



KfK 2877  
Mai 1980

# **Entwicklung eines Radionuklid-Kurztests zur Bewertung des Verschleißschutzes von Schmierölen auf der Basis des OM 616-Kombitests**

J. Volz, W. Lausch  
Laboratorium für Isotopentechnik

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE  
Laboratorium für Isotopentechnik

KfK 2877

Entwicklung eines Radionuklid-Kurztests zur Bewertung  
des Verschleißschutzes von Schmierölen auf der Basis  
des OM 616-Kombitests

Jürgen Volz  
Wolfram Lausch

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
ISSN 0303-4003

Entwicklung eines Radionuklid-Kurztests zur Bewertung des Verschleißschutzes von Schmierölen auf der Basis des OM 616-Kombitests

---

In dem vorliegenden Bericht wird zunächst ein Überblick über die seit 1979 durchgeführten Untersuchungen zu einem Radionuklidtest auf der Basis des OM 616-Kombitests gegeben, die die Bewertung des Verschleißschutzverhaltens von Schmierölen im Zylinder- und Nockenwellenbereich zum Ziel hatten.

Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Untersuchungen wurde ein Vorschlag für die vorläufige Kurztestprozedur für den Zylinderverschleiß erarbeitet.

Diese vorläufige Prozedur wurde in einem Ringversuch, an dem neben LIT auch zwei Industriefirmen beteiligt waren, an einem bekannten Referenzöl und zwei Kandidatenölen überprüft. Die Erkenntnisse und Erfahrungen dieses Ringversuchs führten zu einer weiteren Verbesserung des Verfahrens. Sie lassen den Schluß zu, daß eine solche RNT-Kurztestprozedur für den Zylinderverschleiß mit Bezug zum Kombi-Test ein geeignetes Screening-Verfahren darstellt. Bei ausreichender Wiederholbarkeit bietet dieses Verfahren den großen Vorteil der Differenzierung zwischen Kaltwarmtest und Heißtest, liefert in kurzer Zeit die Ergebnisse und verursacht im Vergleich zum Kombitest erheblich geringere Kosten. Es stellt somit als Vorauswahltest eine nützliche Ergänzung des OM 616-Kombitests dar, der jedoch wegen seiner umfassenden Testaussagen in keinem Fall ersetzt werden kann.

## Development of a Radionuclide Short-Test for the Evaluation of Engine Oils in Respect to Cam- and Cylinder Liner Wear by Using OM 616 Kombi-Test Conditions

---

In this report a survey is given on the studies performed since 1973 on the development of radionuclide short-test procedure, based on the test procedure of the OM 616 Kombi-Test, for the evaluation of engine oils in respect to cam- and cylinder liner wear.

Out of the results of these studies on experimental short test procedure has been elaborated to evaluate cylinder liner wear. With this experimental procedure some round robin testing has been carried out by three laboratories using a well-known reference oil and two test oils. The results of this round robin test led to further improvements in the test procedure.

This improved test procedure has become a suitable screening-test for the development of engine oils in respect to cylinder liner wear. It never can replace the OM 616 Kombi-Test as a whole but it will complete it. The radionuclide short test gets results quicker and at lower costs than the Kombi-Test, discriminates between hot test and cold-warm test results, and gives results even with correlation to the Kombi-Test by comparison to an approved reference oil. For such screening work, the repeatability of the test is also sufficient.

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

	Seite
1. PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG	1
1.1 Kurzbeschreibung des OM 616-Kombitest	1
1.2 Möglichkeiten des Einsatzes der RNT im OM 616-Kombitest	2
1.3 Ziele und Lösungsweg für einen RNT-Kurztest auf Basis OM 616-Kombitest	3
2. RADIONUKLIDMESSTECHNIK	5
3. ANALYSE DES KOMBITESTS MIT HILFE DER RNT	9
3.1 Prinzipielle Untersuchung der Eignung von Zylinder- und Nockenverschleiß für eine Kurztestprozedur	9
3.1.1 Zeitverhalten der Verschleißrate im Zylinderbereich	10
3.1.2 Zeitverhalten der Verschleißrate im Nockenbereich	14
3.2 Analysen des OM 616-Kombitest im Zylinderbereich	21
3.2.1 Auswahl des Meßzylinders	21
3.2.2 Analyse des Anteils der einzelnen Betriebsphasen des Kombitests am Gesamtverschleiß	23
3.2.3 Einfluß von Prüf- und Motorbedingungen auf das Verschleißergebnis im Zylinderbereich	27
3.2.4 Möglichkeiten der Bewertung von RNT-Kurztestergebnissen mit Bezug zum Kombitestergebnis im Zylinderbereich	38
3.2.5 Erste Ergebnisse zur Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit mit RNT-Kurzläufen in Heißtest (HT) und Kalt-Warm-Test (KWT)	42
4. Vorläufige, im Ringversuch zu überprüfende Kurztestprozedur zur Beurteilung eines Schmiermittels aufgrund des Zylinderverschleißes	56

	<u>Seite</u>
5. RINGVERSUCH	59
5.1 Durchführung der Versuche	59
5.2 Ergebnisse des Ringversuchs	62
6. VORSCHLAG FÜR EIN RNT-KURZTESTVERFAHREN ZUR BEWERTUNG DES VERSCHLEISS-SCHUTZES VON SCHMIERÖLEN UND ANWEN- DUNGSMÖGLICHKEITEN	68
7. ZUSAMMENFASSUNG	72

Anhang:

A1	Einfluß der Kühlmittelaustrittstemperatur auf das Ver- schleißverhalten der Zylinderlauffläche beim Referenz- öl RL 74	1a
A2	Detail-Versuchsergebnisse des Ringversuches	4a



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

## 1.1 Kurzbeschreibung des OM 616-Kombitests

Der sogenannte OM 616-Kombitest ist ein Vollmotoren-Schmieröltest, der den Verschleißschutz der Schmieröle an Nockenwelle und Zylinderlaufbahn bewertet. Der Test wird mit einem weitgehend serienmäßigen Prüfmotor des Typs DB OM 616 mit 2,4 l Hubvolumen (Fahrzeugdieselmotor aus dem Daimler-Benz PKW 240 D) gefahren.

Der Test läuft wie folgt ab:

Zunächst wird der Motor während ca. 10 h eingelaufen und bezüglich Ölverbrauch und Durchblasegasmengen kontrolliert. Daran schließt sich der eigentliche Test mit drei Abschnitten an.

### Teil A: Kalt-Warm-Test

2 Läufe à 960 Zyklen mit 2,25 min Lauf bei  $4500 \text{ min}^{-1}$  46 kW und 1,5 min Stillstand bei  $34-38^{\circ}\text{C } T_{\text{KWA}}$ ; Dauer: 2 x 60 h (36 h Laufzeit), entspricht 10.000 km Laufstrecke.

### Teil B: Mittlerer Drehzahltest

Dauer: 50 h bei  $3250 \text{ min}^{-1}$ /43 kW, entspricht 5000 km Laufstrecke.

### Teil C: Heißtest

Dauer: 36 h bei  $4500 \text{ min}^{-1}$ /46 kW, entspricht 5000 km Laufstrecke.

Diese Prüfabschnitte sollen wichtige Betriebsbeanspruchungen aus der Praxis berücksichtigen, wie z.B. Teil A den extremen Kurzstreckenbetrieb oder Teil C den Vollgasbetrieb auf der Autobahn. Die Gesamtdauer des Tests entspricht einer Laufstrecke von etwa 20 000 km.

Der Test bewertet die eingesetzten Prüfole bezüglich Zylinderverschleiß und Nockenverschleiß. Die Erfassung des Verschleißes an diesen Bauteilen erfolgt über mechanische Vermessung. Für den Zylinderverschleiß wird

an allen vier Zylindern an je 8 Meßstellen am Umfang ein Oberflächenschrieb aus dem Bereich des oberen Totpunktes des Kolbenringes angefertigt, aus dem der sogenannte Zwickelverschleiß ermittelt wird. An der Nockenwelle wird an jedem Nocken vor und nach dem Test die Gesamthöhe an zwei Stellen gemessen. Aus der Differenz dieser Werte wird dann der Abtrag ermittelt. Als Grenzwert für den Verschleiß ist je ein zulässiger Mittelwert aus allen Messungen und ein zulässiger Maximalwert für einen Einzelmeßwert festgelegt.

Dieser OM 616-Kombitest ist im Prinzip seit 1971 (1971-74 OM 615-Kombitest) in der Mineralöl- und Motorenindustrie im Gebrauch. Inzwischen hat er den Approved-Status des CEC unter der Nr. CEC L-17-A-76 erhalten. Einzelheiten zu dieser Testprozedur können aus /1/ und /2/ entnommen werden.

## 1.2 Möglichkeiten des Einsatzes der RNT im OM 616-Kombitest

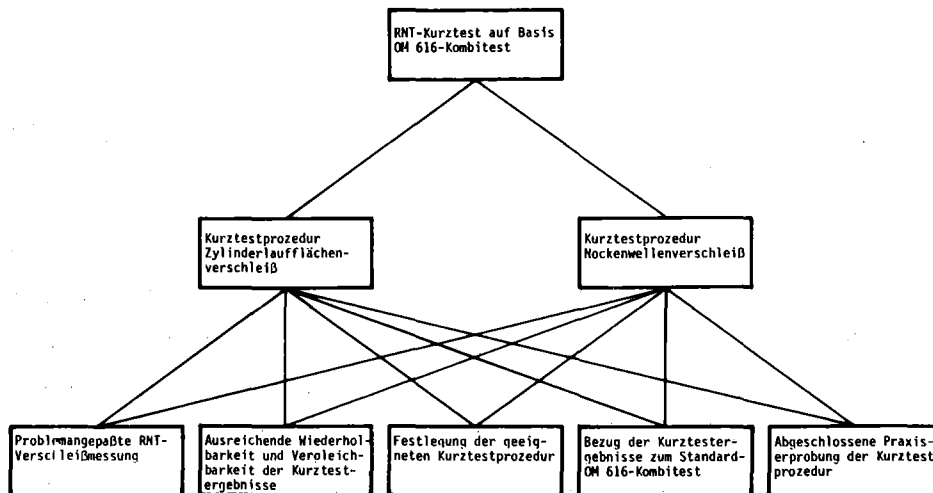
Die moderne RNT ermöglicht es, kontinuierlich und sehr empfindlich den Verschleiß interessierender Bauteile von Verbrennungsmotoren im Betrieb zu messen. Bei einem Einsatz der RNT im OM 616-Kombitest müßten sich die Verschleißergebnisse in kürzerer Laufzeit erfassen lassen, als es konventionell möglich ist. Wünschenswert wäre, daß ein solches Kurzzeitergebnis ebenso aussagekräftig wie das Ergebnis des Langzeittests ist. Trifft dies zu, so könnten die Kosten für eine Ölbewertung bezüglich Zylinder- und Nockenverschleiß erheblich abgesenkt werden, da kürzere Laufzeiten entstehen und mehrere verschiedene Ölformulierungen mit einem Prüfmotor geprüft werden könnten.

Zu beachten ist allerdings, daß ein Ersatz des Kombi- tests durch solche Kurzzeitprozeduren in keinem Fall sinnvoll ist; da im langlaufenden, nur mit einem Öltyp gefahrenen Kombitest neben den Verschleißdaten von Nocken und Zylinder auch andere Ölbeurteilungsdaten, wie Freigängigkeit der Kolbenringe, Lagerzustand, Ablagerungen am Kolben usw. bewertet werden, was in einem Kurztest nicht möglich ist. Der Nutzen eines solchen Kurztests

als Vorauswahltest (Screening-Test) wäre jedoch außerordentlich hoch. Er könnte der Mineralölindustrie bei der Entwicklung neuer Schmieröle oder Additivpackages gezielte Optimierungen ermöglichen, die bisher aus Kosten- und Zeitgründen mit dem Kombitest nicht ohne weiteres durchführbar waren. Aber auch die Motorenindustrie hätte einen Nutzen von einem solchen Kurztest, da er eine laufende Überwachung der Qualität der Schmieröle ermöglichen würde, was bisher aus Kostengründen nicht mit einer Vollmotorenprüfung durchgeführt werden kann.

### 1.3 Ziele und Lösungsweg für einen RNT-Kurztest auf Basis OM 616-Kombitest

Aus den in Kap. 1.2 genannten Gründen sollte Ziel des Vorhabens ein Kurztest auf Basis des OM 616-Kombitests sein, der es mit Hilfe der RNT ermöglicht, in kurzer Laufdauer den Verschleißschutz der eingesetzten Schmieröle an Nocken und Zylindern des OM 616-Motors so zu bewerten, daß ein Bezug zum Verschleißergebnis des kompletten OM 616-Kombitests möglich ist. Um dieses Oberziel zu erreichen, müssen die in Abb. 1 schematisch dargestellten Teilziele erreicht werden.



Grobe Zielplanung für die Entwicklung eines RNT-Kurztests auf Basis des OM 616-Kombitests

Abb. 1: Zielplanung RNT-Kurztest

Zunächst ist eine Aufteilung in eine Prozedur für den Zylinderverschleiß und eine für den Nockenverschleiß vorzunehmen, da aufgrund der sehr unterschiedlichen Eigenschaften der Elemente und der unterschiedlichen Belastungs- und Nutzgrößen der tribologischen Systeme eine gemeinsame Kurztestprozedur nicht wahrscheinlich ist. Für jede der beiden Kurztestprozeduren sind dann die folgenden Teilziele zu erreichen. Entwicklung einer optimierten problemangepaßten RNT-Messung incl. Aktivierung. Entwicklung der kostengünstigen und aussagefähigen Prüfvorschrift, Nachweis des Bezugs zu den Kombitestergebnissen, Nachweis der Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit der Kurztestergebnisse und abgeschlossene praktische Erprobung des Kurztestverfahrens. Zur Erreichung dieser Teilziele wurde der folgende Ablauf gewählt.

Zunächst muß in Kombitestläufen mit RNT festgestellt werden, ob das Zeitverhalten des Verschleißes von Büchse und Nockenwelle eine Kurztestprozedur zuläßt. Dabei können auch Kenntnisse über den Anteil der einzelnen Testabschnitte am Gesamtverschleiß und über deren Bedeutung für die Ölbewertung gewonnen werden. Außerdem ermöglichen diese Versuche Aussagen darüber, ob eine direkte Umrechnung der konventionell ermittelten Kombitestverschleißwerte in Verschleißraten der RNT sinnvoll durchgeführt werden kann.

Nach diesen Kombitestläufen mit RNT sollten Parameterstudien durchgeführt werden, die Aussagen über den Einfluß wichtiger Betriebsgrößen des Motors und Prüfstands auf das Ergebnis der Bewertung des Verschleißschutzverhaltens der Prüföle ermöglichen.

Nach ungefährender Festlegung der Parameter für eine Kurztestprüfung können dann mit einem Referenzöl, das einen Bezug zur Kombitestausswertung erlaubt, und mit verschiedenen Prüfölen Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit des Kurztests überprüft werden. In diesem Zusammenhang ist auch der Einfluß der Rückwirkung verschiedener Prüföle auf das Meßergebnis der nachfolgend gemessenen Öle zu klären. In einer umfangreichen praktischen Erprobung sollten dann die Eignung der Kurztestprozeduren für den Zylinderverschleiß bzw. dem Nockenverschleiß für den praktischen Gebrauch überprüft werden, nachdem zuvor die Prüfvorschrift genau

festgelegt wurde . Erst nach dieser Überprüfung steht der Test für eine Nutzung in der Industrie zur Verfügung.

## 2. R A D I O N U K L I D M E S S T E C H N I K

Die Verschleißmessungen können sowohl für die Nockenwelle als auch für den Zylinder nach dem Durchflußmeßverfahren durchgeführt werden. Da hier der Verschleiß beider Teile ins Öl gelangt, müßte eine Zweikomponentenmessung erfolgen, wenn Nocke und Zylinder gleichzeitig gemessen werden sollen. Die Möglichkeiten einer solchen Zweikomponentenmessung wurden überprüft. Sie ist möglich, wie einige Versuche im LIT gezeigt haben, wenn die Nockenwelle auf das Nuklid  $^{57}\text{Co}$  und der Zylinder auf das Nuklid  $^{56}\text{Co}$  dünn-schichtaktiviert wird. Leider bereitet die Aktivierung auf  $^{57}\text{Co}$  im Zyklotron des KfK Schwierigkeiten wegen der Höhe und der zeitlichen Konstanz der Strahlausgangsenergie,

so daß eine solche Aktivierung standardmäßig bisher nicht möglich ist. Die Aktivierung der Nocke auf das Nuklid  $^{58}\text{Co}$  ist dagegen relativ einfach. Für eine Zweikomponentenmessung hat sie jedoch den Nachteil, daß das Energiespektrum sich mit dem von  $^{56}\text{Co}$  weitgehend überdeckt, so daß eine Zweikomponentenmessung  $^{58}\text{Co} - ^{56}\text{Co}$  nur in Ausnahmefällen sinnvoll ist.

Im Prinzip bietet sich auch eine Dünnschichtdifferenzmessung (DDV) des Nockenverschleißes an. In diesem Fall würde im Durchflußverfahren der Zylinderverschleiß und im DDV die Nocke - beide auf  $^{56}\text{Co}$  aktiviert - gleichzeitig gemessen. Die gegenseitigen Beeinflussungen der Messungen über den im Öl enthaltenen Verschleiß beider Bauteile könnten rechnerisch korrigiert werden. Leider haben erste Vorversuche gezeigt, daß die Meßempfindlichkeit des DDV

für den Nockenverschleiß im normalen Verschleißbereich (im Mittel 0,04 - 0,1  $\mu\text{m}/\text{h}$ ) nicht ausreicht, um in kurzen Laufzeiten den Nockenverschleiß zu erfassen. Mit Ausnahme einiger weniger Testversuche, die von Rüdinger /3/ durchgeführt wurden, bei denen gleichzeitig Nocken- und Zylinderverschleiß im Durchfluß gemessen wurden, sind alle weiteren Versuche als Einzelmessungen gefahren worden.

Die Aktivierung für alle diese Einzelmessungen erfolgte mit Deuteronen im Zyklotron des Kernforschungszentrums Karlsruhe. Für Nockenwelle und Zylinder fand das Meßnuklid  $^{56}\text{Co}$  Verwendung. Die Halbwertszeit beträgt 77,3 Tage, so daß mit einer Aktivierung länger als ein halbes Jahr gemessen werden kann, wenn der Verschleiß dies ermöglicht. Bei der Aktivierung der Zylinderlaufbahn wurde auf Zylinder 2 ein ringförmiger Streifen im Bereich des oberen Totpunkts des ersten Kolbenrings gleichmäßig in einer Schichttiefe von ca. 80  $\mu\text{m}$  aktiviert. Wie in der Abb. 2 dargestellt, wurde für die Untersuchungen an den ersten OM 616-Motoren, die noch mit einer sog. Slip-Fit-Büchse auf Zylinder 2 (Sonderanfertigung) versehen waren, auf einer Breite von 12 mm ab 2 mm über der Oberkante des ersten Kolbenrings in OT aktiviert.

Lage der aktivierten Zone Zylinder 2  
OM 616 — Kombitest mit RNT

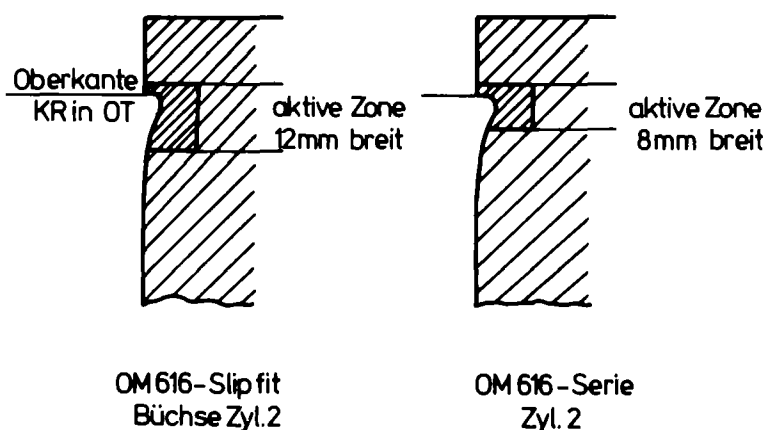


Abb. 2: Aktivierte Bereiche der Zylinderlaufbahn in Slip-Fit- und Serienausführung

Mit Verwendung der serienmäßigen OM 616-Blockmotoren ab 1976 wurde die aktivierte Breite in Zylinder 2 auf 8 mm ab 2 mm über der Oberkante des ersten Kolbenrings in OT verkleinert, weil dadurch die Vergleichbarkeit mit dem konventionell ermittelten Zwickelverschleiß verbessert wird und die gleichmäßige Aktivierung des Zylinder 2 in OT im Motorblock erheblich vereinfacht wurde.

Als Anhaltswert für die Kosten eines auf Zylinder 2 für Parameterstudien zum OM 616-Test aktivierten Motorblocks, der etwa 1 Jahr eingesetzt werden kann, sind ca. 10 TDM nach dem Stand 1978 anzugeben. Hier kann sich jedoch noch eine Verschiebung ergeben, wenn eine Serienaktivierung für einen standardisierten Kurztest durchgeführt werden kann.

Die für einige grundlegende Untersuchungen zum Verschleißverhalten der Nocken im OM 616-Test eingesetzten Nockenwellen (vgl./3/) waren auf der Kuppe von Ein- und Auslaßnocken des Zylinders 2 jeweils rechts u. links bis 12 mm abgewickelter Länge in Richtung Grundkreis auf der ganzen Nockenbreite von 18 mm aktiviert, da hier der wesentliche Verschleißabtrag stattfindet. Diese für grundsätzliche Untersuchungen gewählte Aktivierung ist jedoch für einen direkten Bezug zum Ergebnis der konventionellen Kombitestprüfung nicht sinnvoll, da der Verschleiß über der Nockenlaufbahn sehr ungleichmäßig sein kann und nach dem Kombitest nur die Änderung der Höhe Nockenkupe-Blockgrundkreis gemessen wird. Hier empfiehlt sich eine Aktivierung in einem nur ca. 3mm breiten Streifen auf der Nockenkupe wenn, wie z.B. in einer Kurztestprüfung erwünscht, ein Bezug zum konventionell ermittelten Kombitestergebnis notwendig ist. Die angesprochenen Aktivierungen können routinemäßig über die Aktivierungsgruppe des IAK der KfK GmbH erstellt werden. Die Lieferzeit beträgt z.Zt. 4 Wochen nach Eingang des Versuchsteils.

Die strahlenschutztechnische Handhabung der dünn-schicht-aktivierten Teile bereitet keine besonderen Schwierigkeiten. Einbau und Betrieb können mit einfachen Strahlenschutzmaßnahmen erfolgen. Wegen der mit ca. 200  $\mu$ Ci für den Blockmotor (Zylinder 2) u. mit ca. 30  $\mu$ Ci für die Nockenwelle (2 Nocken akti-

viert) deutlich über der gesetzlichen Freigrenze ( $1 \mu\text{Ci}$  für  $^{56}\text{Co}$ ) liegenden Gesamtaktivitäten, ist jedoch eine entsprechende Umgangsgenehmigung zwingend notwendig.

Die Verschleißmessung erfolgt zweckmäßigerweise mit dem neu-entwickelten Radionuklidverschleißmeßgerät<sup>+</sup>, das eine einfache Bedienung auch durch den Nicht-Radionuklid-Spezialisten ermöglicht. In Abb.3 ist dieses Gerät dargestellt, mit dem in Verbindung mit

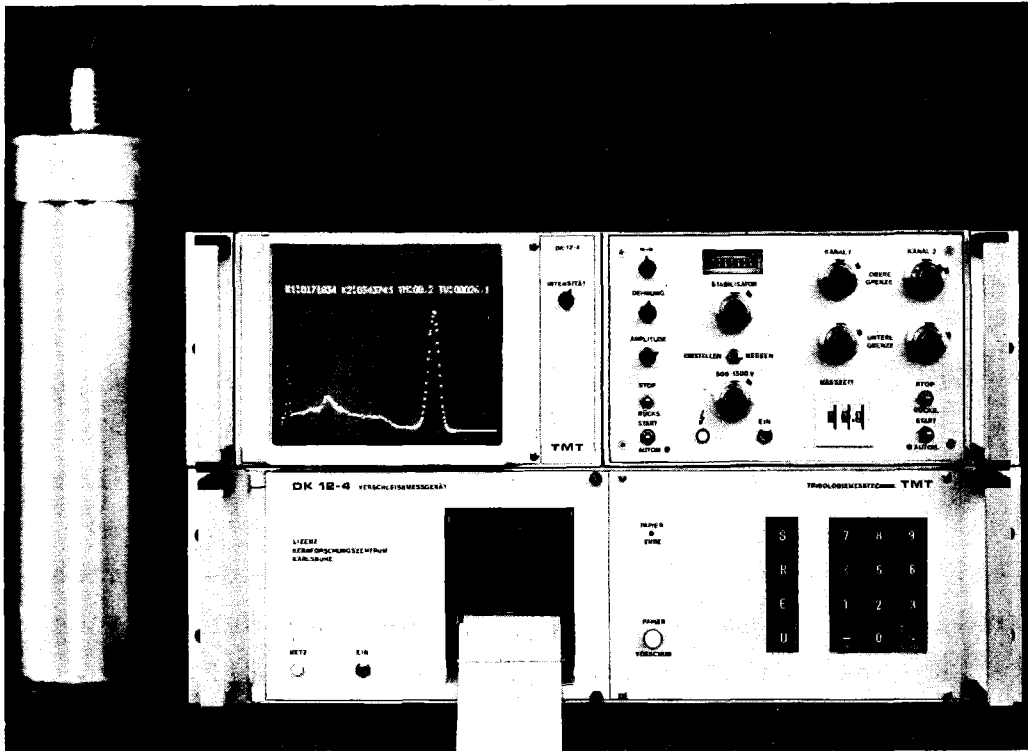


Abb.3: RNT-Verschleißmeßgerät DK 12-4

geeigneten Meßköpfen nach dem Durchfluß- und dem Dünnschicht-differenzverfahren gemessen werden kann. Auf eine gleichzeitige Erfassung des Verschleißanteils im Schmierölfilter des Motors kann bei einer Kurztestprozedur verzichtet werden, da ein Schmierölfilter wegen der Kürze der Öleinsatzzeiten für einen solchen Kurztest nicht notwendig ist. Die Versuchsergebnisse werden dadurch nicht beeinträchtigt, wie viele hundert Laufstunden im Rahmen der Erprobung zum Zylinderverschleiß am OM 616 gezeigt haben.

