

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

März 1977

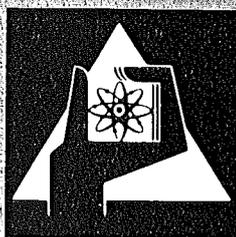
KFK 2432

Laboratorium für Isotopentechnik

**Erstellung optimierter Einlaufprogramme von  
Dieselmotoren**

**(Ein System unter Anwendung von Radionukliden)**

J. Volz



**GESELLSCHAFT  
FÜR  
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

**KARLSRUHE**

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.  
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 2432

Laboratorium für Isotopentechnik

ERSTELLUNG OPTIMIERTER EINLAUFPROGRAMME VON DIESELMOTOREN  
(Ein System unter Anwendung von Radionukliden)

J. Volz

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe  
+ von der Fakultät für Maschinenbau der Universi-  
tät Karlsruhe genehmigte Dissertation



ERSTELLUNG OPTIMIERTER EINLAUFPROGRAMME VON DIESELMOTOREN  
(Ein System unter Anwendung von Radionukliden)

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

In der vorliegenden Arbeit werden die Meßergebnisse und ihre Interpretation beschrieben, die zu einem System zur Optimierung von Einlaufprogrammen von Dieselmotoren geführt haben. Unter Einsatz der Radionuklid-Verschleißmeßtechnik werden Prüfstands-Einlaufprogramme erstellt, die bezüglich Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit optimiert sind.

Die Auswirkungen der Optimierung nach dem Verschleißverhalten von Kolbenring- und Zylinderlaufbahn auf die üblichen Einlaufkriterien - Leistung, spezifischer Kraftstoff- und Ölverbrauch und Oberflächenzustand der Gleitbahnen - werden ausführlich dargestellt.

Das System wird mit allen Bausteinen und einem Ablaufplan für die Optimierung beschrieben. Die gute Eignung von mit dem System erstellten optimierten Einlaufprogrammen wird anhand der Meßergebnisse der im Rahmen der Systemerstellung durchgeführten praktischen Erprobungen nachgewiesen.

DETERMINATION OF OPTIMIZED RUNNING-IN SCHEDULES FOR DIESEL  
ENGINES  
(A SYSTEM USING RADIONUCLIDE MEASURING METHODS)

A B S T R A C T

This work presents experimental results and their interpretation that have led to an optimizing system for the determination of running-in schedules for diesel engines. Through radionuclide measurements the schedules can be optimized with respect to both reliability and economy.

Detailed explanations are given for the influences of optimization-based on piston ring wear and liner wear-on the established running-in criteria engine power, specific fuel and oil consumption and surface state of piston ring and liner.

All components of the system are described as well as a schedule for the optimization steps.

Data from practical tests which were integrated parts of the system development prove the good performance of running-in schedules generated by the system.

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

	Seite
1. PROBLEMSTELLUNG UND MOTIVATION	1
1.1 Ursachen und Beurteilungskriterien des Einlaufs von Verbrennungsmotoren	1
1.2 Wirtschaftliche Bedeutung von Dauer und Güte des Einlaufs	2
1.3 Maßnahmen zur Verkürzung der Einlaufdauer und Bedeutung der Verschleißmeßtechnik mit Radionukliden für eine Einlaufoptimierung	3
2. ZIEL DES VORHABENS UND LÖSUNGSWEG	5
2.1 Zielsetzung	5
2.2 Erläuterungen zur Zielsetzung	6
2.2.1 "Optimierungssystem" nicht "Standard-Einlaufvorschrift"	6
2.2.2 Einschränkungen der Zielsetzung	6
2.3 Prinzipielle Überlegungen zur Optimierung von Einlaufprogrammen mit Hilfe des Verschleißverhaltens von Kolbenring und Zylinderlauffläche	7
2.3.1 Verschleißvorgänge im System Zylinder-Kolbenring	7
2.3.2 Folgerungen für die Optimierung mit Hilfe des Verschleißverhaltens	10
2.4 Durchführung	16
3. EINGESETZTE MITTEL	18
3.1 Verschleißmessung mit Radionukliden	18
3.1.1 Meßverfahren	18
3.1.2 Aktivierungen	19
3.1.3 Radionuklidmeßwagen	22
3.2 Konventionelle Meßtechnik	22
3.2.1 Rechnergesteuerter Motorenprüfstand	23

	Seite
3.2.1.1 Konzeption des rechner- geregelten Motorenprüf- stands	23
3.2.1.2 Software	25
3.2.1.3 Aufbau des Prüfstands	25
3.2.1.4 Bewährung des automatischen Prüfstands	27
3.2.2 Prüfstandsmessungen	27
3.2.3 Oberflächenmessungen	28
3.3 Versuchsmotoren, Versuchsteile und Betriebsmittel	28
3.3.1 Versuchsmotoren	29
3.3.2 Versuchsteile	29
3.3.3 Betriebsmittel	30
3.4 Aufwand für die Systementwicklung	30
4. GRUNDLAGEN DER EINLAUFOPTIMIERUNG MIT HILFE DES VERSCHLEISSVERHALTENS VON EINLAUFBAUTEILEN	31
4.1 Analyse des Einlaufvorgangs mit Hilfe des Verschleißverhaltens	32
4.1.1 Aufteilung des Einlaufvorgangs in Einlaufbereiche	32
4.1.2 Haupteinflußgrößen Drehzahl und Drehmoment	39
4.1.2.1 Darstellung der Meßergebnisse und Interpretation	39
4.1.2.2 Folgerung für die Systement- wicklung	47
4.1.3 Rangfolge der Betriebspunkte im Kenn- feld bezüglich des Einlaufvorganges: Untermengenverhalten und Schlüssel- betriebspunkt	47
4.1.3.1 Untermengenverhalten und Schlüsselbetriebspunkt	47
4.1.3.2 Interpretation von Untermengen- verhalten und Schlüsselbe- triebspunkt	61
4.1.3.3 Folgerungen für das Optimierungs- system	62



	Seite
5.3 Weiterführung der Optimierung zum optimalen Programm (Optimierungsphase 2)	123
6. BEWÄHRUNG DES SYSTEMS IM PRAKTISCHEN EINSATZ	126
6.1 Bereits erstellte optimierte Einlaufprogramme	126
6.2 Praktische Bewährung der optimierten Einlaufprogramme	128
7. HINWEISE FÜR DIE WEITERFÜHRUNG DER ARBEIT	136
7.1 Optimierung von Betriebsmitteln und Bauteilen für den Einlauf	137
7.2 Verwendbarkeit des Optimierungssystems für Ottomotoren	138
8. ZUSAMMENFASSUNG	139
LITERATURVERZEICHNIS	
ANHANG	

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

## 1.1 Ursachen und Beurteilungskriterien des Einlaufs von Verbrennungsmotoren

Durch intensive Bemühungen in der Fertigung, der Konstruktion und der Auswahl von Material und Schmierstoff versuchen die Motorenhersteller den Verschleiß lebensdauerbestimmender Bauteile von Verbrennungsmotoren zu verringern, um die Gebrauchsdauer zu verlängern. Diese Verschleißoptimierung ist jedoch ungünstig für den Einlauf der Motoren, bei dem ein Verschleiß bestimmter einlaufkritischer Bauteile notwendig und erwünscht ist. Der notwendige Einlaufverschleiß wird durch die genannte Verbesserung der Verschleißsicherheit im eingelaufenen Zustand erschwert.

Eine besondere Bedeutung für den Einlauf hat die Reibpaarung Zylinderbüchse - Kolbenringe [1,2]. Bei dieser Paarung ist der Einlauf wegen statischer und dynamischer Verzüge der Zylinderlaufbahn und wegen dynamischer Verformungen der Kolbenringe unter Gas- und Reibungskräften notwendig, die nicht vollständig durch entsprechende Fertigung ausgeglichen werden können.

Statische Verzüge werden vor allem durch die Krafteinleitung der Verbindungselemente Zylinderkopf - Motorblock und die dazwischenliegende elastische Dichtung beeinflusst. Sie sind deshalb stark von der Konstruktion des jeweiligen Motors abhängig. Zu diesen statischen Verzügen kommen im Betrieb des Motors durch unterschiedliche Temperaturverteilungen und durch dynamische Kräfte aufgrund der Verbrennungsdrücke dynamische Verzüge in der Zylinderlaufbahn, die ebenfalls von der konstruktiven Auslegung des jeweiligen Motortyps abhängen [3,4,5,6,7].

Um eine zufriedenstellende Funktion des Systems Kolbenring - Zylinderlaufbahn sicherzustellen, müssen sich diese Reibpaarungen durch Verschleiß im ersten Betrieb des Motors so anpassen, daß die Abdichtung des Brennraums gegenüber dem Kurbelgehäuse und die Wärmeabfuhr vom Kolben über die Kolbenringe (vor allem 1. Ring) ausreichend ist, d.h., daß die Ringe am ganzen Umfang gleichmäßig tragen. Dies beeinflusst auch Leistung und Kraftstoff- und Ölverbrauch der Motoren.

Aus diesen Überlegungen lassen sich die wesentlichen Kriterien, die an einen guten Einlauf gestellt werden müssen, ableiten.

1. Keine Schäden an Kolben, Kolbenringen und Zylinderlaufbahnen im Vollastbetrieb (Betriebssicherheit).
2. Die vorgegebenen Nennleistungswerte werden bei Minimierung des spezifischen Verbrauchs an Kraftstoff erreicht (Optimierung des Wirkungsgrades, Wirtschaftlichkeit).
3. Der spezifische Verbrauch an Schmierstoff muß bestimmte Maximalwerte unterschreiten (Wirtschaftlichkeit).

Diese Kriterien werden in der Literatur übereinstimmend als geeignet angesehen [1,2,7,8,9,10,11,12,13,14] .

Als weiteres Kriterium wird auch die Leckgasmenge genannt, wobei die Beurteilung der Brauchbarkeit uneinheitlich ist.

## 1.2 Wirtschaftliche Bedeutung von Dauer und Güte des Einlaufs

Hier sind sowohl volkswirtschaftliche als auch betriebswirtschaftliche Überlegungen wichtig. Bei einer volkswirtschaftlichen Betrachtung sind vor allem der erhöhte Verbrauch an Kraft- und Schmierstoffen während des Einlaufs und der Verlust an Rohstoffen und Energie (für die Herstellung) durch Lebensdauerverkürzung aufgrund unsachgemäßen Einfahrens zu nennen. Exakte Zahlen für diese Verluste anzugeben ist schwierig, da sich die Einlaufschäden durch falsche Behandlung während des Einlaufs schlecht von den Ausfällen des Motors aufgrund von Fertigungsfehlern unterscheiden lassen und die Lebensdauer der Motoren auch sehr stark von der jeweiligen Betriebsart abhängt [15] . Das heißt, daß als Ursache oft die vorherrschende Betriebsart angenommen wird, wenn ein Motor nicht die erwartete Lebensdauer erreicht, da Einlaufschäden praktisch nicht zu erkennen sind.

Betrachtet man die betriebswirtschaftliche Seite für den Motorenhersteller, so sind vor allem die Motoren für Nutzfahrzeuge und stationären Betrieb von Bedeutung, da hier aus wirtschaftlichen Gründen eine volle Nutzung des Produkts von Anfang an verlangt wird. Die Motoren müssen bestimmte Sollwerte an

spezifischem Kraftstoff- und Ölverbrauch und Leistung erreichen und voll belastbar sein. Dies läßt sich nur sicherstellen, indem der Hersteller für diese Motoren Prüfstandseinläufe durchführt. Dieser Prüfstandseinlauf verursacht hohe Kosten, wobei die Dauer bei gegebener Produktionsgröße sowohl die Anzahl der notwendigen Prüfstände und damit die Investitionen, als auch die laufenden Betriebskosten bestimmt. Der Programmaufbau geht ebenfalls in die Kostenrechnung ein, so z.B. über die notwendigen Personalzugriffszeiten je Einlauf bei häufigen Betriebspunktwechseln und die Möglichkeit einer vereinfachten Automatisierung.

Die Größenordnung der Kosten für einen Einlauf auf Firmenprüfständen soll an einem einfachen Beispiel gezeigt werden. Bei einem kleinen Dieselmotor für den Einbau in Traktoren und Aggregate (3 l Hubraum, Leistung ca. 41 kW) muß mit mehr als 100,-- DM je Prüfstandsstunde einschließlich Personal, Betriebsstoffen, Abschreibung usw. gerechnet werden. Bei einer Tagesproduktion von 50 Motoren (ca. 10 000 im Jahr) würde eine Verkürzung des Einlaufprogramms um 30 min bereits eine Kostenersparnis von ca. 1/2 Mio. DM/Jahr ausmachen.

### 1.3 Maßnahmen zur Verkürzung der Einlaufdauer und Bedeutung der Verschleißmeßtechnik mit Radionukliden für eine Einlaufoptimierung

Da die wirtschaftliche Bedeutung der Verkürzung des Einlaufs bei Nutzfahrzeugmotoren offensichtlich ist, wurden seitens der Herstellerfirmen verschiedene Maßnahmen ergriffen, diesen Kostenfaktor zu senken.

#### a) Konstruktion und Fertigungstechnik:

Verbesserung der Motorkonstruktionen zur Verringerung von Laufbahnverzügen, z.B. durch geeignete Ausbildung der Zylinderköpfe, verbesserte Anordnung der Zylinderkopfschrauben und Optimierung der Zylinderkopfdichtung. Auswahl besserer Materialien für günstiges Einlaufverhalten der Zylinderlaufbahnen und Kolbenringlaufflächen. Untersuchung von für den Einlauf förderlichen Oberflächenstrukturen der Zylinderlaufbahn und Einführung entsprechender Bearbeitungsverfahren in die Serie [5] .

b) Schmiertechnik:

Beschleunigung des Einlaufs durch eine künstliche Erhöhung der Verschleißgeschwindigkeit während des Einlaufs, z.B. durch Erzeugung abrasiven oder korrosiven Verschleißes [13,14,16] .

c) Einlaufprogramme:

Entwicklung von optimierten Einlaufprogrammen, die, entsprechend der jeweiligen Firmenmeinung, aus Wechsellastprogrammen, Propellerkurven, Fahren der Abregelkurven und aus Kombinationen dieser Grundtypen bestehen.

Diese Maßnahmen konnten aber nur unvollständig genutzt werden, da es an einer kontinuierlichen Meßmethode für die fortlaufende Erfassung des Einlaufzustandes der einlaufkritischen Bauteile mangelte. Dies war besonders störend bei der Entwicklung von Einlaufprogrammen, da eine Überprüfung der Brauchbarkeit nur am Ende des Einlaufs möglich war, wenn Leistung, Verbrauch und Oberflächen kontrolliert wurden. Betriebszeiten im Programm die keinen Einlaufbeitrag lieferten, konnten auf diese Weise nicht erkannt werden.

Aufgrund der Ursachen, die das Einlaufen erforderlich machen, ergibt sich für eine gezielte Optimierung der Einlaufprogramme die Notwendigkeit, das Verschleißverhalten bestimmter einlaufkritischer Bauteile (Zylinder, Kolbenringe) während des Einlaufvorgangs kontinuierlich zu verfolgen, was mit einer konventionellen Meßtechnik praktisch nicht möglich ist. Hier bietet sich die Verschleißmessung mit Hilfe Radioaktiver Nuklide (RN) an. Diese Erkenntnis führte dazu, daß RN-Messungen schon vor längerer Zeit für die Untersuchung von Einlaufvorgängen herangezogen wurden. So wurde in [14] der Einfluß von Einlaufbeschleunigern beim MWM Dieselmotor KD 12 E untersucht. In [16] wurde über Versuche zum Öleinfluß am Petter AV 1-Motor am Institut Francaise du Petrol berichtet. Neuere Verschleißversuche mit Radionukliden werden in [8] und [12] berichtet, die sich ebenfalls mit dem Einlaufverhalten des AV 1-Motors beschäftigen. Hierbei wurden jeweils Parameter für das Einlaufprogramm dieses Motortyps untersucht.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß diese Technik bisher nur für Parameterstudien im Einlauf an einem jeweils bestimmten Motortyp angewandt wurde. Die große Möglichkeit einer Verwendung der RN-Technik in einem System zur Erstellung optimierter Einlaufprogramme ist nicht erkannt und genutzt worden.

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

### 2.1 Zielsetzung

Nach den in Kapitel 1 genannten Überlegungen und Erkenntnissen kommt neben der richtigen konstruktiven Auslegung der Motoren und der richtigen Wahl von Materialien und Schmierstoff vor allem dem Prüfstandsprogramm eine große Bedeutung für sicheres und wirtschaftliches Einlaufen zu.

Hieraus leitet sich auch die Zielsetzung für das vorliegende Vorhaben ab, die, da es aus Kapazitätsgründen nicht möglich erschien, sowohl Einlaufprogramm als auch Konstruktion, Materialauswahl und Schmierstoff einzubeziehen, ohne den zeitlich tragbaren Umfang zu sprengen, wie folgt formuliert wurde:

Der Motorenindustrie soll unter Verwendung der Radionuklidtechnik ein System zur Verfügung gestellt werden, mit dessen Hilfe es möglich ist, für einen vorgegebenen Motortyp mit vorgegebener Materialpaarung und Oberfläche und vorgegebenem Schmierstoff ein bezüglich Wirtschaftlichkeit und Betriebssicherheit optimiertes Einlaufprogramm zu erstellen. Das System soll für Dieselmotoren ausgelegt sein.

