaßeile. Deutlich zu sehen sind die Bearbeitungsriefen in einer Breite bis zu maximal $10\ \mu\text{m}$ und Eindrücke bzw. Löcher sehr unterschiedlichen Durchmessers bis zu etwa $20\ \mu\text{m}$.

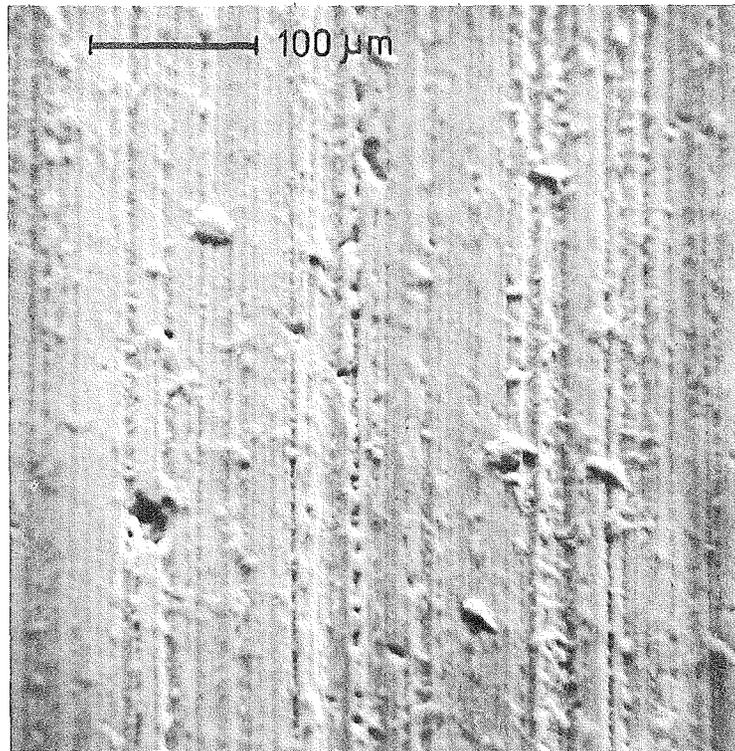


Fig.36: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Ringflanke eines neuen 1. Kompressionsringes für den Versuch KZ MWM 36; Vergrößerungsverhältnis 220:1

Fig.37 zeigt die Aufnahme eines 70 h betriebenen Normalringes. Neben den Resten der Bearbeitungsriefen treten jetzt deutlich die schon im Neuzustand zu sehenden Eindrücke zutage. Die Bearbeitungsriefen verschwinden nach unterschiedlichen Laufzeiten, die zwischen 100 und 150 h liegen können. Fig.38 zeigt die Aufnahme eines 96 h gelaufenen Ringes in einer Nut mit um 200 µm erweitertem Nutspiel. Die Eindrücke sind in ähnlicher Zahl, Art und Größe auch noch bei Aufnahmen der Bauteile der Langzeitversuche zu sehen.

Die Oberflächenuntersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop haben gezeigt, daß es unwahrscheinlich ist, die Gleichartigkeiten zwischen Langzeitversuchen und Spielversuchen mit Hilfe von Vorgängen erklären zu können, die die Oberflächenstruktur der Ringflanken beeinflussen.

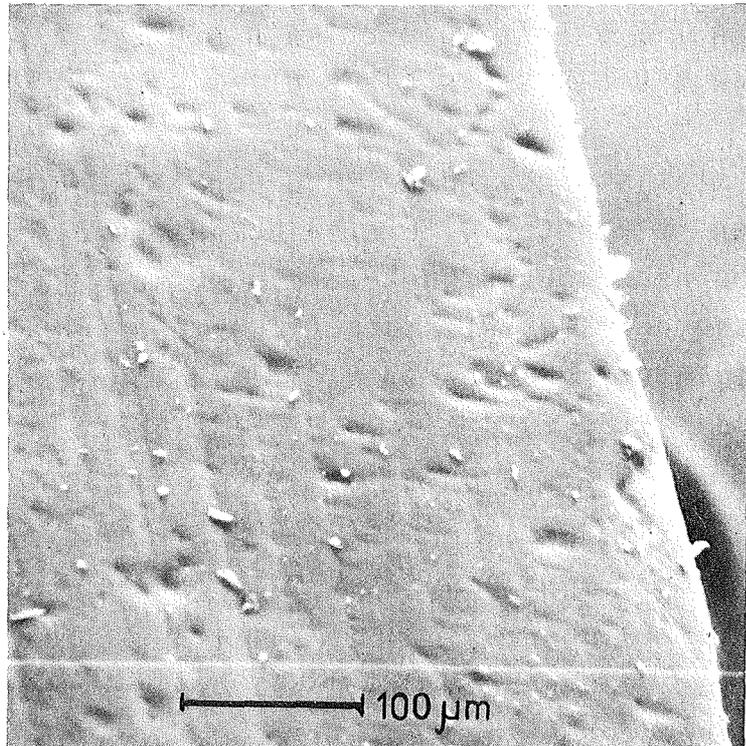


Fig.37: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Ringflanke eines 69 h betriebenen 1.Kompressionsringes aus dem Versuch KZ MWM 30; Vergrößerungsverhältnis 240:1

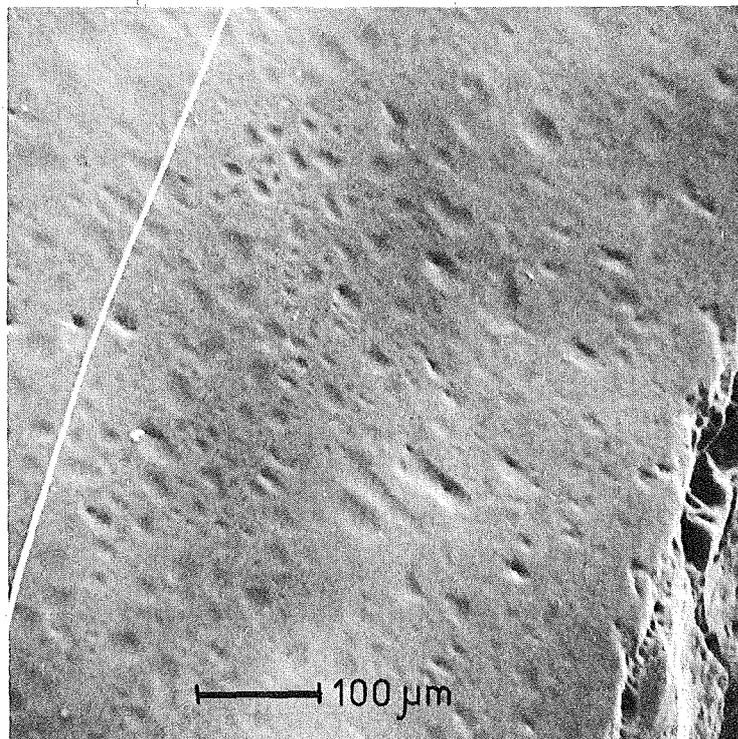


Fig.38: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Ringflanke eines 96 h betriebenen 1.Kompressionsringes aus dem Versuch KZ MWM 23; Vergrößerungsverhältnis 160:1

7. STATISTISCHE AUSWERTUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE

Die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse basiert auf den in Kapitel 4 erarbeiteten Grundlagen, so daß diese nicht mehr näher ausgeführt werden müssen. Es werden nur noch die Ergebnisse der statistischen Auswertung und die zur Nachvollziehung nötigen Zwischenschritte dargestellt. Grundlage der Auswertung ist das Strukturdiagramm Fig.13, Seite 27.

7.1 Auswertung der Verschleißraten aus Bereichen sich über der Motorlaufzeit ändernder Verschleißraten

In Kap.2.3 wurde die Möglichkeit erwähnt, daß es Motorlaufintervalle geben könnte, in denen die Verschleißraten bestimmter Motorbauteile konstant sind. Da dies bei den Versuchen am Motor D, mit dem die Grundgesamtheiten erstellt worden sind, tatsächlich beobachtet wurde, wird dieser Tatsache bei der Auswertung von Anfang an Rechnung getragen und die Daten werden in zwei Grundgesamtheiten aufgeteilt, um für jede die jeweils günstigste statistische Auswertemethode anwenden zu können.

7.1.1 Kolbenringlauffläche und Büchsenlauffläche (OT)

Die Versuche haben gezeigt, daß der Verschleißratenverlauf der Bauteile Ringlauffläche und Büchsenlauffläche (OT) sehr ähnlich aussieht, so daß es gerechtfertigt erscheint, die Auswertung für beide Bauteile parallel zu betrachten.

Normierung der Daten

Während der Versuchsauswertungen zeigte es sich als notwendig, eine geeignete Normierung für die Verschleißratendaten zu finden, denn vergleichbaren Verschleißratenverläufen lagen nicht immer gleich hohe Verschleißniveaus zugrunde. Eine wichtige Erklärung dafür liefert die Aktivierung der Bauteile, da der gemessene Verschleiß z.B. bei den Büchsen nie von einer aktivierten Fläche gleicher Größe herrührt, da aus aktivierungstechnischen

Gründen nicht immer gleich große Flächen im Bereich des oberen Totpunktes des 1. Kompressionsringes aktiviert werden konnten. Für die Durchführung eines Einzelversuches ist das auch unwichtig. Gewicht erhält diese Tatsache beim Vergleich von Versuchen. Eine Möglichkeit der Normierung wäre, den Verschleiß auf die aktivierte Fläche zu beziehen. Bei den Ringlaufflächen-Verschleißmessungen würde aber in einem solchen Fall der Unterschied im Verschleißniveau, basierend z.B. auf kleinen Unterschieden in der Balligkeit des Ringes, nicht erfaßt werden. Wegen dieser und anderer systematischer Fehler von geringerer Bedeutung wurde eine Normierung gewählt, die alle gemessenen Verschleißraten auf die Verschleißrate des Normallaufs bezieht. Damit ergibt sich die dimensionslose, normierte Verschleißrate Φ zu:

$$\Phi(t) = \frac{\dot{V}(t)}{\dot{V}_N} \quad (54)$$

$\dot{V}(t)$ = gemessene Verschleißrate

\dot{V}_N = Verschleißrate des Normallaufes des jeweiligen Versuchs

Um Kurzzeit- und Langzeitversuche zusammenfassend in ein Schaubild zeichnen zu können, wird eine logarithmische Zeitskala eingeführt:

$$\mathcal{T} = \log t$$

Grundgesamtheit I

Bei allen Ringlaufflächen- und Büchsenverschleißraten-Auswertungen wurden die Daten der Betriebspunkte 2800/Vollast und 2350/Vollast zu einer Grundgesamtheit zusammengefaßt. Der Grund war die Erweiterung des Datenkollektivs, um besonders für den Normallaufbereich (der Versuch LZ MWM 2 konnte aus firmeninternen Gründen nicht mit 2800/Vollast betrieben werden) nicht nur ein Datenkollektiv für den Nennleistungspunkt zu haben, sowie einen breiteren Leistungsbereich zu erfassen. Es ist üblich, Motore durch unterschiedliche Einstellungen der Einspritzpumpen und

Leistungen mit unterschiedlichen Nenndrehzahlen auszuliefern. So sind an den Motoren E und F 2800 min^{-1} und 2650 min^{-1} als Nenndrehzahl gebräuchlich oder am Motor A 4500 min^{-1} und beim vergleichbaren Motor B 4350 min^{-1} bei Vollast. Würde man alle folgenden Rechnungen für den Motor D jedoch nur mit den Daten 2800 bzw. 2350/Vollast durchführen, so änderte sich gegenüber der Auswertung als gemeinsames Kollektiv hinsichtlich der Datenbehandlung nichts.

Umfang der Grundgesamtheiten

Ringlauffläche 170 Verschleißratendaten
 Büchse 83 Verschleißratendaten

Sie stammen aus den Versuchen in Tabelle 6, die auch die mittleren Normallaufverschleißraten der Einzelversuche enthält, die der Normierung der Verschleißratendaten zugrunde lagen.

	2350/Vollast	$\dot{V}_N (\mu\text{g/h})$	2800/Vollast	$\dot{V}_N (\mu\text{g/h})$
Ringlauffläche:	LZ MWM 2	14,0	LZ MWM 4	9
	LZ MWM 4	20	LZ MWM 10	16
	LZ MWM 10	20	KZ MWM 5	17
	KZ MWM 3	60	KZ MWM 6	8
	KZ MWM 5	20,5	KZ MWM 18	25
	KZ MWM 6	20		
	KZ MWM 18	20	KZ MWM 30	50
	KZ MWM 30	50		
Büchse (OT):	LZ MWM 2	34,0	LZ MWM 4	12,5
	LZ MWM 4	15,0	KZ MWM 5	23,5
	KZ MWM 3	70,5		
	KZ MWM 5	43	KZ MWM 6	23,5
	KZ MWM 6	27,5		

Tab.6: Normallaufbereich-Verschleißraten

Hypothese über den funktionalen Zusammenhang zwischen Verschleißrate und Motorlaufzeit

Klasseneinteilung:

Ringlauffläche	24 Klassen à 7 Werte
Büchse (OT)	13 Klassen à 6 Werte
	1 Klasse à 5 Werte

Zentralbahn:

Durch die Klassenschwerpunkte galt es eine Kurve zu legen, die eine Realisation der beobachteten Daten ist. Es wurden eine Vielzahl von Funktionen ausprobiert. Ein Optimum an Realisation und Einfachheit hinsichtlich der Zahl der freien Parameter bietet die Funktion:

$$\Phi(\mathcal{T}) = \frac{A}{(\log t)^n} \quad (56)$$

bzw. für Kurven bestimmter Wahrscheinlichkeit i:

$$\Phi(\mathcal{T}, i) = \frac{A_k}{(\log t)^n} = \frac{A_k}{\mathcal{T}^n} \quad (57)$$

Zentralbahn der Ringlauffläche:	Zentralbahn der Büchse (OT):
$\Phi(\mathcal{T}) = 6,64 \cdot \mathcal{T}^{-1,92}$	$\Phi(\mathcal{T}) = 4,43 \cdot \mathcal{T}^{-1,52}$

Überprüfung der Hypothese

Die Überprüfung der Hypothese über den funktionalen Zusammenhang zwischen Verschleißrate und Motorlaufzeit wird analog dem Auswertediagramm Fig.14, Seite 29 vorgenommen.

Zur Ermittlung der Regressionskoeffizienten der Grundgesamtheit ist es von Vorteil, die Strukturfunktionen zu linearisieren, um zu einer linearen Regressionsanalyse zu kommen, die einfacher auszuführen ist wie eine nichtlineare Regressionsanalyse und bei der einfach nachprüfbar ist, ob die angenommene

Linearität vorliegt.

a) Linearisierung

Zentralbahn:

$$\Phi(t) = \frac{A_k}{(\log t)^n} = \frac{A_k}{T^n} \quad (57)$$

$$\log \Phi(t) = \log A_k - n \log T \quad (58)$$

mit:

$$\eta = \log \Phi, \quad \psi = \log T, \quad b = -n, \quad a = \log A_k$$

ergibt sich

$$\eta = b \psi + a \quad (59)$$

b) Regressionskoeffizient des Kollektivs

Ringlauffläche:

$$\eta = - 1,74 \psi + 0,66$$

Büchse (OT):

$$\eta = - 1,28 \psi + 0,46$$

c) Prüfung auf Linearität

Es wird die Hypothese aufgestellt, daß lineare Regression vorliegt, und mit der Prüfgröße F überprüft.

Das Ziel des Tests ist die Annahme der Linearitätshypothese. Die Linearitätshypothese wird angenommen, wenn der errechnete F-Wert die Signifikanzschränke der theoretischen F-Verteilung unterschreitet. Es wird auf dem 5%-Niveau getestet (schärfere

Bedingung als 1%-Niveau).

Prüfgröße: $F(v_1, v_2, 0,05)$

$$v_1 = k - 2$$

$$v_2 = N - k$$

$$v_{1,2} = \text{Freiheitsgrade}$$

Ringlauffläche:

Der Regressionsbereich erstreckt sich bis $\mathcal{T} = 2,04$.

$$v_1 = 8 - 2 = 6$$

$$v_2 = 80 - 8 = 72$$

$$F_{\text{berechnet}} = 0,34 < F(6;72;0,05) = 2,23$$

Büchse:

Der Regressionsbereich erstreckt sich bis $\mathcal{T} = 2,08$.

$$v_1 = 5 - 2 = 3$$

$$v_2 = 50 - 3 = 47$$

$$F_{\text{berechnet}} = 1,24 < F(3;47;0,05) = 2,81.$$

d) Prüfung des Regressionskoeffizienten auf Signifikanz

Der Regressionskoeffizient muß sich signifikant von 0 unterscheiden. Das Ziel des Tests ist die Ablehnung der Hypothese, daß der Regressionskoeffizient sich nicht von Null unterscheidet (Nullhypothese). Das ist dann der Fall, wenn der berechnete Wert die Signifikanzschranke der Prüfgröße t nicht überschreitet. Getestet wird auf dem 1%-Niveau (schärfere Bedingung als 5%-Niveau).

Prüfgröße: $t(v; 0,01)$

$$v = n - 2$$

Ringlauffläche: $t_{\text{berechnet}} = 67,47 > t(78; 0,01) = 2,38$

Büchse: $t_{\text{berechnet}} = 21,88 > t_{(48;0,01)} = 2,4$

Die Regressionsanalyse ergibt, daß lineare Regression vorliegt und sich die Regressionskoeffizienten signifikant von Null unterscheiden.