Sollte sich herausstellen, daß z.B. im Nockenwellenbereich, wegen der Rußbelastung Rückwirkungen bestehen, die einen Filtereinsatz sinnvoll erscheinen lassen, so ist eine Erweiterung des Radionuklidverschleißmeßgeräts um eine zusätzliche Filtermeß-

<sup>+</sup>Das Radionuklidverschleißmeßgerät wird in Lizenz des KfK von der Firma TRIBOLOGIE-MESSTECHNIK, Karlsruhe, hergestellt und vertrieben.



linie mit on-line Auswertung von Durchfluß- und Filterverschleiß ohne Schwierigkeiten möglich.

### 3. ANALYSE DES KOMBITESTS MIT HILFE DER RNT

Generell ist zu den durchgeführten Untersuchungen zu sagen, daß sie in drei wesentlichen Phasen abliefen. In der ersten Phase wurden an OM 615- und 616-Motoren mit einer Slip-Fit-Büchse auf Zylinder 2 grundlegende Untersuchungen zum Verschleißverhalten bei Einsatz verschiedener Öle mit der RNT durchgeführt. Auch erste Untersuchungen zum Nockenverschleiß wurden dabei gefahren (vgl. /3/). Es würde zu weit führen, alle diese Ergebnisse erneut zur Diskussion zu stellen, zumal ein wesentlicher Teil dieser Arbeiten sich mit der Schmieröleentwicklung und nicht primär mit dem Ziel RNT-Kurztest befaßte. Alle für die Zielrichtung RNT-Kurztest wichtige Ergebnisse aus Phase 1 werden jedoch noch einmal dargestellt. In der zweiten Phase wurden mit serienmäßigen OM 616-Motoren (keine Slip-Fit-Büchse mehr) die Möglichkeiten der Kurztestprüfung für den Zylinderbereich untersucht, wobei hier nur mit zwei CEC-Referenzölen und zwei Erprobungsölen gearbeitet wurde. In der dritten Phase wurden die vorgeschlagenen Kurztestprozeduren in einem Ringversuch (gleiches Prüfprogramm auf verschiedenen Prüfständen bzw. bei verschiedenen Firmen) überprüft.

#### 3.1 Prinzipielle Untersuchung der Eignung von Zylinder- und Nockenverschleiß für eine Kurztestprozedur

Um eine Kurztestprozedur sinnvoll anwenden zu können, ist Voraussetzung, daß das Verhalten der untersuchten tribologischen Systeme in der für die Kurztestprüfung gewählten Zeit auch charakteristisch ist für die Laufzeit des Standardtests. Bestimmte

zeitabhängige Effekte, wie z.B. Alterungs- bzw. Ermüdungsprozesse dürfen keine wesentliche Rolle im Standardtest spielen, da sonst eine aussagekräftige Kurztestprüfung nicht möglich ist. Hier liegt gerade bei der Schmierölprüfung im Vollmotor eine Problematik vor, da eine laufende Veränderung des Schmieröls durch die Betriebsbelastungen ebenso wenig auszuschließen ist, wie die laufende Veränderung des Prüfobjekts selbst, z.B. durch Verschleiß. Es ist deshalb unumgänglich, in einigen Läufen nach der Kombitestprozedur zu überprüfen, wie das Zeitverhalten der interessierenden Bauteile während eines Kombitestlaufs ist. Dabei ist zu beachten, daß die so gewonnenen Aussagen streng genommen nur für die untersuchten Öle und Motoren gilt, da der jeweilige Zustand des Motors bzw. die Ölformulierung großen Einfluß haben können.

### 3.1.1 Zeitverhalten der Verschleißrate im Zylinderbereich

Stellvertretend für einige Verschleißversuche im Zylinderbereich ist in Abb.4 der Verschleißverlauf über die drei Kombitestabschnitte aus einem Versuch am OM 615 mit zwei Mehrbereichsölen SAE 10 W 30 und 10 W 40 dargestellt.<sup>+</sup>

Der Einlauf nach DB-Prozedur ergibt einen relativ geringen Einlaufbeitrag. Erst der Ölverbrauchslauf mit  $4500 \text{ min}^{-1}$ /Vollast weist eine hohe Verschleißrate auf.

Im Kaltwarmtest A 1 zeigen sich über längere Laufzeiten konstante Verschleißraten, wobei über den Versuch jedoch eine Zunahme der Verschleißraten um ca. 25% feststellbar ist. Im Teil A 2 ist zunächst eine ähnlich hohe Verschleißrate festzustellen wie in A 1. Diese steigt jedoch bis gegen Ende des Versuchs um fast 100% an. Interessant ist auch der Anstieg nach 18 h Laufdauer. Hier wurde durch Umstellung der Kühlung eine niedrigere Kühlmitteltemperatur im Kaltbetrieb (Stillstandphase) erzielt, was zur Erhöhung der Verschleißrate führte. Dies zeigt, daß der Einhaltung der Betriebsparameter große Bedeutung zukommt.

Im mittleren Drehzahltest ist eine starke Erhöhung der Verschleißrate feststellbar, die gegen Ende des Laufs wieder zurückgeht.

<sup>+</sup>Alle Verschleißraten sind auf die effektive Motorlaufzeit bezogen.

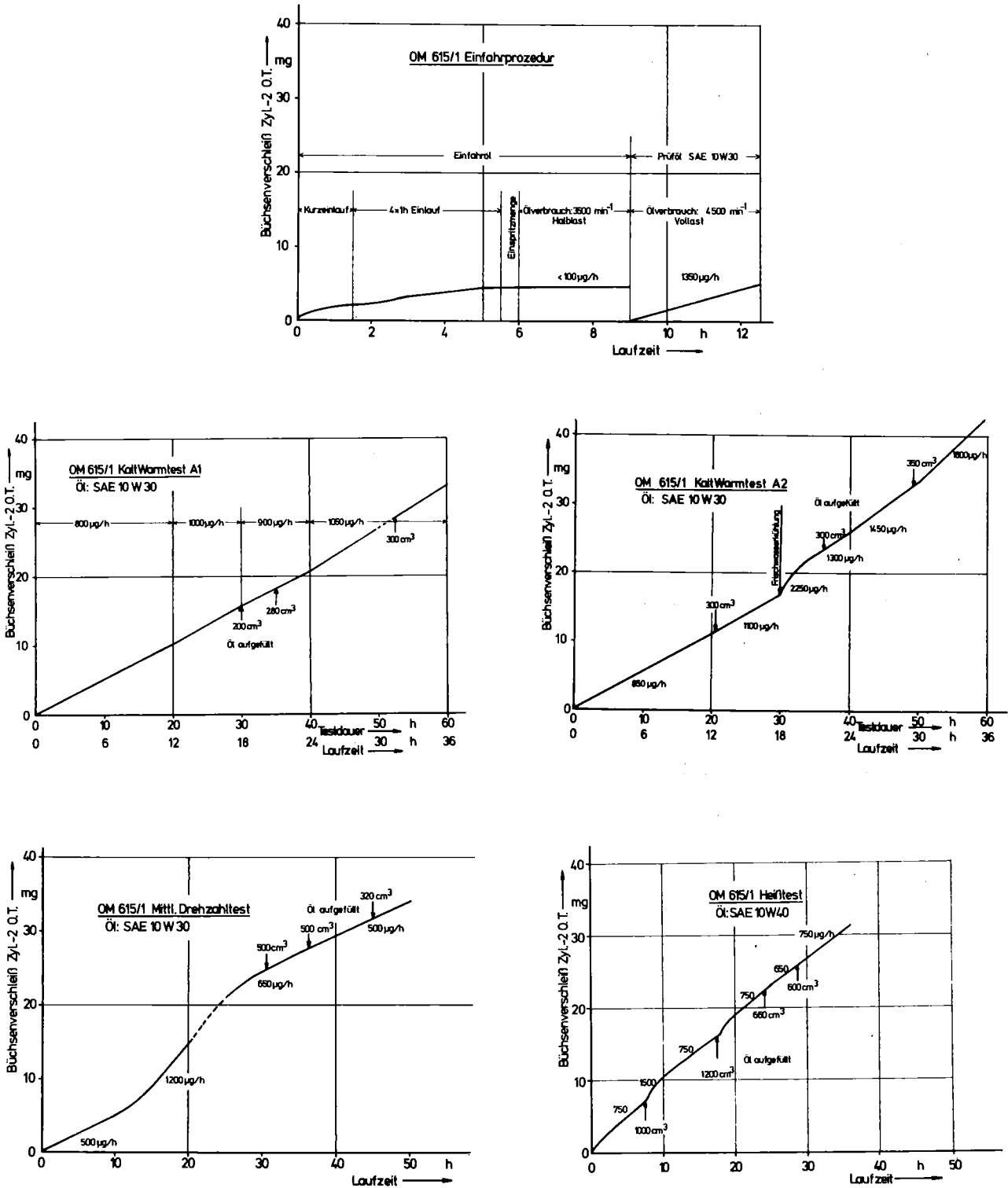


Abb. 4: Kombitestlauf am OM 616 mit RNT-Zylinderverschleiß  
 Öl: SAE 10 W 30/10 W 40

Eine genaue Angabe zu den Ursachen kann nicht gemacht werden, da keine Abweichungen bei den Betriebsparametern feststellbar sind. Allerdings dürften trotzdem Betriebseinflüsse die Ursache sein, da die Verschleißrate wieder zurückgeht, also keine irreversible Veränderung an Motor bzw. Öl vorliegt. Der abschließende Heißtest mit dem Öl SAE 10 W 40 zeigt einen weitgehend konstanten Verschleißratenverlauf. Die Verschleißraten liegen hier deutlich niedriger als im Kalt-Warm-Test.

Faßt man das Ergebnis zusammen, so ist festzustellen, daß im Büchsenbereich über der Laufdauer der Einzeltestabschnitte erhebliche Änderungen der Verschleißrate auftreten können, die nicht direkt über meßbare Änderungen der Motor- und Prüfstand-einstellgrößen erklärt werden können. Hier können dynamische Veränderungen am Motor selbst oder Veränderungen am Schmieröl die Ursache sein. Interessant ist, daß die Veränderungen z.T. wieder zurückgingen, was auf Betriebsparameter als Ursache hinweist.

Aus anderen Versuchen bei denen ebenfalls sowohl Heißtest-(HT) als auch Kalt-Warm-Test (KWT) Bedingungen über der Laufzeit der Motoren angefahren wurden, ist bekannt, daß auch noch eine Art von Einlauf (Feineinlauf) eine Rolle spielen kann. Abb.5 zeigt ein solches Ergebnis. Die abnehmende Verschleißrate ist bis zu 100 h Motorlaufzeit festzustellen.

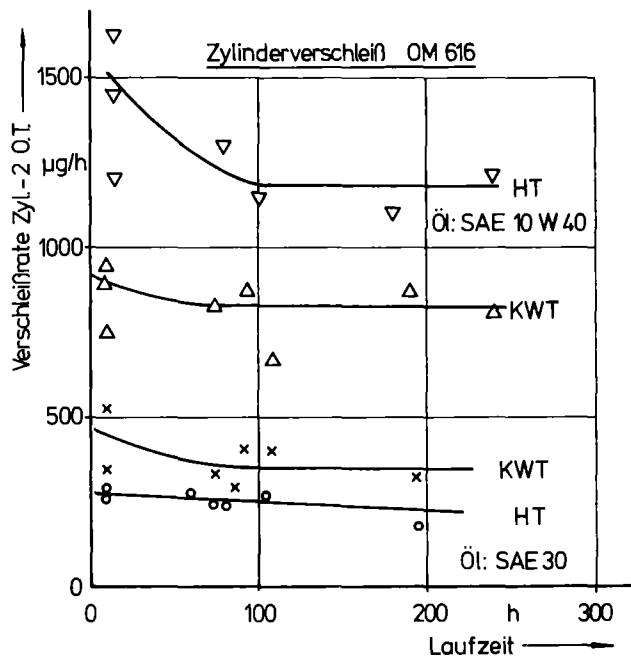


Abb. 5: Zeitverhalten des Zylinderverschleißes mit verschiedenen Ölen im Heißtest (HT) und Kalt-Warm-Test (KWT)

Aus den erzielten Ergebnissen der Kombitests mit RNT läßt sich für den Zylinderbereich folgender Schluß ziehen. Da offensichtlich Veränderungen der Verschleißraten über der Betriebszeit der Motoren auftreten, die durch die Einstellgrößen an Motor und Prüfstand nicht unmittelbar erklärbar sind, also auch durch irreversible Veränderungen an Motor und Schmierstoff über der Laufzeit entstanden sein können, kann eine Kurztestprüfung nicht als repräsentativ für alle Einflußgrößen des Kombitests angesehen werden. Eine einfache Umrechnung von Kurztestergebnissen auf Kombitestergebnisse, z.B. über die gemessenen Verschleißraten, ist deshalb nicht sinnvoll möglich. Ein Vergleich verschiedener Öle im Kurztest mit Bezug zum Kombitest ist nur möglich, wenn mittels geeigneter Referenzöle der jeweilige Motor- bzw. Prüfstandzustand berücksichtigt wird. Gelingt es, Referenzöle einzusetzen, deren

Bewertung im Kombitest gesichert ist, so kann hier auch eine Aussage über das wahrscheinliche Kombitestergebnis des Prüföls gemacht werden. Allerdings ist die Einschränkung zu beachten, daß evtl. vorhandene Langzeiteffekte ein völlig anderes Ergebnis bewirken können. Die bisherigen Ergebnisse aus diversen Kombitestläufen mit RNT lassen solche gravierende Zeiteinflüsse für den Zylinderbereich allerdings als unwahrscheinlich erscheinen.

### 3.1.2 Zeitverhalten der Verschleißrate im Nockenbereich

Im OM 616-Motor wurden auch Verschleißmessungen an Nocken 3 und 4 (Ein- und Auslaß Zylinder 2) während des Kombitests durchgeführt. In Abb.6 sind die Ergebnisse des Versuches dargestellt. Die Verschleißraten liegen um etwa eine Zehnerpotenz niedriger als bei dem Zylinder. Bei Umrechnung auf gleichmäßigen Abtrag der aktivierten Fläche bleibt etwa der Faktor 5. (Umrechnungsfaktoren: Zylinder<sub>Slip-Fit</sub> = ca.0,08  $\mu\text{m}/\text{mg}$ , Zyl.Serie = ca.0,1  $\mu\text{m}/\text{mg}$ , 2 Nocken = ca. 0,16  $\mu\text{m}/\text{mg}$ .) Ähnlich wie beim Zylinder ist auch bei den Nocken im KWT Teil 2 eine Verdoppelung der Verschleißraten über der Laufzeit festzustellen, während im Teil 1 eine erhebliche Veränderung der Verschleißraten über der Laufzeit auffällt. Ebenso im HT. Das Verschleißratenniveau ist im HT und KWT etwa gleich. Der speziell zur Beurteilung des Nockenverschleißes im Kombitest enthaltene mittlere Drehzahltest (MDT) lag um etwa die Hälfte bis zwei Drittel in der Verschleißrate niedriger als die anderen Testabschnitte. Dies kann jedoch auf eine Eigenschaft des untersuchten Öles zurückzuführen sein.

Die Aussagen dieser Kombitestergebnisse müssen ähnlich wie für den Zylinderbereich interpretiert werden. Es gibt über der Laufzeit erhebliche Verschleißratenänderungen, die bedingen, daß Aussagen eines Kurztests mit Bezug zum Kombitest eingeschränkt werden. Ein sinnvoller Bezug zum Kombitest ist ebenfalls nur mittels geeigneter Referenzöle möglich.

Im Gegensatz zum Büchsenbereich, wo alle weiteren Versuche mit verschiedenen Ölen bestätigten, daß die irreversible zeitab-

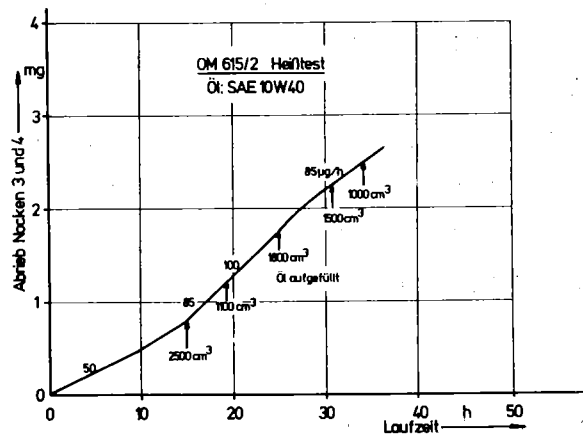
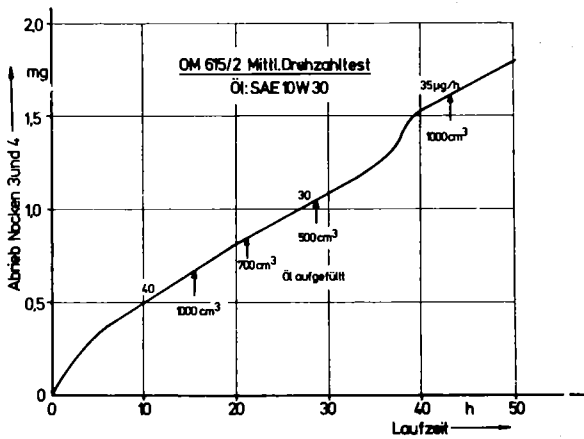
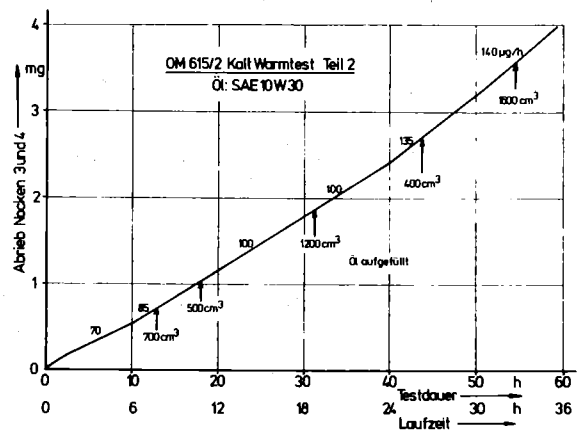
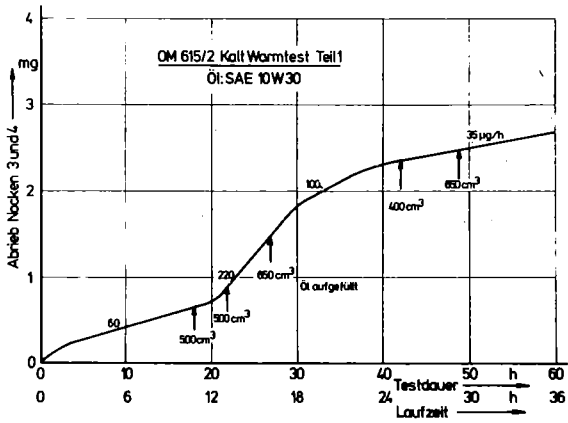
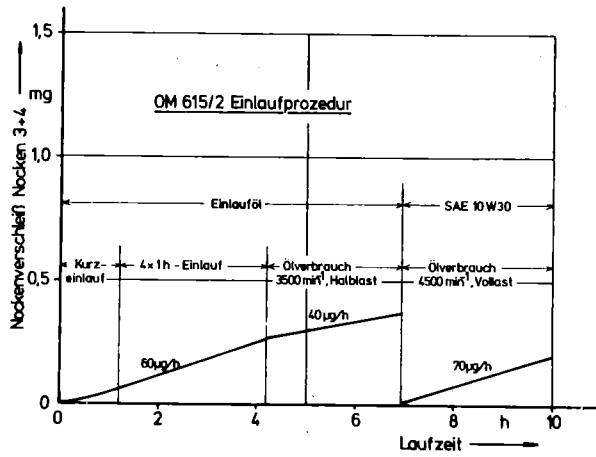


Abb. 6: Kombitestlauf am OM 616 mit RNT - Nockenverschleiß  
 Öl: SAE 10 W 30/10 W 40

hängige Beeinflussung der Verschleißraten nicht gravierend ist, ergaben sich mit anderen Schmierölen für den Nockenverschleiß zum Teil Verschleißratenerhöhungen bis zum 500-fachen während eines Laufs von 40 - 50 h Dauer. Diese Erscheinung ist in Abb. 7 dargestellt.

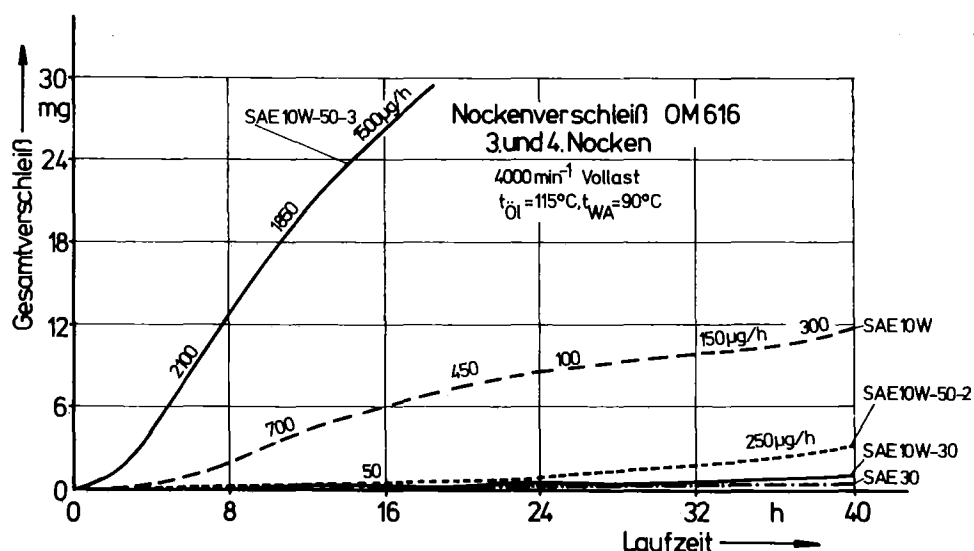


Abb. 7: Zeitlicher Verlauf des Nockenverschleißes am OM 616 mit verschiedenen Ölen

Aufgezeichnet sind Versuchsläufe am OM 616 bei 4000 min<sup>-1</sup>/Vollast mit einer Öltemperatur von 115 °C und einer Kühlmittelaustrittstemperatur von 90 °C mit verschiedenen Ölen. Das unterschiedliche Verhalten der Öle aus Abb. 7 läßt sich nicht auf einen grundlegenden Parameter wie beispielsweise die Ölviskosität zurückführen. Dennoch beeinflusst aber die Ölsorte das Zeitverhalten stark, wenn man als Beispiel das SAE 10 W 50-2 im Vergleich zum SAE 10 W 50-3 heranzieht.

Im OM 616 wurden noch eine Reihe weiterer Untersuchungen im Nockenbereich gefahren, um evtl. Ursachen für dieses Zeitverhalten zu finden. Für diese Untersuchungen wurden drei Typen von SAE 10 W 50 Ölen eingesetzt, die ein besonders ausgeprägtes Zeitverhalten zeigten.



Zunächst wurden einige Läufe mit SAE 10 W 50-2 mit verschiedenen Drehzahl-Lastprogrammen hintereinander mit Ölwechsel gefahren. Die Ergebnisse der Läufe 7, 8 und 9 sind in Abb. 8 dargestellt. Dabei fällt auf, daß bei Beginn jeden Laufs (nach einem Ölwechsel) die zuvor sehr hohe Verschleißrate auf ein sehr niedriges Niveau abfällt, um dann nach Laufzeiten von 10 - 15 h wieder progressiv anzusteigen.

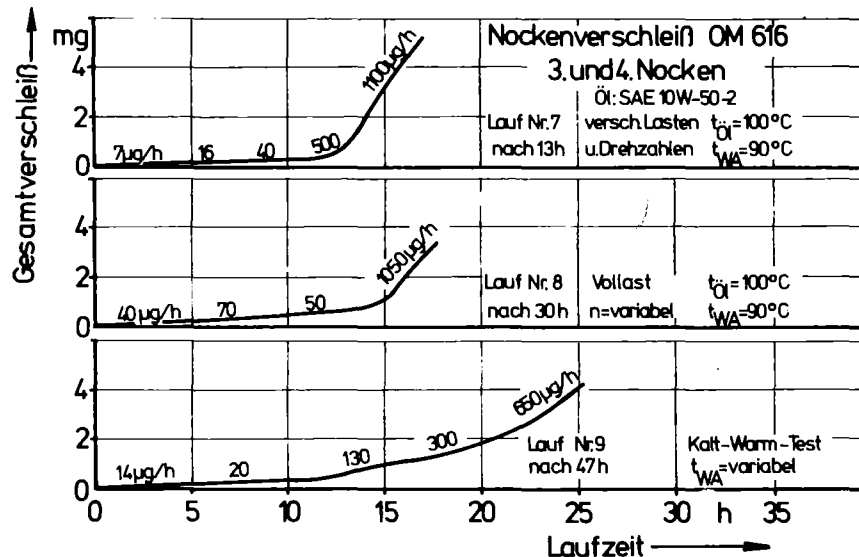


Abb. 8: Zeitlicher Verlauf des Nockenverschleißes am OM 616 bei verschiedenen Drehzahl- und Lastprogrammen

Die zeigt, daß wahrscheinlich Eigenschaften des Schmieröls, die sich mit der Laufzeit verändern, die Ursache sind und nicht Eigenschaften der Paarung Nockenwelle - Schleppebel. Es miß sich demnach um eine Eigenschaft handeln, die von Öltyp zu Öltyp variiert, und die sich in relativ kurzen Laufzeiten deutlich verändern kann.