## 2.2 Erläuterungen zur Zielsetzung

### 2.2.1 "Optimierungssystem" nicht "Standard-Einlaufvorschrift"

Zu Beginn des Vorhabens war, vor allem bei der Motorenindustrie, das Verständnis für ein System zur Einlaufoptimierung nicht groß. Man dachte bei dem Vorhaben eher an die Erstellung einer allgemein gültigen Standardeinlaufvorschrift, deren Einzelstufen nach einem bestimmten Verfahren dem jeweiligen Motortyp angepaßt werden können. Diese Auslegung ist jedoch nicht sinnvoll, da nicht zu erwarten ist, daß Dieselmotoren unterschiedlicher Bauart, Konstruktion und Größe ein so ähnliches Einlaufverhalten aufweisen, daß eine Standardeinlaufvorschrift ausreicht. Mit einem allgemein gültigen System zur Optimierung von Einlaufprogrammen kann für jeden Motortyp das individuell richtig optimierte Programm erstellt werden. Sollte aufgrund der Ergebnisse der Arbeiten zur Systemerstellung wider Erwarten doch eine Standardeinlaufvorschrift realisierbar sein, kann dieser Weg der Einlaufoptimierung dann immer noch beschritten werden.

### 2.2.2 Einschränkungen der Zielsetzung

Mit der in der Zielsetzung genannten Beschränkung auf das Einlaufkriterium Betriebssicherheit wird durch das System zwangsläufig auch die Dauer minimiert, da die Betriebssicherheit die erforderliche Minimalzeit für den Einlauf kennzeichnet. Ist die Betriebssicherheit erreicht, kann der Motor ohne besondere Vorsichtsmaßnahmen genutzt werden, auch wenn die anderen Einlaufkriterien wie Leistung, spezifischer Kraftstoff- und Ölverbrauch noch nicht ihre Sollwerte erreicht haben. Trotz dieser Zieleinschränkung müssen bei der Systemerstellung aber auch die Auswirkungen der Optimierung auf die genannten zusätzlichen Einlaufkriterien untersucht werden. Eine Möglichkeit zur Berücksichtigung der Entwicklung dieser konventionellen Kriterien bei der Gestaltung des Einlaufprogramms muß im System prinzipiell enthalten sein.

Eine weitere Beschränkung ist bezüglich der Begrenzung der in die Optimierung einzubeziehenden Betriebsbereiche der Motoren notwendig. Um die spätere Anwendung des Systems auf normalen Firmenprüfständen ohne spezielle Anpassungsarbeiten zu

ermöglichen, werden nur stationäre Betriebszustände im serienmäßigen Auslegungskennfeld des jeweiligen Motortyps berücksichtigt. Dies gilt sowohl für Drehzahl und Last als auch für Kühlwasser- und Öltemperatur.

### 2.3 Prinzipielle Überlegungen zur Optimierung von Einlaufprogrammen mit Hilfe des Verschleißverhaltens von Kolbenring und Zylinderlauffläche

Unter der Voraussetzung, daß, wie in Kap. 1.1 beschrieben, für einen bestimmten Motortyp ein aufgrund seiner statischen und dynamischen Verzüge und der jeweiligen Oberflächenstruktur und Bauteilgeometrie bestimmtes Materialvolumen der Einlaufbauteile im Einlauf abgetragen werden muß, wird die gewünschte Anpassung durch Verschleiß (unter Vernachlässigung plastischer Verformungen) dann am schnellsten geschehen, wenn die Beanspruchung der Oberflächen immer so gewählt wird, daß die momentane Verschleißrate dem ohne Schädigung maximal zulässigen Wert entspricht. Die Existenz und Kenntnis einer solchen maximal zulässigen Verschleißrate würde das Optimierungsproblem dahingehend vereinfachen, daß im Betriebskennfeld des jeweiligen Motortyps ein Belastungsprogramm gefunden werden muß, das für die gesamte Einlaufdauer eine möglichst gute Annäherung der Einlaufverschleißraten an die maximal zulässige Verschleißrate ergibt. Im Folgenden wird deshalb die Möglichkeit der Verwendung einer solchen maximal zulässigen Verschleißrate im Optimierungssystem näher untersucht.

#### 2.3.1 Verschleißvorgänge im System Zylinder-Kolbenring

Aufgrund der bei Tauchkolbenmotoren im Bereich Zylinder-Kolbenringe vorliegenden Bewegungsabläufe, Druckverläufe, Temperaturverteilungen, Versorgung mit Schmieröl und Oberflächenrauigkeiten kann angenommen werden, daß die Teile, zumindest im Einlauf, im Mischreibungsgebiet laufen. Der Hubmittenbereich weist aufgrund der relativ hohen Gleitgeschwindigkeit den größten Anteil an hydrodynamischer Schmierung auf. Im Bereich der Totpunkte ist der Anteil sehr gering. Der obere Totpunkt ist aufgrund hoher Temperaturen und Gasdrücke und im Vergleich zum unteren Totpunkt geringem Schmiermittelanfall besonders ungünstig.

Diese Überlegungen werden in der Literatur und durch die experimentell gefundene Verschleißverteilung an Zylinderbüchsen über den Hub bestätigt. Der höchste Verschleiß bei Dieselmotoren tritt im OT des obersten Kompressionsringes auf (Zwickelverschleiß). In der Hubmitte und in UT ist er deutlich geringer, wenn nicht, z.B. durch harte Partikel im Öl, der Verschleiß im Bereich höherer Relativgeschwindigkeiten erhöht wird [17,20,21,22].

Als Verschleißarten im Einlauf werden in der Literatur hauptsächlich abrasiver und adhäsiver Verschleiß genannt, wobei die Aufteilung auf beide Arten von Parametern wie Gleitgeschwindigkeit, Belastung, Temperatur, Schmiermittelzusammensetzung und -zustand, Material und Oberflächenstruktur abhängt [20,21,23].

Da einige dieser Einflußparameter im Zylinder örtlich und zeitlich stark variieren, muß mit einem örtlich und zeitlich veränderlichen Anteil beider Arten am Gesamtverschleiß gerechnet werden.

Neben den beiden genannten Verschleißarten tritt auch korrosiver Verschleiß unter bestimmten Umständen, wie z.B. im Kaltbetrieb, auf [20,24].

Betrachtet man das Einlaufen zweier Oberflächen im vereinfachten Modell (homogenes Material, konstante Last und Gleitgeschwindigkeit, wie z.B. bei Stift-Scheibe-Prüfmaschinen) so wird festgestellt, daß im Fall der trockenen Reibung eine Vergrößerung der realen Kontaktfläche der beiden Oberflächen durch Verschleiß und Verformung erfolgt, bis die aufgegebene Belastung auf eine ausreichend große reale Kontaktfläche verteilt wird. Die Last wird dann getragen, ohne daß durch den weiteren Verschleiß die Oberfläche, statistisch gesehen, verändert wird. Das ergibt über der Zeit einen degressiven Verschleißverlauf mit konstantem Verschleißratenendwert bei konstanter Belastung [25].

Wird die Belastung gesteigert, so zeigen Experimente bei trockener Reibung, daß ab bestimmten Lastbereichen spontan sehr hohe Verschleißraten auftreten können ("severe wear"). Das Umschlagen von "mild" in "severe wear" kann dabei in einem breiteren Lastbereich erfolgen, ist also nicht einer bestimmten Grenzlast zuzuordnen [26].

Im Falle der Mischreibung kommt noch der Einfluß des Schmiermittels hinzu. Die Interpretation der Vorgänge wird hier schwieriger, da neben der Trennung der Oberflächen, z.B. durch Hydrodynamik, das Schmiermittel auch über Reaktionsmechanismen Einfluß auf den Verschleiß nimmt, so z.B. durch Reaktionsschichtbildung [27,28] .

Um einen Überblick über die Vorgänge bei Mischreibung und deren Bedeutung für das vorliegende Problem zu bekommen, scheint eine in der Literatur genannte und für vereinfachte Verhältnisse und eine bestimmte Materialpaarung auch experimentell bestätigte Modellvorstellung nützlich zu sein [29,30] .

Die aufgegebene Gesamtlast kann danach bei Mischreibung in einen hydrodynamisch ( $P_h$ ) und einen trocken ( $P_t$ ) getragenen Anteil aufgeteilt werden. (Reaktionsmechanismen werden bei dieser Vorstellung nicht berücksichtigt.) Da bei Hydrodynamik die Oberflächen durch das Schmiermittel getrennt sind, tritt durch  $P_h$  kein Verschleiß ein. Der Verschleiß entsteht nur aufgrund von  $P_t$ . Überträgt man dieses Modell auf den Einlaufvorgang, so werden durch Verschleiß aufgrund von  $P_t$  die neuen Oberflächen verändert. Dabei ändert sich auch das Verhältnis von  $P_h/P_t$ .  $P_h$  wird durch die Glättung der Oberflächen größer und damit  $P_t$  bei gleichbleibender Gesamtlast kleiner. Die Verschleißrate stabilisiert sich. Wichtig ist, daß sowohl Änderungen der äußeren Belastung als auch Beeinflussungen des Schmierzustandes, z.B. durch Änderung von Gleitgeschwindigkeit, Temperaturen und Schmiermittelmenge, die Aufteilung auf beide Lastanteile verschieben und damit zu unterschiedlichen Verschleißraten führen.

Wird durch solche Belastungserhöhungen der Anteil  $P_t$  zu groß, so erfolgt der Übergang zu hohem Verschleiß. Da dabei mehr Energie in Form von Wärme in den Reibstellen zugeführt wird, wird durch Verschlechterung des Schmierzustandes in einer Art negativer Rückkopplung  $P_h$  weiter verkleinert. Der Verschleiß steigt weiter an. Es ergibt sich ein instabiler Zustand, der durch progressiven Verschleißratenverlauf gekennzeichnet ist. Er kann zur Oberflächenschädigung durch Fresserscheinungen führen.

Als typische Schadensformen nach einer Überlastung der Kolbenring- und Zylinderlaufbahnen treten sogenannte Brandspuren auf.

Sie reichen je nach Stärke der Schädigung von leichten Oberflächenverfärbungen bis hin zu schweren Oberflächenschäden mit Verschweissungen und Materialübertrag [31] .

Einige wesentliche experimentelle Befunde sind dabei für die vorliegende Aufgabe interessant. Im allgemeinen ist der oberste Kolbenring stärker gefährdet als die Zylinderbüchse. Der Übertrag auf die Zylinderbüchse ist aber bei starken Schädigungen häufig festzustellen. Brandspuren treten meistens örtlich begrenzt an einzelnen Stellen am Umfang auf. Ihre Struktur zeigt eine Vorzugsrichtung in der Zylinderlängsachse. Unter kritischen Bedingungen ist der Übertrag von zunächst örtlich begrenzten Brandspuren auf größere Oberflächenbereiche beobachtet worden. Es wurde auch festgestellt, daß Brandspuren aus einem längeren stabilen Betrieb mit konstanten Betriebsbedingungen spontan auftreten [31,32] .

Ursache für diese Oberflächenschädigungen sind örtliche Überlastungen der gleitenden Oberflächen durch Verzüge, Störungen des Wärmeübergangs und Mängel in der Schmierung, wie auch die experimentell gefundenen brandspurfördernden Einflußgrößen zeigen. Die wichtigsten sind: Höhere spezifische Leistung, höhere Zylinderwandtemperatur, zu geringe Oberflächenrauigkeiten der Zylinderlaufbahnen von Neumotoren und Verringerung des Schmierölangebots im Zylinder unter für den jeweiligen Motortyp bestimmte Mindestwerte [31,32,33,34] .

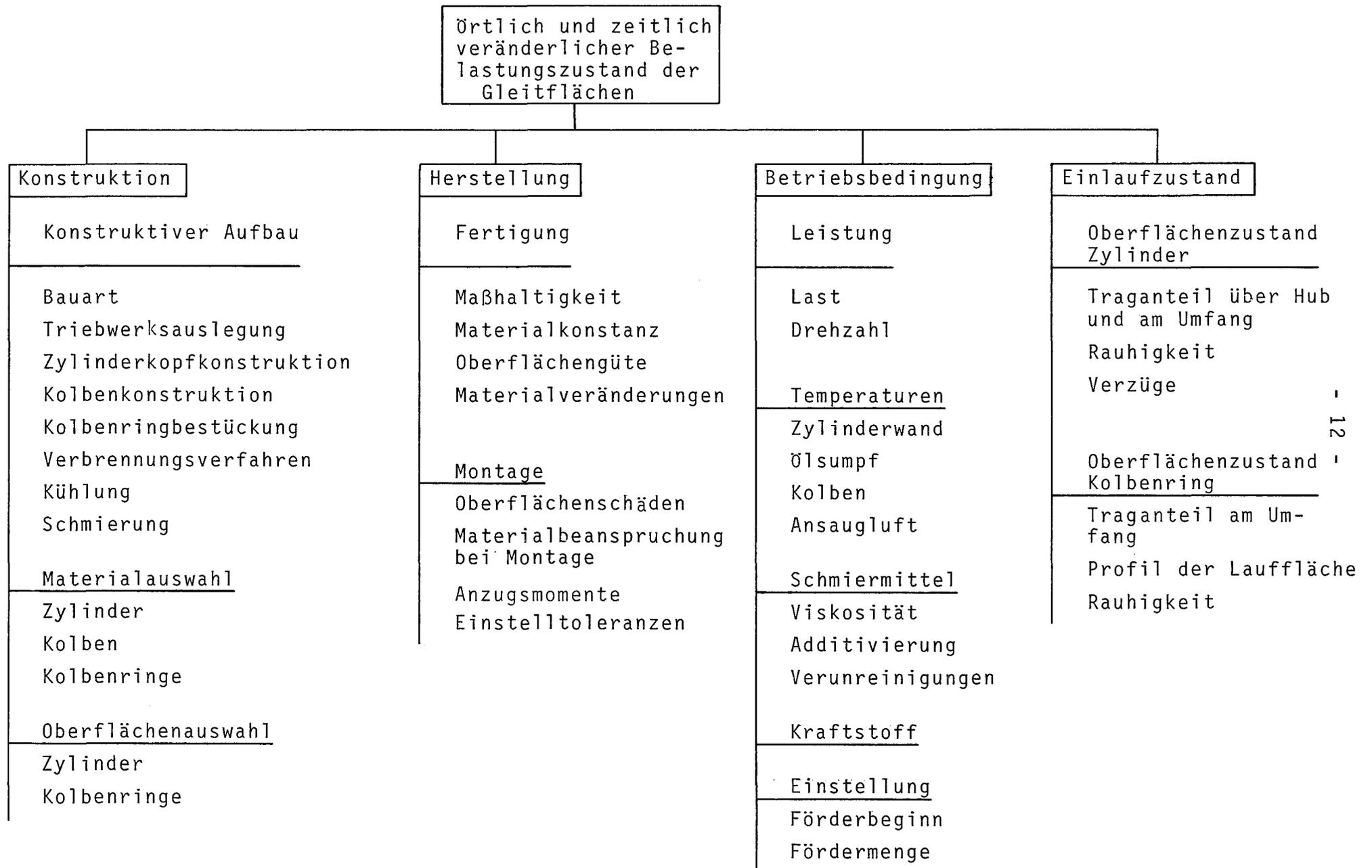
Die Materialpaarungen haben ebenfalls einen starken Einfluß. Molybdängespritzte Ringlaufflächen sind beispielsweise verchromten Ringlaufflächen bezüglich der Brandspursicherheit überlegen [31,35] .

### 2.3.2 Folgerungen für die Optimierung mit Hilfe des Verschleißverhaltens

Nach den in Kap. 2.3.1 genannten Praxiserfahrungen und Überlegungen ergibt sich der mit der RNT erfaßte Gesamtverschleiß als das Integral über der Zeit und Oberfläche der örtlich unterschiedlichen Momentanverschleißwerte. Daraus muß geschlossen wer-

den, daß auch eine maximal zulässige Verschleißrate davon abhängt, welcher Anteil der Gesamtoberfläche im betrachteten Zeitintervall in einem Verschleißzustand läuft, der das Umschlagen in hohen Verschleiß und damit in die Schädigung möglich macht. Diese Vorstellung wird experimentell durch die Tatsache gestützt, daß Brandspuren meistens örtlich begrenzt am Umfang auftreten [31]. Unter dieser Annahme hängt die maximal zulässige Verschleißrate von allen Einflußparametern ab, die die örtliche und zeitliche Verteilung der Belastung und des Schmierzustandes bestimmen. In Tafel 1 sind die wesentlichen Einflußgrößen dargestellt. Neben den Betriebsbedingungen sind Konstruktion, Herstellung und Einlaufzustand maßgeblich.

Diese Überlegungen lassen erwarten, daß sich für einen gegebenen Motortyp aufgrund von Material- und Fertigungsstreuungen und individuellen Betriebsbedingungen mit zunehmenden maximalen Verschleißraten durch erhöhte Belastung eine Zunahme der Schädigungswahrscheinlichkeit ergibt, wie schematisch in Abb.1 dargestellt. Daraus folgt, daß nur die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten einer Schädigung, abhängig von der im jeweiligen Einlaufprogramm erreichten Maximalverschleißrate, sinnvoll angegeben werden kann. Die Verteilung der Schädigungswahrscheinlichkeit als Funktion der jeweils erreichten Maximalverschleißrate wird für unterschiedliche Motortypen material- und konstruktionsbedingt unterschiedlich sein (vgl. Tafel 1). Auch das verwendete Schmiermittel hat einen erheblichen Einfluß, wie in der Literatur genannte Beispiele für Schadensfälle mit ungeeigneten Schmiermitteln zeigen [32,36].