Die Linearisierung und deren statistische Absicherung bedeutet, daß Linearität besteht zwischen dem Logarithmus der Verschleißrate und dem doppelten Logarithmus der Zeit, bzw., die angenommene Strukturfunktion den Zusammenhang zwischen Verschleißrate und Laufzeit genügend genau wiedergibt. Ein ähnlicher Zusammenhang wurde unabhängig von dieser Arbeit auch bei einer Kolbenringfirma mit Werkstoffproben an einer Verschleißtestmaschine gefunden unter sehr verschiedenen Betriebsbedingungen gegenüber denen, wie sie im Vollmotor vorliegen. Es scheint sich hier eine Gesetzmäßigkeit anzudeuten, die es lohnt, näher zu untersuchen.

Zusammenhang zwischen Kurvenparameter und Wahrscheinlichkeit:

Der Zusammenhang zwischen Kurvenparameter und Wahrscheinlichkeit kann in der auf S. 34 beschriebenen Weise hergestellt werden. Dazu muß zunächst durch die Variation des Kurvenparameters A_k eine Kurvenschar ins Rohdiagramm gelegt werden. Die Auswertung der so entstandenen Schichtverteilung zur Häufigkeitstabelle liefert über die statistische Auswertung nach Weibull den Zusammenhang zwischen Kurvenparameter und Wahrscheinlichkeit.

A_k	0,5	1	2	3	6	8	12	15	18	20
Δn	3	3	16	13	38	48	29	7	1	5
$n = \sum \Delta n$	3	6	22	35	73	121	150	157	158	163
$i = \frac{n}{n_{\text{ges}}}$	0,02	0,04	0,13	0,21	0,49	0,71	0,88	0,92	0,93	0,96

Tab.7: Häufigkeitstabelle Ringlauffläche

Es wurden 163 Werte verarbeitet. Die fehlenden 7 Werte streuten stark zu sehr hohen A_k -Werten. Der Zusammenhang zwischen Kurvenparameter und Wahrscheinlichkeit ist deshalb ohne eine Erweiterung der Grundgesamtheit mit neuen Daten nur bis $i = 95\%$ bzw. $A_k = 16$ gültig. (In Lit.63 wird vorgeschlagen, die Steigung der Geraden im Weibullnetz zwischen $5\% \leq i \leq 95\%$ zu ermitteln.)

A_k	1	2	3	4	5	6	12
Δn	6	13	14	11	18	10	6
$n = \sum \Delta n$	6	19	33	44	62	72	78
$i = \frac{n}{n_{ges}}$	0,07	0,23	0,4	0,53	0,75	0,87	0,94

Tab.8: Häufigkeitstabelle Büchse (OT)

Es wurden 78 Werte verarbeitet. Das für die Ringlauf-
fläche erwähnte gilt für die Büchse analog bis $i = 87\%$ bzw.
 $A_k = 6$.

Auswertung im Weibull-Papier:

Aus den Fig.39 und 40 sind die für die Berechnung des Zusammenhanges zwischen Kurvenparameter und Wahrscheinlichkeit notwendigen Parameter ablesbar. Die Ermittlung der Parameter wird z.B. in /63/ beschrieben. Es ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen Wahrscheinlichkeit i und Kurvenparameter A_k :

Ringlauffläche:

$$i = 1 - \exp \left(- \left(\frac{A_k}{7,9} \right)^{1,45} \right)$$

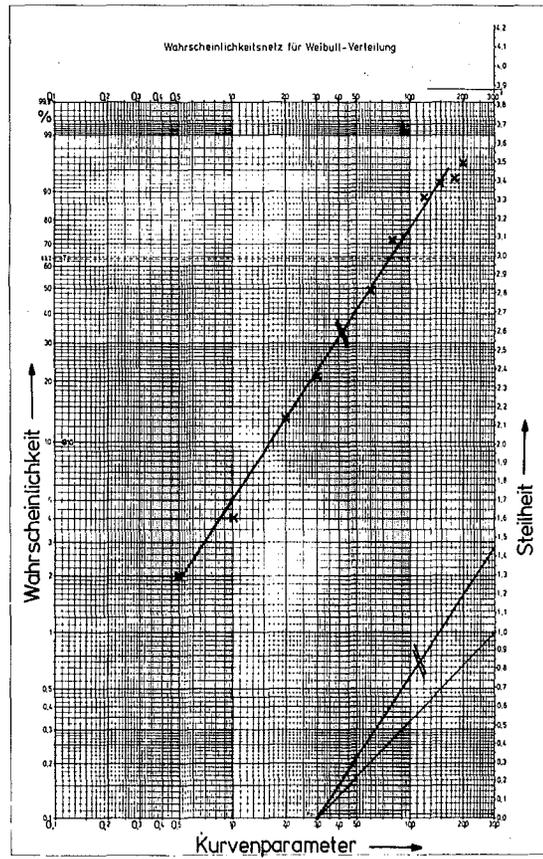


Fig.39: Wahrscheinlichkeitsauswertung der Ringlaufflächenverschleißraten im Weibull-Wahrscheinlichkeitsnetz

Büchse (OT):

$$i = 1 - \exp \left(- \left(\frac{A_k}{4,2} \right)^{1,85} \right)$$

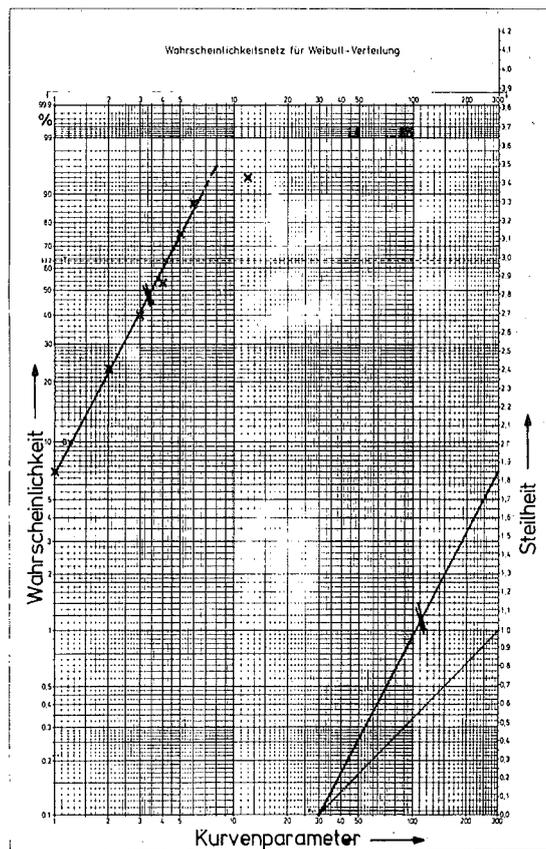


Fig.40: Wahrscheinlichkeitsauswertung der Büchsenverschleißraten (OT) im Weibull-Wahrscheinlichkeitsnetz

Wahrscheinlichkeitskennfeld:

Nachdem der Zusammenhang zwischen Wahrscheinlichkeit und Kurvenparameter gefunden ist, läßt sich mit Hilfe der Strukturfunktion ein Wahrscheinlichkeitskennfeld zeichnen für vorgegebene Wahrscheinlichkeiten und den dazugehörigen A_k .

Die Fig.41 und 42 geben die Wahrscheinlichkeitskennfelder für die normierten Ringlaufflächen- und Büchsenverschleißraten (OT) wieder. Sie ermöglichen folgende Ablesungen:

- a) Zu einer vorgegebenen Zeit lassen sich für den Motor D mit Hilfe der Kurven verschiedenen Parameters i an der Ordinate bestimmte normierte Verschleißraten ablesen. Aufgrund der Kenntnis einer mittleren Normallauf-Verschleißrate für die beiden Komponenten des Motors D läßt sich also sagen, daß zur Zeit t

$i\%$ aller Bauteile eine geringere Verschleißrate als die an der Ordinate abgelesene mal der mittleren Normallauf-Verschleißrate haben werden.

- b) Wenn der Ringlaufflächen- bzw. Büchsenverschleißratenverlauf an einem anderen Motortyp gemessen wird, so lassen sich die Parameter der Strukturfunktion berechnen. Mit Hilfe der A_k wird ein zugehöriges i errechnet und im Kennfeld für vorgegebene t eine normierte Verschleißrate an der Ordinate abgelesen. Diese wird mit der Normallaufverschleißrate des Testversuches multipliziert und gibt dann den Prozentsatz der Bauteile an, die diese Verschleißrate zur entsprechenden Zeit höchstens erreichen werden.

Der Einzelversuch ermöglicht also über die mathematisch statistische Auswertung eine prozentuale Angabe für alle gleichartigen Bauteile dieses Motortyps bezüglich Verschleißrateniveau und Laufzeit.

Da die Normallaufverschleißrate nur für diesen einen Testversuch ermittelt wurde und nicht wie beim Motor D die mittlere der Grundgesamtheit bekannt ist, kann mit einem Testversuch nur ein i gefunden werden !

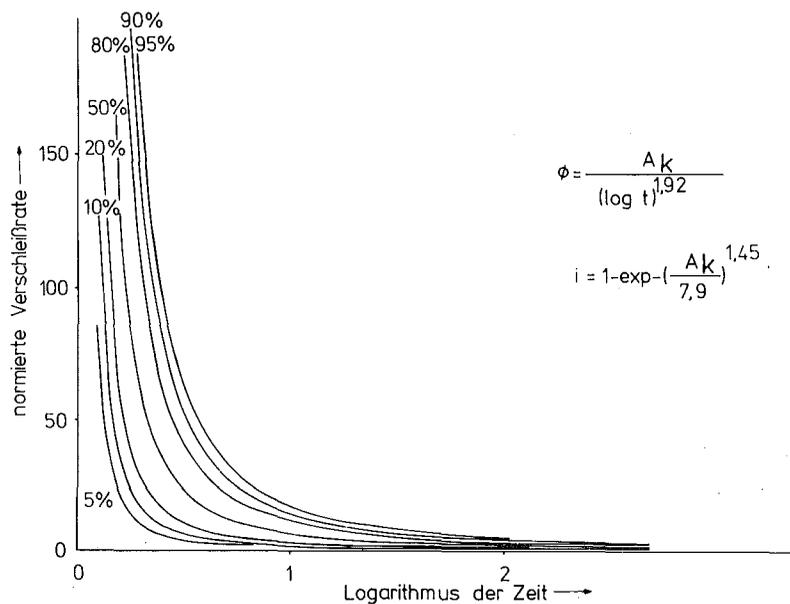


Fig.41: Wahrscheinlichkeitskennfeld der Ringlaufflächenverschleißraten

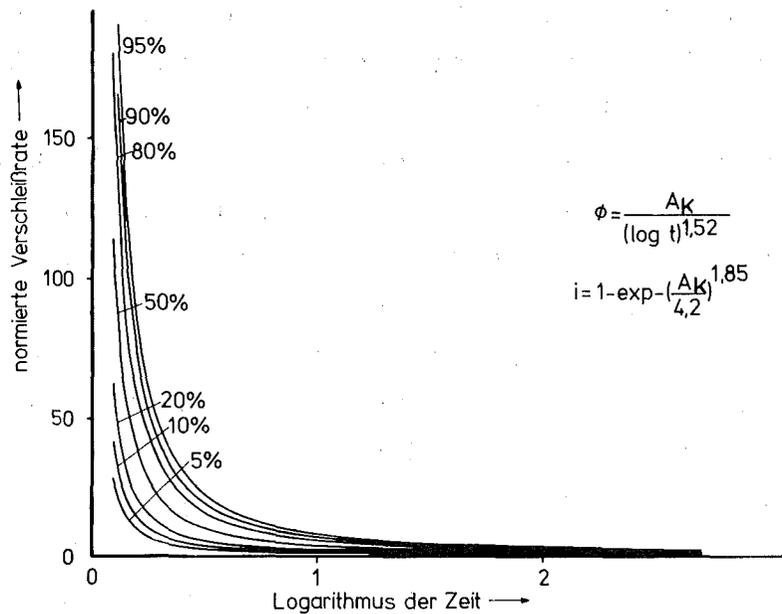


Fig.42: Wahrscheinlichkeitskennfeld der Büchsenverschleißraten (OT)

Voraussetzung für die beschriebenen Vorgänge ist die Prüfung der Zugehörigkeit der Daten des Testversuches zu der Grundgesamtheit der Daten, die mit dem Motor D ermittelt wurden. Der Ablauf dieser Prüfung ist Fig.15, Seite 45 zu entnehmen. Testversuchsergebnisse werden in Kap. 7.3 behandelt.

7.1.2 Kolbenringflanke

Eine statistische Auswertung der Versuchsergebnisse der Kolbenringflanken-Verschleißratendaten ist nur begrenzt möglich. Das vorhandene Datenkollektiv reicht nicht aus, um ein Wahrscheinlichkeitskennfeld vergleichbarer statistischer Sicherheit zu erstellen, wie bei den gleichnamigen Bauteilen Kolbenringlauffläche und Büchsenlauffläche (OT). Der Grund liegt in dem besonderen Verschleißratenverlauf den die Kolbenringflanke über der Motorlaufzeit zeigt. Die Überprüfung, ob es sich wirklich um einen charakteristischen Verschleißratenverlauf handelt, und die dann mögliche Ermittlung eines Wahrscheinlichkeitskennfeldes fordern weitere Langzeitversuche, deren Durchführung aus Zeit- und Kosten-

gründen nicht möglich war.

Die vorhandenen Versuche reichen aber aus, angeben zu können, wie die Verschleißratendaten der Ringflanken behandelt werden müssen, um aus den Daten der Einzelversuche eine gemeinsame Grundgesamtheit bilden zu können. Wegen der Form des Kurvenverlaufes wird davon abgesehen, einen geschlossenen analytischen Ausdruck zu finden. Es erscheint nicht möglich, einen Ausdruck für den Verschleißratenverlauf zu ermitteln, der nur wenige freie Parameter hat, sich möglichst linearisieren läßt, die vier Kurventeile ausreichend genau wiedergibt und es ermöglicht, trotz unterschiedlich langer gleicher Kurventeile zwischen verschiedenen Versuchen, eine Normierung zu finden, die dazu führt, ein Wahrscheinlichkeitskennfeld zu erhalten, dessen Kurven gleicher Wahrscheinlichkeit den Kurven der Einzelversuche ähneln. Stattdessen wird vorgeschlagen, von der Existenz der vier Kurventeile auszugehen und das Wahrscheinlichkeitskennfeld aus vier Teilen aufzubauen, die aneinandergereiht werden. Die Datenaufbereitung erfolgt für jeden Kurvenbereich in sich geschlossen, aber untereinander in gleicher prinzipieller Form. Der Ablaufplan der Auswertung unterscheidet sich nicht von dem der beschriebenen Bauteile und wie er im Strukturdiagramm Fig.13, Seite 27 dargestellt ist. Unterschiedlich ist nur die Normierung der Daten, die im folgenden beschrieben wird.

Normierung:

Um aus den ermittelten Versuchsergebnissen eine Grundgesamtheit bilden zu können, wird jeder einzelne Versuch wie auch bei der Normierung der bisher beschriebenen Bauteile mit den ihm eigenen, spezifischen Werten (Verschleißrate zu Kurvenbereichsbeginn, Achsenabschnitt, Einwirkzeit) normiert.

Fig.43 zeigt die einzelnen Normierungsschritte. Das obere Bild stellt ein Versuchsergebnis eines Einzelversuches dar am Beispiel des 1.Kurventeiles.

Für die Regressionsgerade gilt:

$$\dot{V}(t) = at + \dot{V}_{t_0} \quad (60)$$

Die Verschleißrate am Ende des Kurvenintervalles ist:

$$\dot{V}(t_E) = \Delta \dot{V}(t_E) + \dot{V}_{t_0} \quad (61)$$

mit:

a = Regressionskoeffizient (= Verschleißbeschleunigung)

\dot{V}_{t_0} = Achsenabschnitt zur Zeit $t = 0$

$\Delta \dot{V}$ = Verschleißratenzuwachs

t_E = Einwirkzeit

Die Normierung erfolgt in 2 Schritten:

a) Ordinate

Durch die Subtraktion des Achsenabschnittes werden unterschiedliche Anfangsverschleißraten zwischen den verschiedenen Einzelversuchen eliminiert

aus (60)

$$\dot{V}(t) - \dot{V}_{t_0} = at \quad (62)$$

b) Abszisse

Die Abszisse (Motorlaufzeit) wird mit der Einwirkzeit normiert. Es bedeutet:

$$\mathcal{T} = \frac{t}{t_E} \quad (63)$$

Für $t = t_E$ ist $\mathcal{T} = 1$, d.h., daß die entsprechenden Kurventeile der verschiedenen Einzelversuche gleich lang sind.

(62) geht über in:

$$\dot{V}(\mathcal{T}) = \bar{a} \mathcal{T} \quad (64)$$

Das mittlere Bild in Fig.43 zeigt die Daten nach den beiden

Normierungsschritten.

Werden alle Einzelversuche auf diese Weise normiert, so entsteht ein Datenkollektiv wie es im unteren Bild in Fig.43 wiedergegeben ist.