Außer diesem Ergebnis kann aus der Abb. 8 abgeschätzt werden, daß auch ein Einfluß des Versuchsprogramms vorhanden ist. Offensichtlich ist der KWT weniger kritisch, als Konstantläufe mit verschiedenen Drehzahlen und Lasten.

Es wurde vermutet, daß eine Erschöpfung bestimmter Additive während des Laufs als Ursache in Frage kommt. Deswegen wurde in einigen Läufen mit Öl SAE 10 W 50-2 nach Auftreten von

hohen Verschleißraten mit Verschleißschutzadditiv (ZDTP) und Detergent-Dispersant-Additiv in verschiedenen Volumenprozenten der Konzentration im Neuöl nachgelegt. In Abb. 9 ist das Ergebnis zu sehen. In keinem Fall wurde durch die Nachadditivierung eine Verschleißratenverminderung erzielt. Eine Erschöpfung der genannten Additive kann damit als Ursache wahrscheinlich ausgeschlossen werden.

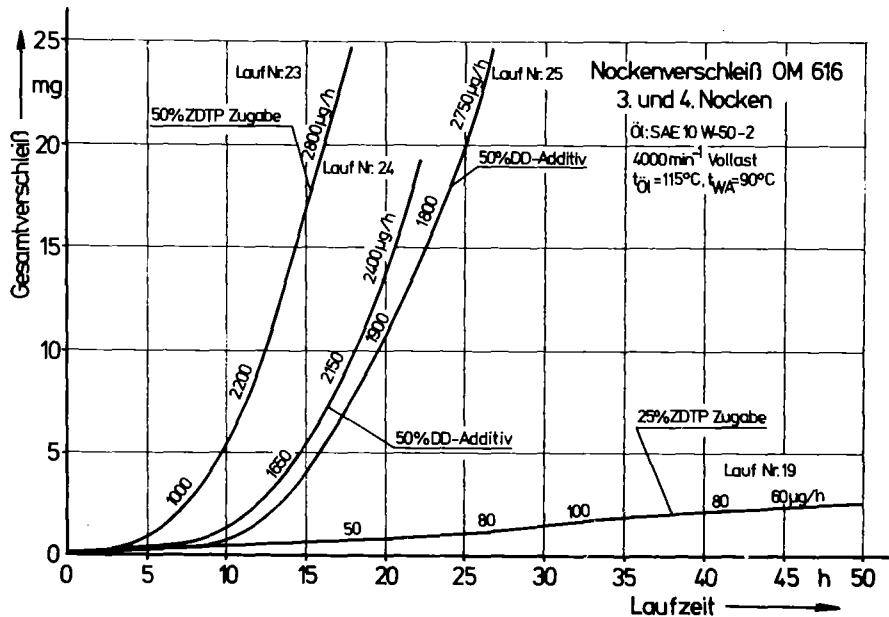


Abb. 9: Zeitlicher Verlauf des Nockenverschleißes am OM 616 mit verschiedenen Ölen und Zugabe von zusätzlichen Additiven

Die bekannte Tatsache, daß in Versuchen an Zylinderkopffaggregaten, die elektrisch angetrieben werden, die Verschleißprobleme, die aus dem Dieselmotor an Nockenwellen bekannt sind, nicht zu beobachten waren, läßt vermuten, daß spezielle Eigenschaften des Dieselmotors ursächlich für diese Verschleißprobleme sind. Hier können zwei Ursachen vermutet werden, wenn man weiter in Betracht zieht, daß solche Probleme, z.B. von den DB-Ottomotoren, trotz ähnlicher Konstruktion, nicht bekannt sind. Zum einen könnte als eine Ursache der höhere Gasdruck des Dieselmotors beim Öffnen des Auslaßventils zu Beginn des Auspufftaktes eine Rolle spielen. In diesem Fall müßte der Auslaßnocken stärker verschleifen als der Einlaßnocken. Eine Untersuchung von 4 Kombitestergebnissen zeigte auch einen im Mittel um

ca. 15% höheren Verschleiß der Auslaßnocken. Allerdings ist die statistische Sicherheit dieser Aussage nicht ausreichend. Weitere Kombitests müßten ausgewertet werden.

Als zweite Ursache könnte die Verschmutzung des Öles durch die Verbrennungsrückstände des Diesels, speziell also Ruß, eine Rolle spielen. Hierzu wurden noch Untersuchungen durchgeführt. Die Rußbildung kann u.a. durch die Einspritzmenge beeinflusst werden. Deshalb wurden in weiteren Läufen mit dem Öl SAE 10 W 50-2 die Einspritzmengen variiert. Das Ergebnis ist in Abb. 10 dargestellt. Es läßt sich in der Form interpretieren, daß wahrscheinlich ein Einfluß der Einspritzmenge existiert, da mit den beiden höheren Mengen der Anstieg der Verschleißrate

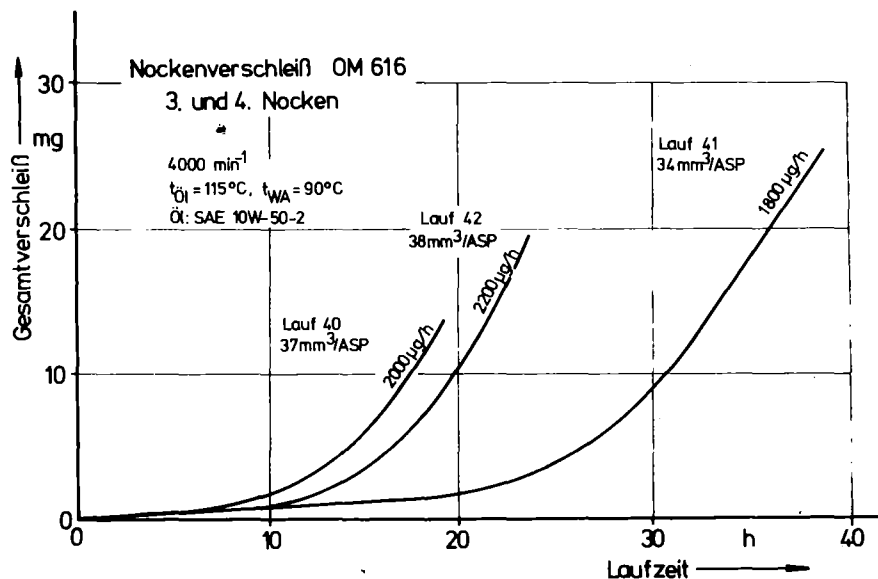


Abb. 10: Zeitlicher Verlauf des Nockenverschleißes am OM 616 bei verschiedenen Einspritzmengen

erheblich früher erfolgte. Allerdings müßte dieses Ergebnis noch weiter abgesichert werden, da, wie Abb. 9 zeigt, auch ohne Variation der Einspritzmenge erhebliche Streuungen im Beginn des Verschleißanstiegs auftreten können.

Unterstellt man den Einfluß des Rußes im Öl als wahrscheinlich, so ergibt sich im Nachhinein auch noch ein interessanter Aspekt zu der Nachlegung von Additiven (Abb. 9). Die dort hinzugefügten DD-Additive zeigen keine Wirkung.

Dies könnte dadurch erklärbar sein, daß durch die DD-Additive im Öl der Ruß in Schwebelage gehalten wird und mit dem Öl zur Paarung Nocken-Schlepphebel transportiert wird. Unterstellt man weiterhin, daß die DD-Additive im Öl bei der Zugabe von weiterem Additiv aufgrund der kurzen Einwirkzeit noch wirksam waren, so ist erklärlich, warum diese weitere Erhöhung des DD-Additivanteils keine Verschleißminderung verursachte. Dies ist selbstverständlich nur eine Hypothese, die allerdings durch einige recht einfache Versuche überprüft werden könnte. Zunächst müßte mit einigen extrem niedrig DD-additivierten Ölen überprüft werden, ob ein Verschleißanstieg auftritt, Ist dies nicht der Fall, könnte durch Zulegierung von DD-Additiven der Gegenversuch gemacht werden.

Zum Abschluß der Vorversuche zum Komplex Nockenverschleiß wurde noch der Einfluß der Drehzahl auf den Beginn des Anstiegs untersucht. Hier wurden drei Läufe mit Öl SAE 10 W 50-3 gefahren, wobei die Drehzahl bei konstanter Einspritzmenge je Hub von 3250 bis 4400  $\text{min}^{-1}$  variiert wurde. Das Ergebnis ist in Abb. 11 dargestellt.

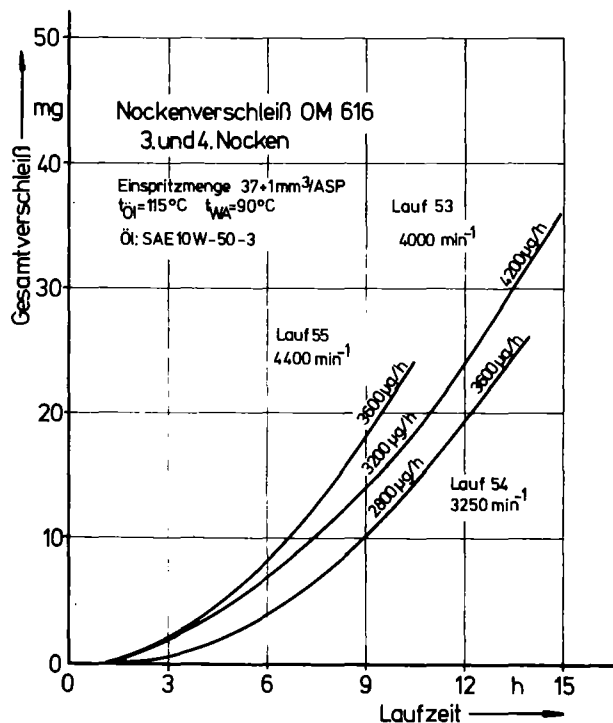


Abb. 11: Zeitlicher Verlauf des Nockenverschleißes am OM 616 bei verschiedenen Vollastdrehzahlen

Hier fällt auf, daß mit Öl SAE 10 W 50-3 extrem hohe Verschleißraten auftreten (mittl. Nockenabtrag ca. 0,7  $\mu\text{m}/\text{h}$  !). Es zeigt sich die Tendenz, daß der Abtrag mit zunehmender Drehzahl stärker wird, was wieder in das Bild des Rußgehalts als Einflußgröße passen würde. Aber auch hier ist anzumerken, daß eine solche Aussage endgültig über weitere Untersuchungen abgesichert werden müßte.

Faßt man die Ergebnisse der Voruntersuchungen an Nockenwellen zusammen, so zeigt sich, daß abhängig von der Ölsorte und von den Laufbedingungen des Motors ein erheblicher Einfluß der Laufzeit vorhanden ist, der eine sinnvolle Kurztestprüfung in Frage stellt. Bevor über eine Kurztestmöglichkeit endgültig entschieden wird, müßten die Ursachen für dieses Zeitverhalten einwandfrei geklärt sein. Die bisher durchgeführten Stichversuche, die auf einen Einfluß des Rußes und des Dispersant-Detergentverhaltens der Öle hindeuten, können hier allenfalls als Anhaltswerte betrachtet werden. Anregungen für die Zielrichtung der weiteren Untersuchungen wurden im Text gegeben. Auch für die weiteren Untersuchungen ist ein Einsatz der RNT-Verschleißmessung notwendig.

Diese weiteren Untersuchungen an Nockenwellen wurden im Rahmen des laufenden Vorhabens "Kurztest auf Basis OM 616-Kombitest" zugunsten der Kurztestentwicklung im Büchsenbereich aufgegeben, die größere Aussichten auf Erfolg bietet.

### 3.2 Analysen des OM 616-Kombitest im Zylinderbereich

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Untersuchungen zur Erstellung eines Kurztests, die im Büchsenbereich durchgeführt wurden, dargelegt.

#### 3.2.1 Auswahl des Meßzylinders

Wie in Kap. 3.1 bereits erwähnt, wurde der Zylinder 2 als Meßzylinder ausgewählt. Alle noch folgenden Meßergebnisse wurden mit Slip-Fit-Büchsen auf Zylinder 2 gefahren, wenn nicht durch die Bezeichnung "Serienmotor" die Aktivierung des

Zylinder 2 in der Serienausführung gekennzeichnet ist.

Die Auswahl des Zyl. 2 stützt sich zum einen auf eine leichtere Aktivierbarkeit dieses Zyl. im Motorblock und auf die Überlegung, daß die inneren Zylinder aufgrund der Wasserführung gleichmäßiger umspült werden und deshalb reproduzierbare Werte zu erwarten sind. Insgesamt wird von einer etwa gleichen Beanspruchung aller Zylinder ausgegangen. In Abb. 12 sind die Verhältnisse der aus Oberflächenschrieben ermittelten Verschleißwerte der einzelnen Zylinder aus 5 Kombitestläufen mit verschiedenen Ölsorten bezogen auf den mittleren Verschleiß aller Zylinder eines Motors aufgetragen.

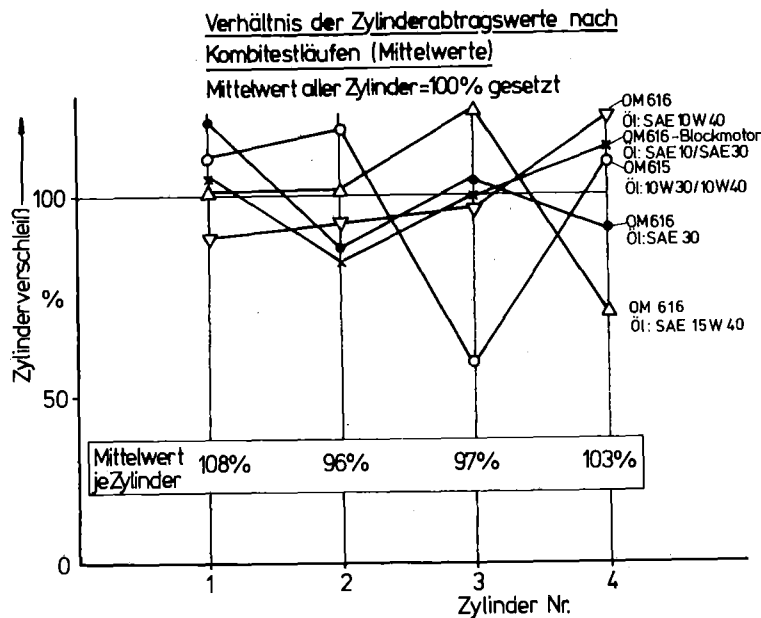


Abb. 12: Verteilung des Zylinderverschleißes aus verschiedenen Kombitestläufen am OM 616 auf die Einzelzylinder

Außerdem ist der Mittelwert der relativen Verschleißwerte eines Zylinders als Zahlenwert zusätzlich eingetragen.

Die Ergebnisse zeigen Abweichungen der Einzelzylinder um bis zu 40% vom Mittelwert, was auf die individuell von Motor zu Motor unterschiedliche Beanspruchung der Einzelzylinder hindeutet. Dies muß auch als Hinweis auf die Notwendigkeit des Einsatzes von Referenzölen mit Bezug zum Kombitest gesehen werden, wenn eine Kurztestprüfung Sinn haben soll. Über das Referenzöl werden solche

individuellen Einflüsse berücksichtigt. Im Mittel sind jedoch die Verschleißwerte der Zylinder 1 - 4 auf  $\pm 10\%$  gleich, so daß die Auswahl des Zylinders 2, unter dem Gesichtspunkt einer einfacheren Aktivierung des Serienmotors zulässig erscheint.

### 3.2.2 Analyse des Anteile der einzelnen Betriebsphasen des Kombitests am Gesamtverschleiß

Um Kenntnisse über den Beitrag der einzelnen Abschnitte des Kombitests zum Gesamtverschleißergebnis zu erhalten, wurden mehrere Kombitestläufe gefahren, bei denen der Verschleiß auf Zylinder 2 (alle Slip-Fit-Büchsen) mit der RNT mitgemessen wurde. Dabei kamen verschiedene Öle zum Einsatz. Die Ergebnisse sind in Abb. 13 aufgetragen.

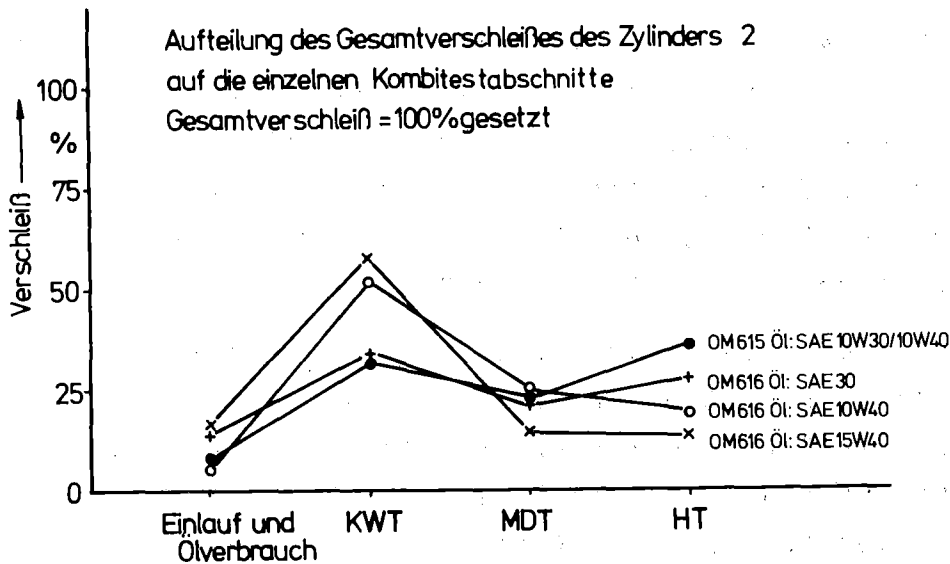


Abb. 13: Verteilung des Gesamtverschleißes aus verschiedenen Kombitestläufen auf die einzelnen Kombitestabschnitte

Die Ergebnisse zeigen, daß immerhin ein Anteil von 10 - 20% des Gesamtverschleißes des Kombitests im Einlauf und den anschließenden Kontrollläufen zu Ölverbrauch und Durchblasegasen anfällt. Dies bedeutet, daß der Einlaufanteil unbedingt bei einer Berechnung des Kombitestergebnisses aus einem Kurztestversuch berücksichtigt werden müßte.

Der MDT, der zur Nockenwellenerprobung in das Testverfahren aufgenommen worden ist, hat mit 15 - 25% ebenfalls einen erheblichen Anteil am Gesamtverschleiß der Büchse. Allerdings zeigt das Ergebnis aus Abb.13, daß er nicht sehr selektiv wirkt. Das heißt, die verschiedenen Öle zeigen in etwa das gleiche Verschleißergebnis im MDT, während sie sich im KWT und HT unterscheiden. Für eine Kurztestprüfung im Büchsenbereich kann auf diesen Testteil verzichtet werden, wenn der Bezug zum Kombitestergebnis über Referenzöle hergestellt wird. Bei Umrechnung vom Kurztest- auf das Kombitestergebnis jedoch muß entweder der MDT im Kurztestprogramm enthalten sein oder rechnerisch berücksichtigt werden.

Sowohl HT als auch KWT ergeben deutliche Unterscheidungen der verschiedenen Öle. Interessant ist dabei, wie z.B. das Öl 15 W 40 zeigt, daß ein Öl im KWT einen hohen Verschleißanteil und im HT einen relativ niedrigen Verschleißanteil aufweisen kann. Das zeigt, daß ein Kurztest mit RNT hier deutlich mehr Aufschlüsse bringen kann als der Kombitestergebnis, der nicht zwischen Anteil KWT und HT unterscheiden kann. Sowohl KWT als auch HT müssen demnach in einer Kurztestprozedur enthalten sein.

In den Ergebnissen aus Abb.13 ist die unterschiedliche Laufzeit der einzelnen Testabschnitte nicht berücksichtigt. Bezieht man die Verschleißwerte der einzelnen Kombitesterabschnitte auf die jeweilige Laufzeit des Testabschnitts, so erhält man relative mittlere Verschleißraten. In Abb.14 ist dies für die Kombitesterläufe aus Abb.13 durchgeführt, wobei die Verschleißraten des MDT zu 100% gesetzt wurden. Dabei zeigt sich, daß die höchsten relativen, mittleren Verschleißraten im Einlauf auftreten und HT und KWT in etwa gleich hohe mittlere Verschleißraten aufweisen. Bei diesem Ergebnis ist jedoch zu beachten, daß es aus bestimmten Kombitesterläufen mit bestimmten Ölen gewonnen wurde. Mit anderen Ölen kann unter Umständen eine erheblich andere Aufteilung auftreten. Trotzdem ist dieses Ergebnis in Verbindung mit den Ergebnissen aus Abb.13 interessant, da es für einen Kurztest wichtige Erkenntnisse aufzeigt.



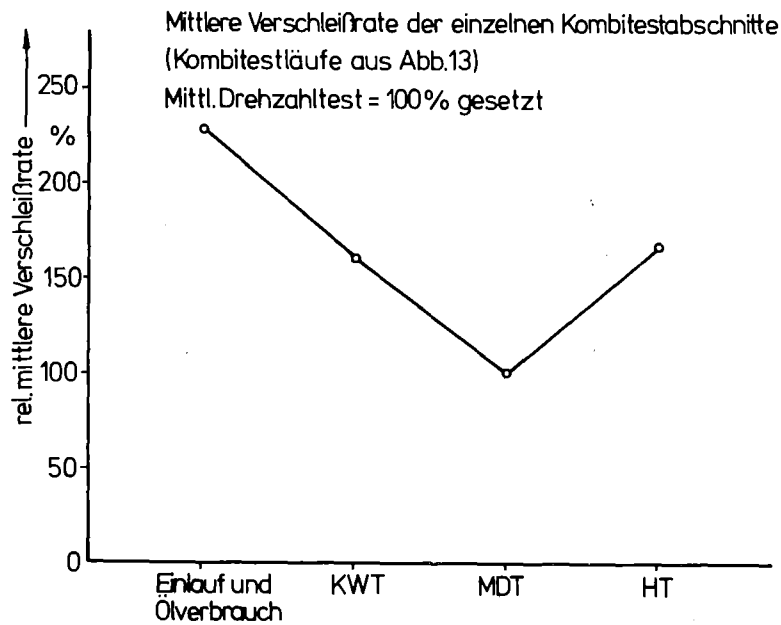


Abb. 14: Mittlere Verschleißrate der einzelnen Kombitestabschnitte ermittelt aus den Kombitestergebnissen von Abb. 13

Für eine evtl. Umrechnung eines Kurztestergebnisses, das aus Verschleißraten in den einzelnen Testphasen (KWT, HT) gebildet wird, ist zu beachten, daß das Kombitestergebnis wesentlich durch den Zeitanteil der einzelnen Testabschnitte beeinflusst wird. Vergleicht man z.B. Abb.13 und 14, so zeigt sich, daß der bei den hier ausgewählten Testölen im Mittel etwa doppelt so hohe Verschleißanteil im KWT gegenüber dem HT im wesentlichen durch die doppelte Laufzeit des KWT im Vergleich zum HT hervorgerufen wird. Der KWT wird im Kombitest also stärker betont. Bei der Bewertung der Ergebnisse aus Kurztestläufen muß das entsprechend berücksichtigt werden. Auch der Einlauf muß beachtet werden, da die starke zeitliche Veränderung der hohen Einlaufverschleißraten bei einer Kurztestprozedur die Meßergebnisse unter HT- und KWT-Bedingungen erheblich verfälschen können.

Der Einlaufvorgang kann, wie umfangreiche Untersuchungen /4,6/ gezeigt haben, im sogenannten Feineinlauf über bis zu 100 h Motorlaufzeit gehen, was zu über der Laufzeit des Motors allmählich abnehmenden Verschleißraten führt. Dies wurde in Abb.15,

Kap. 3.1.1 anhand von Ergebnissen von Kombitestläufen, wo zu verschiedenen Zeiten die gleichen Öle wieder angefahren wurden, bereits dargestellt. Es zeigte sich eine allmähliche Abnahme der Verschleißraten über lange Laufzeiten.

Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang auch, daß z.B. mit dem ersten Anfahren des KWT bei einem Motor beobachtet worden ist, daß noch einmal ein neuer Einlauf auf diese Bedingungen stattfindet, da der erfolgte Einlauf unter HT-Bedingungen für die KWT-Bedingungen nicht ausgereicht hat. Die KWT-Bedingung war in diesen Fällen bezgl. des Einlaufs keine Untermenge der HT-Bedingung im Sinne von /4/ (vgl. auch /6/).

Abb. 15 zeigt dieses Verhalten des Motors bei Verwendung eines Einbereich-Referenzöles. Der Versuch wurde in Serienausführung auf Zylinder 2 gefahren.

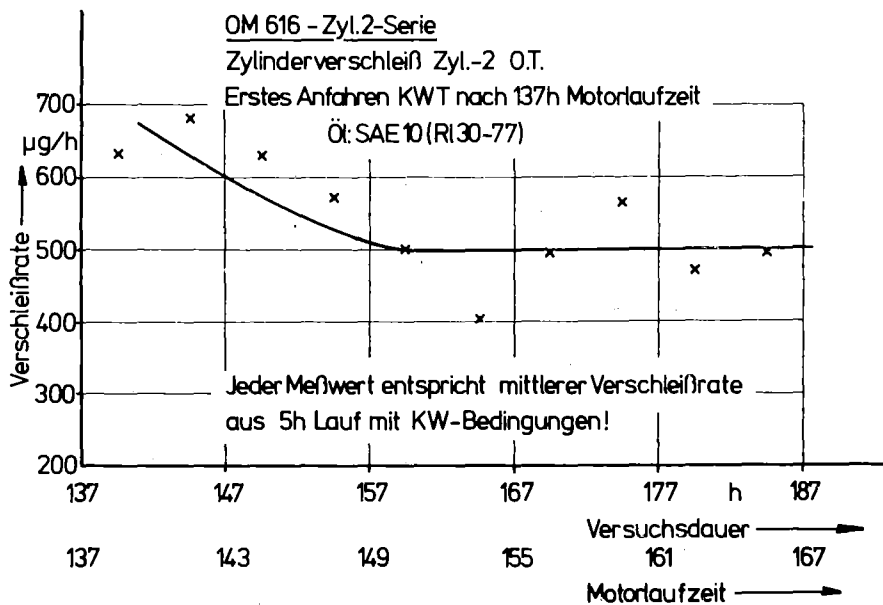


Abb. 15: Erneuter Einlauf bei erstmaligem Anfahren der KWT-Bedingung

Obwohl der Motor beim ersten Anfahren der KWT-Bedingungen bereits ca. 140 h gelaufen war, davon ca. 120 h mit HT-Bedingung zeigte sich ein erneuter Einlauf unter KWT-Bedingung über ca. 4 Läufe à 5 h Dauer. Erst danach wurde ein weitgehend konstantes Verschleißniveau erreicht.