Tafel 1: Einflußgrößen für Belastung der Gleitflächen Zylinder - Kolbenring

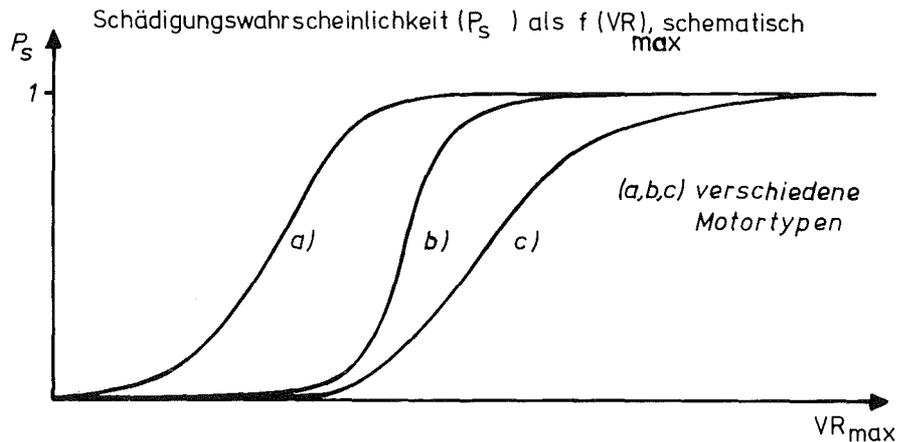


Abb.1 Schematische Darstellung des Verlaufs der Schädigungswahrscheinlichkeit ( $P_s$ ) als Funktion der maximalen Verschleißrate ( $VR_{max}$ ) bei verschiedenen Motortypen

Um für das Optimierungssystem eine maximal zulässige Verschleißrate (VR) verwenden zu können, müßte die Verteilung der Schädigungswahrscheinlichkeiten ( $P_s$ ) im Einlauf für den zu optimierenden Motortyp in Abhängigkeit der jeweils maximal gefahrenen Verschleißrate bekannt sein. Wegen des zur Aufnahme dieser Verteilung notwendigen, bei jedem Motortyp neu erforderlichen Aufwandes, ist die Optimierung mit Hilfe einer maximal zulässigen Verschleißrate beim gegenwärtigen Kenntnisstand nicht durchführbar. Außerdem müßte für jeden Motortyp die nach wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten richtige zulässige Schädigungswahrscheinlichkeit bestimmt werden, auf die an anderer Stelle noch näher eingegangen wird. Aus den genannten Gründen müssen Informationen aus den Verschleißmeßergebnissen für die Optimierung herangezogen werden.

Wie bei den Modellvorstellungen erläutert, kann der Verschleißratenverlauf über der Zeit bei jeweils konstanten Betriebsbedingungen als Beurteilungsgröße für eine Schädigung herangezogen werden. Konstanter oder degressiver Verschleißratenverlauf ergibt Hinweise, daß die effektive Belastung ertragen

bzw. vermindert wird. Der Anteil  $P_t$  bleibt stabil oder nimmt ab. Progressiver Verschleißratenverlauf ist ein Hinweis, daß der Anteil von  $P_t$  ständig zunimmt. Dieser instabile Zustand kann bis zum Schaden führen. Allerdings kann sich auch eine progressive Verschleißrate stabilisieren, wenn durch den erhöhten Verschleiß die örtliche Überlastung, z.B. durch Ausbildung einer günstigeren Oberflächengeometrie (Verzugsabbau), geringer wird. Auch die Herabsetzung der äußeren Belastung kann zur Stabilisierung führen. Dies wird durch experimentelle Beobachtungen gestützt, wo bei Motoren mit leichten Brandspuren diese Schäden nach längerem Fahren niedriger Belastungen wieder abgetragen wurden. Hier spielt auch die Reaktionsschichtbildung mit den eingesetzten Schmiermitteln eine Rolle [34] .

Als weitere Information neben dem zeitlichen Verschleißratenverlauf kann auch die Änderungsgeschwindigkeit der Verschleißraten aufgrund zunehmender äußerer Belastung (Drehzahl, Last) herangezogen werden. Steigen die Verschleißraten bei Belastungserhöhung überproportional an, so ist zu erwarten, daß weitere Belastungserhöhungen schnell in den Bereich möglicher Schädigung führen. Interpretiert man dieses Verhalten mit Hilfe der genannten Modellvorstellung, so bedeutet das überproportionale Ansteigen der Verschleißrate, daß der Anteil  $P_h$  überproportional abnimmt, weil beispielsweise neben der Belastungserhöhung auch der Schmierzustand durch die belastungsbedingte Temperaturerhöhung in den Gleitflächen verschlechtert wird. Die Gefahr einer Schädigung wird größer.

Für das Optimierungssystem ist zusätzlich die Klärung der Frage wichtig, wie weit die Optimierung des Einlaufvorganges unter den Aspekten Wirtschaftlichkeit und Betriebssicherheit getrieben werden soll. Aus den gleichen Gründen, die eine bestimmte Verteilung der Schädigungswahrscheinlichkeit über der maximal erreichten Verschleißrate für einen bestimmten Motorentyp bewirken (vgl. Abb.1), ist für ein bestimmtes Einlaufprogramm des vorgegebenen Motortyps eine charakteristische Häufigkeitsverteilung der dabei auftretenden maximalen Verschleißraten und eine entsprechende Ver-

teilung der Schädigungswahrscheinlichkeit zu erwarten, so daß sich für einen bestimmten Motortyp mit einem festen Einlaufprogramm eine bestimmte Schädigungswahrscheinlichkeit ergibt. Es ist zu erwarten, daß ein kürzeres Einlaufprogramm mit einer höheren Belastung des Motors zu einer höheren Schädigungswahrscheinlichkeit führt. Welche Schädigungsrate für einen bestimmten Motortyp zulässig ist, ist aber sowohl von technischen und wirtschaftlichen als auch von firmenpolitischen Gesichtspunkten abhängig. Es ist denkbar, daß beispielsweise bei einer großen Serienstückzahl eine weitere Einlaufverkürzung wirtschaftlich günstiger ist, obwohl dadurch die Schädigungsrate größer wird. Hier muß auch der Aspekt einer erweiterten Gütesicherung in die Überlegungen einbezogen werden.

Die Schwierigkeit bei der Festlegung des sinnvollen Optimierungsgrads ist eng gekoppelt mit der Frage, welcher Aufwand an Motoren, aktivierten Versuchsteilen und Prüfstandszeiten für das Einlaufsystem von Fall zu Fall richtig ist. Aufgrund spezieller Konstruktion und Auslegung der verschiedenen Motorentypen ist zu erwarten, daß der Aufwand zur Erreichung eines bestimmten Optimierungsgrades sehr unterschiedlich ist. So existieren z.B. Motoren, die von Anfang an volllastfest sind [18]. Eine Auslegung des Grundaufwandes für das System auf besonders kritische Motorentypen erscheint dabei unwirtschaftlich, da dieser Aufwand in der Mehrzahl der Fälle viel zu groß sein wird. Ein für jede Optimierung neu festzulegender Aufwand scheitert an der Schwierigkeit, im voraus das Einlaufverhalten des jeweiligen Motortyps richtig abzuschätzen.

Um dieses Problem zu lösen, bietet sich eine Aufteilung der Optimierung in zwei Phasen an. In der ersten Phase wird mit einem im Rahmen der Systemerstellung noch festzulegenden Standardaufwand an Material und Betriebsstunden ein Einlaufprogramm erstellt, dessen Optimierungsgrad je nach dem Einlaufverhalten des Motortyps unterschiedlich ist. Für viele Motorentypen wird dabei bereits das endgültig optimierte Programm erstellt werden können. Reicht das erreichte Einlaufprogramm nicht aus, kann mit Kenntnis der Ergebnisse der Phase 1 in einer Phase 2 unter Beachtung wirt-

schaftlicher Daten, wie z.B. Seriengröße, Prüfstandkosten, und spezieller Kundenanforderungen, wie z.B. erweiterte Gütesicherung, das optimale Programm erstellt werden. In der Phase 2 müssen aber auch Schmierstoff und Material und Oberfläche der Einlaufbauteile mit in die Optimierung einbezogen werden, die für die Phase 1 als fest vorgegeben angesehen werden.

Wegen der grundsätzlichen Bedeutung der Optimierungsphase 1 für die Gesamtoptimierung und des erheblichen Aufwands, der, auch unter dem Gesichtspunkt der notwendigen Einbeziehung von Material, Oberflächen und Schmierstoff, für die Phase 2 zusätzlich getrieben werden müßte, muß sich das vorliegende Vorhaben auf die Erstellung der Systemphase 1 beschränken. Für die Phase 2 können nur die grundsätzlichen Überlegungen zur Vorgehensweise aufgezeigt werden.

#### 2.4 Durchführung

In Abb.2 ist die Zielstruktur dargestellt, aus der sich die prinzipiellen Arbeitspakete zur Erstellung der Systemphase 1 ableiten lassen. Nach der Bereitstellung geeigneter Meßverfahren müssen Einflußgrößen und charakteristische Erscheinungen beim Einlaufen von Dieselmotoren untersucht werden. Ein weiteres wesentliches Teilziel ist der Nachweis der Eignung des Verschleißverhaltens der Einlaufbauteile Kolbenring und Zylinderbüchse als Steuergröße für die Optimierung von Einlaufprogrammen. In diesem Zusammenhang muß auch untersucht werden, wie sich eine Einlaufoptimierung nach dem Verschleißverhalten auf die konventionellen Einlaufkriterien Leistung, spezifischer Kraftstoff- und Ölverbrauch und Oberflächenstruktur auswirkt. Danach kann das System konzipiert werden. Nach Erstellung der notwendigen Systembausteine erfolgt die ausführliche Erprobung in Optimierungsreihen an verschiedenen Dieselmotortypen.

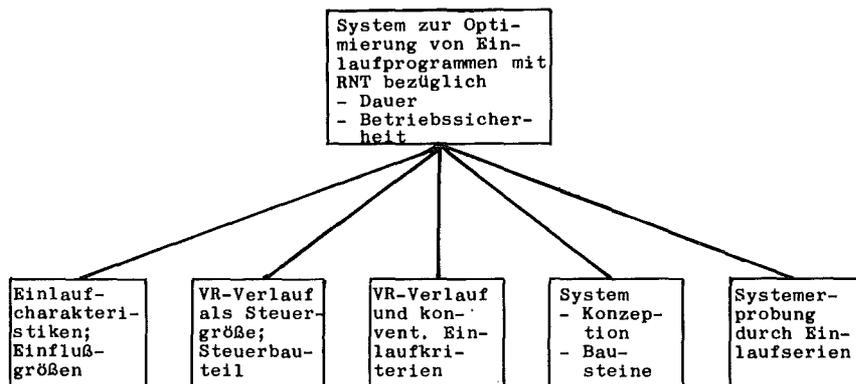


Abb.2 Zielstruktur zur Erstellung des Systems zur Einlaufoptimierung

Um die erforderlichen Einlaufcharakteristiken zu finden und die universelle Verwendbarkeit des Systems zu gewährleisten, müssen zur Systemerstellung verschiedene Motortypen unterschiedlicher Konstruktion, Größe und Materialauswahl untersucht werden. Dieses Vorgehen erfordert einen erheblichen Aufwand an Versuchsmotoren, Bauteilen und Prüfstandskapazität.

Da dies die finanziellen, personellen und prüftechnischen Möglichkeiten eines Forschungsinstituts übersteigt, war eine erfolgreiche Bearbeitung des Vorhabens nur mit Unterstützung von interessierten Motorenherstellern möglich. Deshalb wurde für das Vorhaben eine Projektgruppe der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) gebildet, die die Arbeiten durch fachliche Beratung, finanzielle Beteiligung und Bereitstellung von Motoren, Bauteilen und Prüfstandskapazität unterstützte. Diese notwendige und für das Vorhaben positive Beteiligung der Industrie hatte jedoch zur Folge, daß die Durchführung der Arbeiten u.a. auch an der Interessenslage der Firmen und an dem Kriterium der praktischen Anwendbarkeit orientiert werden mußte. Das bedeutete neben der für den Ingenieur reizvollen und wichtigen Aufgabe, in Nutzen-Kostenrelationen zu denken und zu arbeiten, aber auch gewisse

Einschränkungen in der Form, daß beispielsweise interessanten, aber für die Zielerreichung nicht zwingend notwendigen Phänomenen bei der Durchführung nicht nachgegangen werden konnte. Hier wird sich ein Feld interessanter Anschlußaufgaben ergeben.

### 3. E I N G E S E T Z T E M I T T E L

In diesem Kapitel sollen die für das Vorhaben eingesetzten Mittel an Meß- und Prüfstandstechnik, Versuchsmotoren und -bauteilen dargelegt werden.

#### 3.1 Verschleißmessung mit Radionukliden

##### 3.1.1 Meßverfahren

Für die Erfassung des Verschleißverhaltens von Kolbenringen und Zylinderbüchsen mit Hilfe der Radionuklidtechnik wird das bekannte Durchflußmeßverfahren, das sich zur Verschleißmessung der genannten Komponenten in Verbrennungsmotoren gut bewährt hat, eingesetzt. Der Verschleiß der aktivierten Bauteile wird dabei mit Hilfe eines Sekundärkreislaufs über die Konzentration an radioaktivem Abrieb gemessen. Das Standardverfahren ermöglicht eine kontinuierliche, sehr empfindliche Messung von bis zu drei Verschleißkomponenten gleichzeitig. Da das Verfahren bereits häufig publiziert wurde, wird auf eine detaillierte Beschreibung verzichtet [37,38] .

Im Laufe des Vorhabens ergab sich die Notwendigkeit, das Standard-Durchflußverfahren zu ergänzen. Um eine Verfälschung der Verschleißmessung durch Verlust an aktivem Abrieb in den Haupt- bzw. Nebenstromölfiltren der Versuchsmotoren zu verhindern, wurde

im allgemeinen ohne Filter gefahren. Die Zulässigkeit dieser Maßnahme bezüglich der Veränderung des Verschleißverhaltens wurde an einigen Versuchsbeispielen (vgl. Kap. 4.1.5) nachgewiesen. Bei der Überprüfung des Einlaufsystems an Neumotoren zeigten sich jedoch Nachteile, die es erforderlich machten, mit Ölfilter zu fahren (vgl. Kap. 4.1.5). Hierzu wurde ein Radionuklidtechnikmeßsystem entwickelt, mit dem es möglich ist, zusätzlich den Verschleiß im Ölfilter kontinuierlich zu erfassen. Der Verschleiß im Schmieröl wird wie bisher über die Aktivitätskonzentration in einem Sekundärkreislauf erfaßt. Der Verschleiß im Ölfilter wird zusätzlich in einem separaten, in den Motorhauptölkreislauf eingeschalteten Filtermeßkopf, in den der Originalfilter des Motors eingebaut werden kann, gemessen. Da der Anteil der radioaktiven Strahlung aus dem durch den Filter strömenden Schmieröl bereits bei der Verschleißerfassung im Durchfluß enthalten ist, wird er mit Hilfe der im Durchflußmeßkopf gemessenen Aktivitätskonzentration des Schmieröls rechnerisch korrigiert. Mit dieser Meßanlage läßt sich der Gesamtverschleiß der untersuchten Bauteile über der Zeit kontinuierlich als Summe des Verschleißes im Schmieröl und im Ölfilter ermitteln. Das Verfahren ist ausführlich in [39] beschrieben.

### 3.1.2 Aktivierungen

Die für das Vorhaben notwendigen Aktivierungen von Zylinderlaufbahn und Kolbenringen sollen in kurzer Form übersichtshalber zusammengestellt werden.

Grundsätzlich lassen sich die Bauteile im Neutronenfluß eines Kernreaktors oder mit geladenen Teilchen eines Beschleunigers aktivieren. Die Aktivierung mit geladenen Teilchen (Protonen, Deuteronen, Alpha-Teilchen) bietet den entscheidenden Vorteil, daß, unter Ausnutzung der besonderen Wechselwirkungen geladener Teilchen mit den Targetmaterialien, gezielt speziell die für die Verschleißmessung gewünschte Oberflächenzone in einer dem Verschleißproblem angepaßten dünnen Schicht gleichmäßig aktiviert werden kann. Damit kann auch das Verschleißverhalten größerer Bauteile, wie z.B. Zylinderbüchsen, mit hoher Meßempfindlichkeit

bei einer für die Handhabung günstig niedrigen Gesamtaktivität gemessen werden. Diese Dünnschichtaktivierung wurde deshalb auch ausnahmslos für die Zylinderbüchsen eingesetzt.