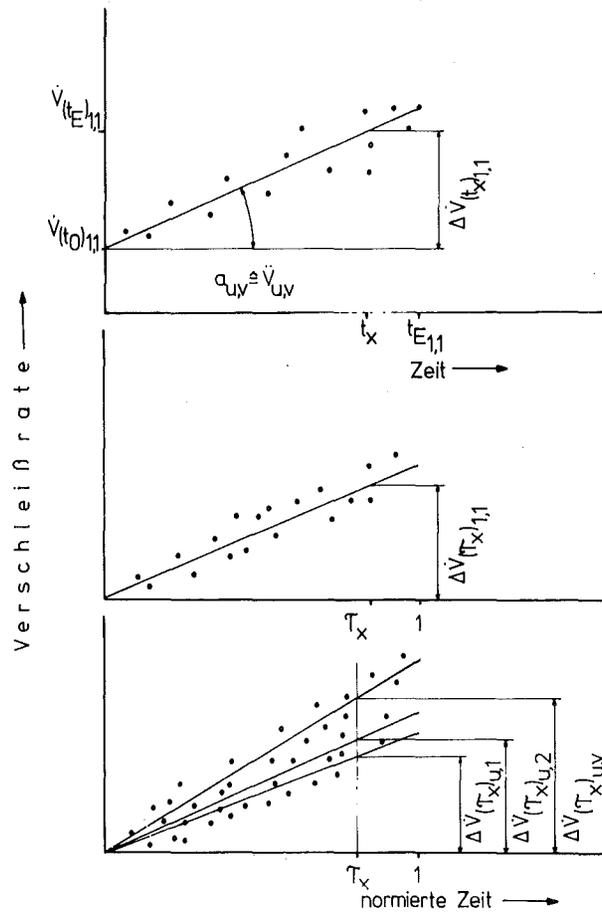


Fig.43: Schema der einzelnen Normierungsschritte für die Ringflankenverschleißraten-Auswertung (Index $u \hat{=}$ Kurventeil, $v \hat{=}$ Einzelversuchsbezeichnung)

Nach der Normierung werden die Auswertungen laut Strukturdiagramm Fig.13, Seite 27 durchgeführt. Zunächst wird überprüft, ob der lineare Zusammenhang zwischen Verschleißraten und der Motorlaufzeit für die Grundgesamtheit gilt. Danach muß der Zusammenhang zwischen Kurvenparametern und Wahrscheinlichkeit

hergestellt werden, was im vorliegenden Fall sehr einfach ist, da die Kurven gleicher Wahrscheinlichkeit die einfache Form

$$V(\mathcal{T}) = \bar{a}_i \cdot \mathcal{T} \quad (65)$$

haben. Die Auswertung erfolgt wie in Kap. 4.1 beschrieben.

7.2 Auswertung der Verschleißraten der Bauteile Kolbenringlauffläche und Büchsenlauffläche (OT) aus Bereichen sich nicht über der Motorlaufzeit ändernder Verschleißraten

Grundgesamtheit II:

Die Grundgesamtheit der Verschleißratendaten, die dem Normallaufbereich zugerechnet werden, umfaßt die Daten, die in dem Bereich liegen, in dem der Verschleißratenverlauf horizontal verläuft.

Die Prüfung der Ausgleichsgerade durch die Daten auf Linearität und Signifikanz erfolgte wie in Kap. 4.1 für die Daten sich über der Zeit ändernder Verschleißraten nach der Linearisierung. Der Unterschied im vorliegenden Fall besteht lediglich darin, daß beim Signifikanztest herauskommen muß: Falls die Hypothese $V = \text{konst.}$ stimmt, muß sich der Regressionskoeffizient zufällig und nicht signifikant von 0 unterscheiden. Beide Tests konnten für beide Bauteile die Hypothese $V = \text{konst.}$ nicht ablehnen. Für die Linearitätsprüfung mit dem F-Test wurde $\alpha = 5\%$ gewählt und für den Signifikanztest $t = 1\%$.

Die Varianzanalyse, die an dieser Stelle die Aufgabe hat, die Abgrenzung des Normallaufbereiches zum Bereich sich über der Laufzeit ändernder Verschleißraten vorzunehmen, konnte leider nicht angewendet werden, da im Anwendungsbereich zwischen 100 ÷ 200 Laufstunden zu wenige Meßwerte vorlagen. Deshalb wird der Normallaufbeginn auf die Laufzeit gelegt, bei der die Mittelwertkurve der Grundgesamtheit I den Wert $\emptyset = 1$ (mittlere normierte Normallaufverschleißrate) annimmt.

Damit liegt der Normallaufbeginn der Ringlauffläche bei

248 h und der der Büchsenlauffläche bei 194 h.

Verteilungsfunktion der Verschleißraten:

Ringlauffläche:

Um zu ermitteln, wie die Ringlaufflächenverschleißraten verteilt sind, wird die Methode der Summenhäufigkeitskurve angewendet. Dazu müssen die Daten in Klassen eingeteilt werden. Die Klassenbreite b wird nach Sturges ermittelt.

Ringlauffläche:

Klassenbreite der Verschleißratendaten

$$b_{\text{errechnet}} = 0,13; b_{\text{gewählt}} = 0,12$$

Φ	0,69	0,81	0,93	1,05	1,17	1,29	1,41	1,53
n	11	18	16	12	9	8	3	3
$\sum n$	11	29	45	57	66	74	77	80
i	0,14	0,36	0,56	0,71	0,83	0,93	0,96	1

Tab.9: Häufigkeitstabelle für die Ringlaufflächen-Normal-lauf-Verschleißraten

In Fig.44 ist die Summenhäufigkeit über der Klassengrenze (d.h. den Verschleißratenklassen) in einem Wahrscheinlichkeitsnetz aufgetragen, dessen Ordinate nach der Summenfunktion der Normalverteilung geteilt ist. Es ergibt sich eine Gerade. Es lassen sich Schätzungen des Mittelwertes und der Standardabweichung vornehmen und der Variationskoeffizient aus den geschätzten Parametern errechnen.

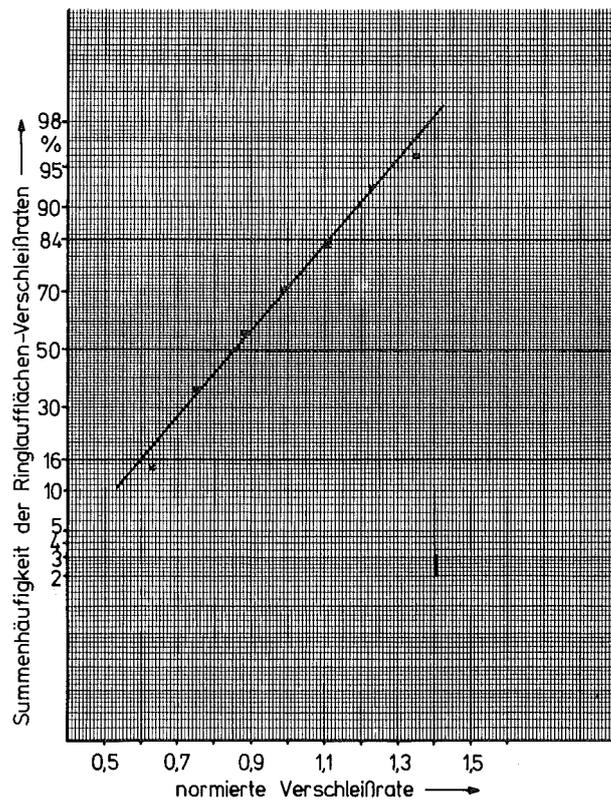


Fig.44: Summenhäufigkeitskurve der Ringlaufflächenverschleißraten (empirischer Verlauf)

Der Verlauf der Summenhäufigkeitskurve sowie der Variationskoeffizient von 30% deuten auf normalverteilte Daten hin.

Büchsenlauffläche (OT):

Klassenbreite der Verschleißraten

$$b_{\text{errechnet}} = 0,3; b_{\text{gewählt}} = 0,3$$

Φ	0,5	0,8	1,1	1,4	1,7	2,3
n	5	10	12	9	4	1
$\sum n$	5	15	27	36	40	41
i	0,12	0,37	0,66	0,88	0,98	1,0

Tab.10: Häufigkeitstabelle für die Büchsenlaufflächen-Normallauf-Verschleißraten

In Fig.45 ist der Verlauf der Summenhäufigkeitskurve wiedergegeben. Sie deutet darauf hin, daß die Daten normal verteilt sind, wenn auch der Variationskoeffizient recht groß ist.

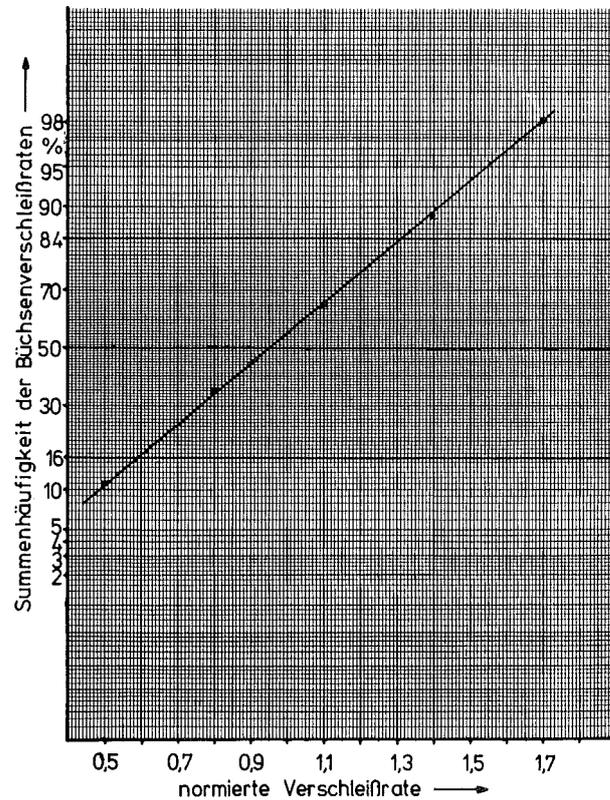


Fig.45: Summenhäufigkeitskurve der Büchsenverschleißraten (OT) (empirischer Verlauf)

χ^2 -Test:

Der Test dient der Überprüfung der Hypothese, daß die Daten normal verteilt sind. Die Durchführung des Tests wird nicht im einzelnen angeführt, da er in der Literatur ausführlich beschrieben ist, z.B. /29,30,34,35/.

Ringlauffläche:

$$\chi_{\text{berechnet}}^2 = 7,44$$

$$\chi_{\text{theoretisch}}^2 (3;0,05) = 7,81$$

Büchse:

$$\chi^2_{\text{berechnet}} = 2,55$$

$$\chi^2_{\text{theoretisch}} (2; 0,05) = 5,99$$

Damit wird die Nullhypothese auf dem 5%-Niveau angenommen und es kann davon ausgegangen werden, daß die beobachteten Verschleißratendaten einer Normalverteilung folgen.

Verteilungsfunktion für Normallauf:

Die empirische Auswertung der Daten und der CHI-Quadrat-Test haben die Hypothese, daß die Daten normal verteilt sind, nicht widerlegen können. Es kann somit in einem normal geteilten Wahrscheinlichkeitsnetz eine Gerade eingezeichnet werden, die die Summenhäufigkeitskurve der Normallaufdaten darstellt und durch die berechneten Parameter σ und $\bar{\Phi}$ gegeben ist.

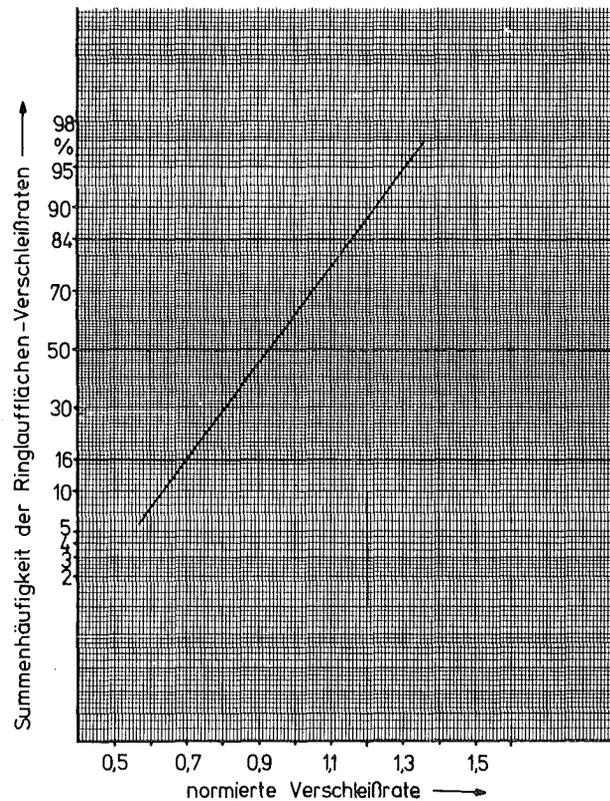


Fig.46: Summenhäufigkeitskurve der Ringlaufflächenverschleißraten (gerechneter Verlauf)

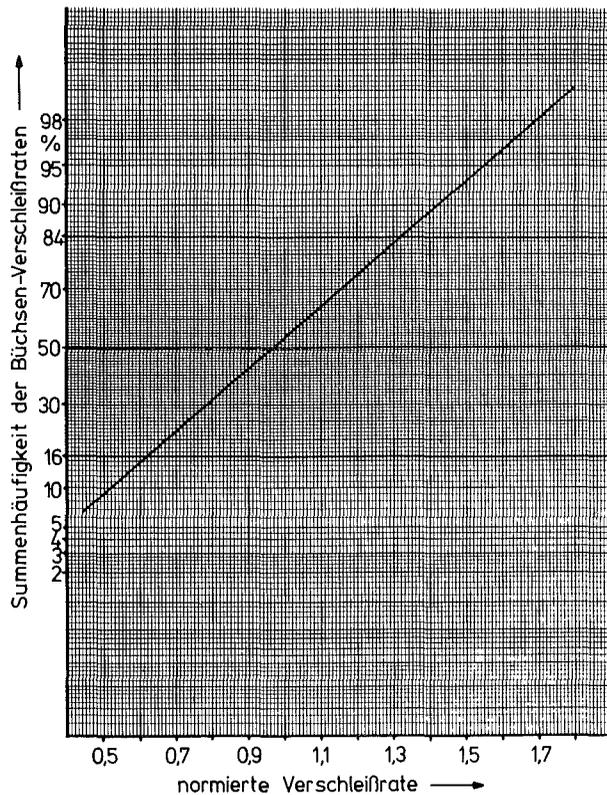


Fig.47: Summenhäufigkeitskurve der Büchsenverschleißraten (OT)
(gerechneter Verlauf)

Der Variationskoeffizient der Büchsenverschleißraten beträgt 0,35, der der Ringlaufflächenverschleißraten 0,25.

Aufnahme der Verschleißratendaten alter Bestückungen in die Grundgesamtheiten des Normallaufbereiches:

Die in Kap. 6.1.2 beschriebenen Kurzzeitversuche KZ MWM 12 bis 17 waren zu dem Zweck durchgeführt worden, die Streuung der Verschleißraten nach dem Einlauf mit Hilfe bereits auf z.T. unbekanntem Motoren gelaufenen Bestückungen durch Kurzzeitversuche besser abschätzen zu können und so die Grundgesamtheit zu erweitern.

Die Bestückungen waren bereits zwischen 1000 und 2400 h gelaufen. Es wurde eine Varianzanalyse durchgeführt, die zum

Ziel hatte, die Daten der Testversuche mit den Daten der Grundgesamtheit zu vergleichen. Dazu wurde die Grundgesamtheit in Klassen gleicher Größe wie die Klasse der Testdaten unterteilt und der F-Wert berechnet.

$$F_{\text{errechnet}} = 15,8 \quad F_{(6;77;0,01)} = 3,09$$

Die Hypothese, die Daten der alten Bestückungen gehören zur Grundgesamtheit der Ringlaufflächenverschleißraten des Normallaufs, muß selbst auf dem schwächeren 1%-Niveau abgelehnt werden. Damit können die Daten der gelaufenen Bestückungen nicht in die Grundgesamtheit aufgenommen werden.

7.3 Auswertung der Verschleißraten aus Testversuchen

7.3.1 Kolbenringlauffläche und Büchsenlauffläche (OT)

Nachdem für die Ringlauffläche und die Büchsenlauffläche (OT) die jeweiligen Grundgesamtheiten nebst ihren charakteristischen Merkmalen aufgestellt worden waren, konnte der Vergleich der Verschleißratendaten aus den Testversuchen mit denen der entsprechenden Grundgesamtheit erfolgen. Die Testversuche haben zum Ziel, für einen vom Motor D verschiedenen Dieselmotor für die beiden Bauteile Büchsenlauffläche (OT) und Kolbenringlauffläche eine Aussage darüber zu machen, wie das Verschleißratenniveau eines bestimmten Prozentsatzes gleichartiger Bauteile zu einer vorgegebenen Zeit höchstens sein wird. Das Strukturdiagramm Fig.15, Seite 45 zeigt die Auswertungsschritte der Testversuche und die nötigen Vergleiche mit der Grundgesamtheit auf statistischer Basis. Für die Versuche, deren Ergebnisse in Tab.11 wiedergegeben sind, verlief der Signifikanztest positiv, d.h. $V \neq \text{konst}$, der Umfang der Daten reichte aber in keinem Fall aus, eine Linearisierung vorzunehmen. So wurde die Anpassung der Strukturfunktion an die Meßwerte mit Hilfe des Bestimmtheitsmaßes überprüft, das in den aufgeführten Beispielen immer größer als 96% war. Der Vergleich der Testdaten mit denen der entsprechenden Grundgesamtheit verlief in den angeführten Fällen ebenfalls positiv. Die einzelnen Verschleiß- und Testdaten werden nicht näher aufgeführt.

Versuch	Motortyp	Wahrscheinlichkeit i (%)	
		Ringlauffläche	Büchse (OT)
KZ DB 2	A	29	
KZ DB 4	A	12	20
KZ MWM 9	C	19	
LZ DB 1	B		29
LZ KHD 4	F		31
KZ KHD 1	E	52	85
KZ KHD 3	E	20	13

Tab.11: Testversuchsergebnisse

Die Ergebnisse der Tab.11 gelten für den Nennleistungsbetriebspunkt bei Vollast.

Mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitskennfelder Fig.41 und 42, Seite 112 und Seite 113, in die die der Tab.11 entnommenen i -Kurven eingezeichnet werden können, oder den Formeln (22) Seite 37 und (57) Seite 106 mit den für die jeweiligen Verschleißbauteile entsprechenden Parameterwerten können die normierten Verschleißraten abgelesen oder berechnet werden, die maximal zu einer vorgegebenen Zeit von i -% der Bauteile erreicht werden.

Mit Hilfe des Testversuches wird also über die mathematisch statistische Behandlung seiner Daten eine Aussage über einen Teil der Grundgesamtheit gleicher Bauteile des jeweiligen Motortyps gefunden. Nur über einen Teil der Grundgesamtheit deshalb, weil die Normalbereichsverschleißrate, mit der normiert wurde, nur für den Testversuch bekannt ist, aber nicht die mittlere Normalbereichsverschleißrate mit Hilfe genügend vieler Versuche.

An den Ergebnissen der Tab.11 fällt auf, daß die Wahrscheinlichkeitsbelegungen für beide Bauteile eines Versuches in der gleichen Größenordnung liegen. Dies mag seine Erklärung darin finden, daß es sich bei den untersuchten Bauteilen um direkte Reibpartner handelt, und ist ein weiterer Hinweis für die auch in Lit. 58 beschriebene Abhängigkeit des Verschleißratenverlaufes dieser

beiden Verschleißmotorbauteile.

Der wesentliche Unterschied zwischen den Kurven bestimmter Wahrscheinlichkeit der Wahrscheinlichkeitskennfelder und den Verschleißratenkurven, die unmittelbar aus der Verschleißmessung während des Testversuchslaufes gewonnen werden, sei noch einmal anhand von Fig.48 erklärt, wo der im beschriebenen Sinne normierte Büchsenverschleißratenverlauf für zwei Versuche am selben Motor von Typ E aufgetragen ist.

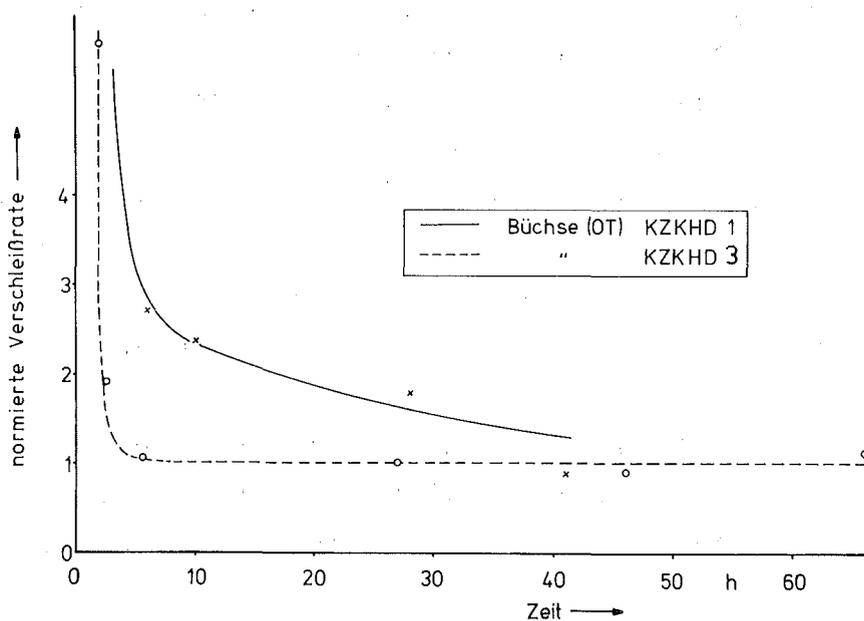


Fig.48: Normierter Büchsenverschleißratenverlauf (OT) am Motor E für die Versuche KZ KHD 1 und 3 beim Nennleistungs-triebspunkt 2650/Vollast

Beim Versuch KZ KHD 3 ist der Übergang vom Einlauf in den Normal-
lauf wesentlich schneller abgeschlossen als beim Versuch KZ KHD 1,
man kann auch die Aussage machen, daß sich das relative Verschleiß-
ratenniveau nach Zeiten > 50 h anzugleichen scheint. Darüberhinaus
ist aus den beiden Kurvenverläufen ersichtlich, daß die Kurve des
Versuches KZ KHD 1 einen größeren Verschleißratenbereich abdeckt
als der andere Versuch, also für eine prozentual größere Anzahl
von Bauteilen eine maximal mögliche obere Verschleißratengrenze
darstellt. Qualitative Angaben lassen sich aber nicht machen und

damit auch keine Aussagen darüber, ob diese Kurvenverläufe repräsentativ sind und für prozentual wieviel gleichartige Bauteile sie eine obere Verschleißratengrenze darstellen.

Die mathematisch statistische Auswertung führte dagegen zu Ergebnissen, mit Hilfe derer diese qualitativen und prozentualen Aussagen möglich sind. Die Versuche KZ KHD 1 und 3 führten über diese Auswertung zu Ersatzkurven, mit denen maximale relative Verschleißratenniveaus über der Zeit angegeben werden können. Durch die Kenntnis der Normalbereichverschleißraten lassen sich auch absolute Verschleißraten angeben, d.h., daß durch den Versuch KZ KHD 1 gesagt werden kann, daß 85% aller gleichartigen Bauteile nach 10 h maximal eine Verschleißrate von 1300 $\mu\text{g/h}$ haben, nach 100 h 450 $\mu\text{g/h}$ und nach 194 h 355 $\mu\text{g/h}$. (Beginn Normallaufbereich der Grundgesamtheit siehe Kap. 7.2.) Der Versuch KZ KHD 3 ermöglicht die Aussage, daß 13% der Bauteile nach 10 h maximal 910 $\mu\text{g/h}$ aufweisen, nach 100 h 320 $\mu\text{g/h}$ und nach 194 h 255 $\mu\text{g/h}$. Allerdings muß an dieser Stelle noch einmal deutlich darauf hingewiesen werden, daß die absoluten Verschleißratenangaben für Büchsen (OT) untereinander nur vergleichbar sind, wenn bei den verschiedenen Versuchen stets eine gleich große Fläche im gleichen Zylinderbereich aktiviert worden ist (siehe dazu auch Kap. 5.1.2). Eine Prüfung der aktivierten Flächen muß Unterschiede ausgleichen.

7.3.2 Kolbenringflanke

Die Verarbeitung der Kolbenringflanken-Verschleißraten aus Testversuchen geschieht wie bei den anderen Bauteilen. Die Auswerteschritte sind in Fig.15, Seite 45 dargestellt. Der Testversuch selber kann auf zweierlei Art durchgeführt werden, was mit der Charakteristik des Ringflankenverschleißratenverlaufes und der daraus abgeleiteten Normierung zusammenhängt. Um eine Normierung vornehmen zu können, muß die Anfangsverschleißrate und die Einwirkzeit bekannt sein. Die Einwirkzeit kann ermittelt werden, indem der Versuch so lange gefahren wird, bis eine Beurteilung des Kurventeilendes möglich ist und damit auch der Einwirkzeit. Da dies sehr lange Versuchszeiten erfordert

(≈ 1000 h) ist es sinnvoll, die aus Tab.5, Seite 96 aufgeführten Versuchsergebnisse zu berücksichtigen. Es ist der Tabelle zu entnehmen, daß der Verschleißratenzuwachs $\Delta \dot{V}$ pro Kurventeil (mit Ausnahme des 4. Kurventeiles) für alle Versuche etwa gleich ist. Falls sich diese Beobachtung durch weitere Versuche bestätigt, könnten die Testversuche erheblich verkürzt werden. Die beiden Testversuchsarten sind also:

- a) Die Ringflankenverschleißrate wird vom Anfang bis zum Ende eines Kurventeils ermittelt.
- b) Es wird vorausgesetzt, daß der Verschleißratenzuwachs $\Delta \dot{V}$ pro Kurventeil für alle Einzelversuche gleich groß ist.

Zu_a):

Die Ringflankenverschleißrate des Testversuches wird über der gesamten Zeit bis zum Ende des Kurventeiles erfaßt. Somit erhält man $\Delta \dot{V}$ und t_E . Der Testversuch läßt sich jetzt so behandeln, wie es das Auswertediagramm Fig.15 vorschreibt. Ergibt die Überprüfung Übereinstimmung mit dem Kollektiv, so kann angegeben werden, wieviel Prozent gleichartiger Bauteile zu einer vorgegebenen Zeit (nach Rückrechnung der Normierung oder in % t_E) maximal die an der Ordinate ablesbare Verschleißrate haben werden.

Zu_b):

Aus den gemessenen \dot{V} mit $t < t_E$ wird die Regressionsgerade

$$\dot{V}(t) = a \cdot t + \dot{V}_{t_0} \quad (66)$$

berechnet.

Die Subtraktion des Achsenabschnittes führt zum ersten Normierungsschritt.

$$\dot{V}(t) - \dot{V}_{t_0} = a \cdot t$$

Aufgrund der Ergebnisse in Tab.5 wird nun vorausgesetzt, daß der Verschleißbratenzuwachs $\Delta \dot{V}$ des Kollektivs mit einem Fehler $\frac{d(\Delta \dot{V})}{\Delta \dot{V}}$ erreicht wird.

Damit läßt sich t_E berechnen und der zweite Normierungsschritt vornehmen.

$$t_E = \frac{\Delta \dot{V}}{a} \text{ und } d(t_E) = \frac{d(\Delta \dot{V})}{a} \quad (67)$$

Nach der Division durch t_E erhält man den normierten Regressionskoeffizienten \bar{a} mit seinem relativen Fehler $\frac{d(\bar{a})}{\bar{a}}$.

$$\bar{a} + d(\bar{a}) = (t_E + d(t_E)) \cdot a \quad (68)$$

$$\frac{d(\bar{a})}{\bar{a}} = \frac{d(t_E)}{t_E} = \frac{d(\Delta \dot{V})}{\Delta \dot{V}} \quad (69)$$

Die statistische Auswertung erfolgt nun in gleicher Weise wie unter a) mit dem Unterschied, daß die Wahrscheinlichkeit i des Testversuches mit ihrem relativen Fehler $\frac{d_i}{i}$ aufgrund des Fehlers, mit welchem der Regressionskoeffizient behaftet ist, berechnet werden muß.

Nach Weibull ist:

$$i = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\bar{a}}{a_{63}}\right)^Z\right) \quad (12)$$

und somit:

$$\frac{d_i}{i} = \frac{Z \cdot \left(\frac{\bar{a}}{a_{63}}\right)^Z \exp\left(-\left(\frac{\bar{a}}{a_{63}}\right)^Z\right) d\bar{a}}{1 - \exp\left(-\left(\frac{\bar{a}}{a_{63}}\right)^Z\right)} \cdot \frac{1}{\bar{a}} \quad (70)$$

C

Mit (67) ergibt sich:

$$\frac{di}{i} = c \cdot \frac{d(\Delta \dot{V})}{\Delta \dot{V}} \quad (71)$$

Beispiel:

Weibullparameter: $Z = 1, a_{63} = 10$

Versuchsparameter: $\bar{a} = 2$

Fehlerabschätzung: $\frac{d(\Delta \dot{V})}{\Delta \dot{V}} = 10\%$

damit:

$$\frac{di}{i} = 9,1\%$$

d.h., bei den gegebenen Werten führt eine Fehlerabschätzung, die besagt, daß der Verschleißratenzuwachs eines Kurventeiles auf 10% genau angegeben werden kann, zu einem Fehler in der Wahrscheinlichkeitsaussage von 9,1%.

Die Erstellung der Grundgesamtheit, die Voraussetzung für die Anwendung des gewählten Verfahrens ist, erfordert ein hohes Maß an Versuchsaufwendungen für Langzeitversuche. Da aber die Kenntnis eines in der beschriebenen Weise erstellten Wahrscheinlichkeitskennfeldes ein großer Schritt zur Zielerreichung wäre, nämlich durch einen Einzelversuch den Ausfall (!) eines bestimmten Prozentsatzes dieser Bauteilart vorhersagen zu können, kann man sich vorstellen, daß es lohnend ist, den Aufwand nicht zu scheuen. Die Erfolgsaussichten werden aus jetziger Sicht für gut beurteilt.

7.4 Auswertung der Ringflanken-Verschleißraten aus Versuchen mit künstlich verändertem Kolbenringflankenspiel

7.4.1 Ringflankenverschleißbeschleunigung in Abhängigkeit des Kolbenringflankenspiels

Die Ergebnisse der Langzeitversuche am Motor D und die Spielerweiterungsversuche am gleichen Motortyp ermöglichen es, einen Zusammenhang zwischen Kolbenringspiel und sich einstellender Ringflankenverschleißbeschleunigung anzugeben. Fig.49 zeigt, daß

ein linearer Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen besteht.

Die Linearitätshypothese wurde auf dem 1%-Niveau mit Hilfe des F-Testes überprüft und nicht verworfen. Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsgeraden beträgt 84%. Das bedeutet statistisch gesehen, daß 84 % der sich einstellenden Verschleißbeschleunigung auf die Spielerweiterung zurückzuführen ist und 16 % andere Gründe hat. Das Meßergebnis für \ddot{V} des Versuches LZ MWM 10 wurde nicht berücksichtigt, da die Ursachen des Ausfalles dieser Paarung durch Kolbenhemdriß und Kolben- und Ringfresser verursacht, nicht geklärt ist und sonst nie vorgekommen war, sowie aus firmeninternen Gründen dieser Versuch als einziger aller MWM-Versuche mit einem Kolbenring aus IKA-Material durchgeführt worden war.

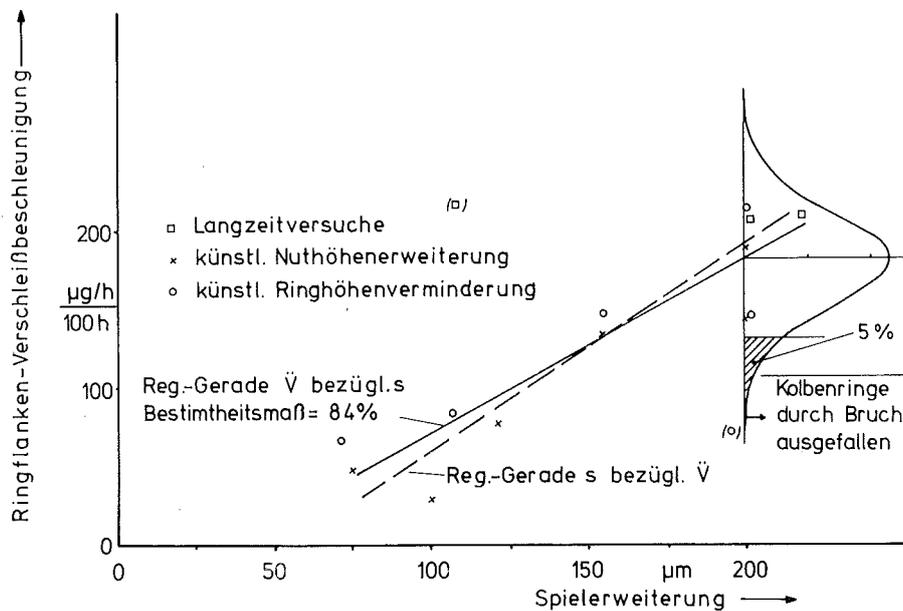


Fig.49: Ringflankenverschleißbeschleunigung \ddot{V} am Motor D in Abhängigkeit der Spielerweiterung s zwischen 1.Kompressionsring und 1.Kolbennut für den Nennleistungsbetriebspunkt 2800/Vollast

Es wurden insgesamt 11 Versuche mit einem zusätzlichen Spiel von ca. 200 µm gefahren (einschließlich der Langzeitversuche). Im beobachteten Versuchszeitraum fielen 10 Ringe durch

Bruch aus.. Lediglich beim Versuch KZ MWM 28. (siehe Fig.30, Seite 86) trat im Beobachtungszeitrum kein Bruch auf. Es läßt sich also mit großer Sicherheit sagen, daß ein zusätzliches Spiel von 200 μm am Motor D die Spielerweiterungsgrenze darstellt, wenn der Motor mit Nennleistung betrieben wird.

Wenn man annimmt, daß bei einer Spielerweiterung von 200 μm die sich einstellenden und zum Ausfall der Paarung führenden Verschleißbeschleunigungsmeßwerte normal verteilt sind (was nicht erwiesen ist), ergibt sich der in Fig.49 zu sehende Wahrscheinlichkeitsdichteverlauf. 95% aller sich einstellenden \ddot{V} -Ergebnisse liegen oberhalb $138 \frac{\mu\text{g/h}}{100\text{h}}$. Da zwischen den Regressionsgeraden Y bezüglich X und X bezüglich Y über dem Bestimmtheitsmaß der Zusammenhang

$$B = \sqrt{a_{YX} \cdot a_{XY}} \quad \text{besteht,} \quad (72)$$

wobei

B = Bestimmtheitsmaß

a_{YX} = Regressionskoeffizient Y bezüglich X

a_{XY} = Regressionskoeffizient X bezüglich Y

X, Y = übliche Achsenbezeichnung

ist, kann man an der gestrichelt eingezeichneten Regressionsgeraden, die das sich einstellende Spiel bei vorgegebenem \ddot{V} darstellt, ablesen, daß im Mittel bei einer Verschleißbeschleunigung von $138 \frac{\mu\text{g/h}}{100\text{h}}$ die Spielerweiterung 155 μm beträgt. Jedoch können aufgrund der Kenntnis des Verlaufes der Dichtefunktion bei 200 μm Spielerweiterung 5% der Paarungen diese Verschleißbeschleunigung haben. Diese Paarungen würden durch Bruch ausfallen.