Für einen Kurztest ergibt sich daraus die Forderung, daß

die KWT-Bedingungen ein Teil des Einlaufprogramms sein müssen. In diesem Zusammenhang müßte überprüft werden, ob nicht evtl. der Einlauf mit KWT-Bedingung auch den HT-Einlauf mitbeinhaltet (HT Untermenge von KWT), was Verkürzungen der Einlaufdauer ergeben könnte.

### 3.2.3 Einfluß von Prüf- und Motorbedingungen auf das Verschleißergebnis im Zylinderbereich

Die durchgeführten Untersuchungen über Veränderungen in Motor- und Prüfstandsbedingungen, die zu deutlichen Veränderungen im Verschleiß führen können, sollen im folgenden dargestellt werden.

Zunächst ist die Motorleistung, repräsentiert durch Drehzahl und Last zu nennen. Bei der Drehzahl kann aufgrund von Erfahrungen davon ausgegangen werden, daß eine auf  $\pm 25 \text{ min}^{-1}$  genaue Einhaltung der Drehzahl, die mit modernen Prüfstandseinrichtungen in jedem Fall gewährleistet ist, keine wesentlichen Auswirkungen auf das Verschleißergebnis hat. Bei konstanter Drehzahl ist die Last der Leistung proportional. Hier hat die Erfahrung gezeigt, daß auch bei eingelaufenen Dieselmotoren (z.B. OM 617) Leistungsunterschiede bis zu 6% (Standardabweichung) /4/ auftreten können. Auch die CEC-Testvorschrift (CEC L-17-T-76) läßt eine Leistungsstreuung von ca.  $\pm 6\%$  in den Laufbedingungen für HT und KWT zu, was schon deutliche Veränderungen im Verschleißverhalten ergeben kann. Hier ist aber wichtig zu beachten, daß die zulässige Einspritzmenge wesentlich enger toleriert ist. Diese Toleranzen sollten in jedem Fall eingehalten werden. Auf keinen Fall darf die Nominalleistung durch Erhöhung der Einspritzmenge über die Toleranz  $39 - 40 \text{ mm}^3/\text{Zylinder}$  und Arbeitspiel eingestellt werden, wenn der Motor mit der Normaleinspritzmenge die Nominalleistung nicht erreicht. Auch die Leistungseinflüsse auf das Verschleißergebnis sprechen bei einer Kurztestprozedur für die relative Bewertung mittels Referenzölen, da damit Unterschiede im Verschleißverhalten aufgrund von Leistungsstreuungen berücksichtigt werden.

Neben Leistung und Drehzahlen und selbstverständlich auch

der exakten Einhaltung der Zykluszeiten im KWT kommt vor allem der Kühlmitteltemperatur bzw. der Zylinderwandtemperatur große Bedeutung zu. Die Ölsumpftemperatur dagegen ist weniger kritisch, da sie das Verschleißverhalten im Zylinderbereich nur wenig beeinflusst, wie Untersuchungen am OM 616 /4/ gezeigt haben.

Welchen Einfluß die Kühlwasseraustrittstemperatur ( $T_{KWA}$ ) hat, zeigt Abb. 16 am Beispiel eines SAE 30 Öls, das zu Versuchszwecken sowohl im HT als auch im MDT und KWT eingesetzt wurde. Während die Verschleißraten im MDT mit zunehmender  $T_{KWA}$  relativ wenig zunehmen, stiegen sie im HT erheblich stärker an.

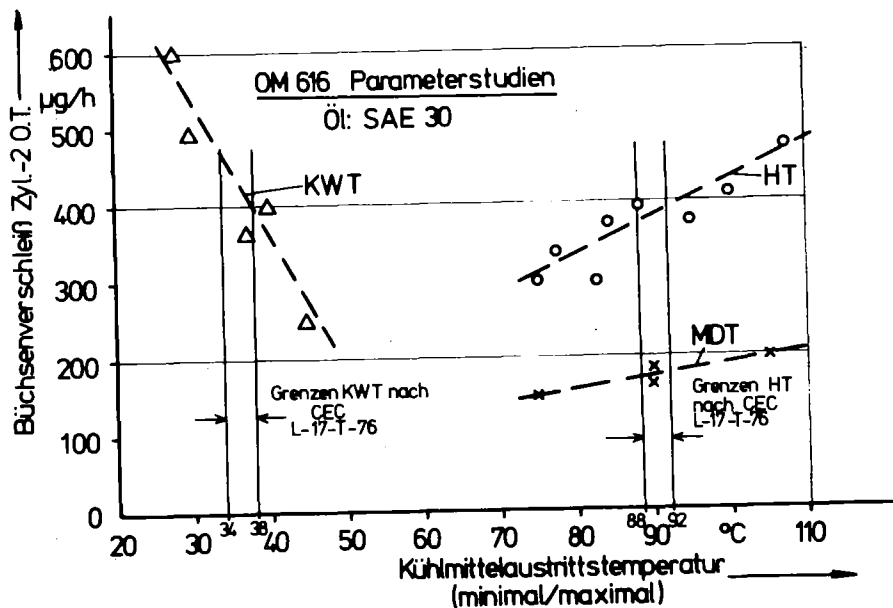


Abb. 16: Einfluß der Kühlmittelaustrittstemperatur auf die Zylinder Verschleißrate im Leißtest (HT), Kalt-Warm-Test (KWT) und Mittlerer Drehzahltest (MDT)

Besonders im KWT war mit diesem Öl eine erhebliche Abhängigkeit der Büchsenverschleißrate von der minimal erreichten  $T_{KWA}$  festzustellen. Würden hier die zulässigen Temperaturgrenzen der CEC-Vorschrift ausgenutzt werden, würde sich die Verschleißrate im KWT um mehr als 15% verändern. Da ein solcher Einfluß (der mit anderer Ölformulierung möglicherweise nicht viel drastischer sein kann) für einen Kurztest erhebliche Fehler mit sich bringen würde, wurden in einer Reihe von Versuchen mit Slip-Fit-Büchsenmotoren verschiedene Öle in KWT und HT auf ihr Temperaturverhalten untersucht.

Abb. 17 zeigt einige Ergebnisse aus dem KWT mit Ein- und Mehrbereichsölen. Wichtig ist zu beachten, daß es bei diesen Ergebnissen nicht auf eine Ölbewertung ankommt, was ja wegen des

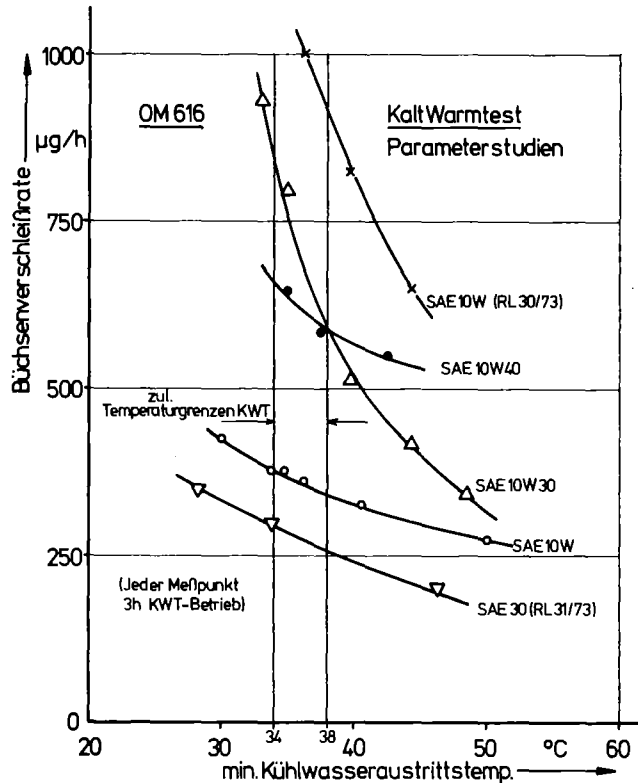


Abb. 17: Einfluß der Kühlmittelaustrittstemperatur auf die Zylinderverschleißrate bei verschiedenen Ölen im Kalt-Warm-Test (KWT)

Einsatzes einer Slip-Fit-Büchse ohnehin problematisch wäre, sondern allein auf die Auswirkung der Veränderung der  $T_{KWA}$  auf die gemessenen Verschleißwerte. Die Ergebnisse in Abb. 17 zeigen bei einigen Ölen eine extreme Abhängigkeit von  $T_{KWA}$ .

Während beispielsweise für das Öl SAE 30 die Verschleißratenänderung bei Ausnutzen der zulässigen Temperaturtoleranz der CEC-Vorschrift für den KWT ca. 20% beträgt, ist bei dem Öl SAE 10 W 30 eine Änderung von fast 50% festzustellen. Dies zeigt, daß die für den Kombitest zugelassene Toleranz für einen Kurztest wahrscheinlich zu groß ist. Durch diese Toleranz ist aber

auch im Kombitest eine erhebliche Fehlermöglichkeit gegeben, denn bei einem "empfindlichen" Öl kann trotz Einhaltung der Testbedingungen ein Unterschied von z.B. 50% im Verschleiß des KWT-Teils, der ja ein Gewicht am Gesamtergebnis hat, entstehen. Vermutlich liegt hier eine wesentliche Ursache von Streuungen der Testergebnisse. Allerdings ist zu beachten, daß diese Ergebnisse mit einer Slip-Fit-Büchse gefahren wurden, die im Vergleich zum Serienmotor ein unterschiedliches Verhalten aufweisen kann. Möglicherweise ist die Temperaturabhängigkeit bei der Serienausführung nicht so stark vorhanden. Darauf wird an anderer Stelle ausführlicher eingegangen.

Abb. 17 zeigt aber auch, daß selbst mit dem Einsatz eines oder mehrerer Referenzöle für eine relative Bewertung Probleme mit der Einhaltung der Solltemperaturen nicht vollständig ausgeglichen werden können. Nähme man z.B. das SAE 10 W 40 aus Abb.17 als Referenzöl und das SAE 10 W 30 wäre ein Kandidatenöl, so würde das Kandidatenöl bei  $T_{KWA}$  von  $38^{\circ}\text{C}$  etwa gleich wie das Referenzöl bewertet, bei  $34^{\circ}\text{C}$  aber ca. 30 % schlechter.

Dieses Ergebnis zeigt zweierlei: Zum einen sind Öle mit einer sehr ausgeprägten Temperaturabhängigkeit im Verschleißverhalten als Referenzöle ungeeignet. Ein flacher Verlauf wäre wünschenswert. Zum zweiten müßte für den Kurztest eine engere Eingrenzung der  $T_{KWA}$  erfolgen (Temperaturverhalten des im Ringversuch verwendeten Referenzöles s. Anhang A1).

Dieses Ergebnis zeigt zusätzlich, daß nur über eine Relativbewertung mit Referenzölen ein Bezug zum Kombitest hergestellt werden kann. Eine Umrechnung über die Verschleißratenhöhe ist nicht möglich.

Beachtenswert ist die Bedeutung solch starker Temperaturabhängigkeiten für die praktische Aussagefähigkeit des Kombitests. Ein solches Testergebnis muß unter diesem Aspekt als ein von der Praxis möglicherweise stark abweichendes Einzelergebnis gesehen werden, wenn die Temperaturen im praktischen Fall deutlich abweichen. Für eine gezielte Ölentwicklung über die Verschleißmessung mit RNT erscheint der in /3/ gemachte

Vorschlag, mindestens mit drei Temperaturwerten in HT und KWT das Temperaturverhalten der Öle miteinzubeziehen sinnvoll. Für eine Kurztestprozedur ist dieser Weg allerdings nicht günstig, da der Zeitaufwand steigt und der Bezug zum Ergebnis der Kombitestprozedur nicht zwangsläufig besser wird.

Eine ähnliche Untersuchung wie für den KWT wurde auch für den HT gemacht. In Abb. 18 ist das Ergebnis dargestellt. Auch hier zeigt sich wie beim KWT bei einigen Ölen eine sehr starke Temperaturabhängigkeit. Auch die unterschiedlichen Verläufe über der Temperatur, die auch eine Bewertung mittels Referenzölen erschweren, sind im HT ebenfalls vorhanden. Somit gelten alle bereits beim KWT gemachten Einschränkungen und Anmerkungen in Bezug auf Kurztest und Kombitest auch für den HT.

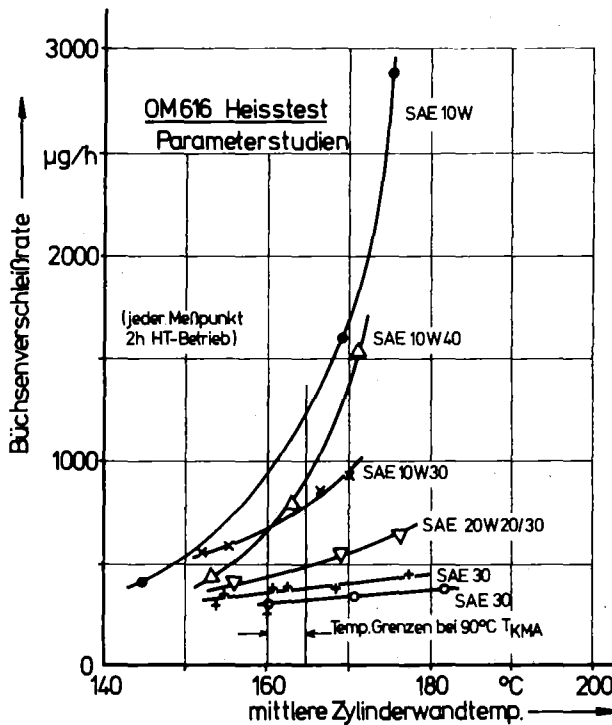


Abb. 18: Einfluß der Zylinderwandtemperatur auf die Zylinderver-  
schleißrate bei verschiedenen Ölen im Heißtest (HT)

Faßt man diese Ergebnisse zusammen, so muß festgestellt werden, daß der  $T_{KWA}$  und der damit bei sonst konstanten Laufbedingungen gekoppelten Zylinderwandtemperatur eine zentrale Bedeutung für die Ölbewertung sowohl im Kombi-test als auch im Kurztest mit RNT zukommt. Dies gilt prinzipiell auch unter Beachtung der Einschränkung, daß alle zum Temperaturverhalten bisher gezeigten Ergebnisse mit von der Serie abweichenden Slip-Fit-Büchsen auf dem Meßzylinder gefahren wurden. Denn selbst wenn, was auf Grund von im folgenden noch zu besprechenden Ergebnissen wahrscheinlich ist, die Slip-Fit-Büchse durch ihren weniger definierten Wärmeübergang zum Motorblock temperaturmäßig kritischer ist als die Serienausführung, so bleibt die sehr unterschiedliche "Empfindlichkeit" verschiedener Öle auf Temperaturveränderungen im Prinzip erhalten. Die absoluten Verschleißhöhen und Steigungen können sich allerdings zu niedrigeren Werten verändern, was für eine Bewertung sicherere Aussagen erlauben würde.

Für die Kurztestprüfung ist in jedem Fall der Einsatz von Referenzölen zur richtigen Bewertung sinnvoll. Außerdem sollten die Toleranzen der Testbedingungen in HT und im KWT bezüglich der zulässigen Temperaturen eingeschränkt werden. Bezüglich der Motorausrüstung für den RNT-Kurztest wäre der Einsatz von Motoren mit Temperaturmeßstellen für die Zylinderwandtemperatur im aktivierten Zylinder 2 sinnvoll. Allerdings ist dabei der zusätzliche Kostenfaktor in einer Wirtschaftlichkeitsüberlegung zu berücksichtigen. Damit der Aufwand lohnt, muß aber eine technisch einwandfreie Temperaturmessung garantiert sein, die eine Vergleichbarkeit auf ca.  $\pm 2^{\circ} \text{C}$  ermöglicht.

Wegen der Bedeutung der Zylinderwandtemperaturen im Kombi-test wurden noch einige weitere Untersuchungen durchgeführt, die sich mit Beobachtungen über Veränderungen der Zylinderwandtemperatur über der Laufzeit bei jeweils konstanter  $T_{KWA}$  befaßten. Die Ergebnisse sind ausführlich in /5/ zusammengefaßt. Hier soll nur ein kurzer Überblick gegeben werden. Die Untersuchungen wurden alle mit Slip-Fit-Büchsen gemacht, was die Allgemeingültigkeit der Ergebnisse einschränkt.



Bei längeren Testläufen mit dem OM 616 unter Mitmessung der Zylinderwandtemperaturen mit zwei Thermoelementen, die rechts und links von Zylinder zwei auf der Rückseite der Slip-Fit-Büchse angebracht waren, wurde festgestellt, daß bei konstanter  $T_{KWA}$  die mittlere Zylinderwandtemperatur kontinuierlich zunimmt, was zu erheblichen Verschleißveränderungen führte. Abb. 19 zeigt ein solches Ergebnis.

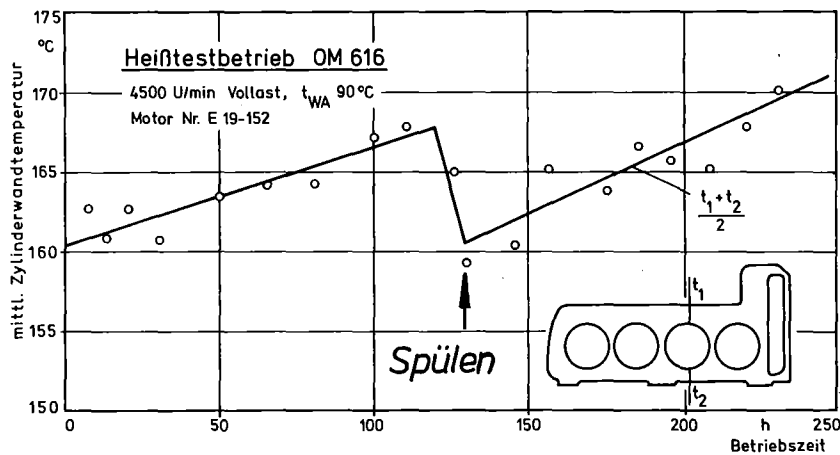


Abb. 19: Zunahme der Zylinderwandtemperatur bei Heißtestbedingungen über der Motorlaufzeit

Die Temperatursteigerung lag in diesem Versuch bei ca.  $0,6^{\circ}C/10 h$  HT. Als Kühlmittel war das in der Kombitestvorschrift festgelegte Gemisch von Wasser, Frostschutz- und Korrosionsschutzmittel eingefüllt. Da die Temperaturerhöhung durch Spülen des Kühlsystems aufgehoben werden kann (vgl. Abb. 19), ist zu vermuten, daß kühlmittelseitige Ablagerungen im Motorblock die Ursache ist.

Tritt eine solche Temperaturveränderung über der Laufzeit auch im Kombitest auf, so kann dadurch eine Beeinträchtigung des Ergebnisses erfolgen.

Als wesentlich gravierender hat sich jedoch eine andere Erkenntnis erwiesen. Wurden gelaufene Motoren ohne Kühlwasser einige Zeit (ca. 3 Wochen) gelagert, so konnte eine Erhöhung der Zylinderwandtemperaturen um mehr als 20<sup>0</sup>C festgestellt werden. In denselben Motoren wurden dann extreme Verschleißraten (von bis zu 8000 µg/h) gemessen. In einigen Fällen waren danach leichte Freßerscheinungen an der Zylinderlaufbahn festzustellen. Die extremen Verschleißratenerhöhungen waren nicht mehr allein über die gemessenen Temperaturerhöhungen zu erklären. Es muß angenommen werden, daß an anderen Stellen am Büchsenumfang, z.B. zwischen den Zylindern, erheblich schlechtere Temperaturbedingungen geherrscht haben. Das Verschleißniveau konnte durch anschließendes intensives Spülen der Kühlkanäle mit Weinsäure und Zitronensäure wesentlich verbessert werden.

Auch bei diesem Problem der Lagerung von gelaufenen Motoren ist letztlich nicht geklärt, inwieweit durch die Slip-Fit-Büchse die Verhältnisse zusätzlich verschärft wurden. In jedem Fall empfiehlt sich aber erhöhte Aufmerksamkeit auf diesen Problembereich, wenn z.B. gelaufene Versuchsmotoren neu aufgerüstet werden, oder z.B. im Falle des Kurztests einige Zeit stillgelegt werden. Auch bei diesem Problem würde eine zuverlässige Temperaturmeßmethode an der Zylinderwand Vorteile bringen.

Bei nahezu allen bisher dargelegten Erkenntnissen war die Unsicherheit über den Einfluß der Slip-Fit-Büchse im RNT-Meßzylinder auf das Verschleißergebnis von wesentlicher Bedeutung. Es soll deshalb im folgenden zu diesem Komplex Stellung genommen werden.

Wie bereits im Kapitel "RNT-Meßtechnik" dargelegt, wurde 1977 die Möglichkeit geschaffen, die Aktivierung der Zylinder im serienmäßigen Zustand vorzunehmen. Seit dieser Zeit wurden nur noch solche Motoren eingesetzt. Deshalb kann anhand von Vergleichs-

messungen zum Einfluß der Slip-Fit-Büchse Stellung genommen werden. Dabei ergab sich jedoch die Schwierigkeit, daß die Öle, die bei den älteren Versuchen eingesetzt wurden, nicht mehr zur Verfügung standen. Es ist jedoch gelungen über die Firma KST, Bad Dürkheim, ein Reblend der ehemaligen Referenzöle für den 1973/74 durchgeführten Ringversuch, RL 30-73 und RL 31-73 zu erhalten, das mit der Bezeichnung RL-30-77 und RL 31-77 versehen wurde. Nach Auskunft des Herstellers, Firma Dalton, sollte das Additiv-Package identisch sein, nur das Grundöl sei von anderer Provenienz. Es seien jedoch gleiche Eigenschaften zu erwarten. Mit diesem Öl wurde zunächst ein Kombitest gefahren, um anhand des Vergleichs mit den Ergebnissen des Ringversuchs zu überprüfen, ob die Vergleichbarkeit gegeben ist. Leider waren bei diesem Kombitest durch einen Fehler bei der Aktivierung, der erst nach dem Versuchslauf bemerkt wurde, die RNT-Messungen nicht zu verwerten. Die Ergebnisse der Vermessung von Zylindern und Nocken waren jedoch dadurch nicht beeinträchtigt. In der Tabelle 1 ist das Ergebnis dargestellt.

	Nockenverschleiß µm/1000 km		Zylinderverschleiß µm/1000 km	
	Mittelwert	Max. Wert	Mittelwert	Max. Wert
1) Kombitest mit RL 30-77 RL 30-77	.35	.60	.21	.65
2) Ringvers. mit RL 30-73 RL 31-73	1,49/±.41/	2,23/±.56/	.43/±.07/	.92/±.25/
Verhältnis 1) und 2)	.23	.27	.49	.71

Tab.1: Ergebnisse von Kombitests mit RL 30/31-73 und RL 30/31-77  
Werte in / / Standardabweichung in µm/1000 km

Die Tabelle zeigt deutlich, daß die Ergebnisse mit dem RL 30/31-77 signifikant niedriger liegen als beim Ringversuch mit RL 30/31-73. Bei der Nockenwelle sind es etwa 25% des mittleren Verschleißwertes des Ringversuchs und bei dem Zylinder 50%. Bis auf den maximalen Zylinderverschleiß liegen die Werte auch außerhalb des Streubereichs des Ringversuchs. Es kann deshalb mit einiger Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, daß das RL 30/31-77 günstigere Verschleißschutzeigenschaften als RL 30/31-73 aufweist. Dies muß bei den weiteren Untersuchungen beachtet werden.

Es wurden eine Vielzahl von Kurzläufen mit RNT à 5 h im HT bzw. 80 Zyklen im KWT mit Serienmotoren gefahren, mit einer Gesamtlaufzeit von mehr als 600 Stunden. Ein wesentlicher Teil wurde dabei mit RL 30/31-77 gefahren. Das ergibt die Möglichkeit, die RNT-Verschleißergebnisse im Serienmotor mit RL 30/31-77 zu den in Slip-Fit-Büchsenmotoren mit RL 30/31-73 gefahrenen in Relation zu setzen. Das Ergebnis ist in Abb. 20 dargestellt.