Die Neutronenaktivierung, bei der das gesamte Targetmaterial gleichmäßig aktiv wird, ist aber im allgemeinen erheblich kostengünstiger. Deshalb wird sie bei kleinen Targets unter Beachtung der Strahlenschutzvorschriften immer noch eingesetzt. Sie hat sich vor allem bei verchromten Kolbenringen bewährt. Die Dünnschichtaktivierungen erfolgten am Zyklotron der Gesellschaft für Kernforschung mbH im Kernforschungszentrum Karlsruhe, die Neutronenaktivierung im Forschungsreaktor München-Garching. Ausführliche Unterlagen zu den Aktivierungsverfahren finden sich in [40] .

Eine Übersicht der für das Vorhaben einsetzbaren Aktivierungen von Zylinderbüchsen aus Zylinderguß und Kolbenringen mit Chrom- bzw. Molybdänlaufschicht ist in Tafel 2 zusammengestellt.

Die Zylinder wurden im Bereich des oberen Totpunktes des ersten Rings ringförmig am Umfang aktiviert. Die aktivierte Breite betrug dabei je nach Motortyp bis zu 15 mm ab der Oberkante des obersten Rings im OT nach unten. Diese Einschränkung des meßbaren Oberflächenbereichs wurde in Anbetracht der höheren Kosten einer Aktivierung der gesamten Laufbahn in Kauf genommen, da der Hauptverschleiß des Zylinders aufgrund der dort vorliegenden ungünstigen Verschleißbedingungen bei Dieselmotoren im OT-Bereich liegt. Außerdem wird über den jeweils mitgemessenen Kolbenringverschleiß der gesamte Hub erfaßt. Durch Oberflächenmessungen nach den Versuchen können zusätzlich auch die anderen Zylinderlaufbahnanteile mit in die Beurteilung einbezogen werden.

Die verchromten Kolbenringe wurden zur Erzielung einer konstanten spezifischen Aktivität aller Ringe satzweise mit Neutronen aktiviert. Diese prinzipiell auch für molybdängespritzte Kolbenringe mögliche Aktivierung wurde wegen der sehr kurzen Halbwertszeit des dabei entstehenden Meßnuklids ( $^{99}\text{Mo}$ ) in Verbindung

Bauteil	Material	Wahrscheinlichste Kernreaktionen zur Erzeugung der Meßnuklide			HWZ (d)	Maximalbereich konstanter spez. Aktivität ( $\mu\text{m}$ )
		Stabiles Nuklid		Radionuklid		
Kolbenring- Lauffläche	Chrom	$^{50}\text{Cr}$	$(n, \gamma)$	$^{51}\text{Cr}$	27,7	ganze Schicht
		$^{50}\text{Cr}$	$(d, p)$	$^{51}\text{Cr} +$	27,7	~200
	Molybdän	$^{98}\text{Mo}$	$(n, \gamma)$	$^{99}\text{Mo}$	2,8	ganze Schicht
		Mo	$(d, xn)$	$^{96}\text{Tc}$	4,3	~400
		Mo	$(d, xn)$	$^{95\text{m}}\text{Tc}$	60	~400
	Kolbenring- Flanken	Kolbenring- guß	$^{58}\text{Fe}$	$(n, \gamma)$	$^{59}\text{Fe}$	45
$^{56}\text{Fe}$			$(d, 2n)$	$^{56}\text{Co} +$	77,3	~220
$^{56}\text{Fe}$			$(\alpha, pn)$	$^{58}\text{Co} +$	70,8	~100
Zylinder- büchsen	Zylinderguß	$^{56}\text{Fe}$	$(d, 2n)$	$^{56}\text{Co} +$	77,3	~220
		$^{56}\text{Fe}$	$(\alpha, pn)$	$^{58}\text{Co} +$	70,8	~100

<sup>+</sup>Reaktionen aus Literatursammlung "Mc Gowan, Milner, Kim"

Tafel 2: Übersicht über die praktisch verwendbaren Aktivierungen für Kolbenringe und Zylinderbüchsen

mit den notwendigen Rüstzeiten durch die Bestrahlung in Garching [15] nicht eingesetzt, da eine geeignete Dünnschichtaktivierung entwickelt werden konnte, bei der alle für eine Meßreihe benötigten Ringe (bis zu 10 Stück) in einer Bestrahlung gleichmäßig aktiviert wurden.

Folgende Gesamtaktivitäten je Versuchsteil wurden eingesetzt:

Kolbenringe	verchromt	$\sim 10 \text{ mCi } ^{51}\text{Cr}$
	molybdängespritzt	$\sim 0,5 \text{ mCi } ^{96}\text{Tc}$
Zylinderbüchse		$\sim 0,1 \text{ mCi } (^{56}\text{Co}, ^{58}\text{Co})$

### 3.1.3 Radionuklidmeßwagen

Im Rahmen der Systemerstellung war auch der Test des Optimierungssystems in entsprechenden Versuchsreihen an verschiedenen Motortypen notwendig. Dazu schien es zweckmäßig, auf den Prüfständen der jeweiligen Motorhersteller zu fahren, weil so die Versuche in erheblich kürzeren Zeiten durchgeführt werden können, da das "know-how" und die technischen Möglichkeiten der Herstellerfirmen einen problemlosen Prüfstandsbetrieb ermöglichen. Um diese Vorteile nutzen zu können, wurde der im Institut vorhandene Radionuklidmeßwagen eingesetzt. Mit diesem Fahrzeug können alle für das Vorhaben notwendigen Radionuklidmeßverfahren unter Beachtung der Strahlenschutzbestimmungen auf normalen Prüfständen der Motorenhersteller gefahren werden. Das Fahrzeug ist mit den erforderlichen Meßgeräten und entsprechender Datenverarbeitung ausgerüstet, um die Verschleißmessungen mit Radionukliden in gleicher Qualität wie auf den Institutsprüfständen durchführen zu können.

Ausrüstung und Einsatzmöglichkeiten des Fahrzeugs sind ausführlich in [41] beschrieben.

### 3.2 Konventionelle Meßtechnik

In diesem Abschnitt wird in kurzer Form die eingesetzte Prüfstands- und Oberflächenmeßtechnik beschrieben.

### 3.2.1 Rechnergeregelter Motorenprüfstand

Um die im Rahmen des Vorhabens notwendigen Versuche auf den Institutsprüfständen zu vereinfachen und zu verbilligen und um, falls die Ergebnisse der Untersuchungen zur Systemerstellung dies ermöglichen, Teile der Programmoptimierung zu automatisieren, indem der Rechner das Belastungsprogramm nach dem jeweils gemessenen Verschleißratenverlauf eines Steuerbauteils regelt, wurde der Aufbau eines entsprechenden rechnergeregeltten Motorenprüfstands in das Vorhaben aufgenommen. Dieser rechnergeregeltte Motorenprüfstand wird im Folgenden kurz beschrieben. Ausführliche Unterlagen über Konzeption, Software, Hardware und praktische Bewährung sind in [42] enthalten.

#### 3.2.1.1 Konzeption des rechnergeregeltten Motorenprüfstands

Der Prüfstand sollte unter Verwendung eines bereits vorhandenen Prozeßrechners (8 K-Kernspeicher) und einer Wirbelstrombremse erstellt werden. Neben der Regelung von Last und Drehzahl sollte auch die Überwachung des Prüfmotors und die Datenerfassung und -speicherung zur Weiterverarbeitung durch den Prüfstand erfolgen. Die Anlage sollte einfache Änderung der Prüfprogramme und einfache Umstellung auf verschiedene Motortypen und auf Handbetrieb ermöglichen.

Unter Beachtung dieser Anforderungen wurde folgende Konzeption gewählt (vgl. Abb.3). Der Prozeßrechner erfaßt die Motorbetriebs- und Verschleißmeßdaten und überwacht Drehzahl und Last. Er gibt die Sollwerte für Drehzahl und Last entweder nach einem zuvor eingespeicherten Programm oder dynamisch aufgrund der jeweils gemessenen Prüfstandwerte an entsprechende externe Regelkreise vor. Die Sicherheitsüberwachung, mit Ausnahme der Leistung, erfolgt in einem externen Sicherheitskreis, in den alle zeitkritischen Überwachungsgrößen, wie z.B. Öldruck, Überdrehzahlen usw., eingeschaltet sind. Kühlwasser- und Schmieröltemperatur werden ebenfalls in zwei externen Regelkreisen geregelt, deren Sollwerte z.Zt. noch von Hand vorgegeben werden. Durch die Verwendung externer Regelkreise und eines externen

Blockschaltbild: "Automatischer Motorenprüfstand"

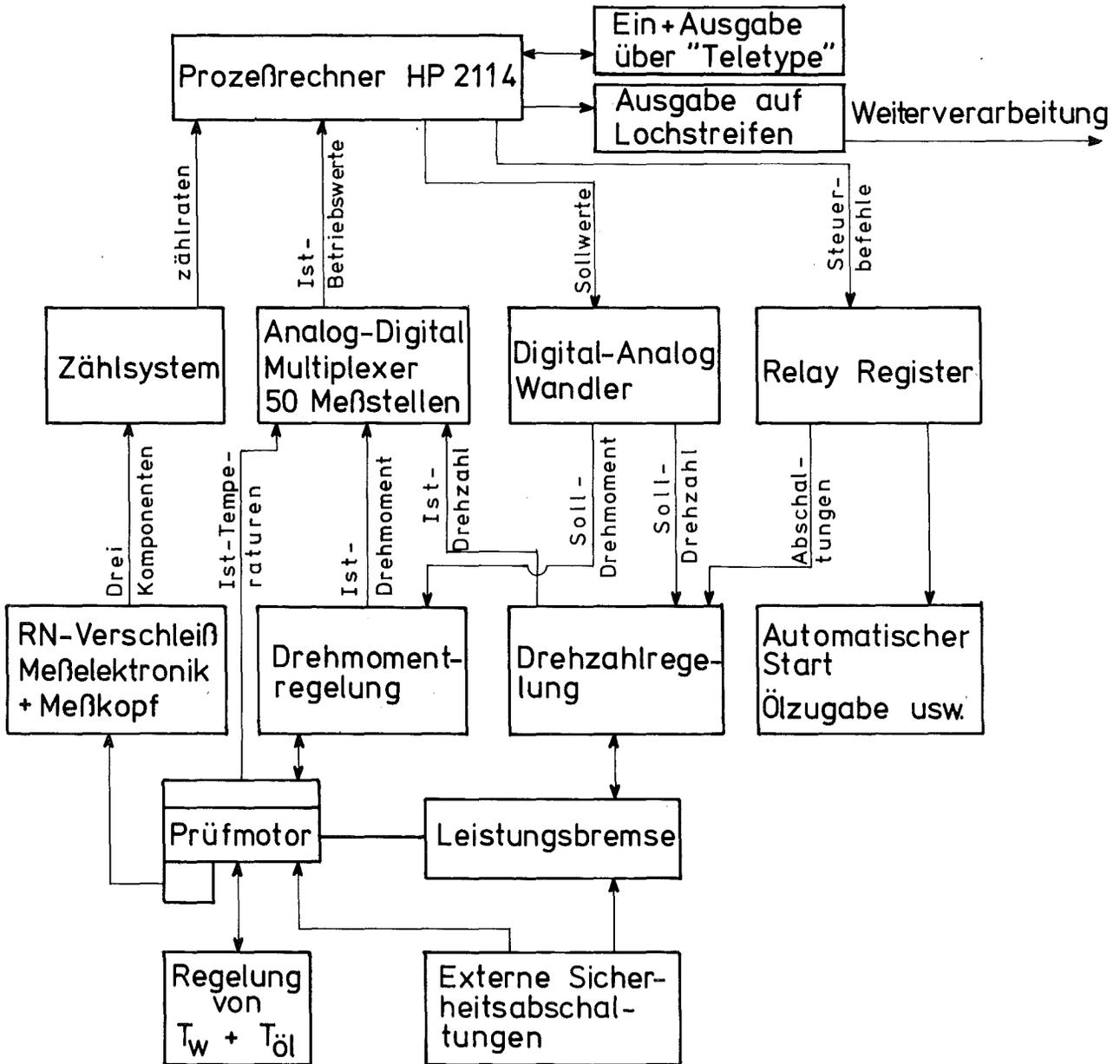


Abb.3 Blockschaltbild des rechnergeregelteten Motorenprüfstands

Sicherheitskreises bleibt die Funktion auch im Handbetrieb erhalten.

### 3.2.1.2 Software

Da eine hohe Flexibilität der Anlage und eine einfache Bedienung ohne Datenverarbeitungsspezialisten erwünscht war, kam für die Programmierung nur eine anwendungsorientierte Sprache in Betracht. Hierfür wurde der Nachteil eines höheren Speicherplatzbedarfs in Kauf genommen.

Ausgewählt wurde die Programmiersprache BASIC, die für die meisten kleinen Prozeßrechner verwendet werden kann. Um Speicherplatz zu sparen, wurden für immer wieder verwendete Programmteile, wie z.B. die externe Sollwertvorgabe, Assembler-Unterprogramme verwendet. Ausführliche Erläuterungen zur Softwarekonzeption mit Beispielen finden sich in [42].

### 3.2.1.3 Aufbau des Prüfstands

In Abb.4 ist der Motorenprüfstand mit Prüfmotor (1), Leistungsbremse (2) und Radionukliddurchflußmeßkopf (3) zu sehen.

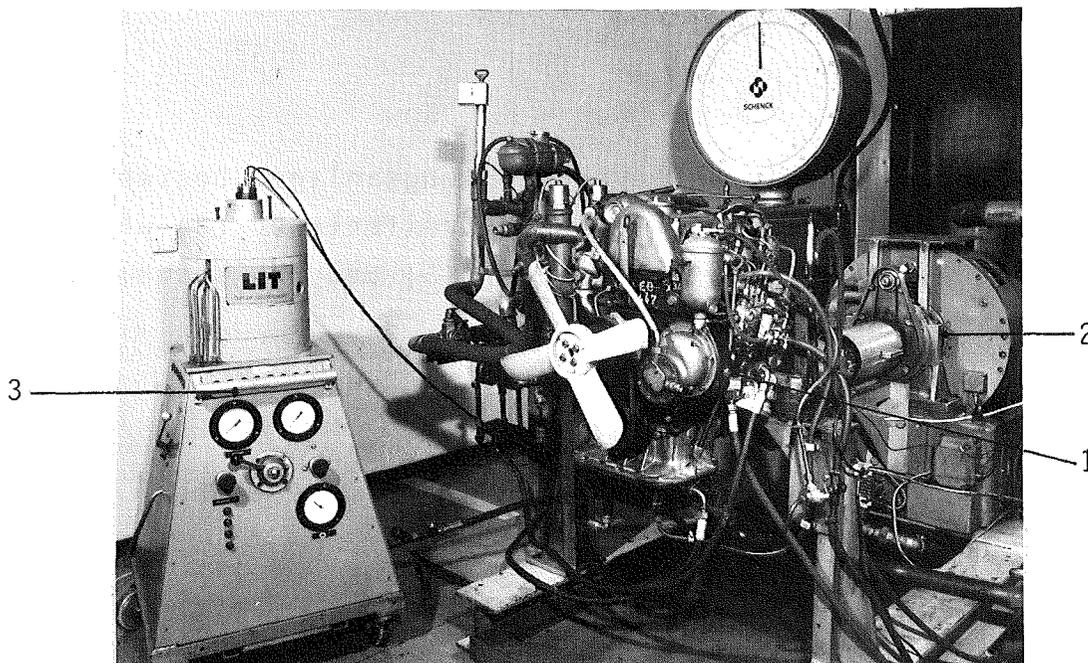


Abb.4 Ansicht des Motorenprüfstands

Das Bedienpult im Schaltraum des Prüfstandes ist in Abb.5 dargestellt. Es zeigt Bremsensteuergerät und Drehzahl- und Drehmomenteinrichtung (1), Kraftstoff- (2) und Durchblasegasmeßgerät (3), Analoganzeigen für Temperaturen und Öldruck (4) und eine Dreikomponenten-Radionuklidmeßelektronik (5) mit Impulshöhenanalysator (6).

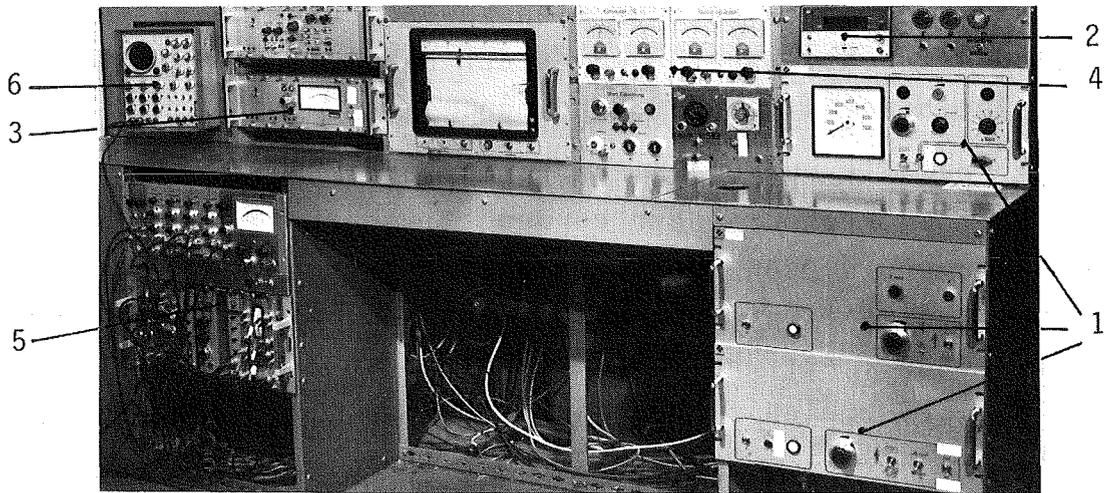


Abb.5 Ansicht des Bedienpults im Schaltraum

In Abb.6 ist die Datenverarbeitungsanlage, bestehend aus Prozeßrechner (1), Teletype (2), Lochstreifenleser (3) und -stanze (4), Analog-Digitalmultiplexer (5) und Zählsystem (6) für die Radionuklidmeßanlage dargestellt.