An dieser Stelle bietet es sich an, auf die bisherigen Erkenntnisse aufbauende Folgearbeiten zu erörtern und anzugeben. Wegen des damit verbundenen erheblichen Aufwandes in Relation zu dem für die Praxis notwendigen Bezug zur Aufgabenstellung muß jedoch z.B. darauf verzichtet werden, die Dichtefunktion und deren Parameter für die Ausfallwahrscheinlichkeit über der Spielerweiterung zu er-

mitteln, was über die Gewinnung der Dichtefunktion und deren Parameter für die Ausfallwahrscheinlichkeit über der Verschleißbeschleunigung bei vorgegebenem Spiel erzielbar wäre, ohne die Teile bis zum Ausfall zu betreiben. Mit Hilfe des Ringflanken- und Kolbennutflankenverschleißratenverlaufes über der Zeit ließe sich dann der Zusammenhang zwischen Laufzeit und Ausfallwahrscheinlichkeit herstellen. Es ist zwar begründet anzunehmen, daß die Dichtefunktionen, die ermittelt werden müssen, in ihrer Art bei gleichen Bauteilen an ähnlichen Motoren gleich, aber die Parameter verschieden sind, was sich beispielsweise darin zeigt, daß am Motortyp E nach 3000 Betriebsstunden Spielerweiterungen von mehr als 400 μm nicht zum Ausfall führten /62/.

Für die praktische Anwendung ergibt sich folgende Erkenntnis:

Mit Hilfe von künstlich aufgebrachtten Spielerweiterungen im Bereich 1.Kompressionsring/1.Kolbennut ist es für den Motor D gelungen, den Ausfall der Paarungen mit Kurzzeitversuchen zu erzeugen. Die Spielerweiterungen, bei denen der Ausfall auftrat, deckten sich mit den Spielerweiterungen, die bei den Langzeitversuchen (Ausnahme LZ MWM 10) vorhanden waren als diese ausfielen, das gleiche gilt für die Verschleißbeschleunigungswerte (einschließlich LZ MWM 10). Es läßt sich also durch kurzzeitige Versuche eine Grenze zulässigen Axialspiels angeben. Das ermöglicht, ein Verfahren zur Lebensdauerabschätzung von Kolbenringen zu entwickeln.

7.4.2 Verfahren zur Lebensdauerabschätzung von Kolbenringen

Das hier zu beschreibende Verfahren zur Lebensdauerabschätzung von Kolbenringen ermöglicht es, mit Hilfe von Kurzzeitversuchen und Erfahrungswerten der Motorbetreiber, -hersteller und Bauteilehersteller eine Formel anzugeben, mit der sich die Lebensdauer des Kolbenringes bis zum Ausfall durch Bruch errechnen läßt. Es werden folgende Erkenntnisse benötigt:

- a) Grenzspielerweiterung (zusätzliches Spiel, das zum Bruch des Ringes führt).

- b) Ringflankenansfangverschleißrate
- c) Verhältnis b): Mittlerer Ringflankenverschleißrate über der gesamten Laufzeit.
- d) Verhältnis der Spielerweiterungsanteile Kolbennut : Ringflanke.

Die Grenzspielerweiterung und die Ringflankenansfangverschleißrate müssen durch Versuche ermittelt werden. Das Verhältnis mittlere Ringflankenverschleißrate über der gesamten Motorlaufzeit zu Ringansfangverschleißrate ist ein Erfahrungswert. Zahlreiche Auswertungen von Langzeitversuchen an verschiedenen Motoren ergaben, daß das Verhältnis auch zwischen verschiedenen Motortypen im gleichen Größenbereich liegt /62,4/. Die mittlere Ringflankenverschleißrate wurde anhand der Wägung des Ringes vor und nach dem Lauf ermittelt (der Ringlaufflächenverschleiß ist in der Regel vernachlässigbar) oder durch eine geeignete Auswertung der radialen Perth-0-Meter-Schriebe des Ringflankenprofils vor und nach dem Lauf.

Die Erfassung der Kolbenringnuterweiterung erfolgt bei trapezförmigen Nuten im allgemeinen nach der Walzenmeßmethode und liefert punktförmige Meßergebnisse an ausgewählten Stellen der Kolbennut. Gelaufene, d.h. verschmutzte und verformte doppeltrapezförmige Kolbennuten auszumessen ist schwierig. Mit Fehlern bis zu 10% /64/ muß gerechnet werden.

Wie schon in Kap. 6.4 angedeutet, gibt es aber auch Erfahrungswerte, wie bei den entsprechenden Kolben die Spielerweiterungsanteile auf den Ring und auf die Kolbennut umzulegen sind.

Grundlage:

$$\frac{s_{\text{Nut}}}{s_{\text{Ring}}} = x \text{ (Erfahrungswert)} \quad (73)$$

$$\frac{\dot{V}_{\text{RFm}}}{\dot{V}_{\text{RFa}}} = y \text{ (")} \quad (74)$$

\dot{V}_{RFm} ist ein konventionell zu ermittelnder Wert, falls nicht auf Erfahrungswert y zurückgegriffen werden soll

\dot{V}_{RFa} ist radionuklidtechnisch ermittelter Wert

$$s_{Ring} = \frac{\dot{V}_{RFm} \cdot t}{b \cdot d \cdot \pi \cdot \rho} \quad (75)$$

Rechnung:

$$s = s_{Ring} + s_{Nut}, \quad (76)$$

mit (73) und (74) ergibt sich

$$s = \frac{\dot{V}_{RFa} \cdot t \cdot y \cdot (1+x)}{b \cdot d \cdot \pi \cdot \rho} \quad (77)$$

oder

$$t = \frac{s \cdot b \cdot d \cdot \pi \cdot \rho}{\dot{V}_{RFa} \cdot y \cdot (1+x)} \quad (78)$$

Bei Kenntnis der Faktoren x und y läßt sich mit Hilfe der Spiel-erweiterungsversuche und Kurzzeitversuchen von etwa 50 h Dauer mit Normalmaßpaarungen zur Anfangsverschleißratenermittlung der Ringflanke eine Abschätzung treffen, wie lange die Paarung im Dauerversuch bis zum Bruch des 1. Kompressionsringes bei dem untersuchten Betriebspunkt betrieben werden kann.

Nachträglich gerechnet würde diese Abschätzung für den Motor D folgende mittlere Laufzeiten für den Betrieb bei Nennleistung ergeben, wenn man sich auf Erfahrungswerte und Meßergebnisse vergleichbarer Bauteile stützt (hier: Konventionell ermittelte Langzeitmeßergebnisse am Motor E für das Verschleißverhalten Ring - Kolbennut):

Versuchsergebnis:

$$s = 0,2 \text{ mm}$$

$$\dot{V}_{RFa} = 55 \text{ } \mu\text{g/h}$$

Erfahrungswerte:

$$x = \frac{s_{\text{Nut}}}{s_{\text{Ring}}} = 2$$

$$y = \frac{\dot{V}_{\text{RFm}}}{\dot{V}_{\text{RFa}}} = 4,23 \quad (+ 1,34)$$

Rechnung für Motor D:

$$t = \frac{0,2 \cdot \pi \cdot 95,7 \cdot 4,3 \cdot 7,25}{12,69 \cdot 0,055} = 2683 \quad \begin{matrix} - 850 \text{ h} \\ +2490 \text{ h} \end{matrix} \quad (78)$$

(Die große Streuung für t beruht auf dem nur mit großer Streuung bekannten Verhältnis $\frac{\dot{V}_{\text{RFm}}}{\dot{V}_{\text{RFa}}}$.)

s = Grenzspielerweiterung

\dot{V}_{RFm} = mittlere Ringflankenverschleißrate über der Lebensdauer

\dot{V}_{RFa} = Ringflanken-Anfangsverschleißrate

d = Ringdurchmesser (neutrale Faser)

b = radiale Wanddicke des Ringes

ρ = Dichte des Ringmaterials

s_{Nut} = Spielerweiterung durch Vergrößerung der Kolbennut

s_{Ring} = Spielerweiterung durch Ringhöhenabnahme

Das Ergebnis zeigt, daß durch die relativ schnell ermittelbaren nur für den Motor D spezifischen Werte s und \dot{V}_{RFa} und durch den Zugriff auf Erfahrungswerte an ähnlichen Bauteilen, eine Laufzeit-Vorausschätzung möglich ist, die für den Motor D, wo sie überprüfbar ist, sehr realistische Werte erbracht hat. So betrug die Laufzeit bis zum Ausfall der Paarung bei den Versuchen LZ MWM 10 und LZ MWM 4 2733 h. Der Laufzeitvergleich mit den Paarungen des Versuches LZ MWM 2 muß extra berechnet werden, da die Anfangsverschleißrate $\dot{V}_{\text{RFa}} = 55 \mu\text{g/h}$ aus den mit 2800/Vollast betriebenen Versuchen ermittelt wurde. Die Betriebspunkte des Versuches LZ MWM 2 reichten von 1200 - 2350 min^{-1} . In diesem Fall müßte $\dot{V}_{\text{RFa}} \approx 40 \mu\text{g/h}$ gewählt werden. Diese Annahme ergäbe eine

Ringlebensdauer von 3690 - 887 h
+1710 h. Während des Versuches LZ MWM 2
brachen 3 Ringe bei den Laufzeiten 4010 h, 5320 h und 6414 h.

Der Nachteil dieses Verfahrens ist die nur mit geringer Genauigkeit ermittelbare Kenntnis der mittleren Ringflankenverschleißrate über der gesamten Motorlaufzeit. Auch die Fehler bei den anderen Abschätzungen gehen linear als Fehler in die Laufzeitabschätzung ein. Das durchgerechnete Beispiel zeigt aber auch anhand der unabhängig von der Schätzung gemessenen Ergebnisse, daß mit einem Minimum an Aufwand die Laufzeit des Kolbenringes bis zum Bruch (!) verhältnismäßig gut geschätzt werden konnte.

8. H I N W E I S E Z U R F O R T F Ü H R U N G D E R A R B E I T

In der vorliegenden Arbeit wurden schon an einigen Stellen Hinweise gegeben, welche Arbeiten für eine abgeschlossene Betrachtung des jeweiligen Problems noch nötig wären, so z.B. in Kap. 7.4.1, wo die Aktivitäten angeführt werden, die zu leisten wären, um vom Ringflankenverschleißratenverlauf auf den Ausfall des Kolbenringes schließen zu können. Auf diese bereits abgehandelten Fragen wird in diesem Kapitel nicht mehr eingegangen. Es wird die Rede sein von der Möglichkeit der Erweiterung oder Neuermittlung der Grundgesamtheiten durch Feldtests, sowie den erforderlichen Arbeitsschritten im Falle der Anwendung des Systems auf andere Verschleißbauteilarten.

8.1 Einbeziehung von Feldtests

Zu Beginn der Arbeit wurde es für notwendig erachtet, die Grundgesamtheiten der Verschleißratendaten mit Hilfe von Prüfstandsversuchen und Feldtests zu erstellen. Aus diesem Grunde wurde auch das in Kap. 5.2 beschriebene mobile Verschleißmeßsystem entwickelt, dessen Erstellung und Erprobung sich aber aus verschiedenen Gründen verzögerte und erst zu einem zu späten Zeitpunkt für die vorgesehenen Versuche verfügbar war.

Es bieten sich für zukünftige Arbeiten zwei Versuchsreihen an. Die erste würde zum Ziel haben, die bestehende Grundgesamtheit mit Feldtestdaten zu erweitern, um die Allgemeingültigkeit der gewonnenen Aussagen zu erhöhen. Da die in dieser Arbeit beschriebenen Grundgesamtheiten nur aus Verschleißratendaten aufgebaut sind, die bei Nennleistungsbetrieb des Motors gewonnen worden sind, müßte dies auch für die Feldtestdaten gelten. Im vorliegenden Fall ist eine Erweiterung der Grundgesamtheiten auf diese Art aber nicht möglich, da der Motor D hauptsächlich in landwirtschaftlichen Fahrzeugen eingebaut wird.

Werden neue Grundgesamtheiten erstellt, weil die zu untersuchenden Verschleißbauteile entweder verschieden von den hier beschriebenen sind oder nicht das Verschleißverhalten der Bauteile bei Nennleistung interessiert oder aus sonstigen Gründen, dann ist es von Vorteil, Feldtests in die Auswertung einzubeziehen. Diese Aussage basiert auf den inzwischen nach Abschluß der Versuche für diese Arbeit durchgeführten Verschleißversuchen im PKW an einer Büchse (OT) des Motors B (in vierzylindriger Ausführung). Die Versuche haben gezeigt, daß sich zusätzliche Erkenntnisse zu den auf dem Prüfstand erzielten gewinnen lassen.

Eine zweite Versuchsreihe bietet sich für solche Bauteile an, deren Prüfstandserprobung weitgehend abgeschlossen ist und von denen Kenntnisse über ihr Verhalten bei wechselnden Betriebsbedingungen im Feldtest gewonnen werden sollen. Die Grundgesamtheit setzt sich dann nur aus im Feldtest gewonnenen Daten zusammen mit der ganzen Breite der anfallenden Betriebsbedingungen. Es muß aber einige Arbeit aufgewendet werden, um herauszufinden, welche Art des Aufbaus der Grundgesamtheit die günstigste ist. Ob

dies auch die Auftragung der Verschleißrate über der Zeit ist, ist keineswegs sicher. Denkbar wäre der Zusammenhang zwischen Verschleißrate und zurückgelegter Strecke, Verschleißrate und Häufigkeit vorgegebener Betriebspunkte oder Verschleißrate und Häufigkeit gegebener Drehmomente o.ä..

Eine solche Grundgesamtheit würde dann in Verbindung mit der statistischen Datenverarbeitung ähnliche Aussagen für Testversuche erlauben, wie in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben.

8.2 Anwendung des Systems auf andere Verschleißbauteile

Die Anwendung des in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Systems kann auf andere Verschleißbauteile direkt angewendet werden, wenn nachstehende Voraussetzungen und Verfahrensvorschriften eingehalten werden und der Zusammenhang zwischen Verschleißrate und Betriebszeit interessiert.

I. Voraussetzungen:

1. Kontinuierliche Meßbarkeit des Verschleißes der Bauteile.
2. Kenntnis der Gesetzmäßigkeiten der charakteristischen Verschleißratenverläufe.
3. Normierbarkeit der Verschleißraten.
4. Genügende Zahl von Kurzzeitversuchen zur Erstellung der Häufigkeitstabellen.

II. Verfahrensvorschriften:

1. Aufbau der Grundgesamtheit nur mit Daten, die bei gleichen Betriebsbedingungen gewonnen wurden.
2. Das 1.Anfahren der ausgewählten Betriebsbedingung muß bei allen Versuchen zeitlich einheitlich sein.
3. Gleichheit des Prüfprogrammablaufes.

Erläuterungen:

Die Anwendung des Systems beschränkt sich auf Grundgesamtheiten, deren Daten aus Verschleißraten und Laufzeiten bestehen,

weil nicht gesichert ist, daß beim Aufbau der Grundgesamtheiten mit Daten wie z.B. jenen in Kap. 8.1 erwähnten, die in dieser Arbeit entwickelte mathematisch statistische Auswertemethode anwendbar bzw. die günstigste ist.

Die Normierbarkeit der Daten ist dann notwendig, wenn radio-nuklidtechnisch bedingte Unterschiede der Versuchsergebnisse ausgeglichen werden müssen oder wie am Beispiel der Ringflanken-auswertung zu sehen, die Grundgesamtheiten der Daten dadurch einfacher zu handhaben sind.

Das zeitlich einheitliche 1.Anfahren der ausgewählten Betriebsbedingung ist wichtig, weil dadurch der Verlauf der Zentralbahn der Grundgesamtheit genauer erfaßt werden kann. Besonders wichtig wird dieser Bezugspunkt für die Testversuche, weil z.B. im Falle der Linearisierung des Kurvenverlaufes u.a. über den Achsenabschnitt der Gerade mit der Ordinate die Wahrscheinlichkeitsbelegung des Testversuchs ermittelt wird. Bei gleichem Kurvenverlauf, aber einer zeitlichen Verschiebung desselben, ergeben sich unterschiedliche Achsenabschnitte.

9. Z U S A M M E N F A S S U N G

Die vorliegende Arbeit besteht im wesentlichen aus 6 Teilen. Der 1. Teil enthält die Ergebnisse der Literaturstudie (Kap. 2). Im 2. Teil wird das mathematisch statistische Modell dargelegt (Kap. 3 und 4), im 3. Teil die für die Durchführung der Versuche notwendigen technischen Mittel (Kap. 5). Die Beschreibung der Versuchsdurchführungen erfolgt im 4. Teil (Kap. 6). Der 5. Teil (Kap. 7) bildet mit dem 2. Teil den Kern der Arbeit, hier wird die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse auf der Basis der im 2. Teil erstellten Grundlagen vorgenommen.

Aufgrund der Ergebnisse der zu Beginn der Arbeit geplanten Versuche und der sich abzeichnenden Möglichkeit, auf eine einfache Weise die Grenze der Lebensdauer von Kolbenringen bezüglich Ringbruch angeben zu können, wurde eine zusätzliche Versuchsserie mit Bauteilen künstlich veränderten Einbauspiels aufgelegt, deren Durchführung in Kap. 6 beschrieben und deren Ergebnisse in Kap. 7 statistisch ausgewertet werden.