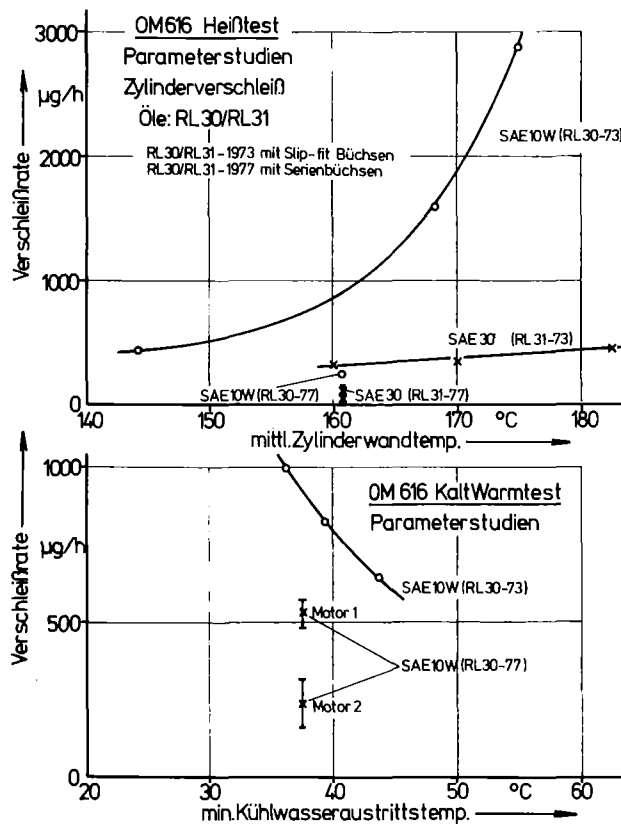


Abb. 20: Zylinderverschleiß am OM 616 im Heißtest (HT) und Kalt-Warm-Test (KWT) mit RL 30/31-73 und RL 30/31-77

Eingetragen sind über der mittleren Zylinderwandtemperatur bzw. der minimalen  $T_{KWA}$  die Zylinderverschleißraten mit den verschiedenen Ölen. Es war dabei nicht Ziel der Versuche mit dem Serienmotor das Temperaturverhalten zu klären, so daß hier nur mit einer Wandtemperatur gearbeitet wurde. Die Meßergebnisse aus diesen Kurzläufen am Serienmotor mit RL 30/31-77 sind mit Streubalken in das Diagramm eingetragen. Während im KWT der Mittelwert der Versuche mit dem RL 30-77 um etwa 60% bei gleicher  $T_{KWA}$  niedriger liegt als RL 30-73, was in etwa mit dem Kombitestergebnis übereinstimmt, liegt der Wert im HT für das RL 30-77 um 75% und für das Öl RL 31-77 um 80% niedriger.

Zu beachten ist jedoch, daß bei der Serienausführung ein um ca. 40% kleinerer Oberflächenbereich aktiviert ist, was aufgrund der Form des Verschleißzwickels ca. 20% niedrigere Verschleißraten ergibt. Berücksichtigt man dies, so zeigt sich, daß bei der hier gewählten Temperatur die Unterschiede zwischen Slip-Fit-Büchse und Serienzylinder im KWT klein, im HT dagegen relativ groß sind. Das würde auch der Vorstellung eines verschlechterten Wärmeübergangs der Slip-Fit-Büchse entsprechen, der sich ja vor allem im HT in erhöhtem Verschleißniveau bemerkbar machen müßte.

Alle hier gemachten Überlegungen können aufgrund der Absicherung in nur einem Temperaturpunkt jedoch nur als Anhaltswert gelten. Genaueren Aufschluß bringen hier Läufe mit dem Serienmotor auf verschiedenen Temperaturniveaus, wie sie mit RL 30/31-73 und Slip-Fit-Büchse bereits gefahren wurden. Solche Ergebnisse liegen inzwischen vor und sind in diesem Bericht für das Ringversuchs-Referenzöl im Anhang A 1 aufgeführt.

In diesem Zusammenhang ist auch noch die Tatsache von Interesse, daß bei der Auswertung der Vermessungsergebnisse von verschiedenen Kombitestläufen, die auf Zylinder 2 mit Slip-Fit-Büchse zur RNT-Messung bestückt waren, keine signifikante Erhöhung der Verschleißwerte von Zylinder 2 festgestellt wurde im Vergleich zu den anderen serienmäßigen Zylindern. Das würde bedeuten, daß der negative Einfluß der Slip-Fit-Büchse im Kombitest bei Einhaltung der Temperaturen nicht gravierend ist.

Auch der Einfluß von Ablagerungen im Kühlwassermantel scheint bei den ständig laufenden und mit Kühlmittel befüllten Kombitest-

motoren nicht so gravierend zu sein. Dafür sprechen die vielen Erfahrungen mit normalen Kombitestläufen die, wie beispielsweise in dem Ringversuch von 1973 festgestellt wurde, mit einer relativ geringen Streuung für den Mittelwert des Zylinderverschleißes (Standardabweichung ca. 16%) behaftet sind.

Dennoch ist eine genauere Untersuchung des Einflusses von Änderungen der Zylinderwandtemperatur beim Serienmotor auf den Zylinderverschleiß durch Veränderung der  $T_{KWA}$ , wie sie beim Slip-Fit-Büchsen-Motor bereits durchgeführt wurden, für den RNT-Kurztest wichtig und wurden deshalb für das Referenzöl des Ringversuches durchgeführt.

#### 3.2.4 Möglichkeiten der Bewertung von RNT-Kurztestergebnissen mit Bezug zum Kombitestergebnis im Zylinderbereich

Bei der Kombitestauswertung wird der Verschleiß als Mittel- und Maximalwert aus den Oberflächenmessungen des Zylinders im OT-Bereich nach dem Testlauf ermittelt. Als Verschleiß wird die größte Zwickeltiefe, d.h. ein einzelnes Maß pro Mantellinie, genommen. Beim RNT-Kurztest wird der gesamte Materialabtrag der aktivierten Zone des Meßzylinders erfaßt, und zwar als Materialabtragsrate bei den einzelnen Betriebsbedingungen.

Wenn eine Umrechnung vorgenommen werden soll, so müßte zunächst ein stets gleichbleibendes Verhältnis von Zwickeltiefe zu Zwickelfläche gefordert werden. Außerdem müßte die Zwickeltiefenverteilung an den Meßstellen auch die tatsächliche Verteilung am ganzen Umfang des Zylinders genügend genau wiedergeben. Zusätzlich müßte gewährleistet sein, daß die lineare Umrechnung der Verschleißraten des Kurztests auf die Laufzeit des Kombitests zulässig ist und der Verschleißanteil des im Kurztest nicht mitgemessenen Einlaufs und MDT am Gesamtverschleiß korrigiert werden muß. Aufgrund der vielen Voraussetzungen ist es wahrscheinlich, daß eine Umrechnung der Verschleißraten des Kurztests nur zu wenig brauchbaren Aussagen über das Kombitestergebnis führt.

Um dies durch Messungen zu erhärten, wurden einige Auswertungen an den Kombitestläufen durchgeführt, die auch mit der RNT gefahren wurden. Zunächst wurden aus verschiedenen Kombitestläufen mittels fotografischer Vergrößerung der Meßschriebe der Mantellinien die Zwickelflächen ermittelt und in das Verhältnis zu den gemessenen Zwickeltiefen gesetzt. Das Ergebnis ist in Abb.21 dargestellt.

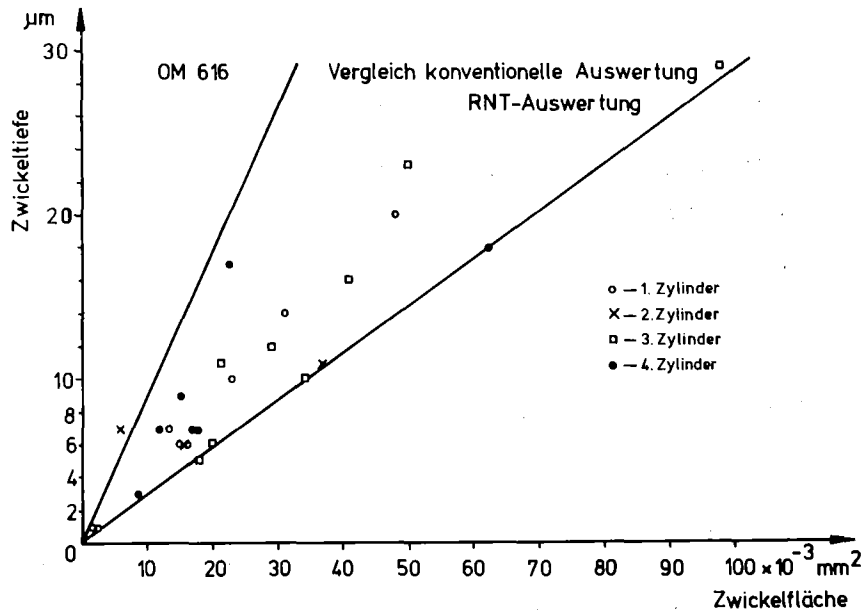


Abb.21: Verhältnis von Zwickeltiefe und Zwickelfläche aus Mantellinienmessungen eines OM 616-Kombitest

Das Bild zeigt, daß das Verhältnis Zwickelfläche zu Zwickeltiefe wie erwartet erheblichen Streuungen unterliegt. Dies ist nicht erstaunlich, da sich die Form der Zwickel stark verändert, wie bereits eine oberflächliche Betrachtung von Kombitestauswertungen zeigt. Dies kommt auch durch die Ergebnisse von Tab.2 zum Ausdruck. Nach der einfachen Überlegung, daß im Falle der Richtigkeit einer einfachen Umrechnung ein festes Verhältnis zwischen Mantellinienauswertung (Mittelwert der Zwickeltiefe) eines Kombitests und im gleichen Kombitest auf Zylinder 2 mit RNT gemessenem Gesamtverschleiß bestehen müßte, wurden solche Verhältnisse aus 6 Kombitestläufen ermittelt. Sie sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Motor	MW. Zwickeltiefe/Gesamtverschleiß RNT $\mu\text{m}/\text{mg}$	(Zyl. 2)
OM 615	.04	
"	.22	
OM 616	.15	Mittelwert: $.117 \mu\text{m}/\text{mg}$
"	.06	Standardabw.: $.071 \mu\text{m}/\text{mg}$
"	.16	
"	.07	

Tab.2: Verhältnisse des Mittelwerts der Zwickeltiefen und des im selben Lauf mit RNT gemessenen Gesamtverschleißes auf Zylinder 2 aus verschiedenen Kombitestläufen

Das Ergebnis zeigt, daß zum einen der Mittelwert der Verhältnisse recht gut mit dem aufgrund geometrischer Überlegungen ermittelten Umrechnungsfaktor Abtrag in  $\mu\text{m}$  zu Verschleiß in  $\text{mg}$  (für die hier eingesetzte Slip-Fit-Büchse ca.  $0,1 \mu\text{m}/\text{mg}$ ) übereinstimmt. Auf der anderen Seite zeigen die Einzelmessungen große Abweichung, was die Standardabweichung mit mehr als  $\pm 60\%$  andeutet. Würde man eine statistische Sicherheit von  $98\%$  zugrunde legen, so wäre der Streubereich sogar etwa  $\pm 120\%$ . Dies zeigt, daß eine solche Umrechnung nur als sehr grobe Abschätzung zu gebrauchen ist. Die Ursache liegt mit großer Wahrscheinlichkeit in der Form des Verschleißzwickels.

Trägt man, wie z.B. in /3/ aufgezeigt, das Verhältnis von durch Ausplanimetrieren der Verschleißzwickel im aktivierten Bereich errechneten Gesamtverschleiß zum mit RNT gemessenen Gesamtverschleiß auf, so zeigen sich erheblich geringere Abweichungen. Allerdings sind auch hier noch beträchtliche Abweichungen möglich, die u.a. auf Fehler bei der Wiedergabe der tatsächlichen Verschleißverteilung durch die 8 Meßstellen am Umfang zurückzuführen sind.

Dies stört beim Kombitest aber nicht besonders, weil zum einen immer die gleiche Auswertprozedur herangezogen wird und über die Mittelwertbildung aus 32 Meßstellen die Mittelwerte vergleich-



bar sind. Sie geben aber nicht den tatsächlichen Abtrag wieder.

Das Ergebnis der Untersuchungen einer Umrechnung von RNT-Kurztestergebnissen auf Kombitestergebnisse läßt sich dahingehend zusammenfassen, daß ein rechnerischer Bezug mit einer befriedigenden Aussagesicherheit nicht möglich ist.

Eine Schmiermittelbewertung ist demnach nur möglich über den Bezug zu geeigneten Referenzölen, deren Verschleißergebnisse im Kombitest gesichert sind und die über längere Zeit in gleichbleibender Qualität verfügbar sind. Daß gerade die letzte Forderung erhebliche Probleme mit sich bringt, haben die Versuche mit dem Reblend RL 30/31-77 des Ringversuchsöls (RL 30/31-73) gezeigt (vgl. 3.2.3). Das Öl RL 30/31-73 schien aufgrund der Ringversuchsergebnisse von 1973 gut als Referenzöl geeignet, weil es im Mittelwert relativ nah an der Grenze des zulässigen Verschleißes im Zylinder für den Kombitest lag. Wie jedoch die Versuche mit dem Reblend zeigten, hatte dieses ein um ca. 50% besseres Verschleißverhalten als das Originalöl.

Mit der Frühjahrssitzung 1978 des DKA wurde ein sogenanntes Standardisierungsöl (CEC-Bezeichnung RL-74) für den OM 616-Kombitest bekannt gemacht, das im Rahmen der Projektgruppe CL-17 zu Vergleichszwecken in Ringversuchen des OM 616 Kombitest eingesetzt werden soll. Über dieses 15 W 50-Öl sind 4 Kombitestergebnisse bekannt. Sie zeigen, daß das RL-74 mit im Mittel  $0,38 \mu\text{m}/1000 \text{ km}$  Zylinderverschleiß ähnlich bewertet wird wie das RL 30/31-73 aus dem Ringtest 1973/74. Dieses Öl RL 74 sollte deshalb im Ringversuch (s. Kap. 5) als Referenzöl eingesetzt werden. Günstig wäre allerdings die Verwendung eines echten Referenzöls, d.h. eines Öls, von dem nicht nur das Kombitestergebnis statistisch abgesichert vorliegt, sondern auch die Bewährung in der Praxis bekannt ist. Eine Lösung diese Problems konnte noch nicht gefunden werden.

Mit den Referenzölen ist der Bezug zum Kombitest, wie er für einen Kurztest als Vorauswahltest notwendig ist,

relativ einfach möglich, indem die Kandidatenöle mit den Referenzölen gefahren werden und über relative Werte für den Verschleiß die Lage im Kombitestergebnis im Bezug auf das Referenzöl angegeben werden kann. Um zu vermeiden, daß man für den KWT und HT je ein Referenzöl benötigt, ist ein Mehrbereichsöl wünschenswert, da damit die Lagerhaltung vereinfacht wird.

Erste Anhaltswerte zur Klärung der Frage, ob die in Kurzläufen ermittelte Differenzierung des Verschleißverhaltens zwischen Prüf- und Referenzöl ausreicht, ob die Wiederholbarkeit in einem Motor und die Vergleichbarkeit bei verschiedenen Motoren genügt, wie die Prüfprozedur für die Referenz- und Prüföle aussehen muß und wie lange die einzelnen Phasen des Kurztests dauern müssen, lassen sich nur über eine Vielzahl von Kurzläufen mit entsprechenden Ölen ermitteln. Einige Versuche dazu enthält das folgende Kapitel.

### 3.2.5 Erste Ergebnisse zur Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit mit RNT-Kurzläufen in Heißtest (HT) und Kalt-Warm-Test (KWT)

Zunächst sollen einige Beispiele gezeigt werden, die noch mit Slip-Fit-Büchsen auf Zylinder 2 gemessen wurden. Aus einer sehr großen Anzahl von Läufen, die der Ölentwicklung dienten und deshalb mit mehr als 30 verschiedenen Öltypen gefahren wurden, konnten einige mit typischen Aussagen ausgewählt werden. Zunächst wird ein Beispiel gezeigt, bei dem ein Öl SAE 30 in HT und KWT in drei verschiedenen OM 616-Motoren zu verschiedenen Laufzeiten gefahren wurde. Das Ergebnis ist in Tabelle 3 zusammengefaßt.

Motor	Mittlere Verschleißrate (Standardabw.)		Relation KWT/HT
	Heißtest $\mu\text{g/h}$	Kalt-Warm-Test $\mu\text{g/h}$	
OM 616-1	204 (+ 36.5)	113 (+ 57.7)	0,55
OM 616-2	202.5 (+ 100.4)	420 (+ 87.2)	2,1
OM 616-3	155 (+ 84.1)	142 (+ 52.9)	0,92

Tab. 3: Verschleißraten in HT und KWT in drei verschiedenen OM 616-Motoren bei Einsatz eines Öls SAE 30 (Slip-Fit-Büchsen)

Die Versuche wurden im Wechsel mit anderen Ölen gefahren. Die Versuchszeit lag zwischen 25 und 550 h Laufzeit. Die Meßgenauigkeit der RNT lag bei etwa  $\pm 20 \mu\text{g/h}$ . Betrachtet man die Ergebnisse, so fällt bei den HT-Werten auf, daß die Mittelwerte zwar recht gut übereinstimmen, daß aber Standardabweichungen von bis zu 50% auftreten. Bei den KWT-Ergebnissen differieren die Mittelwerte um fast 300% und auch die Standardabweichungen erreichen 50%. Diese Werte sind prüfstands- und motorbedingt. Sie sind nicht über die RN-Meßtechnik zu erklären. Ist das bisher gesagte für eine Kurztestprüfung schon wenig ermutigend; Sowohl die Wiederholbarkeit an einem Motor als auch die Vergleichbarkeit zwischen den 3 Motoren ist schlecht; so zeigt die Betrachtung der Relation der mittleren Verschleißraten aus HT/KWT, daß auch sie sich drastisch verschiebt. Mit dem gleichen Öl wird in einem Motor im Mittel die 0,55-fache Verschleißrate im KWT im Vergleich zum HT und im anderen Motor die 2,1-fache Verschleißrate gemessen. In Abb.22 sind die Relationen der mittleren Verschleißraten je Motor in KWT und HT mit drei unterschiedlichen Ölen aufgetragen. Auch hier zeigen sich sehr große Streuungen dieser bereits aus Mittelwerten gewonnenen Relationen.

Für eine Kurztestprüfung mit relativer Bewertung über ein Referenzöl ist interessant, inwieweit die mittleren Verschleißraten von Prüfölen in Bezug auf ein Vergleichsöl, das unter vergleichbaren äußeren Bedingungen im selben Motor gefahren wird, konstant bleiben. Aus den Messungen mit Slip-Fit-Büchsen können einige Versuche in dieser Form ausgewertet werden. Bezugsöl ist da-

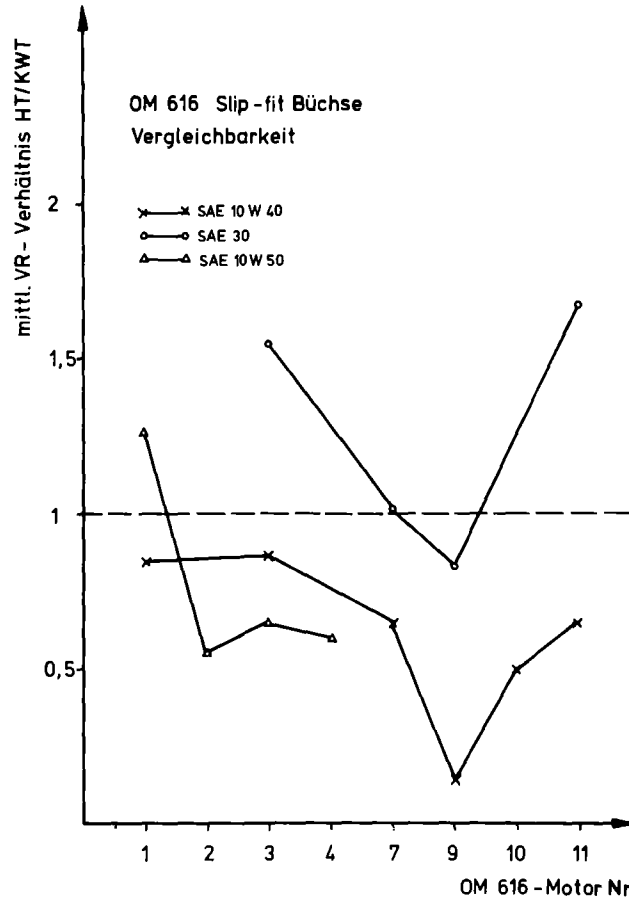


Abb. 22: Verhältnis der Verschleißraten Heißtest/Kalt-Warmtest bei drei verschiedenen Ölen in unterschiedlichen OM 616-Motoren

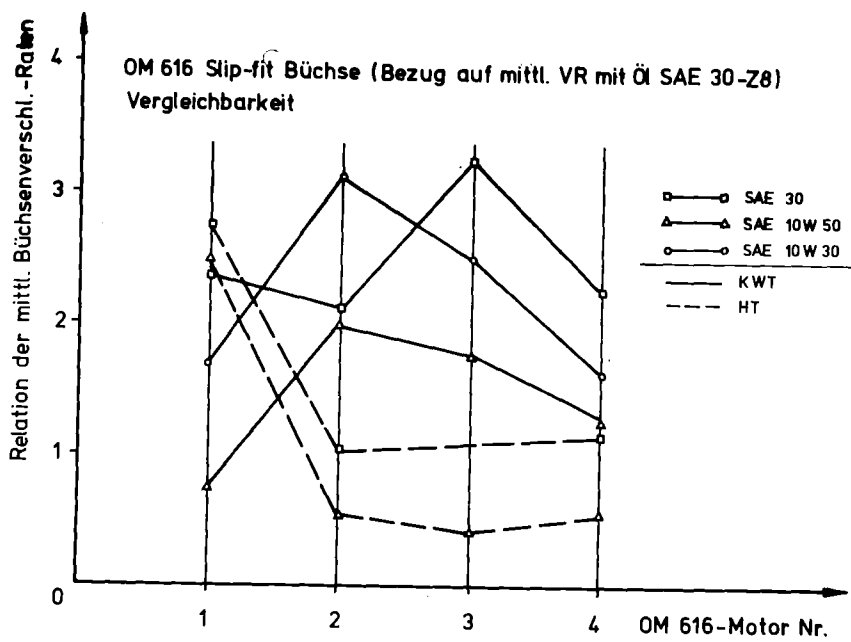


Abb. 23: Relation der Büchsenverschleißraten verschiedener Öle bezogen auf ein Vergleichsöl in unterschiedlichen OM 616-Motoren

bei das Öl SAE 30-Z 8, wie es auch der Tabelle 3 zugrunde liegt. In Abb.23 sind für drei verschiedene Prüfole, die in vier OM 616-Motoren gefahren wurden, solche Relationen der mittleren Verschleißraten in HT und KWT, bezogen auf die Verschleißraten mit dem Öl SAE 30-Z 8, dargestellt, sie unterscheiden sich für ein Öl um bis zum Faktor 3.

An eine in gleicher Weise durchzuführende Kurztestprüfung ist aufgrund dieser Ergebnisse nicht zu denken, auch wenn nur eine Relativausgabe mit Hilfe eines Bezugs- oder Referenzöls versucht wird.

Als Ursache für diese ungünstigen Ergebnisse wird die Slip-Fit-Büchse mit ihren schlecht definierten Wärmeübergangsbedingungen zum Gehäuse (leichter Schiebesitz mit relativ großen Toleranzen) vermutet. Die dadurch möglicherweise extremen Temperatur- und Verzugsbedingungen können zu starken Veränderungen der örtlichen Verschleißraten führen, was von einer so empfindlichen Meßmethode wie der RNT direkt wiedergegeben wird. Als Abhilfe wurde deswegen auf die Verwendung der serienmäßigen Büchsen mit Preßsitz übergegangen. Über mit diesen Motoren durchgeführte Versuche wird im folgenden berichtet werden. Für die Slip-Fit-Büchsenmotoren kann bereits jetzt festgehalten werden, daß sie für eine Ölbewertung in Kurztestverfahren nicht sinnvoll einzusetzen sind.

Wie bereits in Kap. 3.2.3 dargelegt, wurden für die Untersuchungen mit den Serien-OM 616-Motoren als Referenzöl die Öle (RL 30/31-73) aus dem Ringtest von 1973 als Reblend (RL 30/31-77) verwendet, um möglichst einen gesicherten Bezug zum Kombitestergebnis zu haben. Dieses Reblend wurde in einem Kombitest gefahren. Das Ergebnis der konventionellen Auswertung (vgl. Kap. 3.2.3, Tabelle 1) zeigte, daß wahrscheinlich dieses Reblend um etwa 50% günstigere Verschleißschutzeigenschaften im Zylinderbereich aufweist als das ursprüngliche Öl. Mit diesen Kenntnissen und unter Verwendung der Ergebnisse der Abb.13 und 14 lassen sich die zu erwartenden Verschleißraten in etwa abschätzen.

Der mittlere Gesamtverschleiß für den Kombitest mit RL 30/31-77 betrug 4,11  $\mu\text{m}$ . Dieser Wert entspricht unter Berücksichtigung der vom Ring überlaufenen aktivierten Höhe von 6 mm und einer

mittleren Zwickelform aus Dreieck und Rechteck etwa 41 mg Verschleißmasse/Zylinder. Berücksichtigt man, daß nach Abb.13 im Mittel ca. ein Drittel des Gesamtverschleißes auf den Einlauf und den mittleren Drehzahltest entfallen, so betrug der mittlere Gesamtverschleiß aus HT und KWT ca. 28 mg. Unter der Annahme, daß die Verschleißrate in beiden Testteilen etwa gleich ist (vgl. Abb. 14), errechnet sich eine Verschleißrate von ca. 250 µg/h für HT und KWT. Bei einem angenommenen Verschleißratenverhältnis KWT/HT von 3/1 ergeben sich 336/110 µg/h und bei einem Verhältnis von 5/1 ca. 350/70 µg/h als mittlere Verschleißrate. Damit ist die etwa zu erwartende Verschleißgrößenordnung für die RNT-Versuche bekannt. Die Aktivierung wurde mit etwa 0,20 µCi/mg ausgelegt, um diese Verschleißraten in Laufzeiten von etwa 5 h HT bzw. 80 Zyklen KWT auf ±15 µg/h genau erfassen zu können.