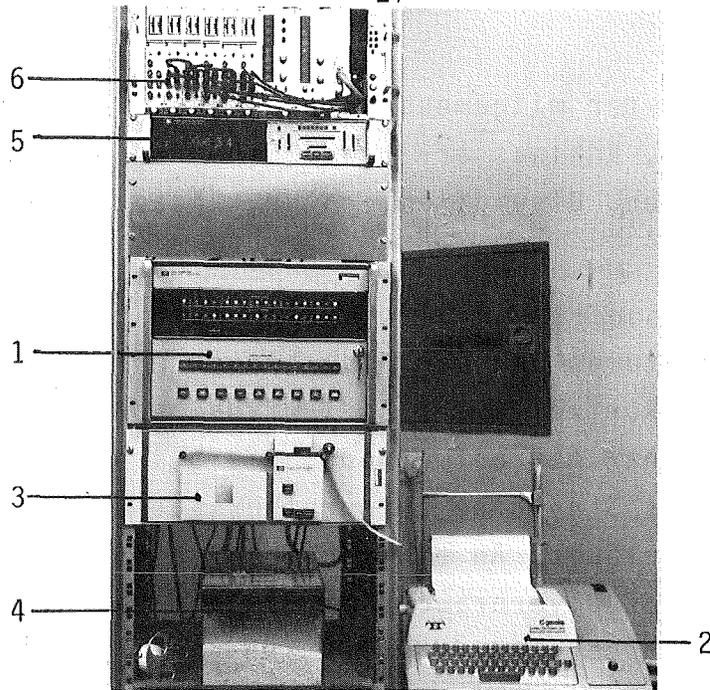


Abb.6 Ansicht der Datenver-  
arbeitungsanlage

#### 3.2.1.4 Bewährung des automatischen Prüfstands

Nach der Überwindung einiger Schwierigkeiten mit den Regelcharakteristiken der verschiedenen Einspritzpumpenregler hat sich der automatische Prüfstand bewährt. Das Rechnersystem vereinfacht die Versuchsdurchführung erheblich. Die Meßdaten werden in kurzen Abständen exakt erfaßt. Die Weiterverarbeitung ist durch die Lochstreifenspeicherung wesentlich erleichtert. Die Motorprüfprogramme werden exakt eingehalten. Der Prüfstand wird bei Bedarf im 24 h-Betrieb auch über das Wochenende, mit geringem zusätzlichem Personaleinsatz für Kontrollen, betrieben und besser ausgenutzt. Der Gesamtzeitbedarf für Langzeitversuche wurde damit erheblich verkürzt. Gravierende Folgeschäden leichterer Motordefekte wurden durch das schnell und zuverlässig arbeitende Sicherheitssystem immer vermieden, wobei hier vor allem die Leistungsüberwachung über den Rechner große Vorteile bringt.

#### 3.2.2 Prüfstandsmessungen

Bei den eingesetzten Versuchsmotoren wurden allgemein

folgende Motorparameter mitgemessen: Drehzahl, Last, Öldruck, Kraftstoffverbrauch, Kühlwasser- bzw. Büchsenwandtemperatur (bei luftgekühlten Motoren), Ölsumpftemperatur, Ansaug- und Abgas-temperatur.

In besonderen Fällen wurden auch Leckgasmengen, Zylinderwandtemperaturen und der Ölverbrauch erfaßt. Die Ölverbrauchsmessung zur Kontrolle des Einlaufzustandes erfolgte im allgemeinen nach einer Abtropfmethode, die bei ausreichend langer Laufzeit (mindestens 3 h) eine Integralaussage über das gefahrene Betriebsintervall erlaubt. An einigen Motoren wurde auch der zeitliche Verlauf des Ölverbrauchs im Einlauf nach einer modifizierten Tritiummethode, in Zusammenarbeit mit der Daimler-Benz AG, gemessen.

### 3.2.3 Oberflächenmessungen

Neben der Messung der in 3.2.2 beschriebenen Prüfstandsdaten und des Verschleißverhaltens von Zylinder- und Kolbenringlaufflächen mit Hilfe der Radionuklidmeßtechnik mußten zur Beurteilung des Einlaufverhaltens auch Messungen des Oberflächenzustandes vorgenommen werden.

Neben der Erfassung der Rauigkeitsprofile durch Perthometerschriebe wurden die Oberflächen direkt und, wo dies aus technischen Gründen nicht möglich war, mit Hilfe von Oberflächenreproduktionen nach dem Fax-Filmverfahren [ 9 ] im Mikroskop begutachtet.

In einigen Fällen wurden auch Oberflächenaufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop angefertigt. Die Verzugszustände der Zylinderbüchsen wurden, wo dies notwendig war, mit Hilfe von Talyrondmessungen erfaßt.

## 3.3 Versuchsmotoren, Versuchsteile und Betriebsmittel

In diesem Kapitel sollen in kurzer Form die wesentlichen Daten der eingesetzten Motoren, Bauteile und Betriebsmittel dargestellt werden.

### 3.3.1 Versuchsmotoren

Insgesamt wurden für die Untersuchung 6 Dieselmotorentypen und zum Vergleich ein Ottomotortyp eingesetzt. Die Auswahl geschah unter dem Gesichtspunkt unterschiedlicher Konstruktion, Leistung und Material- und Oberflächenausbildung, um die Aussagen auf eine breite Basis zu stellen. Allerdings mußten auch die Interessen der beteiligten Industriefirmen soweit als möglich berücksichtigt werden, um die ausreichende Bereitstellung von Prüfständen, Motoren und Material zu gewährleisten. In Tafel I im Anhang sind einige wesentliche konstruktive Daten und in Tafel II im Anhang die wesentlichen Auslegungsdaten der eingesetzten Versuchsmotoren zusammengefaßt. Die sechs Dieselmotorentypen sind in den Tafeln und im folgenden Text mit Buchstaben von A bis F gekennzeichnet. Zur Vereinfachung des Textes wurde anstelle der vollen Bezeichnung - Motortyp A, B, C - häufig auch die Kurzbezeichnung Motor A, B, C ... verwendet. Darunter ist jedoch immer der Motortyp zu verstehen und nicht ein bestimmter Motor dieses Typs. Wie aus den Tafeln ersichtlich, werden die bei Kleindieselmotoren wesentlichen Auslegungsvarianten bezüglich Bauart, Verbrennungsverfahren, Kühlung, Kolbenring- und Büchsenkonstruktion erfaßt. Die Motoren wurden in serienmäßigem Zustand eingesetzt, mit Ausnahme der Motoren A und E. Bei Motor A wurde zur Vereinfachung der Montage anstelle der serienmäßig eingepreßten, trockenen Laufbüchsen Slip-Fit-Büchsen verwendet. Motor E war mit ungebonderten Laufbüchsen versehen.

### 3.3.2 Versuchsteile

Für die Versuche wurden mit den genannten Ausnahmen bei Motor A und E serienmäßige Versuchsteile verwendet. Für die Motoren A und E wurden die Kolben, Kolbenringe und Zylinderbüchsen vermessen, um bei den grundlegenden Voruntersuchungen Abweichungen besser beurteilen zu können. Die Verwendung serienmäßiger Versuchsteile erfolgte, um Aussagen über die damit auftretenden Streuungen zu bekommen, da das Optimierungssystem an Serienmotoren eingesetzt werden soll.

### 3.3.3 Betriebsmittel

Die Versuche wurden mit handelsüblichem Dieselkraftstoff gefahren. Da der Einfluß der Motorenöle nicht Ziel der Untersuchung war, wurden die Öle, die die jeweiligen Motorenhersteller vorschreiben, verwendet. Die verwendeten Ölviskositäten sind ebenfalls aus Tafel II im Anhang zu entnehmen. Es wurden ausnahmslos HD-Öle verwendet. Da aus der Literatur und aus umfangreichen Untersuchungen am eigenen Institut der starke Einfluß des Öls auf das Verschleißverhalten im Bereich Zylinderbüchsen - Kolbenringe bekannt ist, erscheint eine genaue Untersuchung dieses Einflußparameters auch im Hinblick auf die in Kapitel 2.3.2 genannte Systemphase 2 zu einem späteren Zeitpunkt lohnend (vgl. auch Kapitel 7.1).

### 3.4 Aufwand für die Systementwicklung

Insgesamt wurde das Verschleißverhalten im Einlauf an 65 Neupaarungen bzw. Neumotoren mit Radionuklidern gemessen. Dabei entstanden Aktivierungskosten vor allem durch die Dünnschichtaktivierung der Zylinderbüchsen und Molybdänringe in Höhe von ca. 150 TDM. Für die aktiven Einlaufversuche wurden mehr als 1300 Versuchsstunden gefahren, was aufgrund des Einsatzes von Datenverarbeitung und hochwertigen Meßsystemen Kosten in Höhe von ca. 200 TDM verursachte. Zu diesen Aufwendungen addieren sich Kosten für Versuchs- und Montageteile, die nicht genau angegeben werden können, da bei einigen Teilen Vermessungskosten und Zuschläge für Sonderanfertigungen hinzukommen. Der Aufwand dürfte bei ca. 20 TDM gelegen haben. Die Versuchsmotoren wurden nicht mitgerechnet, da sie bei den Versuchen nicht zerstört wurden.

Zu diesen Sachkosten müssen noch die Personalkosten für Montage, Versuchsvorbereitung, -betreuung und -auswertung gerechnet werden, die mit geschätzten 300 TDM zu Buche schlagen. Damit liegen die Gesamtkosten bei ca. 670 TDM. Hinzu müßten noch eine Vielzahl von inaktiven Versuchsläufen zur Ergänzung der aktiven

Messungen, die zum Teil bei den beteiligten Firmen gefahren wurden, addiert werden. Diese Kosten sind aber nicht direkt erfaßbar.

Dieser notwendige hohe Aufwand zeigt, warum neben der Vereinfachung der Beschaffung von Teilen und Motoren und der vereinfachten Durchführung von Versuchsreihen eine enge Zusammenarbeit mit den Motorenherstellern erforderlich war.

Auf der anderen Seite ergibt eine kurze Rechnung unter Verwendung der in Kapitel 1.2 genannten Zahlen, daß bereits eine Einlaufverkürzung von 20 min bei einer Tagesproduktion von ca. 50 Motoren fast die Hälfte der Gesamtkosten des Vorhabens bei einer einzigen Firma in einem Jahr einsparen könnte, so daß mit einer schnellen Rentabilität des Systems zu rechnen ist.

#### 4. GRUNDLAGEN DER EINLAUFOPTIMIERUNG MIT HILFE DES VERSCHLEISSVERHALTENS VON EINLAUFBAUTEILEN

In diesem Abschnitt werden zunächst die wesentlichen Ergebnisse der Analyse des Einlaufvorgangs mit Hilfe der Radionuklidverschleißmeßtechnik dargestellt und danach die Versuchsergebnisse beschrieben und interpretiert, die eine Aussage über die Verwendbarkeit des Verschleißverhaltens der untersuchten Bauteile für die Optimierung von Einlaufprogrammen erlauben.

#### 4.1 Analyse des Einlaufvorgangs mit Hilfe des Verschleißverhaltens

Im Folgenden werden die wesentlichen Versuchsergebnisse, die zur Beschreibung des Einlaufvorganges mit Hilfe des Verschleißverhaltens dienen, und Parameter zur Beeinflussung des Verschleißverhaltens im Einlauf aufzeigen, dargestellt.

##### 4.1.1 Aufteilung des Einlaufvorgangs in Einlaufbereiche

Im Laufe der Untersuchung hat sich eine Aufteilung des vollständigen Einlaufs in zwei Bereiche als sinnvoll erwiesen, um die Beschreibung zu vereinfachen und der unterschiedlichen praktischen Bedeutung Rechnung zu tragen. Die Aufteilung wird in Abb.7 schematisch dargestellt. Man unterscheidet danach einen Grobeinlauf, der sich vom Start des neuen Motors bis zum Erreichen eines bestimmten Werts der Verschleißratenänderung der Einlaufbauteile im Nennleistungsbetrieb erstreckt und den Feineinlauf, der durch nur noch langsam abnehmende Verschleißraten mit zunehmender Laufzeit gekennzeichnet ist. Mit dem Erreichen einer konstanten Verschleißrate beginnt der Dauerlaufbereich [ 44 ] . Die Grenze zwischen Grobeinlauf und Feineinlauf wurde, wie in Abb.7 dargestellt, folgendermaßen festgelegt. Nach Anfahren der Nennleistung ( $t_1$ ) wird nach jeder Laufstunde die Änderung der Verschleißrate in dieser Stunde gemessen ( $\dot{V}_{i+1} - \dot{V}_i$ ). Diese Differenz ( $\mu\text{g/h}$ ) wird auf die Anfangsverschleißrate zur Zeit  $t_1$  ( $\dot{V}_{t_1}$ ) bezogen. Mit Beginn des Stundenintervalls, für das diese Differenz kleiner als 5% der Anfangsverschleißrate ist, endet der Grobeinlauf. Die Grenze von 5% wurde gewählt, da eine so geringe Verschleißratenänderung einen weitgehend stabilen Einlaufzustand anzeigt, so daß eine Gefährdung der Betriebssicherheit nicht mehr zu erwarten ist. Die hier genannte quantitative Abgrenzung zwischen Grob- und Feineinlauf ist für die Festlegung des Programmendes im Rahmen des Optimierungssystems allein nicht ausreichend. Hierauf wird in den Kapiteln 4.2.2 und 5.2.3 ausführlich eingegangen.

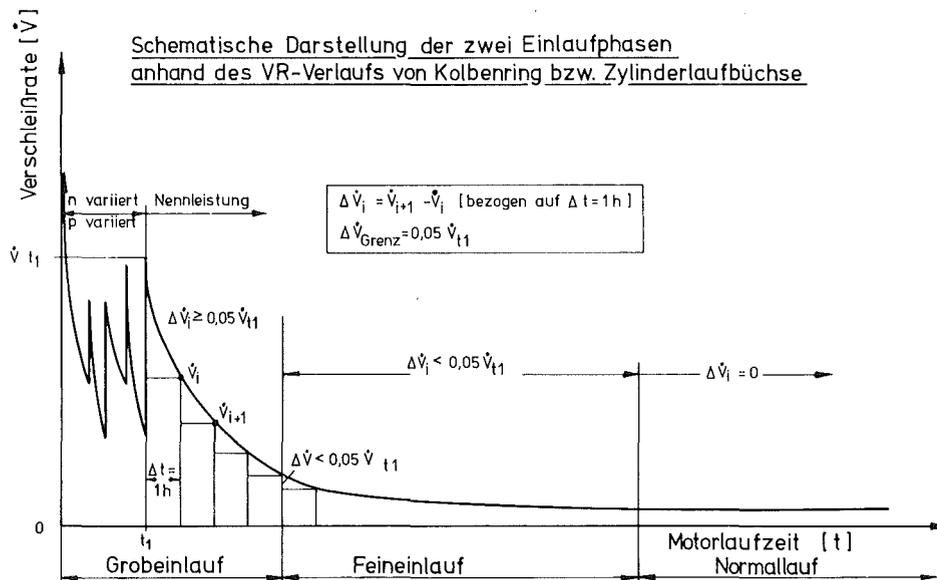


Abb.7 Schematische Darstellung der Aufteilung des Gesamteinlaufs in Grob- und Feineinlauf

Für die im System angestrebte Einlaufoptimierung bezüglich Betriebssicherheit und Dauer ist vor allem der Grobeinlauf interessant, da hier eine starke Beeinflussung des Einlaufvorgangs über das Belastungsprogramm möglich ist. Mit Erreichen des Grobeinlaufendes ist der Motor betriebssicher. Der Kunde kann ihn ohne Gefahr einer Schädigung durch Überlastung voll beanspruchen. Der Feineinlauf, der bis zu 100 Stunden dauern kann, ist für einen Serieneinlauf auf Firmenprüfständen wirtschaftlich nicht zu vertreten. Er muß aber bei vergleichenden Parameterstudien beachtet werden.

Im Grobeinlauf hat es sich als zweckmäßig erwiesen, die Phase der ersten Laufminuten des Motors bei Null-Last, im Folgenden Anfahrverschleiß genannt, von der restlichen Grobeinlaufphase zu unterscheiden, da hier bei einigen Motortypen kurzzeitig sehr hohe, aber stark degressive Verschleißraten auftreten, die im weiteren Einlauf bei solch geringen Lasten nicht typisch sind.

Die Aufteilung in Grob- und Feineinlauf wird an einigen praktischen Beispielen aufgezeigt, wobei zur Demonstration unterschiedliche Einlaufprogramme gezeigt werden, die im Laufe der

Untersuchungen gefahren wurden. Es handelt sich dabei nicht um optimierte Programme.