Die Literaturstudie soll Auskünfte darüber geben, ob von Verschleißbauteilen von Dieselmotoren, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden sollen, bereits Langzeitverschleißkurven vorliegen und eine analytische Behandlung derselben vorgenommen wird.

Es werden eine Reihe repräsentativer Veröffentlichungen angeführt, die darauf hindeuten, daß es einen charakteristischen Verschleißverlauf der Zylinderlauffläche gibt, der sogar für unterschiedliche Motortypen gleichartig sein kann. Dies ist auch für den Ringlaufflächen- und -flankenverschleißverlauf zu vermuten, auch wenn das gesichtete Datenmaterial hier vorab keine endgültige Aussage erlaubt.

Die mathematische Behandlung des Problemkreises der Darstellung von Lebensdauerbegrenzungen von Verschleißbauteilen wird in der Literatur im Prinzip auf zwei Arten durchgeführt. Die erste Art führt im wesentlichen über die analytische Darstellung von Verschleißkurvenformen, die zweite zu Aussagen über die Wahrscheinlichkeit des fehlerfreien Betriebs eines gegebenen Bauteiles.

Es wird in der zur Verfügung stehenden Literatur kein Lösungsvorschlag gemacht, wie mit Hilfe eines Einzelversuches die Höhe der oberen Grenze des Verschleißniveaus für berechnete Prozentsätze gleicher Bauteile ermittelbar ist.

In Kapitel 3 und 4 dieser Arbeit wird ein System in allen Einzelheiten beschrieben, das es ermöglicht, aufgrund der zu einer geeigneten Zeit mit Hilfe eines einzelnen kurzzeitigen Motor- tests gewonnenen Kenntnis des Verschleißratenverlaufes eines interessierenden Verschleiß-Motorbauteiles, Angaben über die Höhe der oberen Grenzen des Verschleißniveaus eines bestimmten Prozentsatzes gleicher Bauteile machen zu können.

Das System benötigt für ein gleichnamiges Verschleißbauteil eine genügend große Grundgesamtheit von Verschleißratendaten. Sie müssen aus Versuchen stammen, die vom Start mit dem Neuteil bis zum Ende der Beobachtungszeiträume reichen oder/und aus Versuchen, die nur Zeitbereiche abdecken. Zunächst wird das gleichnamige Bauteil nur in einem Motortyp in einem engen Betriebsintervall betrieben (z.B. Nennleistung). Die Grundgesamtheit ist also erweiterbar um Daten gleichnamiger Bauteile, die in anderen Motorentypen gelaufen sind und z.B. in Feldtests gewonnen wurden. Die Erweiterungen der Grundgesamtheit führen zu allgemeingültigeren Aussagen.

Weiter verlangt das System überprüfbare Hypothesen über den funktionalen Zusammenhang zwischen den Verschleißratendaten und der Versuchszeit. Danach kann eine mathematisch statistische Auswertemethode angewendet werden, die den Zusammenhang zwischen Kurvenparametern und Wahrscheinlichkeiten liefert und zum Wahrscheinlichkeitskennfeld für das gleichnamige Bauteil führt.

Ergibt eine mathematisch statistische Überprüfung Zugehörigkeit der Daten eines Testversuches zur Grundgesamtheit, so kann mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsbelegung des Testversuches eine obere Verschleißratengrenze für den berechneten Prozentsatz gleichnamiger Bauteile zu beliebig vorgegebenen Zeiten im Rahmen des Beobachtungszeitraumes angegeben werden. In Kap.7 wird das System mit den durch die Versuche gewonnenen Daten aufgefüllt und angewendet. Es zeigt sich, daß überall dort, wo die Ergebnisse

anhand von Erfahrungen der Motor- und Bauteilehersteller und Motorbetreiber überprüfbar sind, die Ergebnisse sinnvoll sind und im Erwartungsbereich liegen.

Die für die Durchführung der notwendigen Versuche zur Erstellung der Grundgesamtheiten fehlenden technischen Hilfsmittel werden nur im Falle des Einflusses von Konzentrationsänderungen des Verschleißes im Öl durch Ölverbrauch und Verschleißverlust auf das Verschleißmeßergebnis ausführlich behandelt. Die Entwicklungen zum mobilen Verschleißmeßsystem für die Gewinnung von Feldtestdaten und zum Ölprobenmeßverfahren und zum automatischen Ölprobenziehgerät sowie die Entwicklung, Erprobung und die Eichverfahren der Filtermeßanlage werden nur kurz erwähnt, es wird dabei auf die Literatur verwiesen.

Die Langzeit- und Kurzzeitversuche haben die Daten für die Grundgesamtheiten geliefert, darüberhinaus lieferten sie bisher unbekannte Erkenntnisse hinsichtlich des Verschleißverhaltens der drei untersuchten Motorbauteile. Unbekannt war bisher die gleichartige Verschleißratencharakteristik für die Ringlauffläche und die Büchse (OT) während des Einlaufes mit dem sich daran anschließenden konstanten Verschleißratenverlauf bis zum Ausfall des Kolbenringes.

Besonders bemerkenswertes Ergebnis am Motor D sind die Ringflankenverschleißratenverläufe und die gleichen Verschleißbeschleunigungswerte vor dem Ausfall der Ringe durch Bruch. Diese Ergebnisse führten zur Durchführung der Versuche mit Bauteilen künstlich vergrößerten Spiels. Auch hier werden bei zum Bruch der Kolbenringe führenden Paarungen die gleichen Verschleißbeschleunigungswerte der Ringflanken gemessen.

Mit Hilfe der Spielversuche lassen sich Ergebnisse gewinnen, die zu einem einfachen Verfahren führen, mit dem eine Laufzeitabschätzung der Kolbenringe bezüglich des Ringbruches getroffen werden kann. Das Verfahren benötigt Daten, die durch kurze Motorversuche ermittelbar sind. Außerdem gehen Erfahrungswerte der Motorhersteller und -betreiber ein.

Aus jetziger Sicht erscheint es besonders interessant

durch ergänzende Arbeiten, das Phänomen der gleichen Verschleißbeschleunigung vor dem Bruch des Kolbenringes näher zu untersuchen, sowie das damit verbundene Verfahren zur Laufzeitabschätzung der Kolbenringe mittels künstlich vergrößerten Kolbenringsspielen zu verbessern.

10. L I T E R A T U R V E R Z E I C H N I S

1. Pavelescu, D.: Statistical calculation of the wear rate and service life
First European Tribology Congress, London, September 25-27, 1973, S.97-100
2. Beck, G.: Zylinder- und Kolbenringverschleiß
Deutsche Kraftfahrtforschung, Heft 29, (1939) S.1-11
3. Sreenath, A.V., Venkatesh, S.: Experimental studies on the wear of engine components
Wear 16 (1970), S.245-254
4. Motorenwerke Mannheim Mannheim(1973), persönliche Mitteilung
5. Lalow, J.R.B., Epton, S.R.: Kolbenringverschleiß von Ottomotoren
Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) 65, (1963), Heft 6, S.1-7
6. Charlesworth, W.H., Brown, W.L.: Wear of chromium piston rings in modern automotive engines
SAE Transactions 76, (1968), Paper 670042, S.386-399
7. Imre, A.: Information about the work of the Radioisotope Laboratory of the Research Institute of the Automotive Industry in the field of abrasive wear
Budapest, Oktober 1973, persönliche Mitteilung
8. Khrushchov, M.M.: Wear dynamics of machine parts
Russian engineering Journal 46, (1966) No.8, S.3-8
9. Klemushin, F.M.: Verschleißberechnung von Schiffsmotorbauteilen (in russisch)
Sudostroenie 29, (1963), No.7, S.56-59

10. Lees, H.D.: Statistics on cylinder wear in marine diesel engines
Wear 2 (1958/59), S.273-295
11. Seifert, A.: Ein Beitrag zum Zylinder- und Kolbenringverschleiß bei Dieselmotoren für Traktoren
Wear 3, (1960), S.426-439
12. Wellinger, K., Uetz, H., Breckel, H.: Verschleiß an Zylinderlaufbüchsen aus Schleuderguß
Motortechnische Zeitschrift (MTZ), 23, (1962), S.307-320
13. Korogodskii, M.V., Potievskii, Z.L.: Distribution laws of machine life criteria
Russian Engineering Journal 50, (1970), No.11, S.42-45
14. Trofinov, O.F., u.a.: Life assessments of vehicle structures using the random-functions theory
Russian Engineering Journal 51, (1971), No.10, S.13-17
15. Sheinin, A.M.: Volume, type and duration of reliability testing
Russian Engineering Journal 50, (1970), No.11, S.38-41
16. Schafer, R.E., Feduccia, A.J.: Prior distributions fitted to observed reliability data
IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-21, (1972), S.148-154
17. Sewengen, S.V., Kogaev, V.P.: Life of machine components and the probability of failure
Russian Engineering Journal 46, (1966) No.1, S.6-11
18. Tartakovskii, J.B.: Statistical study of the wear process in machine components
Russian Engineering Journal 44, (1964), No.6, S.49-54

19. Aleksandrev, A.M.: Wear and usage-rate norms for marine diesel-engine components
Russian Engineering Journal 49, (1969), No.12, S.31-33
20. Tartakovskii, J.B.: Correlation equations of wear
Russian Engineering Journal 48, (1968), No.2, S.8-11
21. Tartakovskii, J.B.: Calculating the wear on machine components
Russian Engineering Journal 47, (1967), No.9, S.33-37
22. Tartakovskii, J.B.: Predicting the wear on railway wheels
Russian Engineering Journal 49, (1969), No.4, S.17-20
23. Tartakovskii, J.B.: Scheinbare und tatsächliche Verschleißkurven (in russisch)
Standarty i Kachestvo 30, (1966), No.12, S.17-20
24. Tartakovskii, J.B.: Wear of machine parts as a random quantity
Russian Engineering Journal 46, (1966), No.2, S.3-8
25. Lausch, W.: Möglichkeit einer Extrapolation vom Kurzzeitverschleißverhalten auf den Langzeitverschleiß
Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) Frankfurt, (1972), Heft R 222 (Isotopenanwendung in der Forschung des Verbrennungskraftmaschinenbaus)
26. Pavelescu, D.: Determination of the importance of some wear factors by statistical analysis
Rev. Roum. Sci. Techn.-Mec. Appl., 13, (1968), No.2, S.293-303

27. Pavelescu, D.,
Musat, M.: On the accuracy of the relations for
the statistical calculation of the
wear rate in a friction pair with li-
near contact
Rev. Roum. Sci. Techn.-Mec. Appl., 16,
(1971), No.5, S.1135-1148, Bucarest
28. Gesellschaft für
Kernforschung mbH.,
Karlsruhe Bericht über die Tätigkeit der In-
stitute und Abteilungen im Jahre 1975,
KFK 2275, S.320
29. Kreyszig, E.: Statistische Methoden und ihre An-
wendungen
3. Auflage, Vandenhoeck + Ruprecht,
Göttingen (1968)
30. Weber, E.: Grundriß der biologischen Statistik
4. Auflage, VEB Gustav Fischer Verlag,
Jena (1961)
31. Soom, E.: Varianzanalyse, Regressionsanalyse
und Korrelationsrechnung
Heft 102, Verlag Technische Rundschau
im Hallwag Verlag Bern, Stuttgart,
(1972)
32. N.N. Klöckner-Humboldt-Deutz AG, Köln-Porz
Verschleiß-Statistik nach der Koinzi-
denten-Methode
(1972), unveröffentlicht
33. Weibull, W.: A statistical distribution function
of wide applicability
Journal of Applied Mechanics, 18, (1951),
S.293-297
34. Sachs, L.: Statistische Auswertemethoden
2. Auflage, Springer-Verlag Berlin,
Heidelberg, New York, (1969)
35. Smirnow, N.W.,
Dunin-Barkowski, J.W.: Mathematische Statistik in der Technik
VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften,
Berlin (1963)

36. Bronstein, J.N.,
Semendjajew, K.A.: Taschenbuch der Mathematik
7. Auflage, Verlag Harry Deutsch,
Zürich, Frankfurt/M., (1967)
37. Lausch, W.: Radionuklidtechnische Meßsysteme und
verbesserte Auswertemethoden für Ver-
schleißanlagen an stationären und mo-
bilien Systemen
Kerntechnik 18, (1976), S.475-481
38. Gervé, A.: Moderne Möglichkeiten der Verschleiß-
messung mit radioaktiven Isotopen
Zeitschrift für Werkstofftechnik 3,
(1972), S.81-86
39. Lausch, W.: Moderne Möglichkeiten der Verschleiß-
messung mit Radionukliden
KFK-Nachrichten 4, (1972), S.20-26
40. Gervé, A.: Radioisotope tracers in industry and
geophysics
International Atomic Energy Agency,
Vienna, (1967), S.81-92
41. Ziegler, P.: Grundlagen zum Ölprobenmeßverfahren
und Erstellung eines automatisch ar-
beitenden Ölprobenziehgerätes
Diplomarbeit Universität Karlsruhe,
Karlsruhe (1975)
42. Fautz, M.: Ein Verfahren zur Teilchengrößenanalyse
von Verschleißteilchen
KFK-Bericht Nr.2243, (1976)
43. Rumpf, H.: Untersuchungen zur Genauigkeit der
Kornanalyse
Staub, Zeitschrift für Staubhygiene, 20,
(1960), S.253-256
44. Katzenmeier, G.,
Volz, J.: Einsatzmöglichkeiten eines Radionuklid-
meßwagens im Maschinenbau
Kerntechnik 16, (1974), S.145-152

45. Haury, H.:
Konstruktion und Fertigung einer mobilen Verschleißmeßanlage nach dem Durchflußprinzip für den Einsatz in Mittelklassepersonenkraftwagen
Diplomarbeit Universität Karlsruhe, Karlsruhe (1974)
46. Gervé, A.,
Haury, H.,
Lausch, W.:
Verschleißmeßanlage nach dem Durchflußprinzip für den Einsatz in Fahrzeugen und mobilen Systemen
DT/OS 2507172
47. Tödte, B.:
Erstellung und Erprobung einer modifizierten Standard-Radionuklidmeßanlage zur Erfassung des Verschleißverhaltens von Motorbauteilen im Fahrzeugeinsatz
Diplomarbeit Universität Karlsruhe, Karlsruhe (1974)
48. Deterding, J.H.,
Calow, J.R.B.:
Piston ring wear (The application of radiotracers to the measurement of engine wear in moving vehicles
Automobile Engineer, Oct.(1958), S.1-4
49. Vysotskiy, D.J.,
Beloglazov, G.J.,
Golov, V.J.,
Kaznacheev, V.P.:
Mobile laboratory for studying the wearing of parts by means of radioactive isotopes
Organ of the Government, Sci.-Tech. Committee, USSR, Sept. (1959), S.24-26
50. Volz, J.:
Erste Erfahrung mit einem mobilen Radionuklid-Verschleißmeßsystem
Automobiltechnische Zeitung 76, (1974), S.95
51. Sprich, W.:
Statistische Auswertung von Verschleißmeßergebnissen mit dem Ziel einer Extrapolation vom Kurzzeit- auf das Langzeitverschleißverhalten
Diplomarbeit Universität Karlsruhe, Karlsruhe (1976)

52. Haury, H.: Entwurf einer mobilen Verschleißmeß-
anlage nach dem Durchflußprinzip für
den Einsatz in Mittelklasse-Personen-
kraftwagen
unveröffentlicht (1974)
53. Lausch, W.,
Roth, H.,
Stöber, D.: Erprobung einer mobilen Verschleißmeß-
anlage in einem Mittelklasse-Personen-
kraftwagen
unveröffentlicht (1976)
54. Schäfer, J.: Radionuklid-Verschleißmeßsystem zur
gleichzeitigen Erfassung des Verschleißes
im Schmieröl und im Ölfilter von Ver-
brennungsmotoren
Diplomarbeit Universität Karlsruhe,
Karlsruhe (1976)
55. Kaspar-Sickermann, W.: Methoden und Ergebnisse der Verschleiß-
messung an Kolbenringen mit Hilfe ra-
dioaktiver Isotope
Forschungsvereinigung Verbrennungs-
kraftmaschinen e.V., Frankfurt, Heft 18,
(1961)
56. Sprich, W.: Aufbereitung von kontaminiertem Altöl
durch Entzug von radioaktiven Partikeln
unveröffentlicht (1976)
57. Kaiser, W.: Der Einfluß verschiedener Kolbenring-
und Nutformen sowie der Nutwerkstoffe
auf den Ring- und Nutverschleiß in einem
6-Zylinder-Dieselmotor (Experimentelle
Untersuchungen mit Hilfe von Radio-
isotopen)
KFK-Bericht Nr.1568, (1972)
58. Volz, J.: Erstellung optimierter Einlaufprogramme
von Dieselmotoren (Ein System unter An-
wendung von Radionukliden)
KFK-Bericht Nr.2432, (1977)

59. Lausch, W.,
Volz, J.: Motorverschleißprogramme. Zwischenbericht zum Stand der Arbeiten:
I. Optimierung von Motoreinlaufprogrammen
II. Extrapolation des Kurzzeitverschleißverhaltens auf den Langzeitverschleiß
Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., Frankfurt, Heft R 279, (1976)
60. Rüdinger, V.,
Schwannecke, H.: Die motorische Prüfung des Verschleißschutzes von Schmierölen mit Hilfe von Radionukliden
Compendium 75/76, 3. DGMK-Fachgruppentagung vom 6.-8.10.1976 in Hannover, S.385-396
61. Gervé, A.,
Volz, J.,
Stöber, D.: Einsatz eines Prozeßrechners zur Automation eines Verbrennungsmotorenprüfstandes
Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., Frankfurt, Heft 185, (1975)
62. Klöckner-Humboldt-
Deutz AG, Köln-Porz Köln (1972), persönliche Mitteilung
63. Deutsche Gesellschaft
für Qualität e.V.,
Frankfurt Wahrscheinlichkeitsnetz für die Weibull-Verteilung nach Stange und Gumbel mit Auswertebblatt
Beuth-Verlag Berlin, (1975)
64. Mahle GmbH.,
Stuttgart Persönliche Mitteilung (1976)
65. Barth, H.,
Gervé, A.,
Herkert, B.,
Katzenmeier, G.,
Rühl, E.: Dünnschichtaktivierungen von Maschinenteilen
KFK-Bericht Nr.1783, (1973)
66. Götze-Werke AG,
Burscheid Kolbenringe für den Großmotoren- und Maschinenbau
Drucksache Nr.751 (1961)

67. Rüdinger, V.: Prüfung von Motorenölen im thermisch hochbelasteten Ottomotor und in der Teststreifenapparatur
Dissertation Universität Karlsruhe, Karlsruhe 1972
68. Götze-Werke AG, Burscheid: Flattern und Brechen von Kolbenringen
Arbeitsgespräch am 16./17.11.1967 in Burscheid (Druckschrift)
69. Englisch, C.: Kolbenringe, Band 1; Theorie, Herstellung und Bemessung
Springer-Verlag, Wien (1958)
70. Lausch, W.: Korrektur des Verschleißverlustes durch Ölverbrauch
unveröffentlicht (1974)
71. Lausch, W.: Ergebnisse der Erprobung des mobilen Verschleißmeßsystems
unveröffentlicht (1977)
72. verschiedene Verfasser: Einstreuungseffekte bei Szintillationskristallen und ihre Auswirkungen auf radionuklidtechnische Verschleißmessungen
unveröffentlicht (1970-1977)

11.	A N H A N G	Seite
A I	Testen von Hypothesen	1
A II	Funktionsverlauf der Konzentration und der Masse des Abriebs im Öl über der relativ verbrauchten Ölmenge.	3
A III	Versuchsliste und Versuchsstunden-Gesamtübersicht	8
A IV	Auswerteprogramme	14

A I Testen von Hypothesen

Um die Anwendungen der in den vorhergehenden Kapiteln benutzten Tests verständlich zu machen, soll kurz auf die Grundlagen der Teststatistik eingegangen werden.