Das Versuchsprogramm für den ersten OM 616-Serienmotor bestand aus einem Einlauf nach CEC-Testvorschrift und den vorgeschriebenen Kontrollläufen. Daran schloß sich ein HT-Dauerlauf mit RL 30- und 31-77 an. Danach wurden Kurzläufe in HT und KWT gefahren, und zwar je 10 Läufe à 5 h bzw. 80 Zyklen mit einer Ölfüllung,-nach jedem Lauf 2 h Abkühlpause und Ölverbrauchsergänzung durch Frischöl- und 10 Läufe mit 2 h Abkühlpause und mit Ölwechsel nach jedem Lauf, um über die Streuungen Aussagen über den möglicherweise vorhandenen Einfluß des Ölwechsels, wie er in einer Kurztestprozedur ständig vorkommt, zu erhalten. Im Anschluß an diese Streuungsuntersuchungen wurden mit einem synthetischen Mehrbereichsöl SAE 5 W 20 und einem Mineralöl SAE 10 W 40 Untersuchungen über die Verschleißrelationen und evtl. Rückwirkungen der Kandidatenöle auf das Ergebnis der immer wieder angefahrenen Referenzöle RL 30/31-77 gefahren. Leider fiel der erste Testmotor vor Abschluß dieser Serie, nach 5 HT-Läufen mit dem SAE 5 W 20 durch einen Lagerschaden nach insgesamt 296 Laufstunden aus. Im folgenden sind die Ergebnisse dieser Testläufe mit dem ersten Serienmotor dargestellt.

Abb.24 zeigt die Verschleißergebnisse des Zylinders 2 über der Laufzeit die mit den Ölen RL 30/31-77 in HT und KWT gefahren wurden. Jeder Meßpunkt steht für den Mittelwert der Verschleißraten aus einem 5 h HT-Lauf bzw. 80 Zyklen KWT-Lauf.

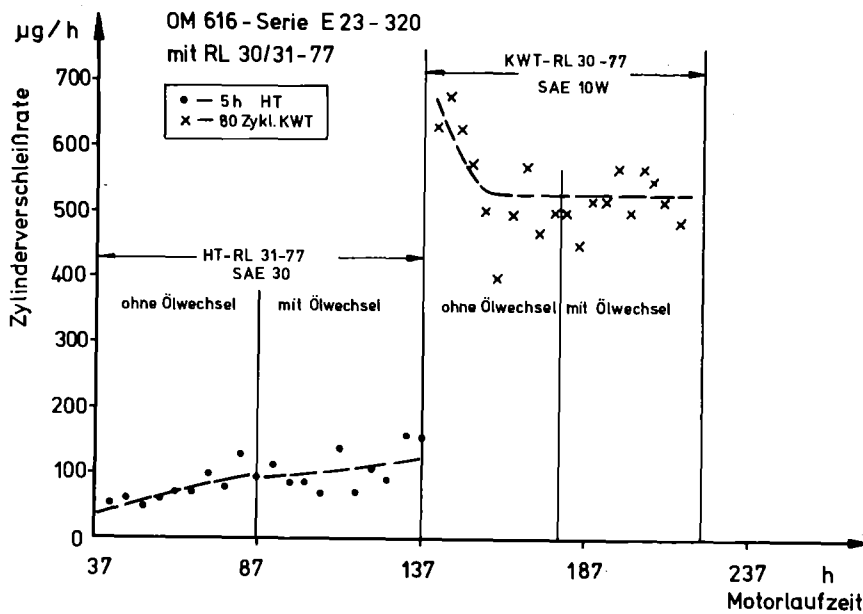


Abb. 24: Ergebnisse der Kurzläufe im Heißtest (HT) und Kalt-Warm-Test (KWT) mit RL 30/31-77 im OM 616-Serienmotor

Bei den HT-Läufen fällt auf, daß über der Zeit ein Anstieg der mittleren Verschleißrate um etwa den Faktor zwei erfolgt. Auch bei den Läufen mit Ölwechsel ist der Verschleißratenanstieg feststellbar. Auffällig ist, daß die Streuungen bei den Läufen mit Ölwechsel erheblich größer sind als bei denen ohne Ölwechsel. Dies ist erstaunlich, da auch bei den Läufen ohne Ölwechsel zwischen den Läufen je zwei Stunden Abkühlpause eingehalten wurden. Bei den Läufen mit Ölwechsel wurde zusätzlich 1 x mit Spülöl gespült und mit anderem Öl wieder aufgefüllt.

In den KWT-Läufen ist der in Kap. 3.2.2, Abb.15, bereits gezeigte Abfall der Verschleißraten beim ersten Anfahren der KWT-Bedingung für diesen Prüfmotor zu erkennen. Die Bereiche annähernd konstanter Verschleißratenverlaufes haben Standardabweichungen von 16 bzw. 10% im konstanten Verschleißratenbereich. Faßt man diese Ergebnisse bezüglich der Eignung für einen Kurztest zusammen, so zeigt sich, daß die Bewertungen mit deutlichen Streuungen behaftet sind. Diese Streuungen sind nicht durch die RNT-Meßtechnik bedingt sondern haben motor- und prüf-

standseitige Ursachen. Die mittleren Verschleißraten des Motors betragen etwa  $95 \mu\text{g/h}$  für den HT und  $530 \mu\text{g/h}$  für den KWT, d.h. das Verschleißratenverhältnis beträgt etwa 5,5:1. Das bedeutet, daß die mittleren Verschleißraten etwa um 50 % höher lagen als aufgrund der Umrechnung aus dem Kombitest zu erwarten gewesen wäre.

Ersichtlich ist, daß mit diesen Ölen (RL 30/31-77) der KWT der das Prüfergebn dominierend beeinflussende Testteil ist. Wird die doppelte Laufzeit des KWT gegenüber dem HT berücksichtigt, so ergibt sich, daß etwa 11 mal so viel Verschleiß im KWT erzeugt wird wie im HT. Bei den Slip-Fit-Büchsenversuchen (mit RL 30/31-73) wurde etwa 7-facher Verschleiß im KWT (vgl. Abb.20) gegenüber dem HT erzeugt. Auch dieses Ergebnis ist ein Indiz dafür, daß durch die verbesserten Wärmübergangsbedingungen des Serienmotors die HT-Verschleißwerte verringert worden sind.

Im Anschluß an diese Läufe wurde im HT ein synthetisches Öl SAE 5 W 20 im Wechsel mit dem Öl RL 30/31-77 gefahren. Das Ergebnis ist in Abb. 25 dargestellt.

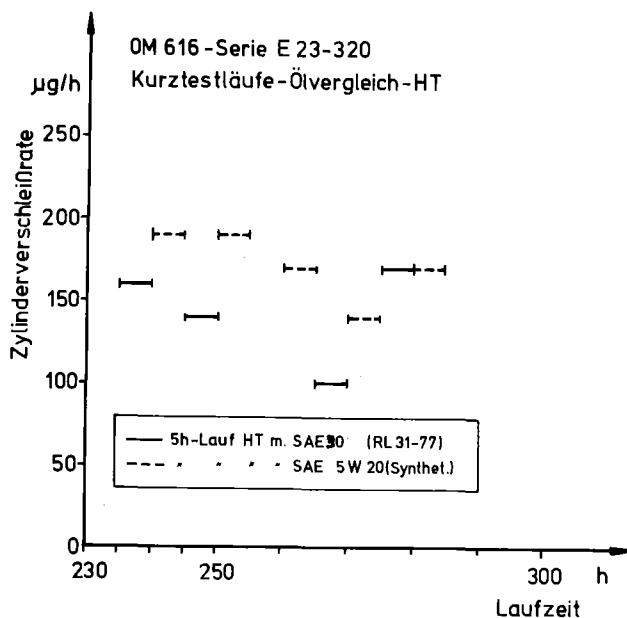


Abb. 25: Ergebnisse aus Kurzläufen im Heißtest (HT) mit RL 31-77 und einem synthetischen Öl SAE 5 W 20 im OM 616-Serienmotor



Es zeigte sich, daß im Mittel das SAE 5 W 20 einen relativen Verschleiß von 131 % (Std.-Abweichung  $\pm$  25 %) im Vergleich zum SAE 30 Referenzöl aufweist (RL 31-77). Die Verschleißratenverhältnisse der beiden Öle in den einzelnen 5 h-Läufen schwanken zwischen 100 und 140 %, d.h. das Öl 5 W 20 wurde in allen Läufen schlechter bis gleich gut bewertet als das Referenzöl RL 31-77. Leider konnten wegen eines Motorschadens die Versuche mit diesem Motor im KWT-Bereich nicht mehr gefahren werden.

Mit einem weiteren Serienmotor wurde anschließend ein ähnliches Erprobungsprogramm gefahren. Dieser Motor wurde, abweichend vom ersten, mit dem DB-Kurzeinlaufprogramm und einem Öl SAE 10 W 40 eingefahren und dann über etwa 50 h mit RL 31-77 im HT weiter eingelaufen. Danach folgten Kurzversuche mit RL 30/31-77 im HT und KWT. Im Anschluß daran wurden mit dem synthetischen Öl SAE 5 W 20 und einem Mineralöl SAE 10 W 40 wieder Vergleichsläufe in HT und KWT gefahren. Die Ergebnisse sind im folgenden dargestellt.

Abb. 26 zeigt die Versuche mit RL 30/31-77 in Feineinlauf und HT und KWT mit und ohne Ölwechsel. Zunächst fällt auf, daß das Verschleißrateniveau dieses Motors um mehr als die Hälfte niedriger liegt als das des Motors zuvor.

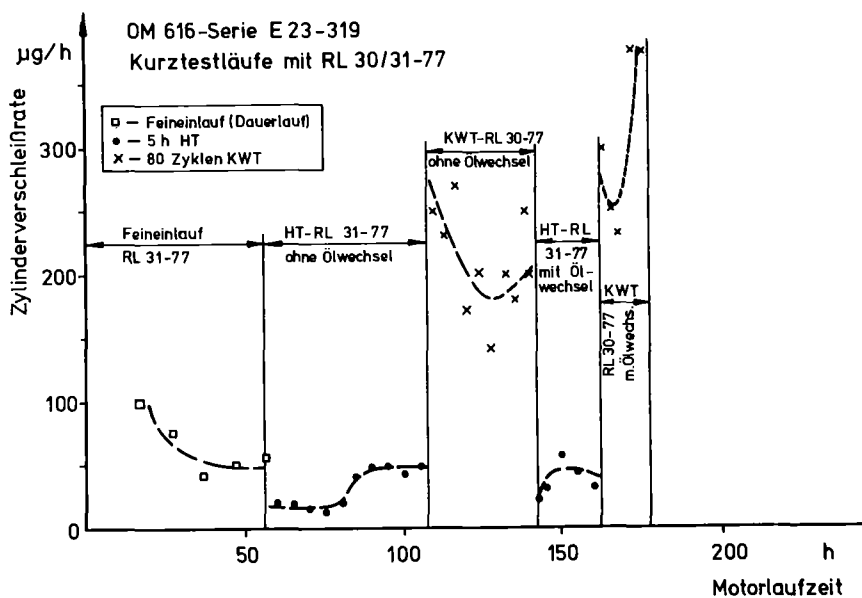


Abb. 22: Ergebnisse von Kurzläufen im Heißtest (HT) und Kalt-Warm-Test (KWT) mit RL 30/31-77 im OM 616-Serienmotor

Der Feineinlauf zeigt den typischen Verschleißratenrückgang. In anschließenden Kurzläufen im HT ohne Ölwechsel stellt sich zunächst ein sehr niedriges Verschleißratenniveau ein, das aber nach etwa 5 Läufen wieder auf das Niveau am Ende des Feineinlaufs ansteigt. Bis gegen Ende der Versuche (200 bis 300 h) steigt die Verschleißrate nochmals um etwa 50% auf 70 - 80  $\mu\text{g}/\text{h}$  an. Die Streuungen der Verschleißraten liegen etwa so wie beim ersten Motor. Der KWT zeigt zunächst den erneuten Einlauf in den ersten Läufen wie der Motor zuvor. Die Verschleißraten bleiben aber in den weiteren Läufen nicht konstant, der Mittelwert steigt an. Die Streuungen sind absolut gesehen erheblich größer als beim HT und auch größer als beim Vorgängermotor. Die Läufe mit Ölwechsel zeigen auch starke Veränderungen über der Laufzeit. Über die Streuungen kann keine exakte Angabe gemacht werden weil der zeitliche Verlauf nicht genau genug erfaßt werden kann. Die zeitlichen Veränderungen der Verschleißraten sind bei diesem Motor viel stärker als beim ersten Motor. Das Verschleißverhältnis HT zu KWT liegt im Mittel aller Werte bei etwa 5:1, wenn man als mittlere Verschleißrate im HT etwa 50  $\mu\text{g}/\text{h}$  und im KWT etwa 250  $\mu\text{g}/\text{h}$  ansetzt. Das heißt, daß im Mittel in beiden Motoren das Verhältnis KWT/HT etwa gleich bewertet wurde.

Die mittleren Verschleißratenhöhen zeigen an, daß in diesem Motor RL 30/31-77 etwa 30% niedriger bewertet würde, als aus der Umrechnung der Kombitestergebnisse erwartet wurde. Allerdings dürfen diese aufgrund von Mittelwertbildungen gefundenen Relationen nicht überbewertet werden, da es sich hier nicht nur um Streuungen, sondern auch um erhebliche Mittelwertsveränderungen über der Laufzeit handelt.

Benutzt man die ab etwa 170 Laufstunden durchgeführten Vergleichsläufe, so stimmt das Verschleißverhalten z.B. wieder besser mit den Werten aus dem Kombitest mit RL 30/31 überein.

Aus den Ergebnissen der Abb.26 lassen sich wichtige Erkenntnisse für einen Kurztest ableiten. Auf keinen Fall ist eine

Kurztestbewertung über absolute Verschleißratenhöhen durchzuführen, da diese sich über der Zeit stark verändern. Das bestätigt Erkenntnisse aus den Läufen mit Slip-Fit-Büchsen. Aber auch beim Bezug auf Referenzöle muß dieser Veränderung Rechnung getragen werden. Es empfiehlt sich, die Referenzöle sehr häufig einzusetzen, weil die motorischen Änderungen kurzfristig auftreten können. Außerdem ist festzustellen, daß das RL 30/31-77 nicht sehr gut als Referenzöl geeignet ist, da sein Kombitestergebnis einseitig stark vom KWT bestimmt wird (KWT/HT ca. 11:1). Besser wäre hier ein Öl mit gleichmäßigerer Eignung für HT und KWT, so daß auch im HT höhere Verschleißraten erzielt werden, was die relativen Streuungen aufgrund der Meßgenauigkeit der RNT verkleinern würde. Günstig wäre auch ein Öl, das in etwa die Borderline des Kombitests repräsentiert.

In Abb. 27 sind die Ölvergleichsläufe mit dem 2. Serienmotor im HT dargestellt. Zunächst wurde mit SAE 5 W 20 im Vergleich zu

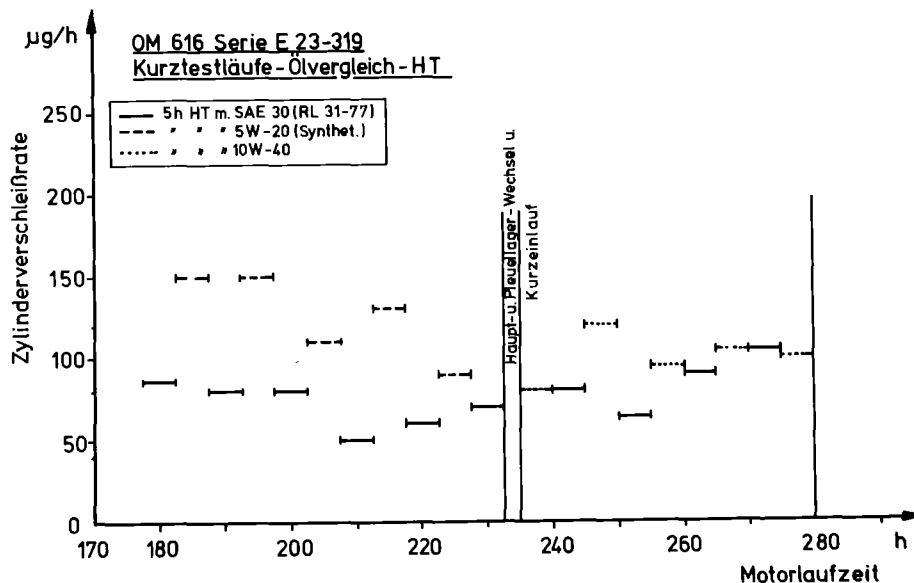


Abb. 27: Ergebnisse von Kurzläufen im Heißtest (HT) mit RL 31-77, einem synthetischen Öl SAE 5 W 20 und einem Mineralöl 10 W 40

RL 31-77 gefahren. Auch hier ist wie beim ersten Motor eine schlechtere Bewertung des SAE 5 W 20 Öls festzustellen. Die relative Bewertung ergibt 184% der Verschleißrate mit RL 31-77 (Std.-Abweichung  $\pm 36\%$ ). Allerdings ist der Unterschied mit etwa 180% im Vergleich zu 120% beim 1. Serienmotor erheblich. Eine Erklärung für dieses Verhalten könnten unterschiedliche Verläufe über der Zylinderwandtemperatur, wie sie z.B. in Abb.18 für den Slip-Fit-Büchsenmotor gefunden wurden, sein. Verläuft die Verschleißkurve mit dem SAE 5 W 20 Öl flach und die des RL 31-77 relativ steil, so können sich bei einem insg. niedrigeren Temp.niveau erhebliche Verschiebungen auch in der relativen Bewertung ergeben. Das ergibt eine zweite Anforderung an das Referenzöl. Es sollte einen möglichst flachen Verlauf über der Temperatur aufweisen, wie auch bereits erwähnt. Achtet man dann noch bei der Kurztestprozedur darauf, daß möglichst die oberen Temperaturgrenzwerte gefahren werden, so liegt man mit der Bewertung immer auf der sicheren Seite, d.h. man bewertet allenfalls das Kandidatenöl zu schlecht, aber nie zu gut im Bezug auf den Kombitest. Eine solche Ausweidlösung ist aber zu umgehen, wenn es gelänge, die Temperaturänderungen im Betrieb zu reduzieren. Dies scheint allerdings aus heutiger Sicht ein aussichtsloses Unterfangen, da nicht alle Einflußparameter meßtechnisch zu erfassen sind.

Im zweiten Versuchsabschnitt mit dem SAE 10 W 40 Mineralöl wurde zunächst ein kompletter Lagerwechsel vorgenommen, da sinkender Öldruck während der Läufe mit SAE 5 W 20 und RL 31-77 auf einen Schaden hinwies. Die ausgebauten Lager zeigten erste Ermüdungsschäden in Form von feinem Ribnetzwerk in der Oberfläche. Ein Ausbröckeln war allerdings noch nicht festzustellen.

Die Versuche im HT zeigten, daß auch das Öl 10 W 40 schlechter bewertet wurde als das RL 31-77, und zwar im Mittel mit 125% (Std.-Abweichung  $\pm 29\%$ ). Die Streuungen in der Relation der unmittelbar aufeinander folgenden Läufe ist relativ groß, wie Abb.27 zeigt. Gegen Ende der Versuche wird sogar RL 31-77 geringfügig schlechter bewertet als das 10 W 40. Dies zeigt die Grenzen eines Kurztests auf. Eine signifikante Unterscheidung zweier Öle, auch bei relativer Bewertung mittels Referenzölen dürfte erst bei Un-

terschieden von mehr als 20 % möglich sein. Allerdings muß bei dieser Aussage auch beachtet werden, daß auch der Kombitest, der ja über viele Laufstunden und mehrere Betriebsbedingungen mittelt, wie die Ergebnisse des Ringversuchs 1973 im Zylinderbereich zeigten, eine Streuung von ca. 16 % aufweist. Das aber bedeutet, daß eine Kurztestaussage mindestens mit dieser Unschärfe behaftet sein wird, wobei noch zu beachten ist, daß die relativ niedrigen Verschleißraten im HT für das Kombitestgesamtergebnis wenig Gewicht haben.

Abb. 28 zeigt die Ergebnisse mit denselben Ölen im KWT.

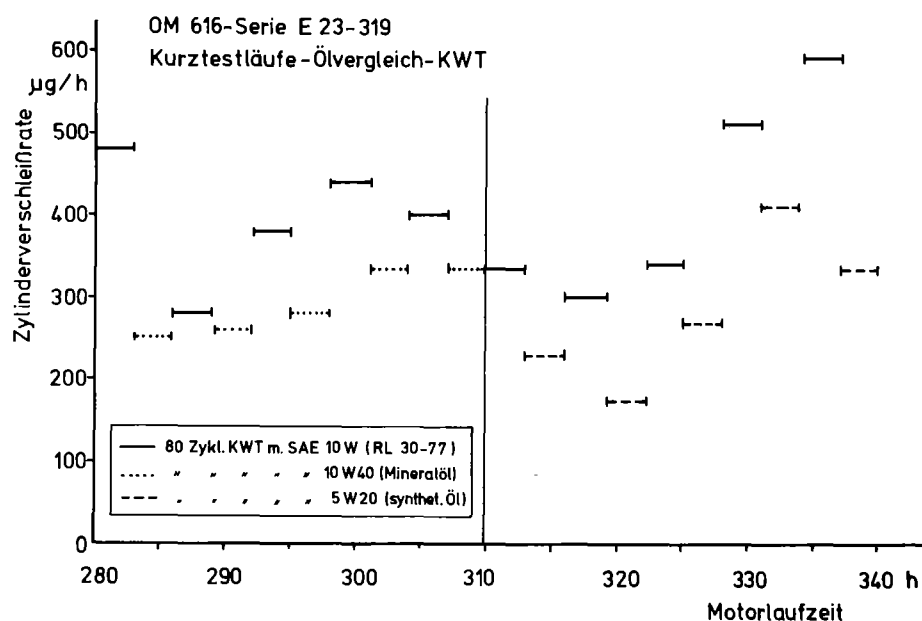


Abb. 28: Ergebnisse von Kurzläufen im Kalt-Warm-Test (KWT) mit RL 30-77, einem synthetischen Öl SAE 5 W 20 und einem Mineralöl 10 W 40

Hier zeigen beide Testöle deutlich niedrigere Verschleißraten als RL 30-77. Auffällig sind wieder die starken Veränderungen der Referenzölverschleißraten über der Zeit. Bei dem SAE 5 W 20 beträgt die mittlere relative Verschleißrate 66,3 % (Std.-Abweichung + 10 %) und beim SAE 10 W 40 81,6 % (Std.-Abweichung  $\pm$  11 %), wenn

die Relation immer auf den Mittelwert aus zuvor und unmittelbar danach gefahrenem Referenzöl gebildet wird, was das Zeitverhalten des Prüfobjekts berücksichtigt. Die Streuungen im KWT sind also erheblich kleiner in der Relation. Faßt man die Ergebnisse dieser Kurzversuche zusammen, so läßt sich feststellen, daß mit den Serienmotoren die Streuungen zwar immer noch beträchtlich sind, daß aber die extremen Abweichungen, wie sie mit den Slip-Fit-Motoren aufgetreten sind, hier nicht festgestellt werden konnten. Auch die Relationen in der Ölbewertung über Referenzöle sind, soweit dies das vorhandene Material angeht, wesentlich besser als bei Versuchen mit der Slip-Fit-Büchse. Die Versuche haben weiter bestätigt, daß eine Ölbewertung über die absolute Verschleißratenhöhe nicht möglich ist, da auch mit den Serienmotoren noch erhebliche Streuungen und zeitliche Veränderungen in der Verschleißrate auftreten.

Die Güte der Vergleichsversuche litt im Heißtest unter den sehr kleinen Verschleißraten mit dem RL 31-77, die z.T. in der Gegend der Meßgrenze des RNT-Verfahrens lagen. Deshalb muß im Ringversuch ein anderes Referenzöl eingesetzt werden.

Die Versuche zeigten weiterhin, daß bei allen drei eingesetzten Ölformulierungen der KWT-Verschleiß den dominierenden Anteil bei der Umrechnung auf Kombitestergebnisse aufwies. Im Extremfall ergab sich ein Anteil KWT/HT von 11/1 bezogen auf den auf die Laufzeit hochgerechneten Gesamtverschleiß. Es hat sich weiterhin gezeigt, daß im vorläufigen Kurztestprogramm für den Ringversuch die Referenzölläufe die Prüfölläufe zeitlich eingabeln sollten, um das Zeitverhalten von Motor und/oder Prüfstand besser bei der Bewertung zu berücksichtigen. Unter diesen Umständen wird angestrebt, Vergleichsvertrauensbereiche von knapp über 20 % zu erreichen. D.h., daß ein Unterschied von mehr als 20 % zwischen dem Mittelwert in der Verschleißrate der beiden Referenzölläufe und des dazwischen lie-

genden Prüföllaufs signifikant ist, wenn die Verschleißraten nicht unter  $100 \mu\text{g/h}$  liegen. Diese Grenze von  $100 \mu\text{g/h}$  ergibt sich aufgrund des Einflusses der Meßgenauigkeit des Meßverfahrens unter den gewählten Meß- und Aktivierungsbedingungen (von etwa  $0,2 \mu\text{Ci/mg}$ ).

Der praktische Hintergrund der Meßgrenze von  $100 \mu\text{g/h}$  ist, daß eine Differenzierung nicht mehr notwendig ist, wenn die Verschleißrate diesen Grenzwert unterschreitet. Berechnet man - mit allen Vorbehalten zur Umrechnung - den entsprechenden Abtrag, bezogen auf das Kombitestergebnis, so ergibt eine Verschleißrate von  $100 \mu\text{g/h}$  ca.  $0,4 \mu\text{m}$  im HT und  $0,8 \mu\text{m}$  im KWT. Setzt man diese Werte zu dem zulässigen Grenzwert des mittleren Zylinderschleiß ( $0,5 \mu\text{m}/1000 \text{ km}$ ) =  $10 \mu\text{m}$  gesamt in Bezug und berücksichtigt den im Ringversuch gefundenen Vertrauensbereich von  $\pm 16\%$  =  $1,6 \mu\text{m}$ , so zeigt sich, daß im KWT mit einer Sicherheit 2 und im HT mit einer Sicherheit 4 die  $100 \mu\text{g/h}$ -Verschleißrate im Streubereich der Kombitestausswertung (bezogen auf die zulässige Grenze) liegt. Das bedeutet, daß, wenn beispielsweise im HT eine solch niedrige Rate gemessen würde, die Verschleißrate für den Fall, daß das Öl an der zulässigen Grenze des Kombitests liegt, im KWT bei etwa  $900 \mu\text{g/h}$  liegen müßte. Bei  $100 \mu\text{g/h}$  im KWT müßten dann im HT sogar ca.  $1800 \mu\text{g/h}$  vorliegen. In einem solchen Fall würde das Öl mit einer relativen Meßgenauigkeit von erheblich besser als  $5\%$  gemessen werden können.