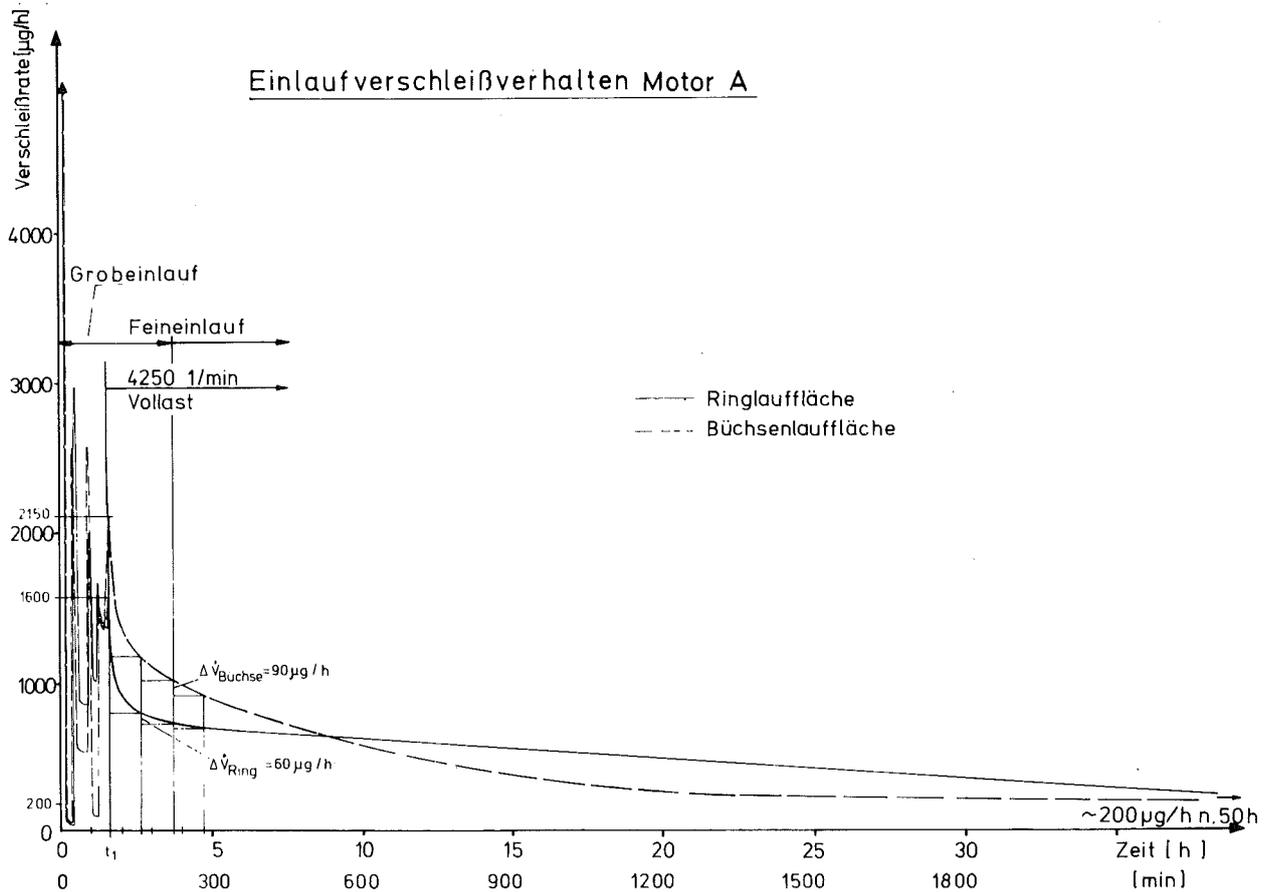


Abb.8 Verlauf der Verschleißraten von Motor A in Grob- und Feineinlauf (kein optimiertes Programm)

In Abb.8 sind Verschleißratenverläufe für Kolbenring- und Büchsenverschleiß von Motortyp A in Grob- und Feineinlauf dargestellt. Nach dem Anfahrverschleiß (sehr hohe, degressive Verschleißraten) zeigen sich jeweils Verschleißratensprünge mit anschließend degressivem Verlauf bei Belastungsänderungen im Grobeinlauf. Aufgrund des geringfügig unterschiedlichen Verschleißratenverlaufs von Ring und Büchse nach Erreichen der Nennleistung wird die Grenze für den Grobeinlauf nach dem Büchsenverschleiß ermittelt, der die 5% eine Stunde später erreicht.

In Abb.9 ist der Verschleißratenverlauf der Ringlauffläche für den Motortyp F dargestellt. Auch hier sind die beiden Einlaufphasen deutlich zu erkennen. Hier dauerte der Feineinlauf ca.40 h.

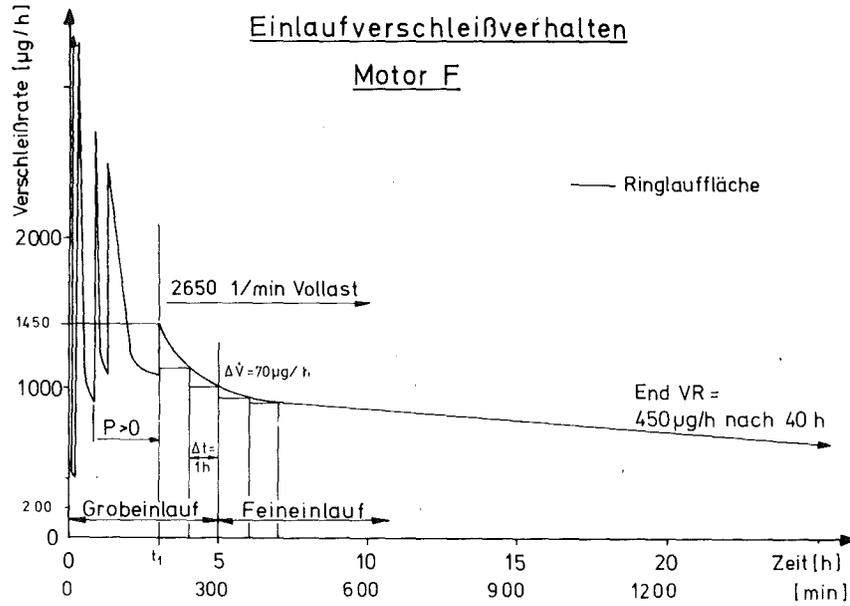


Abb.9 Verlauf der Verschleißraten von Motor F in Grob- und Feineinlauf (kein optimiertes Einlaufprogramm)

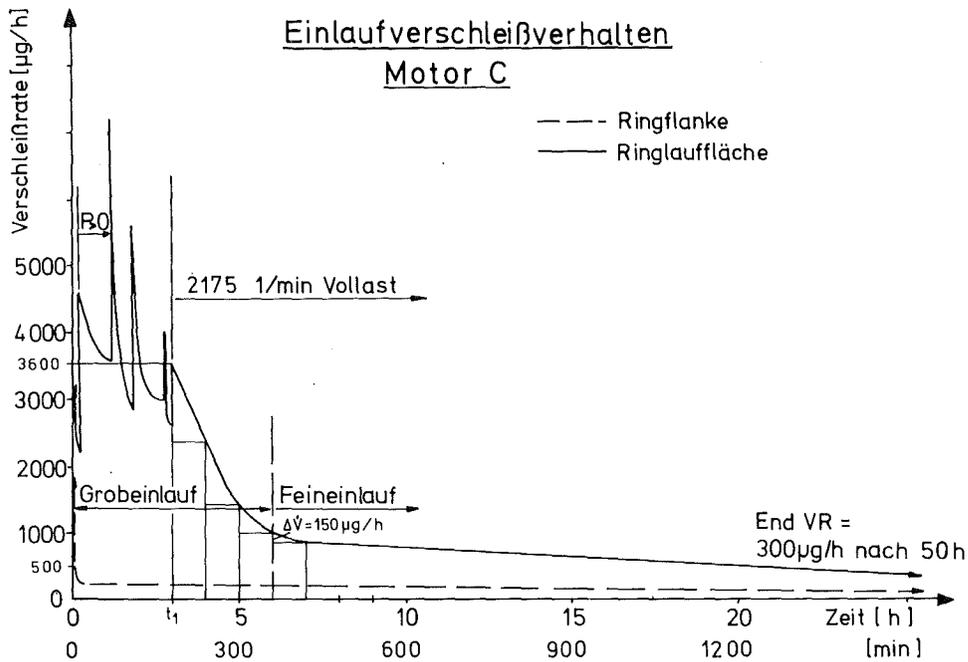


Abb.10 Verlauf der Verschleißraten von Motor C in Grob- und Feineinlauf (kein optimiertes Einlaufprogramm)

In Abb.10 ist ein Versuchsergebnis aus Grob- und Feineinlauf für die Ringlaufläche des Motors C dargestellt. Dauer des Feineinlaufs ca. 50 Stunden. Interessant ist in Abb.10 auch

der miteingezeichnete Verlauf des Ringflankenverschleißes, der, charakteristisch für diese Verschleißkomponente, praktisch nur einen Anfahrverschleiß zeigt.

In Tafel 3 sind für alle eingesetzten Motortypen die aus mehreren Versuchen gemittelten Gesamtverschleißwerte aus dem Anfahrverschleiß und Grobeinlauf und deren Verhältnis zueinander eingetragen. Dabei zeigt sich, daß durch unterschiedliche Konstruktion, Materialien und Oberflächen unterschiedliche Anteile des für den Grobeinlauf notwendigen Gesamtverschleißes bereits in der Phase des Anfahrverschleißes abgetragen werden.

Zwei Beispiele: Der Motor E trägt im Anfahrverschleiß bei der Ringlauffläche ca. 45% des gesamten Verschleißes im Grobeinlauf ab. Der Motor C dagegen nur 8%. Betrachtet man die Ergebnisse in Korrelation mit den wichtigsten Auslegungsgrößen, so fällt auf, daß alle Einzelzylindermotoren, bei den untersuchten Motoren gleichbedeutend mit Luftkühlung, mit im Mittel 30% Verschleißanteil in der Anfahrphase für die Kolbenringlauffläche gegenüber den Blockmotoren (wassergekühlt) mit 12% um mehr als das Doppelte höher liegen. Für den Büchsenlaufflächenverschleiß liegen nicht für alle Motoren Ergebnisse vor, doch weist das Verschleißverhältnis beim Motor E und Motor A in dieselbe Richtung.

Als Ursache kommen möglicherweise die bei Blockmotoren höheren dynamischen Verzüge im Betrieb in Frage, an die sich die Paarung im Grobeinlauf durch Verschleiß anpassen muß. Dieser Hinweis wurde auch durch Talyrondmessungen an Büchsen der Motoren A und E erhärtet, die nach dem Grobeinlauf einen ca. 10-fach höheren Verzug der Büchse des Blockmotors A ergaben. Allerdings muß bei diesem Ergebnis einschränkend berücksichtigt werden, daß die Büchsen nur im ausgebauten Zustand vermessen werden konnten.

Auf eine weitergehende Untersuchung, welche der möglichen Einflußgrößen das unterschiedliche Verhalten hervorrufen, wurde verzichtet, da sie für die Erstellung des Optimierungssystems nicht von Bedeutung ist. Die Klärung dieser Fragestellung wäre jedoch sehr wichtig, um Hinweise für Motorkonstruktionen zu geben, die einen Einlauf unter geringem Zeit- und Geldaufwand bei voller Betriebssicherheit ermöglichen.

Motortyp	Gesamtverschleiß (mg) <sup>+</sup>		Anfahranteil (%)	Zyl.-Konstruktion	Kühlung	Ringform Mat.LFL		Oberfläche Zyl.-Büchse
	Anfahrverschleiß	Grobeinlauf						
A	0,3 (1,2)	2,1 (3,35)	14 (36)	BL trock. Büchse	W	R	Cr	-
B	3,2	21,6	15	BL "	W	R	Mo	-
C	0,9	11,3	8	BL "	W	R	Cr	-
D	0,3	0,93	32	EZ	L	DTR	Cr	-
D	0,17	0,87	19	EZ	L	DTR	Cr	gebondert
E	0,6 (9,3)	1,35 (12,7)	45 (37)	EZ	L	R	Cr	-
F	1,8	6,9	26	EZ	L	DTR	Mo	gebondert

<sup>+</sup>aus verschiedenen Versuchsläufen gemittelte Werte

EZ = Einzelzylinder

DTR = Doppeltrapezring

BL = Blockmotor

R = Rechteckring

L = Luftkühlung

Cr = verchromte Lauffläche

W = Wasserkühlung

Mo = molybdängespritzte Lauffläche

Werte in ( ) = Büchsenverschleiß

Tafel 3: Verschleißaufteilung auf Anfahrverschleiß und Grobeinlauf

Die durch Experimente festgestellte Aufteilung des Einlaufs und das entsprechende Verschleißverhalten läßt sich wie folgt interpretieren. Beim Einlauf werden die beiden Oberflächen so abgetragen, daß sie die äußere Belastung (Last, Temperatur, Gleitgeschwindigkeit usw.) mit möglichst kleiner Verschleißrate aufnehmen. Die hohen Verschleißraten im Anfahrverschleiß ergeben sich, weil die Oberflächen im Neuzustand einen großen Negativprofilanteil aufweisen, was einen hohen Verschleißabtrag normal zur Oberfläche bis zum Erreichen des dem Belastungszustand entsprechenden Traganteils erfordert. Sie werden ohne Makroschäden ertragen, weil durch die geringen Kontaktflächen mögliche Überlastungen örtlich begrenzt bleiben und der Schmierzustand im Bereich Kolbenringe - Zylinder durch die relativ geringen Büchsenwandtemperaturen bei Nulllast und durch das günstige Speichervermögen an Schmieröl aufgrund des noch großen Negativvolumens der rauhen Oberflächen günstig ist.

Im Grobeinlauf erfolgt mit steigender Belastung die Ausbildung entsprechender makroskopischer Oberflächentraganteile und -profile. Durch den dynamischen Verzug ist die Anpassung örtlich unterschiedlich erforderlich. Da der Traganteil der Oberflächen bei zunehmendem Abtrag immer größer wird, muß für einen bestimmten Abtrag normal zur Oberfläche immer mehr Materialvolumen durch Verschleiß abgebaut werden. Dieser verstärkte Materialabtrag bedeutet, daß besonders beim Abbau der Verzüge örtlich mehr Energie zugeführt wird.

Durch diese Energiezufuhr in die Reibstelle und durch die ohnehin höhere Belastung und schlechtere Schmierung - die Zylinderwandtemperaturen steigen mit zunehmender Last und Drehzahl, geringere Schmiermittelreserven durch abnehmendes Negativvolumen - ist die Gefahr eines örtlichen Umschlagens in hohen progressiven Verschleiß mit Schädigung größer als im Anfahrverschleiß.

Den starken Einfluß des Oberflächenzustands auf die Wahrscheinlichkeit einer Schädigung zeigen die umfangreichen Untersuchungsergebnisse aus der Literatur über Brandspurbildung [31,32,33]. Besonders in [45] wird auf den engen Zusammenhang von Oberflächenwelligkeit (Verzügen) und Rauhtiefen (Negativprofil) hingewiesen.

Am Ende des Grobeinlaufs haben sich für den gegebenen Motor für volle Belastung genügend große Traganteile in der notwendigen örtlichen Verteilung (Anpassung an Verzüge) gebildet. Die sich stabilisierenden Verschleißraten zeigen an, daß die makroskopische Anpassung weitgehend stattgefunden hat.

Im Feineinlauf passen sich die Oberflächen durch Verschleiß weiter an, wobei jedoch der Vorgang aufgrund des erreichten großen Traganteils und der geringen Verschleißraten sehr langsam abläuft. Da die Anpassung im Feineinlauf immer besser wird, wird die Verschleißrate und entsprechend die Anpassungsgeschwindigkeit immer kleiner. Der Vorgang führt am Ende des Feineinlaufs zu konstanten Verschleißzuständen über sehr lange Laufzeiten, solange nicht durch zusätzliche Veränderungen der äußeren Einflußgrößen die stabilen Verhältnisse gestört werden.

#### 4.1.2 Haupteinflußgrößen\_Drehzahl\_und\_Drehmoment

Für die Beeinflussung des Verschleißverhaltens im Grobeinlauf stehen als wichtigste Größen Drehmoment (Last) und Drehzahl zur Verfügung. Die Kenntnis charakteristischer Auswirkungen dieser Größen auf das Verschleißverhalten ist für das grundsätzliche Vorgehen bei der Erstellung des Optimierungssystems notwendig.

##### 4.1.2.1 Darstellung\_der\_Meßergebnisse\_und\_Interpretation

Im Folgenden werden die grundsätzlichen Erkenntnisse aus dem Grobeinlauf anhand von Meßergebnissen dargestellt.