Unter einer Hypothese versteht man in der Statistik die Annahme über die Verteilung und deren Parameter einer Zufallsvariablen, der Test ist ein Prüfverfahren, das die Entscheidung entweder: "Annahme der Hypothese" oder: "Ablehnung der Hypothese" ermöglicht.

Ein solcher Test kann nicht zu einer sicheren, sondern nur zu einer eingeschränkten Entscheidung führen. Ein Maß für den Grad der Einschränkung der Entscheidung ist die Irrtumswahrscheinlichkeit α .

Üblicherweise wählt man $\alpha = 5\%$ oder 1% . Bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von z.B. $\alpha = 1\%$ riskiert man im Mittel in 1 von 100 Fällen, daß die aufgestellte Hypothese verworfen wird, obwohl sie richtig ist. Die Standardtests der Statistik werden mit einer Prüfgröße durchgeführt, die eine bekannte Verteilung aufweist. Eine solche Prüfgröße gibt außerdem eine Rechenvorschrift, nach der aus einer gegebenen Stichprobe vom Umfang n eine Zahl berechnet wird. Der Test besteht darin, daß zu testende und Prüfgröße miteinander verglichen werden. Beispielsweise sei X eine normalverteilte Zufallsvariable mit bekannter Varianz σ^2 und bekanntem Erwartungswert μ_0 . Aus einer Stichprobe am Umfang n wird ein Mittelwert \bar{x} berechnet und es wird die Nullhypothese $\bar{x} - \mu_0 = 0$ aufgestellt, d.h. die Hypothese, daß der berechnete Mittelwert nicht oder nur zufällig vom Erwartungswert abweicht.

Als Prüfgröße dient dabei:

$$\frac{\bar{x} - \mu_0}{\sigma} \cdot \sqrt{n} = \bar{z} \quad (A1)$$

Theoretisch ist die Größe \bar{z} standardnormalverteilt mit dem Mittelwert 0. Der von der Stichprobe abhängige Wert wird von 0 mehr oder weniger abweichen, das Maß für die Abweichung sei $|\bar{z}|$.

Je nach vorgegebenem α läßt sich nun ein kritischer Wert C angeben, so daß bei Zutreffen der Hypothese gilt:

$$P (|\bar{z}| > C) = \alpha \quad (A2)$$

das heißt, die Wahrscheinlichkeit, daß die Abweichung $|\bar{z}| > C$ ist, ist gleich der vorgegebenen Irrtumswahrscheinlichkeit α . Ergibt die aus der Stichprobe berechnete Abweichung einen Wert $|\bar{z}| \leq C$, so nimmt man an, daß die von 0 verschiedene Abweichung zufallsbedingt ist. Die Nullhypothese wird durch die Stichprobe nicht widerlegt! Ist der errechnete Wert $|\bar{z}| > C$, so lehnt man die Nullhypothese $\bar{x} - \mu_0 = 0$ ab, da diese Abweichung nicht mehr als zufällig betrachtet werden kann /29,34,35/.

AII Funktionsverlauf der Konzentration und der Masse des Abriebs im Öl über der relativ verbrauchten Ölmenge

Definition:

$$y = 1 - \frac{V_i(t)}{V_{i,0}} \quad (A1)$$

$$y = 1 - x$$

1) Konzentrationsverlauf

Aus (49):

$$C(t) = C_{i,0} + \frac{m_i}{V_i} \ln \frac{1}{x} \quad (A3)$$

Der Konzentrationsverlauf des Abriebs im Öl zeigt, daß mit wachsendem relativen Ölverbrauch der Einfluß des Verschleißverlustes durch Ölverbrauch auf die Konzentrationsänderung des Abriebs im Öl zunimmt, da die Steigung der Kurve monoton ist. Daraus läßt sich die Forderung ableiten, das System stets mit geringem relativen Ölverbrauch zu betreiben, d.h. den Ölverlust oft auszugleichen.

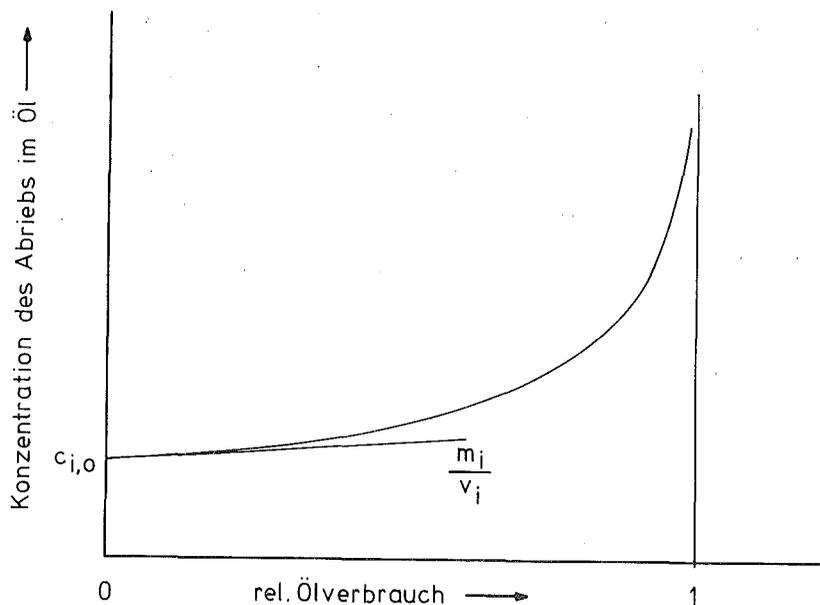


Fig. A 1: Funktionsverlauf der Konzentration des Abriebs im Öl über dem relativen Ölverbrauch

2) Abriebverlauf im Öl im i-ten Ölintervall:

Aus (48):

$$M_{\text{Öl}}(t) = M_{\text{Öl } i,0} \cdot x + \frac{m_i}{v_i} \cdot V_{i,0} \cdot x \cdot \ln \frac{1}{x} \quad (\text{A4})$$

$$= M_{\text{Öl } i,0} (1-y) + \frac{m_i}{v_i} V_{i,0} (1-y) \cdot \ln \frac{1}{1-y} \quad (\text{A5})$$

Es sind mehrere Fälle möglich:

$$\text{I} \quad M_{\text{Öl } i,0} = 0$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{II} \\ \text{III} \\ \text{IV} \end{array} \right\} M_{\text{Öl } i,0} \quad \left\{ \begin{array}{l} < \\ = \\ \gg \end{array} \right\} \frac{m_i}{v_i} V_{i,0}$$

Fall I, siehe Fig. A 2

Fall II, III, IV, siehe Fig. A 3.

Fig. A 2 und A 3 zeigen, daß es für die Kurven I und die Kurve II, die praktisch alle Anwendungsfälle darstellen, einen Punkt gibt, wo die Kurven eine horizontale Tangente haben, d.h., der Verschleißverlust durch Ölverbrauch ändert nicht die Restmasse im Ölsumpf. Dies geschieht bei um so kleineren relativen Ölverbräuchen, je mehr sich $M_{\text{Öl } i,0} \frac{m_i}{v_i} V_{i,0}$ nähert. Bei Gleichheit geschieht es bei $y = 0$ (Kurve III). Nach den Maxima der Kurven I und II nimmt die Abriebmasse im Öl immer stärker ab.

Die in Fig. A 3 bezeichneten Steigungen $a_{i,y}$ haben folgende Werte:

$$a_{\text{I},0} = \frac{m_i}{v_i} \cdot V_{i,0}$$

$$a_{\text{II},0} = \frac{m_i}{v_i} V_{i,0} - M_{\text{Öl } i,0}$$

$$a_{III,0} = 0$$

$$a_{IV,y} = -M_{\text{öl } i,0} \quad (\text{gilt für den ganzen Bereich})$$

Für die Maxima der Kurven I und II gilt:

Maximale Abriebmasse im Öl:

$$b_I = \frac{m_i}{v_i} V_{i,0} \cdot e^{-1}$$

$$b_{II} = \left(M_{\text{öl } i,0} + \frac{m_i}{v_i} V_{i,0} \left(1 - \frac{v_i}{m_i} \cdot \frac{M_{\text{öl } i,0}}{V_{i,0}} \right) \right) \cdot \exp \left(\frac{v_i}{m_i} \frac{M_{\text{öl } i,0}}{V_{i,0}} - 1 \right)$$

$$b_{II} < b_I$$

Bei relativen Ölverbräuchen von:

$$c_I = 1 - e^{-1}$$

$$c_{II} = 1 - \exp \left(\frac{v_i}{m_i} \frac{M_{\text{öl } i,0}}{V_{i,0}} - 1 \right)$$

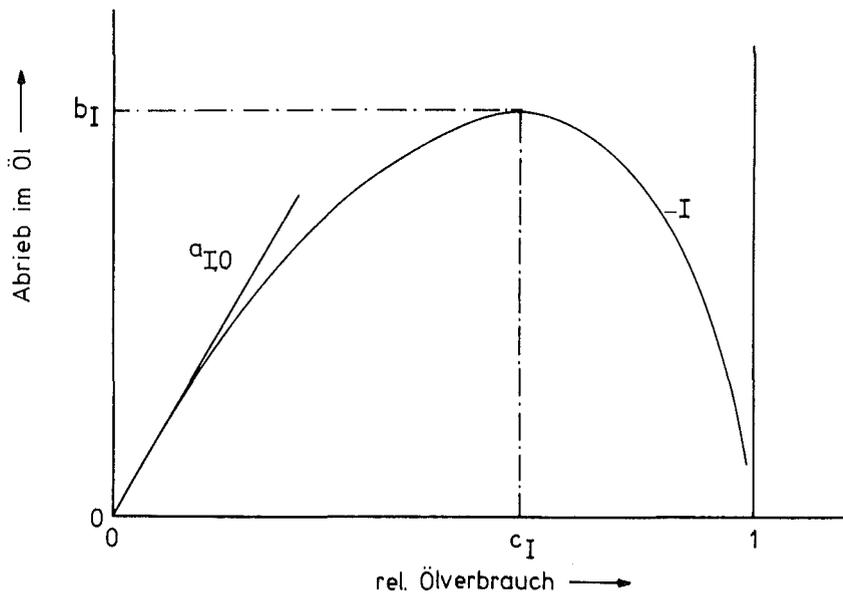


Fig. A 2: Funktionsverlauf der Masse des Abriebs im Öl über dem relativen Ölverbrauch

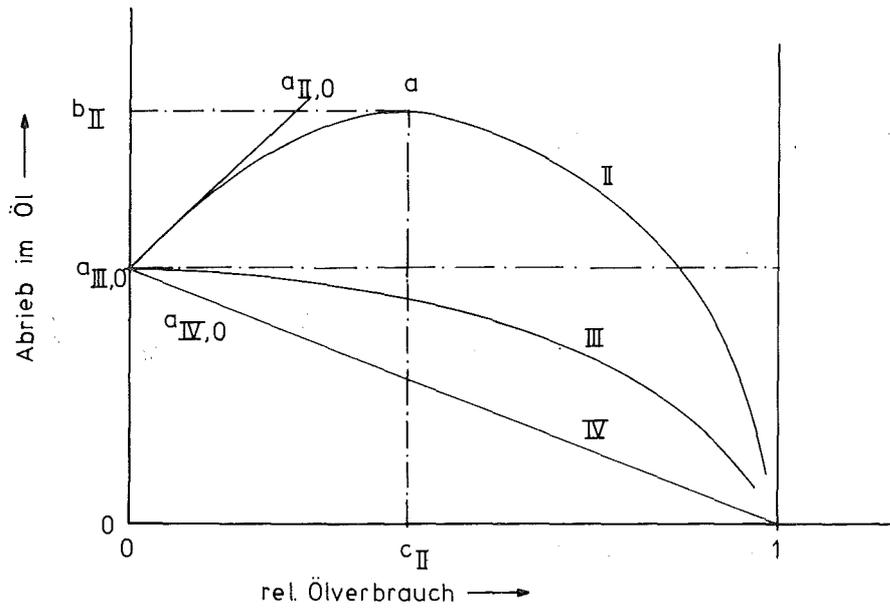


Fig. A 3: Funktionsverlauf der Masse des Abriebs im Öl über dem relativen Ölverbrauch

A N H A N G I I I

Versuchsliste DB und KHD-Versuche

Versuchs- bezeichn.	Motor	Durchführungs- ort	Datum	Laufzeit	Bemerkung
LZ DB 1	B	Zuffenhausen	24. 9. 1973		Start
			24. 9. - 26. 9.73	0-45	1. Meßwagen-Einsatz
			30.11. 1973	532	Ende wegen Wassereinbruch
KZ DB 2	A	LIT	7.11. - 19.11.73	0-56	
KZ DB 3	A	LIT	30.11. - 3.12.73	0-50	
KZ DB 4	A	LIT	28. 2. - 7. 3.74	0-77	
KZ DB 5 *	A	LIT	8. 3. - 9. 3.74	0-12	neuer Ring, Büchse und Kolben von KZ DB 4
KZ DB 6	A	LIT	16. 9. - 20. 9.74	0-53	Ende wegen Kopfriß
KZ KHD 1	E	LIT	27. 8. - 24. 8.73	0-56	Ende, Kardanwellenbruch
KZ KHD 2	E	LIT	21. 3. - 22. 3.74	420-435	
KZ KHD 3	E	LIT	22. 3. - 30. 3.74	0-89	
LZ KHD 4	F	Porz	2. 7. 74		Start
			2. 7. - 5. 7.74	0-60	1. Meßwagen-Einsatz
			24. 9. - 28. 9.74	1426-1507	2. Meßwagen-Einsatz
			10.12. - 13.12.74	2655-2732	3. Meßwagen-Einsatz
			15. 1.75	3104	Versuchsende (planmäßig)

* = Versuche mit Bestückungen, die aus unterschiedlich gelaufenen Teilen bestehen und auch zum Einlaufoptimierungsprogramm gehören.