Die bisher gemessenen Vergleichläufe reichen nicht aus, um die genauen Signifikanzgrenzen einer RNT-Kurztestprozedur mit Bezug zum Kombitest mittels Referenzölen beurteilen zu können. Mit Hilfe des Ringversuches, der nach der vorläufigen Kurztestprozedur gefahren wird, soll ausreichendes Datenmaterial zur Beurteilung der Signifikanzgrenzen ermittelt werden. Auf die vorläufige Kurztestprozedur wird in Kapitel 4 eingegangen, die Ergebnisse des Ringversuches enthält Kapitel 5.

1. V O R L Ä U F I G E , I M R I N G V E R S U C H  
Z U Ü B E R P R Ö F E N D E K U R Z T E S T P R O -  
Z E D U R Z U R B E U R T E I L U N G E I N E S  
S C H M I E R M I T T E L S A U F G R U N D D E S  
Z Y L I N D E R V E R S C H L E I S S E S .

Die bisher durchgeführten Untersuchungen ermöglichten es, Vorschläge für eine Kurztestprozedur für den Zylinderbereich zu machen, die im Ringtest überprüft werden soll.

Aufgrund der bisher erzielten Ergebnisse konnte festgestellt werden, daß der Kurztest nur mit Serienmotoren, aktiviert auf Zylinder 2 in einem 8 mm breiten Streifen, beginnend etwa 2 mm über der Oberkante des ersten Kolbenrings in OT, unter HT- und KWT-Bedingungen gefahren wird. Der für einen Vorauswahltest notwendige Bezug zum OM 616-Kombitest muß über relative Bewertungen mit Hilfe eines geeigneten Referenzöls erfolgen. Die Verschleißrate des Referenzöls soll sowohl im HT als auch im KWT deutlich über der sinnvollen Auswertegrenze von 100  $\mu\text{g/h}$  liegen. Die Bewertung des Referenzöls im Kombitest muß über eine Reihe von Kombitestläufen, statistisch abgesichert, bekannt sein. Außerdem muß eine langjährige Liefermöglichkeit in gleichbleibender Qualität gewährleistet sein.

Die Prüfmotoren sollen zur besseren Kontrolle des Temperaturzustandes auf Zylinder 2 mit zwei isoliert eingesetzten Thermoelementen zur Wandtemperaturmessung versehen sein. Der eingesetzte Prüfstand muß den Spezifikationen der CEC-Vorschrift für den OM 616-Kombitest genügen.



Für die RNT soll das moderne, langzeitstabile Verschleißmeßgerät (vgl. Kap. 2) eingesetzt werden, um eine fehlerfreie Auswertung der Messungen zu gewährleisten.

Der Prüfablauf des beim Ringversuch angewendeten Kurztests soll wie folgt aussehen:

Der neue Motor wird nach der DB-Kurzeinlauf-Prozedur<sup>†</sup> eingefahren. Daran schließen sich die üblichen Kontrollläufe an. Nach dieser Prozedur soll für eine bestimmte Zeit die KWT-Bedingung gefahren werden und anschließend noch einmal die HT-Bedingung zur Kontrolle des Verschleißratenverlaufs. Alle Einlaufprogramme sollen mit dem Referenzöl gefahren werden. Die Gesamtdauer des Einlaufens soll bei circa 15 - 20 h liegen. Danach müßten weitgehend konstante Verschleißraten vorliegen. Die im Feineinlauf noch weiter abfallenden Verschleißraten können über das Referenzöl berücksichtigt werden. Die eigentliche Prüfprozedur in HT und KWT soll wie in Abb. 29 dargestellt ablaufen.

Jedes Kandidatenöl wird von einem Referenzöllauf eingegabelt, um ein mögliches Zeitverhalten der Prüfeinrichtung (Motor und Prüfstand) erfassen zu können.

Die Dauer der Läufe beträgt je 3 h, das heißt im KWT ca. 50 Zyklen. Rechnet man 1 h für jeden Ölwechsel incl. Spülen, so kann an einem Arbeitstag jeweils der HT- bzw. KWT-Teil mit einem Öl erledigt werden. Die Einstellung der Betriebsgrößen in HT und KWT müssen in Übereinstimmung mit der CEC-Testvorschrift erfolgen. Wichtig ist, daß die Einspritzmenge innerhalb der Toleranzen bleibt.

<sup>†</sup>CL 616 001 K 101 und K 201

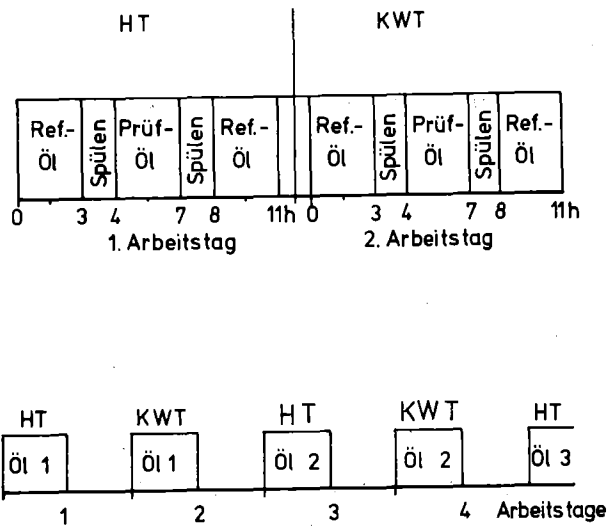


Abb. 29: Ablauf und Aufteilung der RNT-Kurztestprozedur für den Zylinderverschleiß im OM 616 mit Bezug zum OM 616 Kombitest für den Ringversuch

Auch die maximale Kühlmittelaustrittstemperatur im HT bzw. die minimale im KWT müssen genau eingehalten werden. Zusätzlich werden die Zylinderwandtemperaturen vom Meßzylinder an 2 Stellen erfaßt.

Die Auswertung des Kurztests erfolgt über relative Verschleißraten und Bezug auf das Referenzöl. Mit Hilfe der Relativwerte und der Kenntnis des Kombitestergebnisses des Referenzöls, läßt sich das wahrscheinliche Kombitestergebnis des Kandidatenöls mit X % besser oder schlechter als das

Referenzöl angeben. Wichtigstes Versuchsziel des Ringversuches ist die Gewinnung der Signifikanzgrenzen des Kurztest. Mit Hilfe dieser Grenzen kann angegeben werden, mit welcher statistischen Sicherheit ein gemessener Unterschied in den relativen Verschleißraten belegt ist. Die nach der Durchführung des Ringversuches gemachten Vorschläge für eine eventuell geänderte Kurztestprozedur müssen in der Praxis laufend kritisch überprüft werden.

## 5. R I N G V E R S U C H

### 5.1 Durchführung der Versuche

Der Ringversuch ist in der Zeit von Dezember 1978 bis August 1979 an drei verschiedenen Stellen durchgeführt worden. Im Labor A, einer Entwicklungsabteilung für Dieselmotoren eines PKW- und Motorenherstellers, im Labor B, dem Laboratorium für Isotopentechnik und im Labor C, einem privatwirtschaftlichen Institut, bei dem viele Öl- und Additivhersteller komplette OM 616 Kombitests durchführen lassen.

Als Motoren kamen drei OM 616-Motoren, Baumuster 912 mit 48 kW-Leistung zur Anwendung, die alle in der in Kap.4 beschriebenen Weise aktiviert und mit Temperaturmeßstellen versehen worden waren. Als Referenzöl wurde, wie schon in Kap. 3 erwähnt, das CEC-Referenzöl RL 74 eingesetzt. RL 74 ist ein Mehrbereichsöl der SAE-Klasse 15 W 50 und wird von der Firma Dalton, England, hergestellt. Als Testöle kamen 2 Öle zur Anwendung, deren Kombitestergebnis bekannt ist. Das Öl A ist ein Einbereichsöl und wurde als SAE 10er Öl (A1) im KWT gefahren und als SAE 30er Öl (A 2) im HT. Das Öl B ist ein Mehrbereichsöl der SAE-Klasse 10 W 40.

Für die Versuche Labor B und Labor C 4 - 6 mußte das Öl A von der Herstellerfirma neu angemischt werden, da die Charge der vorhergehenden Versuche verbraucht war.

Auf die Lieferung des Referenzöles RL 74 in einer Charge wurde bewußt verzichtet. Das Öl wurde in mehreren Schüben über den Versuchszeitraum verteilt geliefert. Damit sollten

mögliche Streuungen der Kurztestprozedur erfaßt werden, die auf Schwankungen der Referenzölzusammensetzung zurückzuführen sind.

Allerdings versichert der Hersteller, daß das Öl RL 74 in gleichbleibender Zusammensetzung geliefert wird. Anfangs war geplant, die Versuche mit einheitlichem Versuchsprogramm und zeitgleich durchzuführen. Aus Gründen der Prüfstandsbelegung der einzelnen Labors ließ sich das nicht verwirklichen, was aber letztlich ein Vorteil war, worüber in Kap. 5.2 noch zu berichten sein wird.

Geplant war, daß jedes Labor von jedem Öl 6 Testzyklen fährt. Ein Zyklus lief dabei wie folgt ab:

- |                  |           |     |                 |
|------------------|-----------|-----|-----------------|
| 1. RL 74         | 3 h       | HT  | (Neues Öl)      |
| 2. Testöl A2 (B) | 3 h       | HT  | (Neues Öl)      |
| 3. RL 74         | 3 h       | HT  | (Öl von Lauf 1) |
| 4. RL 74         | 50 Zyklen | KWT | (Neues Öl)      |
| 5. Testöl A1 (B) | 50 Zyklen | KWT | (Neues Öl)      |
| 6. RL 74         | 50 Zyklen | KWT | (Öl von Lauf 4) |

Zwischen den Läufen wurde nicht gespült, es wurde lediglich das gelaufene Öl abgelassen und das folgende Öl in den Motor eingefüllt.

Wegen der kurzen Öleinsatzzeiten konnte an den Motoren auf die Hauptstromölfilter verzichtet werden. Lediglich beim Einlauf der Motore kamen handelsübliche Filter zum Einsatz. Dem normalen Einlauf (s. Kap.4) folgten 2 dreistündige Heißtestläufe und 2 Kalt-Warmtestläufe über 50 Zyklen nach dem Ablaufschema HT, KWT, HT, KWT.

Labor A fuhr alle 6 Zyklen mit beiden Testölen nach diesem 1. Kurztestschema (Versuche Labor A<sub>1-6</sub>). Labor B und C führen die ersten drei Versuche nach demselben Schema (Versuche Labor B<sub>1-3</sub>; Labor C<sub>1-3</sub>). Nach Beendigung dieser insgesamt 12 Zyklen versprachen sich die beteiligten Labors eine Verbesserung der Kurztestbewertung durch ein geändertes Versuchsprogramm. Dieses Versuchsprogramm sollte Rückwirkungen von Restölmengen auf das Verhalten des Folgeöls ausschließen.

Dem geänderten 2. Kurztestprogramm lag folgendes Schema zugrunde:

1. RL 74                    3 h            HT (neues Öl)
2. Spülen des Motors und des Meßkreislaufes mit Testöl A2 (B)  
(neues Öl)
3. Testöl A2 (B) 3 h            HT (neues Öl)
4. Spülen des Motors und des Meßkreislaufes mit RL 74  
(neues Öl)
5. RL 74                    3 h            HT (neues Öl)
6. RL 74                    50 Zyklen KWT ( " )
7. Spülen des Motors und des Meßkreislaufes mit Testöl A1 (B)  
(neues Öl)
8. Testöl A1 (B) 50 Zyklen KWT (neues Öl)
9. Spülen des Motors und des Meßkreislaufes mit RL 74  
(neues Öl)
10. RL 74                    50 Zyklen KWT (neues Öl)

Dieses 2. Kurztestprogramm wurde im Labor B mit beiden Testölen über 6 Zyklen gefahren (Versuche Labor B<sub>4-9</sub>).

Die Auswertung der bis dahin gefahrenen 18 Zyklen zeigte für beide Testöle, daß die Eingabelung des Testöls mit dem Referenzöl nur geringe Verbesserungen in der statistischen Sicherheit der Testölbewertung mit sich bringt. Aus diesem Grunde wurde im nachfolgenden Schema am Labor B der Motor des Labors C über 3 weitere Zyklen betrieben (Versuche Labor C<sub>4-6</sub>).

Dem 3. Kurztestprogramm lag folgendes Schema zugrunde:

1. RL 74                    3 h            HT (neues Öl)
2. Spülen des Motors und des Meßkreislaufs mit Testöl A2 (B)  
(neues Öl)
3. Testöl A2 (B) 3 h            HT (neues Öl)
4. Spülen des Motors und des Meßkreislaufs mit RL 74  
(neues Öl)
5. RL 74                    50 Zyklen KWT (neues Öl)
6. Spülen des Motors und des Meßkreislaufs mit Testöl A1 (B)  
(neues Öl)

7. Testöl A1 (B) 50 Zyklen KWT (neues Öl)
8. Spülen des Motors und des Meßkreislaufs mit RL 74 (neues Öl)

Das 3. im Ringtest verwendete Kurztestschema verzichtet also auf den 2. Referenzöllauf und trägt damit der Tatsache Rechnung, daß weder die Wiederverwendung des im Lauf vor dem Testöl verwendeten Referenzöl in einem 2. Lauf noch ein weiterer Referenzöllauf mit neuem nach dem Testöllauf eine nennenswerte Verbesserung in der statistischen Aussagesicherheit der Testölbewertung mit sich bringt.

Die Verwendung des neuen Verschleißmeßgerätes (s. Kap. 2) erwies sich als sehr vorteilhaft. Das nicht mit der RNT vertraute Labor A hat die Versuche nach halbtägiger Einweisung meßtechnisch völlig selbständig betreut und ausgewertet.

## 5.2 Ergebnisse des Ringversuches

Das Ziel des Ringversuches bestand darin, ein Maß für die Streuung des Testöl-Bewertungsmaßes zu finden. Als Bewertungsmaß sollte das Verhältnis der gemessenen Zylinderverschleißrate bei Einsatz des Testöls zur Zylinderverschleißrate bei Einsatz des Referenzöles dienen. Aufgrund der Vorversuche in Kap. 3 war auf die Heranziehung der Absolutverschleißraten als Bewertungsmaß verzichtet worden. Das gewählte Bewertungsmaß erlaubt die Aussage, um welchen Prozentsatz das Testöl einen besseren oder schlechteren Verschleißschutz im Zylinderlaufflächenbereich hat, als das gewählte Referenzöl.

Auf die Darstellung der Einzelergebnisse der insgesamt 84 Testbewertungen (21 Zyklen HT und KWT mit 2 Testölen) soll zugunsten einer besseren Übersicht verzichtet werden. Es werden in Tabelle 4 und 5 die gemessenen mittleren Verschleißraten und ihre Streuungen wiedergegeben, sowie in Tab. 6 das zusammengefaßte Ergebnis der Testölbewertungen bezogen auf die 3 ausgewählten Kurztestprozeduren.

Der Anhang A2 enthält die mittleren Testbewertungen und ihre Streuungen für den Heißtest, Kalt-Warm-Test und die beiden Testöle so

wie sie bei den einzelnen Labors ermittelt worden sind und als Grundlage für die Tab. 6 dienten.

Tab. 4 enthält die mittleren Verschleißraten  $\dot{V}$  im Heißtest und ihre Standardabweichungen. Zusammengefaßt wurden die Zyklen bei einzelnen Labors, für die die gleiche Kurztestprozedur zur Anwendung kam. Also: Labor A<sub>1-6</sub> (2 Referenzöllaufe ohne Zwischenspülungen, 2. Referenzöllauf mit Referenzöl des 1. Referenzöllaufs) Labor B<sub>1-3</sub> und Labor C<sub>1-3</sub> (wie Labor A<sub>1-6</sub>), Labor B<sub>4-9</sub> (2 Referenzöllaufe mit Zwischenspülungen, 2. Referenzöllauf mit neuem Referenzöl), Labor C<sub>4-6</sub> (1 Referenzöllauf). Für Tab. 5 gilt gleiches bezogen auf den Kalt-Warm-Test. Die eingeklammerten Werte bei den Kurztestprozeduren mit 6 Zyklen in Tab. 4 und 5 kennzeichnen, daß ein Ausreißerwert weggelassen worden ist. Als Ausreißer wurde ein Meßwert bezeichnet, der weniger als die Hälfte oder mehr als das doppelte des aus allen 6 Verschleißratenwerten gebildeten Mittelwertes aufwies. Auf diese Weise wurden bei der Heißtestauswertung 2 von 24 und bei der Kalt-Warm-Testauswertung 3 von 24 Meßwerten nicht berücksichtigt.

Bei den Kurztestprozeduren, die nur 3 Meßwerte lieferten, wurde kein Ausreißer definiert.

Um allerdings ein unverfälschtes Testölbeurteilungsergebnis zu erhalten, wurden in Tab. 6, die die Bewertungsmaße enthält, alle Versuchsergebnisse zur Auswertung herangezogen.

Tab. 4: Mittlere Verschleißraten im Heißtest und ihre Standardabweichungen

	Labor A <sub>1-6</sub>		Labor B <sub>1-3</sub>		Labor B <sub>4-9</sub>		Labor C <sub>1-3</sub>		Labor C <sub>4-6</sub>	
	$\dot{V}$  µg/h	$\sigma$  %	$\dot{V}$  µg/h	$\sigma$  %	$\dot{V}$  µg/h	$\sigma$  %	$\dot{V}$  µg/h	$\sigma$  %	$\dot{V}$  µg/h	$\sigma$  %
RL 74	570 (454)	54 (30)	345	27	177	25	733	20	327	55
A2	423	28	220	26	113	21	327	25	202	22
RL 74	470	28	295	57	165	26	597	8	-	-
RL 74	610	32	248	44	175	26	643	23	298	nur 2 Werte
B	855	25	307	30	281	32	637	28	603	8
RL 74	667	27	215	28	189 (155)	45 (13)	567	29	-	-

Tab. 5: Mittlere Verschleißraten im Kalt-Warm-Test und ihre Standardabweichungen

	Labor A <sub>1-6</sub>		Labor B <sub>1-3</sub>		Labor B <sub>4-9</sub>		Labor C <sub>1-3</sub>		Labor C <sub>4-6</sub>	
	$\dot{V}$   $\mu\text{g/h}$	$\sigma$   $\%$	$\dot{V}$   $\mu\text{g/h}$	$\sigma$   $\%$	$\dot{V}$   $\mu\text{g/h}$	$\sigma$   $\%$	$\dot{V}$   $\mu\text{g/h}$	$\sigma$   $\%$	$\dot{V}$   $\mu\text{g/h}$	$\sigma$   $\%$
RL 74	452 (500)	34 (21)	162	30	121	27	443	33	263	10
A1	357	23	178	15	210	35	470	19	392	4
RL 74	325 (366)	42 (29)	135	35	105	32	287	16	-	-
RL 74	417 (478)	48 (31)	123	27	117	38	380	9	247	31
B	310	22	130	23	163	24	303	18	305	29
RL 74	225	29	113	34	112	30	280	22	-	-

Tabelle 4 und 5 bestätigen ein Ergebnis sehr deutlich, daß den Anwendern der Radionuklidtechnik für Verschleißmessungen am tribologischen System Kolbenring-/Zylinderlauffläche seit längerem bekannt ist, nämlich; daß die absoluten Verschleißraten bei Wiederholungsversuchen mit einer Standardabweichung um 30% behaftet sind, wobei es vorkommen kann, daß Unterschiede in der Verschleißrate von über 100% auftreten können. Diese Streuungen beruhen auf Änderungen des Verschleißverhaltens des tribologischen Systems selber, ohne daß die kontrollierbaren Betriebsbedingungen geändert worden wären, denn die Genauigkeit der RNT-Verschleißmessung selber ist beim vorliegenden Anwendungsfall höchstens mit einem Fehler um 5% behaftet.

Sowohl beim Heißtest als auch beim Kalt-Warm-Test ist die Streuung weitgehend unabhängig vom eingesetzten Öl als auch von Randbedingungen wie Spülen des Motors mit dem zunächst folgenden Schmieröl oder auch



vom Weglassen des Spülens. Die Streuungen in der Verschleißrate liegen zwischen 25 und 30%. Bisher ist dieser Zahlenwert noch nicht mit vergleichbarer statistischer Sicherheit ermittelt worden, denn ein Versuchsprogramm, bei dem eine derart große Zahl von Wiederholungsversuchen gefahren worden ist und der Verschleiß radionuklidtechnisch erfaßt worden war, ist den Verfassern nicht bekannt. Obwohl beim Spülen des Motors mit Frischöl der jeweils im folgenden zu fahrenden Ölsorte, die Streuung der Absolutverschleißraten über dem Gesamtversuchszeitraum den gleichen Wert um 25% (siehe Labor B<sub>4-9</sub>) hat wie bei der Kurztestprozedur ohne Spülen, wird das Spülen des Motors bei einer künftigen Kurztestprozedur gefordert werden müssen, weil die Unterschiede in der Verschleißrate an einem Tag vor dem Testöllauf und nach dem Testöllauf signifikant niedriger waren als bei den Läufen ohne Spülen (siehe dazu auch Tab. A im Anhang).

Die Bewertung der Testöle hat im Mittel eine kleinere Standardabweichung wie die Absolutverschleißrate selber. Dies ist nicht überraschend, da ein einzelnes Bewertungsmaß an einem Tag gewonnen wurde und den Unterschied des Testöles zum Referenzöl an diesem Tag wiedergibt. Bei Änderung der Absolutverschleißraten an einem anderen Versuchstag muß sich das Bewertungsmaß nicht zwangsläufig in der gleichen prozentualen Größenordnung wie die Absolutverschleißrate selber ändern. Bei der Ermittlung der Standardabweichung der Absolutverschleißraten geht z.B. das Langzeitverschleißverhalten des Motors ein, bei der Ermittlung des Bewertungsmaßes dagegen nicht.

Tabelle 6 gibt die Bewertung der Testöle bezüglich des Referenzöles wieder. Sie zeigt, daß alle Labore die Öle im Mittel gleich bewertet haben, wobei die angegebenen Streuungen Überschneidungen in der Bewertungsaussage hinsichtlich besser oder schlechter als das Referenzöl zulassen.

Tab. 6: Gesamtdarstellung der Bewertungsmaße des Ringversuches

1. Test mit 2 Referenzöllaufen ohne Spülen (Labor A<sub>1-6</sub>, Labor B<sub>1-3</sub>, Labor C<sub>1-3</sub>)

Testöl	$\frac{\dot{V}_{T-\text{Öl}}}{\dot{V}_{\text{RL 74 Mittel}}}$	$\sigma$ (bez. auf Mittelwert von $\dot{V}$ )	Abweichung in der Bewertung zw. Firmen bzw. Läufen	Versuchsart
A2	0,7	27%	20%	HT
B	1,27	17%	14%	HT
A1	1,19	21%	16%	KWT
B	1,18	21%	18%	KWT

2. Test mit 2 Referenzöllaufen, 2. Lauf mit neuem Öl, Spülen vor Öleinfüllung mit dem nächst zu fahrenden Öl (Labor B<sub>4-6</sub>, 7-9)

A2	0,67	20%	4%	HT
B	1,6	31%	25%	HT
A1	1,84	13%	18%	KWT
B	1,54	8%	17%	KWT

3. Test mit 1 Referenzöllauf (Labor C<sub>4-6</sub>)

A2	0,7	37%		HT
B	2,15 (nur 2 Werte)	-		HT
A1	1,49	6%		KWT
B	1,27	22%		KWT

Mit der Kurztestprozedur 1 sind mit jedem Öl und für jeden Versuchsabschnitt (HT oder KWT) 12 Einzeldurchläufe gefahren worden, damit haben die nach dieser Prozedur ermittelten Ergebnisse eine größere statistische Sicherheit als die nach den beiden anderen Kurztestprozeduren gewonnenen Ergebnisse.

Das Öl A2 wird im HT im Mittel immer besser als das Referenzöl bewertet, auch bei Berücksichtigung der Unterschiede zwischen den Labors. Ähnliches gilt für das Öl B, es wird im Mittel immer schlechter beurteilt als das Referenzöl. Im KWT sind die Aussagen nicht so eindeutig, aber mit deutlicher Tendenz zur "Schlechterbeurteilung" als das Referenzöl, dies gilt für beide Öle. Die Kurztestprozedur 2 liefert die gleichen Aussagen wie die Prozedur 1. Die eindeutigere Differenzierung der Testöle ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, daß durch das Spülen mit dem Folgeöl Rückwirkungen durch das Referenzöl, die ja eine verringerte Differenzierung ergeben würden, stark vermindert werden. Damit ist der Nutzen der zusätzlichen Spülvorgänge ersichtlich, auch wenn dadurch die Standardabweichungen des Bewertungsmaßes nicht verbessert wurde. Die statistische Sicherheit der Ergebnisse der 2. Kurztestprozedur ist zwar nicht so gut wie die der 1. Serie, ist aber ausreichend, die getroffenen Feststellungen zu vertreten.

Werden alle Versuchsergebnisse als Einheit betrachtet, so ergibt sich eine mittlere Standardabweichung des Bewertungsmaßes im Heißtest um 26% und beim Kalt-Warm-Test um 15%. Die mittlere Abweichung in der Bewertung zwischen den Laboren liegt sowohl beim HT als auch beim KWT um 17%.

Im Kapitel 3 ist berichtet worden, daß bei einem Ringversuch 1973 mit kompletten 216-h dauernden Kombitests eine Standardabweichung im Zylinderverschleiß um 16% auftrat. Wenn berücksichtigt wird, daß der KWT den wesentlich größeren Beitrag zum Zylinderverschleiß beim kompletten Kombitest beiträgt als der HT, so kommt der RNT-Kurztest so wie er in den drei Labors durchgeführt worden ist schon sehr nahe an den in der Praxis akzeptierten Wert von 16% Standardabweichung heran.