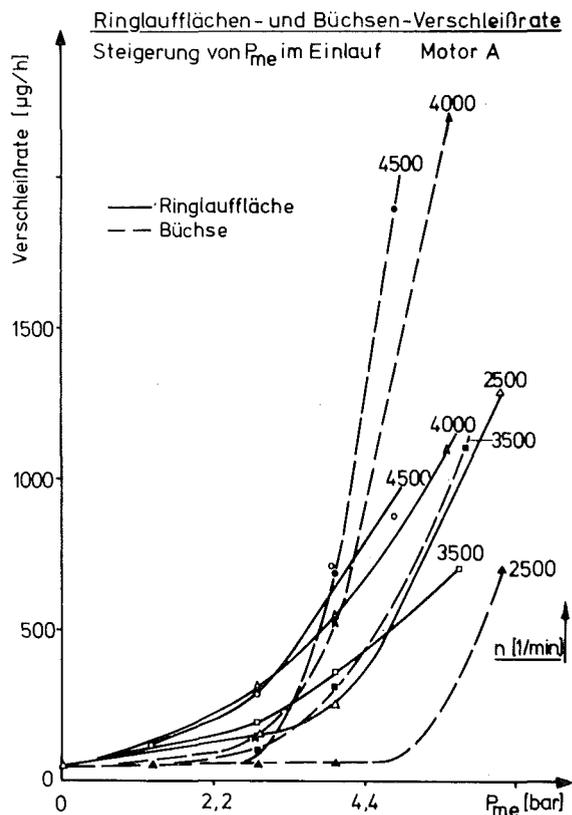


Abb.11 Verlauf der Verschleißraten von Motor A im Grobeinlauf bei Steigerung der Last ( $P_{me}$ )

In Abb.11 ist die Ring- und Büchsenverschleißrate im Grobeinlauf für den Motor A als Funktion der Belastung ( $P_{me}$ ) aufgetragen. (Im Versuch wurde jeweils die Drehzahl konstant gehalten und die Last gesteigert.) Deutlich ist für Ring und Büchse zu erkennen, daß bei niedriger Belastung die Verschleißraten und damit der Einlaufgewinn gering sind. Bei Steigerung der Last über die Halblast steigen die Verschleißraten stark an, wobei sie ab 3500 1/min sowohl für Büchse als auch Ring mit zunehmender Drehzahl (höhere Leistung) steiler ansteigen. Der dabei zu beobachtende steilere Anstieg der Büchsenverschleißrate bei 4000 und 4500 1/min im Vergleich zur Ringverschleißrate dürfte in der steigenden Büchsenwandtemperatur begründet sein, die sich bei der im OT aktivierten Zylinderbüchse stärker als beim Ring bemerkbar macht.

Den starken Einfluß der Belastung bei diesem Motor zeigt die Tatsache, daß bei 4500 1/min Volllast die Verschleißraten von Ring und Büchse zwar steiler ansteigen, aber nicht die gleich hohen Verschleißraten erreichen, wie bei 4000 1/min, da hier der maximale  $P_{me}$ -Wert wieder niedriger liegt.

Der starke Einfluß der Last bei zunehmender Drehzahl (Leistung) ist aus einem in Abb.12 dargestellten Einlaufversuch auch für den Motor F ersichtlich.

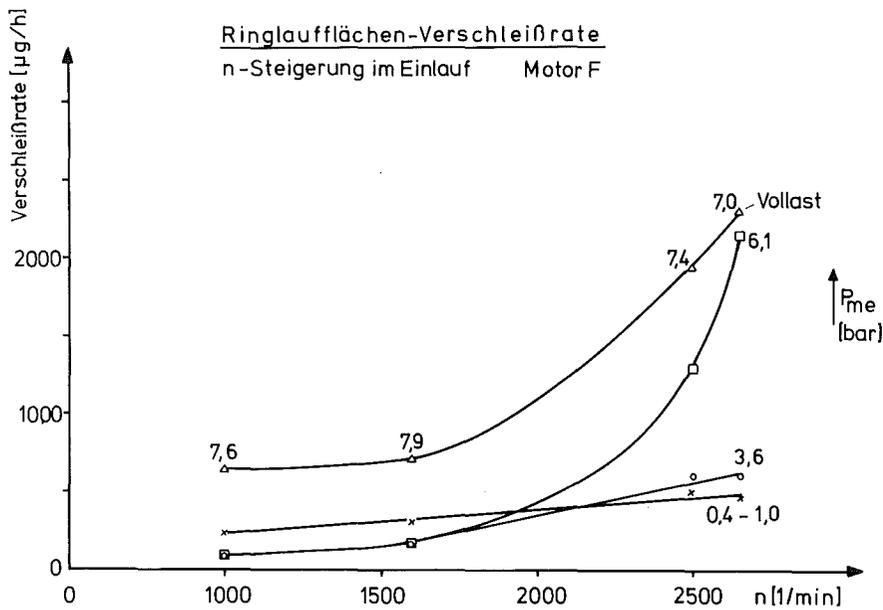


Abb.12 Verlauf der Verschleißraten von Motor F im Grobeinlauf bei Steigerung der Drehzahl

Hier ist die Ringlaufflächenverschleißrate als Funktion der Drehzahl mit der Last als Parameter aufgetragen, da im Versuch jeweils die Last konstant gehalten und die Drehzahl gesteigert wurde. Bei niederen Lasten treten nur relativ geringe Einlaufverschleißraten auf. Bei Halb- und Dreiviertellast, bei niedrigen Drehzahlen, liegen die Verschleißraten sogar etwas niedriger als bei Niedriglast, was vermutlich auf den während des Versuchs fortschreitenden Einlauf zurückzuführen ist. Bei Dreiviertellast steigt die Verschleißrate ab 2000 1/min steil an. Beim Fahren der Volllastkennlinie liegen die Verschleißraten noch höher. Die Volllastverschleißratenkurve verläuft aber flacher als die Dreiviertellastkurve,

da ab 1600 1/min die  $P_{me}$ -Werte geringer werden. Ein ähnliches Verhalten wurde auch durch die Messergebnisse der Motortypen B und D bestätigt.

Faßt man die bisherigen Ergebnisse der Untersuchung zusammen, so zeigt sich als wesentliche Erkenntnis, daß der Last ( $P_{me}$ ) eine überragende Bedeutung für das Einlaufverschleißverhalten zukommt. Nach dem Anfahrverschleiß bringt Fahren mit niedriger bis halber Last im gesamten Drehzahlbereich im allgemeinen nur geringen Einlaufverschleiß. Mit zunehmender Last bis zur Vollast steigen die Verschleißraten stark an. Eine starke Zunahme des Einlaufverschleißes mit zunehmender Drehzahl ist im allgemeinen nur bei höheren Lasten zu beobachten.

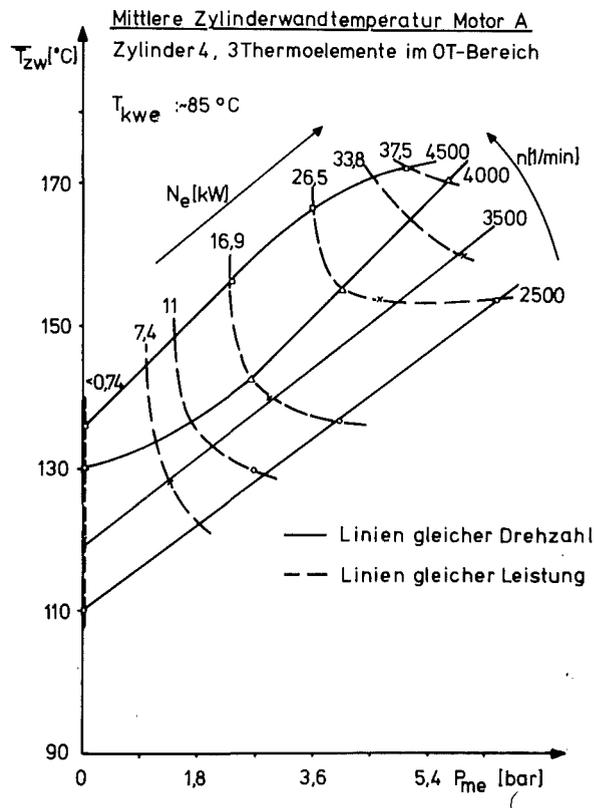


Abb.13 Kennfeld der mittleren Zylinderwandtemperaturen des wassergekühlten Motor A im Bereich des oberen Totpunkts

Im Folgenden soll versucht werden, diese Ergebnisse zu interpretieren. Dabei ist jedoch wie bei allen nachfolgenden

Interpretationen der Verschleißmeßergebnisse zu beachten, daß jeder einzelne Verschleißmeßwert als Integral über die aktivierte Oberfläche und die jeweilige Meßzeit (Integrationszeit für einen Verschleißmeßpunkt zwischen 1 und 10 min) erfaßt wird. Da auch alle wichtigen Einflußparameter im Bereich Zylinder - Kolbenringe nur als Mittelwerte der zeitlich und örtlich unterschiedlichen Größen erfaßt werden können, ist eine Interpretation von Verschleißratenhöhe und -Verlauf mit Hilfe dieser gemessenen Mittelwerte der Einflußparameter, wie z.B. Last, Drehzahl, Temperaturen usw., nur mit entsprechender Vorsicht möglich. Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich dadurch, daß diese Einflußgrößen nicht unabhängig voneinander sind.

Die Auswirkungen dieser Erkenntnisse sollen im Folgenden für den Parameter Drehzahl näher erläutert werden. Wird beispielsweise die Drehzahl bei konstanter Last erhöht, ändern sich Leistung, Temperaturverteilung, Massenkraftbelastung, Schmierzustand, Gleitgeschwindigkeit und Gleitweg. Betrachtet man nur die Veränderung des Gleitwegs, so fällt auf, daß hier eine Interpretation des Einflusses auf das Verschleißverhalten besonders schwierig wird. Im Zusammenhang mit dem Verschleißverhalten darf hier nur der Anteil des Gleitwegs berücksichtigt werden, der zum Verschleiß beiträgt, d.h. bei trockener Reibung oder im Mischreibungsgebiet. Dieser Anteil des Gleitwegs soll im Folgenden als wirksamer Gleitweg bezeichnet werden. Es ändern sich aber bei Drehzahländerung auch Temperaturverteilung, Belastungsverteilung und Schmierzustand so, daß eine eindeutige Aussage über die Veränderung des wirksamen Gleitwegs nicht möglich ist. Ein Bezug des Verschleißes von Kolbenringen und Zylinder auf den aus dem Hub errechneten Gleitweg, der mit der Drehzahl gekoppelt ist, ist deshalb, anders als bei Experimenten unter trockener Reibung, nicht sinnvoll. Diese Erkenntnis über den wirksamen Gleitweg hat für die weiteren Interpretationen des Einlaufverschleißverhaltens große Bedeutung.

Interpretiert man unter Beachtung der genannten Überlegungen die vorliegenden Ergebnisse über den Einfluß von Drehzahl und Last auf das Einlaufverhalten, so zeigt sich folgendes. Bei Steigerung der Drehzahl bei niedrigen Lasten wird die Gleitgeschwindigkeit erhöht, gleichzeitig aber die Hydrodynamik ver-

bessert. Durch die ansteigenden Wandtemperaturen wird aber der Schmierzustand aufgrund abnehmender Viskosität schlechter. Die Temperaturen liegen bei mittleren Lasten jedoch noch relativ niedrig, wie Abb.13 für den wassergekühlten Motor A und Abb.14 für den luftgekühlten Motor D, jeweils im OT-Bereich, zeigen.

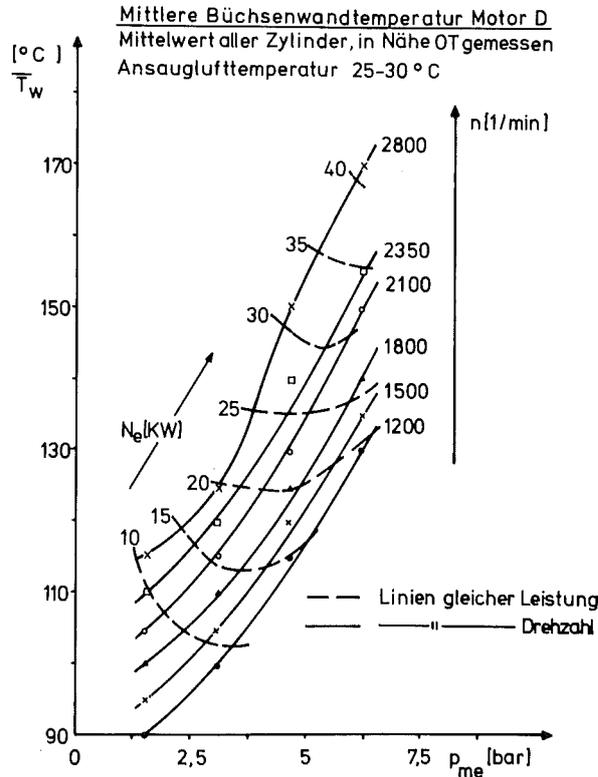


Abb.14 Kennfeld der mittleren Zylinderwandtemperaturen des luftgekühlten Motors D im Bereich des OT

Diese gegenläufigen Einflußgrößen scheinen sich bei niedrigen Lasten weitgehend aufzuheben, so daß eine deutliche Beanspruchungserhöhung der Gleitflächen nicht eintritt, wie die niedrigen Verschleißratenwerte bei niedrigen Lasten zeigen.

Bei Steigerung der Last bei konstanter Drehzahl wird, im Gegensatz zur Drehzahlsteigerung bei konstanter niedriger Last, sowohl über die erhöhten Gaskräfte als auch die Erhöhung der Wandtemperaturen die Beanspruchung der verschiedenen

Gleitflächen größer. Der im allgemeinen relativ geringe Verschleißratenzuwachs bis zur Halblast zeigt jedoch, daß hier noch ausreichend gute Schmierungsbedingungen vorliegen. Im Bereich der Vollast bewirken beide Effekte zusammen den hier z.T. starken Verschleißanstieg. Bei hohen Lasten und Drehzahlen, verbunden mit relativ hohen Wandtemperaturen und entsprechender Verschlechterung des Schmierzustandes werden die höchsten Beanspruchungen der Gleitflächen erreicht, so daß die meisten untersuchten Motoren hier die höchsten Verschleißraten aufweisen.

Daß diese Zusammenhänge aber nicht generell für jeden Motortyp gültig sind, zeigen Meßergebnisse vom Motor C. In Abb.15 ist ein Verschleißkennfeld der Ringlauffläche im Grobeinlauf bei Drehzahlsteigerung dargestellt. Ohne auf alle Einzelheiten des Kennfelds einzugehen, lassen sich folgende grundsätzliche Feststellungen treffen. Bei Nullast steigen die Verschleißraten mit zunehmender Drehzahl an. Bei Laststeigerung liegen bereits bei Viertellast die Verschleißraten bei niedrigen Drehzahlen viel höher als bei Nullast, nehmen jedoch mit zunehmender Drehzahl ab. Diese Verschleißratenabnahme bei zunehmender Leistung (Last konstant, Drehzahl steigt) bleibt bis zur Vollast erhalten. Dies wurde auch im nachfolgenden Feineinlauf und in weiteren Versuchsläufen an diesem Motortyp wiederholt bestätigt.

Eine schlüssige Interpretation des abweichenden Verhaltens von Motor C kann nicht gegeben werden. Auffällig waren bei diesem Motortyp jedoch drei über den Umfang verteilte Bahnen vollständiger Glättung der Honstruktur in Zylinderlängsachse über den ganzen Hub, während der Rest der Oberfläche eine normal eingelaufene Honstruktur aufwies. Dies deutet auf starke Verzüge der Zylinderlaufbahn hin.

Die trotz des zunehmenden Gleitwegs abnehmende Verschleißrate bei Drehzahlsteigerung kann durch eine Verbesserung des Schmierzustandes durch verbesserte Schmiermittelzufuhr und Hydrodynamik erklärt werden, die bewirkte, daß der wirksame Gleitweg kleiner wurde.

Auf eine genauere Untersuchung der Ursachen, z.B. durch gezielte Messung des Verschleißverhaltens der Zylinderbüchse in den interessierenden Bereichen mit Hilfe der Dünnschichtaktivierung, wurde verzichtet, da dies für die Systementwicklung nicht notwendig ist, und der erforderliche erhebliche Aufwand zu Lasten der Arbeiten im Rahmen der Aufgabenstellung gegangen wäre.