Versuchsliste MWM-Versuche

Versuchs- bezeichn.	Motor	Durchführungs- ort	Datum	Laufzeit	Bemerkung
LZ MWM 1	D	Mannheim	28. 5. - 29. 5.73	0-9	abgebr.weg.Kolbenfresser
LZ MWM 2	D	Mannheim	19. 9. 73		Start
			19. 9. - 21. 9.73	0-47	1. Meßwagen-Einsatz
			10.12. - 11.12.73	1558-1580	2. Meßwagen-Einsatz
Am 11.12.1973 Versuchsunterbrechung wegen Nachaktivierung					
LZ MWM 2	D	Mannheim	28. 1. - 30. 1.74	1601-1640	3. Meßwagen-Einsatz
			2. 3. - 3. 3.74	2335-2362	4. Meßwagen-Einsatz
			2. 4. - 3. 4.74	2980-3018	5. Meßwagen-Einsatz
			13. 5. - 14. 5.74	3800-3830	6. Meßwagen-Einsatz
			22. 7. - 24. 7.74	4992-5037	7. Meßwagen-Einsatz
			27. 8. - 29. 8.74	5784-5828	8. Meßwagen-Einsatz
			23. 9.74	6414	Ende ; Kolbenringbruch
KZ MWM 3	D	Mannheim	26. 9. - 28. 9.73	0-45	
LZ MWM 4	D	Mannheim	28. 2. 74		Start
			28. 2. - 1. 3.74	0-40	1. Meßwagen-Einsatz
			4. 4. - 4. 4.74	523-556	2. Meßwagen-Einsatz
			15. 5. - 16. 5.74	1061-1094	3. Meßwagen-Einsatz
			29. 8. - 31. 8.74	1928-1969	4. Meßwagen-Einsatz
			31.10.74	2733	Ende ; Kolbenringbruch
KZ MWM 5	D	Mannheim	25. 3. - 29. 3.74	0-81	
KZ MWM 6	D	Mannheim	29. 3. - 2. 4.74	0-81	
KZ MWM 7	D	Mannheim	27. 1. 75	0-6	abgebr.weg.def.Büchse
KZ MWM 8	C	Mannheim	28. 1. - 30. 1.75	0-46	

Versuchsliste MWM-Versuche

Versuchs- bezeichn.	Motor	Durchführungs- ort	Datum	Laufzeit	Bemerkung
KZ MWM 9	C	Mannheim	31. 1. - 2. 2.75	0-66	
LZ MWM 10	D	Mannheim	21. 2. 75		Start
			21. 2. - 24. 2.75	0-68	1. Meßwagen-Einsatz
			26. 5. - 28. 5.75	1522-1569	2. Meßwagen-Einsatz
			6. 8. - 9. 8.75	2622-2685	3. Meßwageneinsatz
			15. 8. 75	2733	Ende ; Kolben- und Ringfresser
KZ MWM 11	D	L I T	24. 4. - 4. 5.75	2404-2439	Teil aus LZ MWM 2
KZ MWM 12	D	L I T	5. 5. - 7. 5.75	1084-1124	Teil aus LZ MWM 2
KZ MWM 13	D	L I T	10. 6. - 13. 6.75	1589-1662	
KZ MWM 14	D	L I T	9. 9. - 11. 9.75	1144-1200	Teil aus LZ MWM 4
KZ MWM 15	D	L I T	13. 9. - 14. 9.75	1144-1199	Teil aus LZ MWM 4
KZ MWM 16	D	L I T	15. 9. - 18. 9.75	1220-1273	
KZ MWM 17	D	L I T	18. 9. - 20. 9.75	1220-1273	
Versuchsserie mit Teilen erweiterten Spiels					
KZ MWM 18	D	L I T	15.10. - 29.10.75	0-77	normale Teile
KZ MWM 19	D	L I T	31.10. - 3.11.75	0-74	Kolbennut + 75 µm
KZ WWM 20	D	L I T	3.11. - 7.11.75	0-78	Kolbennut + 100 µm
KZ MWM 21	D	L I T	7.11. - 11.11.75	0-76	Kolbennut + 122 µm
			24. 2. - 27. 2.76	76-149	
KZ MWM 22	D	L I T	12.11. - 15.11.75	0-71	Kolbennut + 155 µm
			19. 2. - 21. 2.76	71-109	

Versuchsliste MWM-Versuche

Versuchs- bezeichn.	Motor	Durchführungs- ort	Datum	Laufzeit	Bemerkung
KZ MWM 23	D	L I T	27.11. - 1.12.75	0-75	Kolbennut + 200 µm
			5. 2. - 6. 2.76	75-96	Ringbruch nach 83 h
KZ MWM 24	D	L I T	2.12. - 5.12.75	0-71	Ringhöhe - 71 µm
KZ MWM 25	D	L I T	5.12. - 10.12.75	0-75	Ringhöhe - 107 µm
KZ MWM 26	D	L I T	10.12. - 13.12.75	0-74	Ringhöhe - 155 µm
KZ MWM 27	D	L I F	13.12. - 17.12.75	0-84	Ringhöhe - 193 µm
KZ MWM 28	D	L I T	17.12. - 20.12.75	0-76	Ringhöhe - 196 µm
			9. 2. - 19. 2.76	76-184	
KZ MWM 29	D	L I T	7. 1. 76	0-11	Ringhöhe - 117 µm (einfach gebrochener Ring eingebaut)
KZ MWM 30	D	L I T	27. 4. - 1. 5.76	0-69	normale Teile
KZ MWM 31	D	L I T	3. 5. - 9. 5.76	0-102	Kolbennut + 202 µm
KZ MWM 32	D	L I T	10. 5. - 16. 5.76	0-97	Ringbruch nach 98 h Ringhöhe - 200 µm
					Kolbenfresser nach 97 h durch totalen Ölverlust
KZ MWM 33	D	L I T	17. 5. - 25. 5.76	0-166	Kolbennut + 202 µm
					Ringbr. Zeitp. unbek.
KZ MWM 34	D	L I T	31. 5. - 7. 6.76	0-130	Ringhöhe - 200 µm
					Ringbr. Zeitp. unbek.

wegen schräg Laufendem
Kolben Versuchs-
ergebnisse nur bedingt
brauchbar

Versuchsliste MWM-Versuche

Versuchs- bezeichn.	Motor	Durchführungs- ort	Datum	Laufzeit	Bemerkung
KZ MWM 35	D	L I T	7. 6. - 8. 6.76	0-32	Kolbennut + 202 µm Ringbr. nach 32 h
KZ MWM 36	D	L I T	9. 6. - 13. 6.76	0-53	Ringhöhe - 200 µm Ringbr. Zeitp. unbek.
KZ MWM 37	D	L I T	16. 6. - 25. 6.76	0-125	Kolbennut + 202 µm Ringfresser nach 122 h
KZ MWM 38	D	L I T	28. 6.76	0-2,5	Ringhöhe - 200 µm Ringbr. nach 2,1 h
KZ MWM 39	D	L I T	25. 8. - 26. 8.76	0-12	Kolbennut + 200 µm Ringbr. nach 11 h
KZ MWM 40	D	L I T	26. 8. - 2. 9.76	0-141	Ringhöhe - 200 µm Ringbr. nach 132 h
KZ MWM 41	D	L I T	2. 9. - 7. 9.76	0-110	Kolbennut + 200 µm Ringbruch nach 71 h
KZ MWM 42	D	L I T	7. 9. - 8. 9.76	0-9,5	Ringhöhe - 200 µm Ringbruch nach 9,5 h
KZ MWM 43	D	L I T	9. 9.76	0-11,5	Kolbennut + 200 µm Ringbr. nach 11,5 h
KZ MWM 44	D	L I T	10. 9. - 13. 9.76	0-5	Ringhöhe - 200 µm Ringbruch nach 5 h
KZ MWM 45	D	L I T	13. 9. - 15. 9.76	0-53	Blindversuch mit normalen Teilen

Wegen schräg laufendem
 Kolben Versuchsergeb-
 nisse nur bedingt
 brauchbar

LZ = Langzeitversuche

KZ = Kurzzeitversuche

Versuchsstunden-Gesamtübersicht

1. MWM

a) Langzeitversuche	11 880 h
b) Normalmaßversuche	480 h
c) Versuche mit alten Paarungen	365 h
d) 1. Serie erweitertes Spiel	1 005 h
e) 2. Serie erweitertes Spiel	709 h
f) 3. Serie erweitertes Spiel	289 h

2. KHD

a) Langzeitversuche	3 104 h
b) Normalmaßversuche	145 h
c) Versuche mit alten Paarungen	15 h

3. DB

a) Langzeitversuche	532 h
b) Normalmaßversuche	248 h

Summe aller Versuchsstunden mit aktiven Bestückungen	18 772 h
davon im LIT	2 916 h
Summe aller Blindversuche ca.	150 h

A N H A N G I V

```
2 PRINT " BERECHNUNG DES VERSCHLEISSES ANHAND DER ZAEHLRATEN"
3 PRINT " EINSCHL. KORREKTUR DES VERSCHLEISSVERLUSTES DURCH"
4 PRINT " DELVERBRAUCH UND ANLAGERUNG IM SCHMIERDELFILTER"
10 PRINT
12 PRINT "*****"
17 PRINT "*****"
20 PRINT "EINLEGEN VON BAND UND LOCHSTREIFEN!!!!!!!!!"
23 PRINT "WIEVIELE BLOECKE SIND SCHON AUF BAND?"
24 INPUT L
25 FOR I=1 TO L
26 CALL (7,6,S,0)
27 IF S#4 THEN 26
28 NEXT I
40 PRINT
45 READ N
50 PRINT "ANZAHL DER KOMPONENTEN ";N
52 LET P=1
60 DIM A(6,6),B(6,6),G(13)
65 DIM U(6),E(6),T(6),X(7),Y(6),V(6),F(6)
70 MAT READ A(N,N)
82 MAT B=ZER(N,N)
84 MAT I=ZER(9)
85 MAT B=INV(A)
86 MAT C=ZER(N)
87 PRINT "EINGEFUELLTES DELVOLUMEN"
89 INPUT V0
90 PRINT "DELVERBRAUCH IM 1.INTERVALL"
91 INPUT V1
92 LET V1=V1/60
93 PRINT "WIE OFT WIRD DEL NACHGEFUELLT?"
94 INPUT K7
95 PRINT "ZEIT DER NACHFUELLUNG,MENGE,VERBRAUCH ML/H"
96 FOR I=1 TO K7
97 INPUT I(I),H(I),Q(I)
98 NEXT J
99 LET Z1=0
100 PRINT "WIEVIELE UNTERBRECHUNGEN"
101 INPUT B7
102 PRINT "ZEIT DER UNTERBRECHUNG,WIE LANGE"
103 FOR I=1 TO B7
104 INPUT L(I),W(I)
105 NEXT I
106 LET L(B7+1)=0
107 LET B7=1
109 MAT READ U(N),E(N),T(N)
110 PRINT "ANFANGSZEIT ? "
115 INPUT Z
120 MAT READ J(N),Z(N)
122 MAT READ R(N),S(N)
125 PRINT "WELCHE ZAEHLZEIT?"
130 INPUT X(1)
135 LET X(1)=X(1)*1000
154 CALL (1)
156 LET H=0
157 LET K=0
160 INPUT Q1
161 FOR I=2 TO 3*N+1
162 INPUT X(I)
163 NEXT I
165 IF Q1=0 THEN 290
168 IF Z=I(P) THEN 400
175 LET Z0=X(1)/1000
176 LET Z=Z+Z0
177 IF Z#L(B7) THEN 181
178 LET Z=Z+W(B7)
179 LET B7=B7+1
180 GOTO 160
```

```
181 LET Z1=Z1+Z0
182 LET V6=V0-V1*Z1
183 LET A1=V1*Z1/LOG(V0/V6)
184 LET A2=A1/V6
188 LET G[1]=Z
195 FOR I=1 TO N
196 LET G[I+1]=X[I+1]
205 LET Y[I]=X[I+1]/Z0-U[I]
210 NEXT I
215 FOR I=1 TO N
217 LET F1=0
220 LET V[I]=0
225 FOR J=1 TO N
230 LET V[I]=V[I]+Y[J]*B[I,J]
232 LET F1=F1+B[I,J]*2*(Y[J+1]+U[J]*Z0)
235 NEXT J
237 LET F[I]=ABS(SQR(F1)/(V[I]*Z0)*100)
238 LET M[I]=A2
239 LET V[I]=V[I]*E[I]*V6*EXP(Z*.693147/TL[I])
240 IF C[I]=0 THEN 243
241 LET M[I]=C[I]/V[I]+A2-A1*E[I]/(V0*V[I])
243 LET V[I]=V[I]*M[I]
250 LET G[I+N+1]=V[I]
251 NEXT I
252 FOR I=1 TO N
253 LET J5=0
254 LET J5=X[2*N+1+I]/Z0-J[I]-P[I]*Y[I]
255 LET J5=J5/(S[I]*Z[I])
256 LET G[2*N+1+I]=G[N+1+I]+J5
257 NEXT I
260 CALL (5,G[1],3*N+1,S,0)
261 IF S#0 THEN 260
262 LET H=H+1
280 GOTO 160
290 CALL (1)
291 CALL (7,3,S,0)
292 IF S#4 THEN 291
293 PRINT "ES WURDEN:" ,H,"MESSWERTE EINGELESEN"
294 PRINT
295 PRINT "SOLLEN WEITERE DATEN GESPEICHERT WERDEN?JA=1"
296 INPUT U
298 IF U=1 THEN 86
299 GOTO 500
300 DATA 2
305 DATA 1,.65,1.35500E-04,1
310 DATA 1920,650,2.70510E-09,1.15080E-07
315 DATA 40032.,64800.
320 DATA 1953,430,159219.,4322
325 DATA 8.24000E-02,8.87000E-02,.574,.486
400 REM DELNACHFUELLUNG
405 LET Z1=0
415 LET V0=V6+H[P]
420 LET V1=O[F]/60
425 LET P=P+1
430 FOR I=1 TO N
435 LET C[I]=V[I]
440 LET D[I]=V[I]/M[I]
450 NEXT I
455 GOTO 160
500 END
```

```
1 PRINT "                                DELPROBENAUSWERTUNG "
2 PRINT
3 PRINT "BERECHNUNG DES VERSCHLEISSES ANHAND DER ZAEHLRATEN"
4 PRINT "AUS DELPROBEN EINSCHLIESSLICH KORREKTUR DES"
5 PRINT "VERSCHLEISSVERLUSTES DURCH DELVERBRAUCH"
10 PRINT
22 LET K1=10
45 READ N
60 DIM A(3,3),B(3,3)
62 DIM N(3),M(3),G(3),D(3),C(3),U(3),E(3),T(3),X(4),Y(3)
65 DIM V(3),F(3)
70 MAT READ A(N,N)
75 PRINT "EINSTREUFAKTOREN"
80 MAT PRINT A
81 MAT N=ZER(N)
82 MAT B=ZER(N,N)
85 MAT B=INV(A)
90 PRINT
95 PRINT "INVERSE MATRIX"
100 MAT PRINT B
105 MAT READ U(N),T(N)
106 MAT READ D(N)
107 MAT READ C(N)
108 MAT READ X(N)
109 FOR I=1 TO N
110 LET E(I)=D(I)/(C(I)+X(I))
112 NEXT I
114 LET R=R1=0
115 PRINT "WURDE NULLMESSUNG DURCHGEFUEHRT? JA =1"
116 INPUT Q
122 PRINT
125 PRINT "EINGEF. DELVOLUMEN, DELVERBRAUCH ML/H, MESSZEIT MIN"
126 INPUT V0,V1,Z0
127 PRINT
128 PRINT
129 PRINT "REIHENFOLGE DES EINTIPPENS:"
130 PRINT "ZEIT NACH EICHUNG H, ZEIT ZIEHUNG DER PROBE H, ZAEHLRATEN"
131 LET V1=V1/60
132 PRINT
133 PRINT "*****"
134 PRINT " NR DER DELPROBE "
135 PRINT
136 INPUT L1
137 PRINT "*****"
138 PRINT
140 PRINT "DATEN??"
142 INPUT T1,Z,X(1),X(2),X(3)
146 FOR I=1 TO N
148 LET Y(I)=X(I)/Z0-U(I)
149 NEXT I
152 LET T1=T1*60
156 LET Z=Z*60
172 LET V6=V0-V1*Z
175 REM BERECHNUNG VON A
177 IF Z>0 THEN 183
178 IF Q#1 THEN 181
179 LET A2=1
180 GOTO 215
181 LET A1=0
182 GOTO 184
```

```
183 LET A1=V1*Z/LOG(V0/V6)
184 LET A2=A1/V6
215 FOR I=1 TO N
217 LET F1=0
220 LET XC(I)=0
225 FOR J=1 TO N
230 LET XC(I)=XC(I)+Y(I,J)*B(I,J)
232 LET F1=F1+B(I,J)+2*(Y(I,J)+2*U(I,J))*Z0
235 NEXT J
237 LET FC(I)=ABS(SQR(F1)/(XC(I)*Z0)+100)
238 LET MC(I)=A2
239 LET GC(I)=XC(I)*E(I)*V6*EXP(T1*.893147/T(I))
240 IF R1=0 THEN 243
241 LET MC(I)=GC(I)/GC(I)+A2-A1*DC(I)/(V0*GC(I))
243 LET VC(I)=GC(I)*MC(I)-MC(I)
245 PRINT "A";I;"=";MC(I);TAB(18);"V";I;"=";VC(I);TAB(36);"F";I;"=";FC(I)
255 NEXT I
262 PRINT
265 CALL (3,Z,1)
267 CALL (3,VC(I),N)
272 PRINT
275 IF Q#1 THEN 305
280 LET Q=0
290 FOR I=1 TO N
292 IF VC(I)<0 THEN 300
295 LET MC(I)=VC(I)
300 NEXT I
305 PRINT "WIRD DEL NACHGEFUELLT?JA =1"
310 INPUT R
311 LET Z=Z/60
315 IF R#1 THEN 132
320 LET R1=1
325 LET R=0
326 PRINT "DEL WURDE NACHGEFUELLT"
327 PRINT
330 FOR I=1 TO N
335 LET CC(I)=VC(I)
340 LET DC(I)=VC(I)/MC(I)
342 NEXT I
345 PRINT "NACHGEFUELLTES DELVOLUMEN, DELVERBRAUCH??"
350 INPUT V0,V1
355 LET V0=V6+V0
360 GOTO 131
400 REM ZAHL DER KOMPONENTEN
402 DATA 3
404 REM EINSTREUFAKTOREN
405 DATA 1,.39,.52,5.00000E-04,1,.6,0,.42,1
406 REM UNTERGRUND,HALBWERTSZEI
410 DATA 143,84,51,40032.,111450.,64800.
414 REM EICHPROBENGEWICHTE
415 DATA 1,1,1
416 REM EICHVOLUMINA
417 DATA 250,250,250
418 REM EICHZAEHLRATEN
420 DATA 13410,755,313
450 END
```