6. V O R S C H L A G F Ü R E I N R N T - K U R Z T E S T -  
V E R F A H R E N Z U R B E W E R T U N G D E S V E R -  
S C H L E I S S - S C H U T Z E S V O N S C H M I E R -  
Ö L E N U N D D E S S E N A N W E N D U N G S M Ö G L I C H -  
K E I T E N .

Aufgrund der im vorliegenden Bericht dargelegten Untersuchungsergebnisse wurde nachfolgendes Verfahren zur Bewertung des Verschleißschutzes von Schmierölen mit Hilfe der RNT festgelegt.

Nach einem angemessenen Einlauf (ca.16 h) des neuen Motors, der auch jeweils zwei Durchläufe mit 3 h Heißtest und 50 Zyklen Kaltwarmtest enthalten muß, wird jedes Kandidatenöl unter Messung des Verschleißes von Zylinder 2 mit Hilfe der RNT nach dem Durchflußverfahren wie folgt geprüft:

1. Heißtest

Spülen mit Referenzöl (5 min Leerlauf)

3 h Lauf mit Referenzöl

Spülen mit Kandidatenöl

3 h Lauf mit Kandidatenöl

Spülen mit Referenzöl

3 h Lauf mit Referenzöl

Die Betriebsbedingungen "Heißtest" sind:

$4500 \text{ min}^{-1} \pm 25 \text{ min}^{-1}$      $44 + 1,0 \text{ kW}$  (1010 mbar,  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$   $T_{\text{Ansaug}}$ )

$b_1$  :  $39 + 1 \text{ mm}^3/\text{Hub}$

$T_{\text{Öl}}$  :  $128 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{kWA}}$  :  $90 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{kWE}}$  : ca.  $32 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{Ansg.}}$  :  $35 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Zum Anfahren jedes der 3 h-Heißtestläufe wird folgende Prozedur empfohlen: 5 min  $1500 \text{ min}^{-1}$  - 3 kW, 5 min  $4500 \text{ min}^{-1}$  - 30 kW, dann Beginn des Testlaufes.

## 2. Kaltwarmtest

50 Zyklen Kaltwarmtest mit Referenzöl  
Spülen mit Kandidatenöl  
50 Zyklen Kaltwarmtest mit Kandidatenöl  
Spülen mit Referenzöl  
50 Zyklen Kaltwarmtest mit Referenzöl

Die Betriebsbedingungen "Kaltwarmtest" sind:

2,25 min Lauf mit  $4500 \text{ min}^{-1} + 25 \text{ min}^{-1}$  44 + 1,0 kW (1010 mbar,  
 $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$   $T_{\text{Ansaug}}$ )

$b_1$  :  $39 + 1 \text{ mm}^3/\text{Hub}$

$T_{\text{kWA}}$  am Ende der Laufzeit:  $90 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{kWA}}$  am Ende der Laufzeit: ca.  $82 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{Öl}}$  am Ende der Laufzeit: ca.  $110 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{Ansaugluft}}$  :  $35 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

### 1,5 min Stillstand

$T_{\text{kWA}}$  am Ende des Stillstandes:  $38 - 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{kWE}}$  am Ende des Stillstandes: ca.  $33 \text{ }^{\circ}\text{C}$

(Weitere Einzelheiten siehe CEC L-17-A-78)

Anzumerken ist, daß während des Ringversuchs probeweise für einige Läufe auf die Wiederholungsläufe Heißtest bzw. Kaltwarmtest mit Referenzöl verzichtet wurde, ohne daß die Aussagesicherheit wesentlich verschlechtert wurde.

Sollten auch die weiteren Anwendungen des Verfahrens dieses Ergebnis zeigen, so kann auf diese Wiederholungsläufe verzichtet werden und die eingesparte Zeit für eine vollständige Wiederholung der

Kaltwarmtest- und Heißtestprozedur für das Kandidatenöl verwendet werden, was die Aussagesicherheit verbessern wird.

Mit dieser Kurztestprozedur kann nach dem derzeitigen Stand der Erkenntnisse für den Zylinderverschleiß in der relativen Verschleißbewertung zum Referenzöl (RL 74) eine Standardabweichung von ca. 15% für den Kaltwarmtest und ca. 25% für den Heißtest erreicht werden.

Hierbei ist jedoch anzumerken, daß durch das spezifizierte Anfahren der Heißtestbedingung und eine engere Toleranz bei der Leistung, was während des Ringversuches noch nicht durchgeführt wurde, wahrscheinlich eine Verbesserung der Heißteststreuungen erreicht werden kann.

Diese auf den ersten Blick relativ hoch erscheinenden Streuungen müssen in Relation zu konventionellen Verschleißtests in Vollmotoren gesehen werden. Bei diesen Tests wird die Bewertung an einem komplexen tribologischen System - Kolbenringe, Kolben, Zylinderlaufbahn - gewonnen.

Bei der Erfassung des Verschleißes mit Radionukliden nach dem Konzentrationsmeßverfahren im Durchfluß kann nach allen Erfahrungen auch unter ungünstigen Annahmen mit kleiner 5% relativem Fehler gerechnet werden, so daß hierüber die ermittelten Streuungen nicht zu erklären sind. Sie werden durch das Testobjekt selbst hervorgerufen.

Vergleicht man diese Streuungen mit den im Ringversuch von 1973 ermittelten Streuungen für den Mittelwert des Zylinderverschleißes des OM 616 Kombitests (je 8 Mantellinienmessungen an 4 Zylindern) von ca. 16% Standardabweichung, so ist festzustellen, daß der RNT-Test im Mittelwert von Heißtest (im konventionellen Test 1/3 Zeitanteil) und Kaltwarmtest (im konventionellen Test 2/3 Zeitanteil) nur geringfügig schlechtere Streuungen erreicht.

Dabei ist zu beachten, daß die Kombitestergebnisse als Mittelwert über 216 h Motorlauf (Einlauf, Kaltwarmtest, Mittl. Drehzahltest und Heißtest) gewonnen werden, das eine gute Mittelung aller Einflußparameter erwarten läßt.

Der RNT-Kurztest liefert aus dieser Gesamtheit aller Einflußgrößen Teilmengen über kurze Zeitausschnitte, so daß höhere Streuungen dieser Meßergebnisse zu erwarten sind, zumal auch durch die regelmäßigen Laufunterbrechungen und Ölwechsel zusätzlich Störgrößen Einfluß nehmen können.

Für die Anwendung des RNT-Kurztests stellt sich die Frage, ob die gefundenen Streuungen von 15 - 25% eine in der Praxis brauchbare Bewertung des Verschleißschutzes von Schmierölen zulassen.

Dabei muß daran erinnert werden, daß der RNT-Kurztest den OM 616 Kombitest als genormten Schmierölbewertungstest keineswegs ersetzen soll, was sich durch das Fehlen der Nockenbewertung, der Langzeitaussage und weiterer wichtiger Aussagen des Kombitests, wie an anderer Stelle bereits ausgeführt, von selbst erklärt.

Der RNT-Kurztest soll für den Zylinderverschleiß als ein Screening-Verfahren zur Ölentwicklung dienen, wobei durch Verwendung eines Referenzöles mit bekanntem Bezug zum Kombitest und möglichst auch mit praktischer Bewährung, eine voraussichtliche Abschätzung der Bewertung des Testöles im OM 616-Kombitest möglich sein sollte.

Diese Eignung als Screening-Test ist mit dem im Mittel aus Heißtest und Kaltwarmtest zu erwartenden 15 - 25% Standardabweichung gegeben, da eine Klassifizierung der Kandidatenölen möglich ist, die bei Einsatz eines geeigneten Referenzöles auch eine ungefähre Prognose des Kombitestergebnisses bezüglich des Zylinderverschleißes zuläßt.

Neben der Beurteilung aufgrund der Teststreuungen ist aber auch zu beachten, daß der RNT-Kurztest den für einen Screening-Test wichtigen Vorteil bietet, das Verschleißschutzverhalten des Kandidatenöls differenziert nach Kaltwarmtest und Heißtest aufzuzeigen, was kein konventionelles Verfahren bietet. Außerdem ist die Zeitdauer für die Durchführung des RNT-Tests für ein Öl mit ca. 2 Arbeitstagen relativ kurz und die Kosten für ein Öl sind erheblich günstiger als beim Kombitest, was für ein Screening Verfahren wichtige Vorteile sind.

Zusammenfassend ist demnach die Eignung des RNT-Kurztests als Screening-Test zur Ölentwicklung bzw. zur Vorauswahl einer größeren Anzahl von Kandidatenölen als gut anzusehen.

Der ebenfalls ins Auge gefaßte Einsatz des RNT-Kurztests zur laufenden Qualitätskontrolle von serienmäßig hergestellten Schmierstoffen ist dagegen als nicht so günstig anzusehen, da hierfür die ermittelte Standardabweichung von ca. 15 - 25% als zu groß anzusehen ist. Allerdings kann auch der vollständige Kombitest hier wegen seiner Streuungen, Kosten und Zeitdauer nicht sinnvoll eingesetzt werden.

## 7. Zusammenfassung

In dem vorliegenden Bericht wird zunächst ein Überblick über die seit 1973 durchgeführten Untersuchungen zum Kurztest mit RNT auf der Basis des OM 616-Kombitests gegeben, der das Verschleißverhalten von Schmierölen im Zylinder- und Nockenwellenbereich bewertet.

Zunächst wurde anhand einiger Kombitestläufe, bei denen mit der RNT Zylinderverschleiß und Nockenverschleiß kontinuierlich mitgemessen wurden, festgestellt, daß im Zylinderbereich eine Kurztestprüfung möglich ist. Im Nockenbereich zeigten sich in weiteren Versuchsläufen mit verschiedenen Prüfölen zum Teil extreme Verschleißanstiege während der Laufzeit des Tests. Die Entwicklung einer Kurztestprüfung in diesem Bereich wurde deshalb nicht weiterverfolgt. Es ist jedoch zu betonen, daß eine genauere Kenntnis der Ursachen für dieses Verschleißverhalten für die Bewertung der Ergebnisse im Kombitest bezüglich des Nockenverschleißes und für weitere Ölentwicklungen wichtig wäre.

Die weiteren Untersuchungen im Zylinderbereich mit Slip-Fit-Büchsen auf dem Meßzylinder ergaben im wesentlichen, daß mit dieser Ausführung des Prüfmotors eine Kurztestprüfung mit Bezug zum Kombitest nicht möglich ist.



Nach Schaffung einer Aktivierungsmöglichkeit für den Serienmotor mit eingepreßten Laufbüchsen wurden auf der Basis der Erkenntnisse mit den Slip-Fit-Büchsen-Motoren mittels eines Reblends eines früheren Referenzöls für den Kombitest die Untersuchungen zum Verschleißverhalten im Zylinderbereich weitergeführt. Dabei konnte festgestellt werden, daß eine Kurztestprüfung mit Bezug zum Kombitest mit Serienmotoren wahrscheinlich möglich ist, wenn der Bezug über ein Referenzöl hergestellt wird, dessen statistisch abgesicherte Bewertung im Kombitest bekannt ist.

Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Untersuchungen wurde ein Vorschlag für die Kurztestprozedur im Zylinderverschleiß erarbeitet.

Diese vorläufige Prozedur wurde in einem Ringversuch an dem neben dem LIT auch zwei Industriefirmen beteiligt waren, an einem bekannten Referenzöl und zwei Kandidatenölen überprüft. Die Erkenntnisse und Erfahrungen dieses Ringversuchs führten zu einer weiteren Verbesserung des Verfahrens. Sie lassen den Schluß zu, daß eine solche RNT-Kurztestprozedur für den Zylinderverschleiß mit Bezug zum Kombitest über ein geeignetes Referenzöl ein zur Schmieröleentwicklung geeignetes Screening-Verfahren darstellt, das bei ausreichender Wiederholbarkeit den großen Vorteil der Differenzierung zwischen Kaltwarmtest und Heißtest bietet, in kurzer Zeit die Ergebnisse liefert und im Vergleich zum Kombitest erheblich geringere Kosten verursacht.

Für einen Einsatz zur laufenden Überwachung der Qualität handelsüblicher Schmieröle ist das Verfahren nach dem derzeitigen Stand der Erfahrung nur in Ausnahmefällen geeignet. Hier müßte vor allem eine Verbesserung in der Standardabweichung der relativen Bewertung erreicht werden.

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

- /1/ Gairing, M.: Motorölerprobung im OM 615  
Mineralöltechnik, Heft 11-12, 1974
- /2/ --- Method for the Evaluation of Oil performance in respect of Cam and Cylinder wear (OM 616-Kombitest)  
Prüfvorschrift CEC L-17-T-76
- /3/ Rüdinger, V.,  
Schwannecke, H.: Unveröffentlichte Ergebnisse
- /4/ Volz, J.: Erstellung optimierter Einlaufprogramme von Dieselmotoren  
KfK-Bericht 2432, 1977
- /5/ Rüdinger, V.: Unveröffentlichte Ergebnisse
- /6/ Lausch, W.: Ein Beitrag zur Extrapolation vom Kurzzeit- auf das Langzeitverschleißverhalten von Kolbenringlauffläche, -flanke und Büchsenlauffläche  
KfK-Bericht 2371, 1979

## A N H A N G

- A1 Einfluß der Kühlmittelaustrittstemperatur  
auf das Verschleißverhalten der Zylinderlauf-  
fläche beim Referenzöl RL 74
  
- A2 Detail-Versuchsergebnisse des Ringversuches

A1 Einfluß der Kühlmittelaustrittstemperatur auf das Verschleißverhalten der Zylinderlauffläche beim Referenzöl  
RL 74

In Kap. 3.2.3 werden Ergebnisse dargestellt, die zeigen, daß mit sich verändernder Kühlmittelaustrittstemperatur das Verschleißverhalten der Zylinderlauffläche beeinflusst wird und zwar je nach eingesetztem Schmieröl unterschiedlich stark. Für das Referenzöl muß gefordert werden, daß die Abhängigkeit des Verschleißrateniveaus von der Kühlmittelaustrittstemperatur klein ist, dies gilt für die Kühlmittelaustrittstemperaturen sowohl im Versuchsabschnitt Kalt-Warm-Test als auch im Heißtest. Wenn das Testöl ein anderes Abhängigkeitsverhältnis zwischen Verschleißraten und Kühlmittelaustrittstemperatur hat als das verwendete Referenzöl, so ändert sich das Bewertungsmaß in Abhängigkeit von der Kühlmittelaustrittstemperatur, ein Umstand, der auf jeden Fall vermieden werden muß, besonders wenn Bewertungen zwischen verschiedenen Labors verglichen werden sollen.

Abb. 1a zeigt die angesprochene Abhängigkeit für den Kalt-Warm-Test für das im Ringversuch verwendete Referenzöl RL 74. Es wurden 6 Testläufe zu unterschiedlichen Zeiten gefahren, (siehe unterschiedliche Kennzeichnung in Abb. 1a), wobei der Motor während eines Testlaufs kontinuierlich betrieben worden ist mit Ausnahme einer Ölkontrolle.

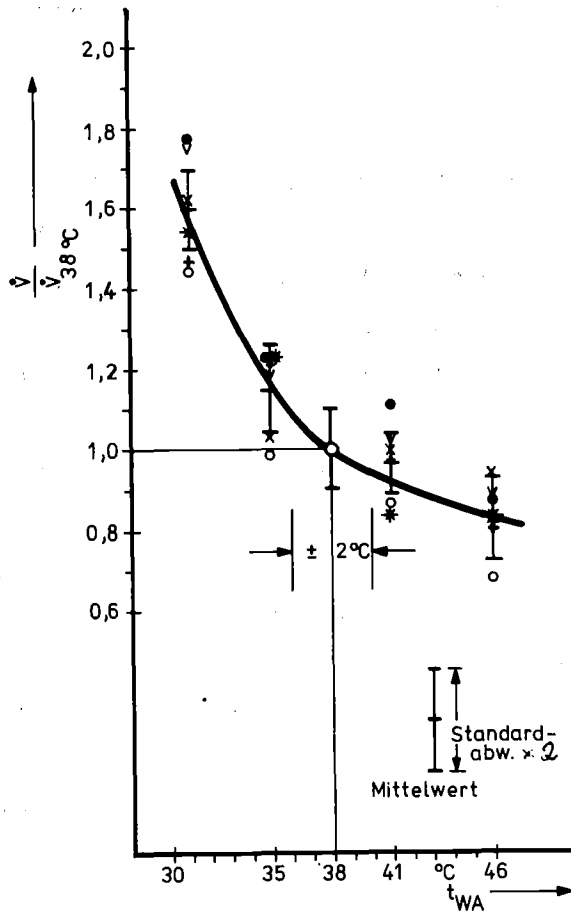


Abb. 1a: Einfluß der Kühlmittelaustrittstemperatur auf die Zylinderverschleißrate beim Öl RL 74 im Kalt-Warm-Test

Der Einfluß der Kühlmittelaustrittstemperatur auf das Zylinderlaufflächen-Verschleißverhalten beim Öl RL 74 ist vergleichbar groß mit dem des Referenzöles RL 30/31 (siehe Abb. 17). Das Versuchsergebnis fordert für eine Kurztestprozedur, die RL 74 als Referenzöl einsetzt, daß beim Kalt-Warm-Test die Kühlmittelaustrittstemperatur  $38\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  betragen sollte. Im Mittel liegt die Verschleißrate bei  $36\text{ }^{\circ}\text{C}$  schon 10% höher als bei  $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Abb. 2a zeigt den Einfluß der Kühlmittelaustrittstemperatur auf die Zylinderlaufflächenverschleißrate im Heißtest (5 Testläufe). Es ist keine signifikante Abhängigkeit zu erkennen. Die Verschleißraten streuen mit vergleichbarer Standardabweichung, wie sie für die Versuchsergebnisse im Ringversuch (Kap. 5.2) angegeben worden sind. Daraus läßt sich schließen, daß kein Einfluß der Kühlmittelaustrittstemperatur auf das Zylinderlaufflächenverschleißverhalten im Heißtest vorliegt, wenn die Kühlmittelaustrittstemperatur  $90\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  beträgt.

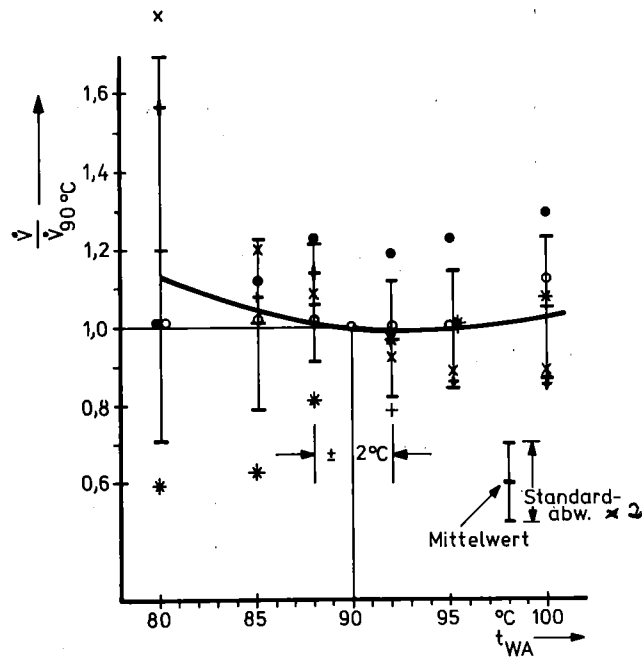


Abb. 2a: Einfluß der Kühlmittelaustrittstemperatur auf die Zylinderverschleißrate beim Öl RL 74 im Heißtest.

## A2 Detail-Versuchsergebnisse des Ringversuchs

Die Tabellen 1a und 2a zeigen die Testöl-Einzelbewertungen für die einzelnen Labore und Kurztestprozeduren.

Es bedeuten:

$B_m$  = mittleres Bewertungsmaß, gewonnen aus den Einzelbewertungen pro Zyklus. Referenzölverschleißrate ist Mittelwert aus  $\dot{V}$  vor und nach Testöllauf

$B_1$  = wie  $B_m$ , aber Referenzölverschleißrate ist nur  $\dot{V}$  vor Testöllauf

$B_2$  = wie  $B_m$ , aber Referenzölverschleißrate ist nur  $\dot{V}$  nach Testöllauf

$\sigma$  = Standardabweichung des Bewertungsmaßes.

Die Aufschlüsselung nach Bewertungsmaßen, bei denen die Testölverschleißrate nur auf die Verschleißrate vor bzw. nach dem Testöllauf bezogen wird, soll zeigen, daß durch den 2. Referenzöllauf die Bewertungssicherheit nicht entscheidend verbessert wird. Dies gilt für den Heißtest als auch für den Kalt-Warm-Test.

Abb. 2a soll verdeutlichen, daß im Mittel die Verschleißrate des Referenzöles, wenn es nach dem Testöl eingesetzt wird, sich nicht wesentlich von der Verschleißrate des Referenzöls vor dem Testöllauf unterscheidet, wenn der Motor wie in Kap. 5.1 beschrieben gespült wird. Wird der Motor nicht gespült, weicht die 2. Referenzölverschleißrate stärker von der 1. ab. Die Schlußfolgerungen aus Tab. 3a verlangen ein Spülen des Motors mit dem Folgeöl und weisen auch darauf hin, daß der zusätzliche Fehler in der Bewertung des Testöls durch Weglassen des 2. Referenzöllaufes nicht groß sein kann. Die Klammerwerte in Tab. 3a sind Werte, die ohne Ausreißer-Verschleißraten gewonnen werden sind (Def. siehe Kap. 5.2).

Tab. 1a: Mittlere Testöl-Einzelbewertungen aller Labore im Heißtest

	Betriebsöl	$B_m$	$R_1$	$B_2$	$\sigma(BM)$	$\sigma(B1)$	$\sigma(B2)$
Labor A <sub>1-6</sub>	HT-RL 74	0,89	0,89	0,9	43%	56%	30%
	HT-RL 74	1,35	1,43	1,33	15%	13%	24%
Labor C <sub>1-3</sub>	HT-RL	0,49	0,45	0,55	14%	16%	17%
	HT-RL	1,11	1,11	1,2	26%	47%	23%
Labor B <sub>1-3</sub>	HT-RL	0,72	0,65	0,9	23%	26%	46%
	HT-RL	1,35	1,32	1,43	11%	21%	16%
Labor B <sub>4-6</sub>	HT-RL 74A	0,7	0,68	0,74	29%	37%	21%
	HT-RL	1,77	1,79	1,8	35%	43%	31%
Labor B <sub>7-9</sub>	HT-RL	0,64	0,63	0,65	10%	14%	12%
	HT-RL	1,42	1,52	1,36	27%	29%	27%
Labor B <sub>4-9</sub>	HT-RL	0,67	0,66	0,7	21%	26%	17%
	HT-RL	1,6	1,66	1,58	31%	35%	31%
Labor C <sub>4-6</sub>	HT-RL A2		0,7			37%	
	HT-RL B		2,15			-	
			(nur 2 Werte)				



Tab. 2a: Mittlere Testöl-Einzelbewertungen aller Labors im Kalt-Warm-Test

	Betriebsöl	$B_m$	$B_1$	$B_2$	$\sigma(BM)$	$\sigma(B1)$	$\sigma(B2)$	
Labor A <sub>1-6</sub>	KWT-RL	1,0	0,86	1,26	33%	31%	40%	
	KWT-RL	1,07	0,93	1,43	32%*	51%*	26%	* = Lauf 16.1. Aus- reißer
Labor C <sub>1-3</sub>	KWT-RL	1,29	1,09	1,65	4%	17%	20%	
	KWT-RL	0,93	0,81	1,11	22%	23%	27%	
Labor B <sub>1-3</sub>	KWT-RL	1,27	1,15	1,42	25%	22%	29%	
	KWT-RL	1,12	1,06	1,18	9%	6%	14%	
Labor B <sub>4-6</sub>	KWT-RL	1,71	1,54	1,93	11%	8%	16%	
	KWT-RL	1,66	1,72	1,62	11%	9%	15%	
Labor B <sub>7-9</sub>	KWT-RL	1,96	1,92	2,05	14%	28%	7%	
	KWT-RL	1,3	1,24	1,38	5%	8%	3%	
Labor B <sub>4-9</sub>	KWT-RL	1,84	1,73	1,99	14%	24%	11%	
	KWT RL	1,48	1,48	1,5	16%	19%	14%	
Labor C <sub>4-6</sub>	KWT-RL A1		1,49			6%		
	KWT-RL B		1,27			22%		

Tab. 3a: Bewertung des Referenzöl-Wiederholungslaufs im Heißtest  
Heißtest

•  
V-Referenzöl 2. Lauf

Labor A <sub>1-6</sub>	=	18% niedriger als der 1. Lauf (4% höher)	
Labor C <sub>1-3</sub>	=	19% höher " " " "	Ø1 A2
Labor B <sub>1-3</sub>	=	14% niedriger " " " "	
Labor B <sub>4-9</sub>	=	7% niedriger " " " "	

---

Labor A <sub>1-6</sub>	=	9% höher als der 1. Lauf	
Labor C <sub>1-3</sub>	=	12% niedriger als der 1. Lauf	Ø1 B
Labor B <sub>1-3</sub>	=	13% niedriger " " " "	
Labor B <sub>4-9</sub>	=	8% höher " " " " (11% niedriger)	

---

Kalt - Warm - Test

Labor A <sub>1-6</sub>	=	28% niedriger als der 1. Lauf	
Labor C <sub>1-3</sub>	=	35% niedriger " " " "	Ø1 A1
Labor B <sub>1-3</sub>	=	17% niedriger " " " "	
Labor B <sub>4-9</sub>	=	13% niedriger " " " "	

---

Labor A <sub>1-6</sub>	=	46% niedriger als der 1. Lauf (53% niedriger)	
Labor C <sub>1-3</sub>	=	26% niedriger " " " "	Ø1 B
Labor B <sub>1-3</sub>	=	8% niedriger " " " "	
Labor B <sub>4-9</sub>	=	4% niedriger " " " "	

---