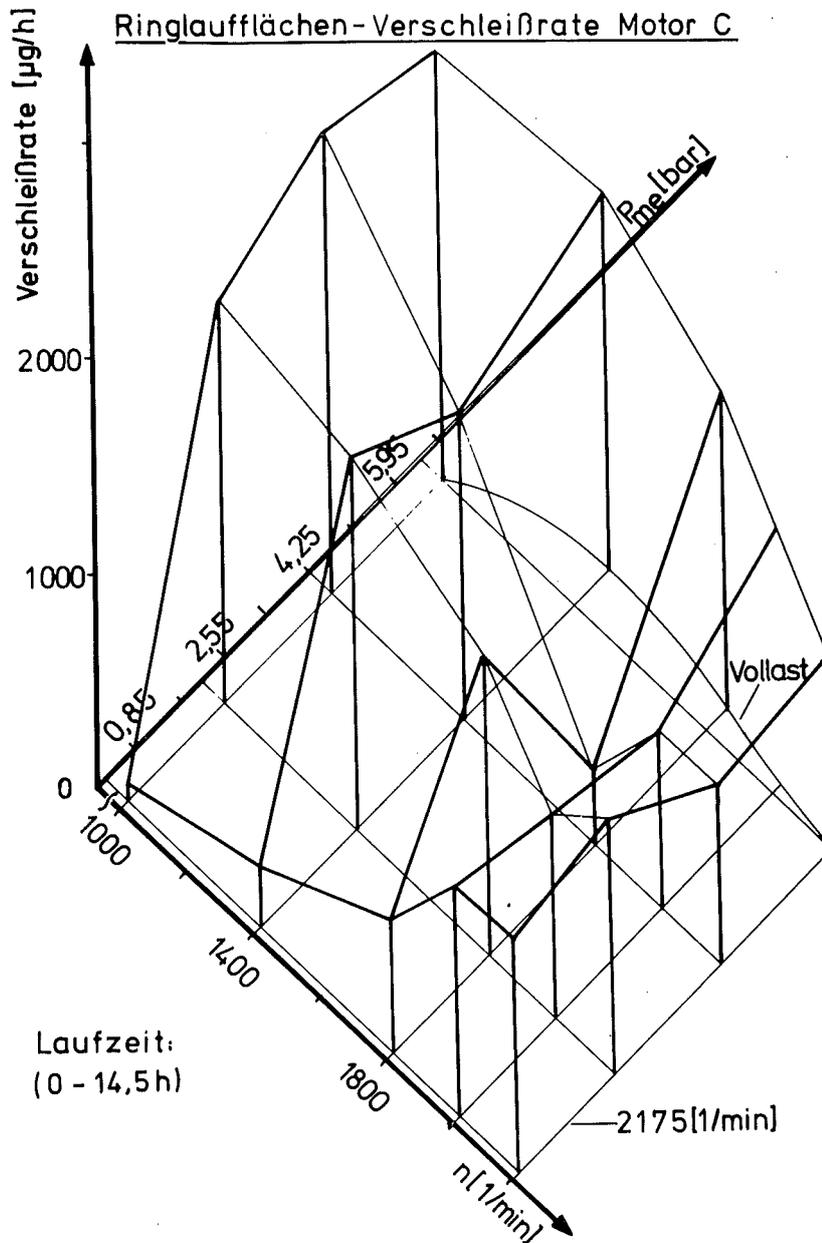


Abb.15 Kennfeld der Ringlaufflächen-Verschleißrate des Motors C im Grobeinlauf

#### 4.1.2.2 Folgerung für die Systementwicklung

Das bei der Mehrzahl der untersuchten Motoren festgestellte Einlaufverhalten gibt Hinweise für die generelle Gestaltung von Einlaufprogrammen. So kann z.B. davon ausgegangen werden, daß in den meisten Fällen der Beitrag niedriger Lasten gering ist [8,12]. Drehzahlsteigerung bringt bei den meisten Motoren nur in höheren Lastbereichen einen erhöhten Einlaufbeitrag. Wichtiger als solche generellen Hinweise ist jedoch die Erkenntnis, daß, auch bei für die Mehrzahl der Motortypen prinzipiell ähnlichem Einfluß von Last und Drehzahl, das individuelle Verhalten der einzelnen Motortypen eine gezielte Anpassung des Programms bezüglich Last- und Drehzahlsteigerung verlangt, und daß Motortypen existieren, die ein völlig anderes Verhalten haben, so daß ein anders angelegtes Programm erforderlich ist, wie z.B. die Messungen am Motor C darlegen. Damit wird die Richtigkeit der Zielsetzung "System zur Einlaufoptimierung" bestätigt, da ein solches Verhalten in einer Standardeinlaufvorschrift nicht zu berücksichtigen wäre. Für das System ergibt sich daraus die Forderung, Maßnahmen einzuarbeiten, die es erlauben, für jeden neuen Motortyp das individuelle Last-Drehzahlverhalten zu ermitteln, so daß Aufbau und Stufung des Einlaufprogramms individuell optimiert werden können.

#### 4.1.3 Rangfolge der Betriebspunkte im Kennfeld bezüglich des Einlaufvorganges: Untermengenverhalten und Schlüsselbetriebspunkt

Das Ausnutzen eventuell vorhandener Rangfolgen der Betriebsbedingungen bezüglich des Einlaufverschleißes könnte eine erhebliche Vereinfachung bei der Einlaufprogrammerstellung ergeben. Sie sollen deshalb im Folgenden untersucht werden.

##### 4.1.3.1 Untermengenverhalten und Schlüsselbetriebspunkt

Schon bei den ersten Einlaufuntersuchungen an Motor A fiel auf, daß nach Erreichen konstanter Verschleißraten in be-

stimmten Betriebspunkten andere Betriebspunkte, ohne vorher angefahren worden zu sein, auch weitgehend stabilisierte, niedrige Verschleißraten aufweisen. Wieder andere Betriebspunkte zeigten jedoch noch einen ausgeprägten Einlauf.

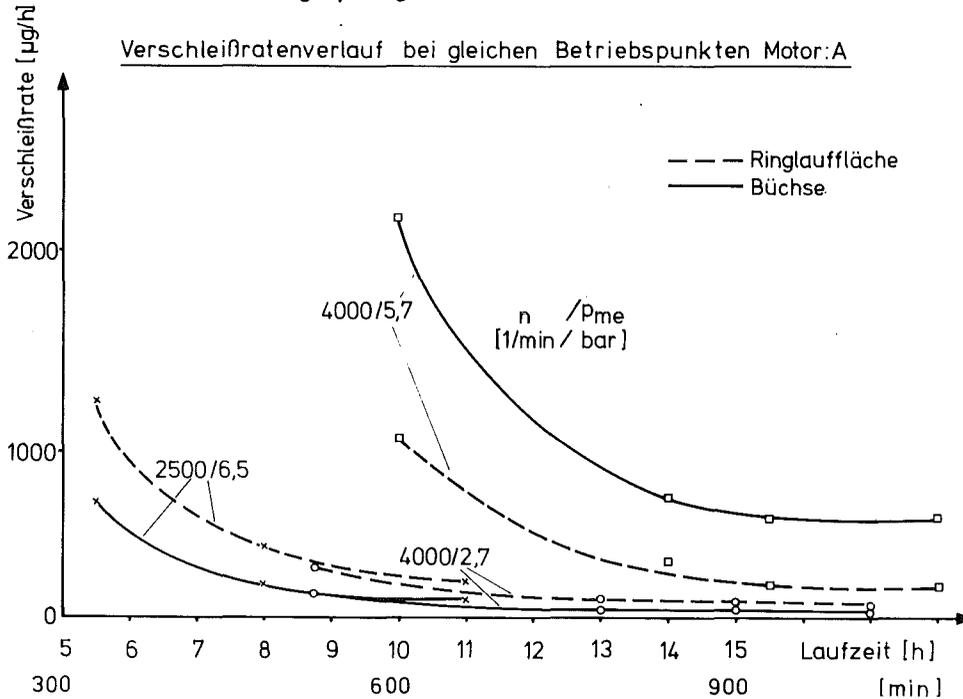


Abb.16 Verlauf der Verschleißraten von Motor A bei wiederholtem Anfahren gleicher Betriebsbedingungen im Grobeinlauf

In Abb.16 ist für Motor A der Verlauf der Verschleißraten von Ring und Büchse in Betriebspunkten, die häufiger angefahren wurden, über der Zeit aufgetragen. Deutlich ist der zunehmende Einlauf bei 2500 1/min/Vollast am degressiven Verschleißratenverlauf zu erkennen. Der zusätzlich gefahrene Betriebspunkt 4000 1/min/Halblast zeigt nur noch einen sehr geringen Einlauf-effekt. Der Betriebspunkt 4000 1/min Vollast, der nach etwa 10 h Gesamtlaufzeit erstmals angefahren wurde, zeigt dagegen eine hohe Anfangsverschleißrate und einen starken Einlaufeffekt für Ring- und Büchsenverschleiß. Trotz des vorangegangenen sehr langen Fahrens der anderen Betriebspunkte war der Einlauf für 4000 1/min/Vollast offensichtlich nicht erreicht worden. Das deutet an, daß im Einlauf gegenseitige Beeinflussungen der Betriebspunkte bezüglich des Einlaufverschleißes vorhanden sind, und daß ein vollständiger Einlauf nicht durch untergeordnete Betriebspunkte erreicht werden kann, auch wenn diese sehr lang ge-

fahren werden.

Kenntnis und Anwendung solcher Rangfolgen der Betriebsbedingungen können zu einer erheblichen Vereinfachung der Einlaufprogramme führen und sind deshalb für die Systementwicklung von großer Bedeutung. Mehr Informationen über die Rangfolge der Betriebspunkte bezüglich ihres Einlaufbeitrags können aus Kennfeldversuchen im Einlauf gewonnen werden, wobei die einzelnen Betriebspunkte ausreichend lange gefahren werden müssen, um den jeweiligen Betriebspunkteinlauf zu ermöglichen. Dieser wird durch eine Stabilisierung der Verschleißrate angezeigt.

Unter der Annahme, daß die gemessene Verschleißrate, die ein Mittelwert der örtlich und zeitlich unterschiedlichen Verschleißanteile ist, ein Maß für die mittlere Beanspruchung der verschleißenden Oberflächen ergibt, kann mit Hilfe der Verschleißratenhöhe in den Einlaufkennfeldern eine Rangfolge der Betriebspunkte bezüglich des Einlaufbeitrags festgestellt werden. Dabei wird die mit der Radionuklidmessung erfaßte Verschleißrate in  $\mu\text{g/h}$  herangezogen, da ein Bezug auf den zurückgelegten Gleitweg, wie er bei trockener Reibung üblich ist, wegen der bereits in Kapitel 4.1.2.1 genannten Schwierigkeiten bei der Beurteilung des Drehzahleinflusses im Zylinder-Kolbenringbereich, die zu einer Einführung des Begriffs wirksamer Gleitweg geführt haben, nicht sinnvoll ist.

Durch Abwarten des jeweiligen Betriebspunkteinlaufs im Kennfeld kann aus den jeweiligen Verschleißratenhöhen relativ zu den zuvor gefahrenen Betriebspunkten die Höhe des Einlaufbeitrags abgeleitet werden.

In die im folgenden dargestellten Verschleißkennfelder aus Grob- und Feinlauf wurden aus Gründen der Übersicht nur die sich einstellende Endverschleißrate jedes Betriebspunktes eingezeichnet.

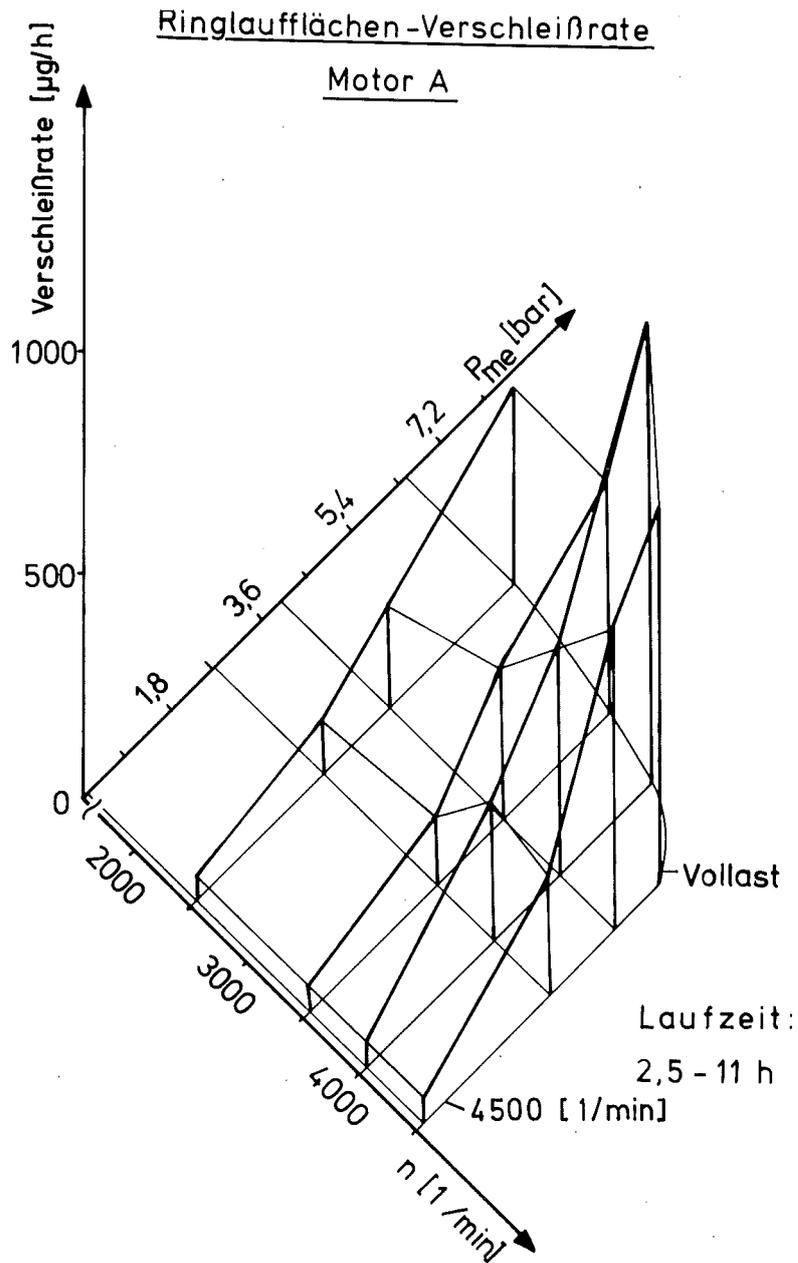


Abb.17 Kennfeld der Ringlaufflächenverschleißrate von Motor A im Grobeinlauf

In Abb.17 ist ein Verschleißratenkennfeld im Grobeinlauf für die Ringlauffläche und in Abb.18 für die Büchsenlauffläche des Motors A aufgetragen. Die Kennfelder wurden in Drehzahlstufen bei jeweils konstanter Last von niedrigen zu hohen Lasten gefahren. Trotz des vorhergehenden etwa achtstündigen Fahrens von Teillast-Betriebspunkten treten deutlich höhere Verschleiß-

raten auf der Vollastkennlinie auf. Diese Betriebsbedingungen wurden demnach durch die Teillastbedingungen nicht eingelaufen.

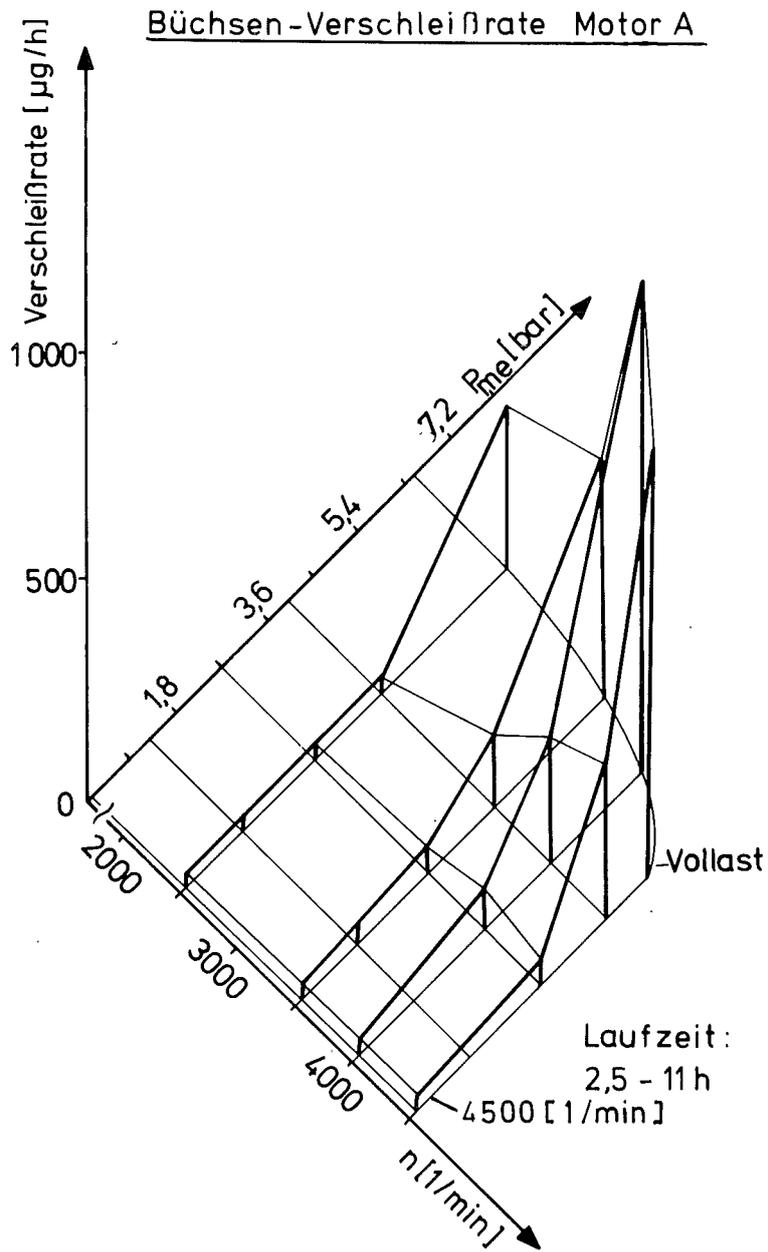


Abb.18 Kennfeld der Büchsenlaufflächenverschleißrate von Motor A im Grobeinlauf

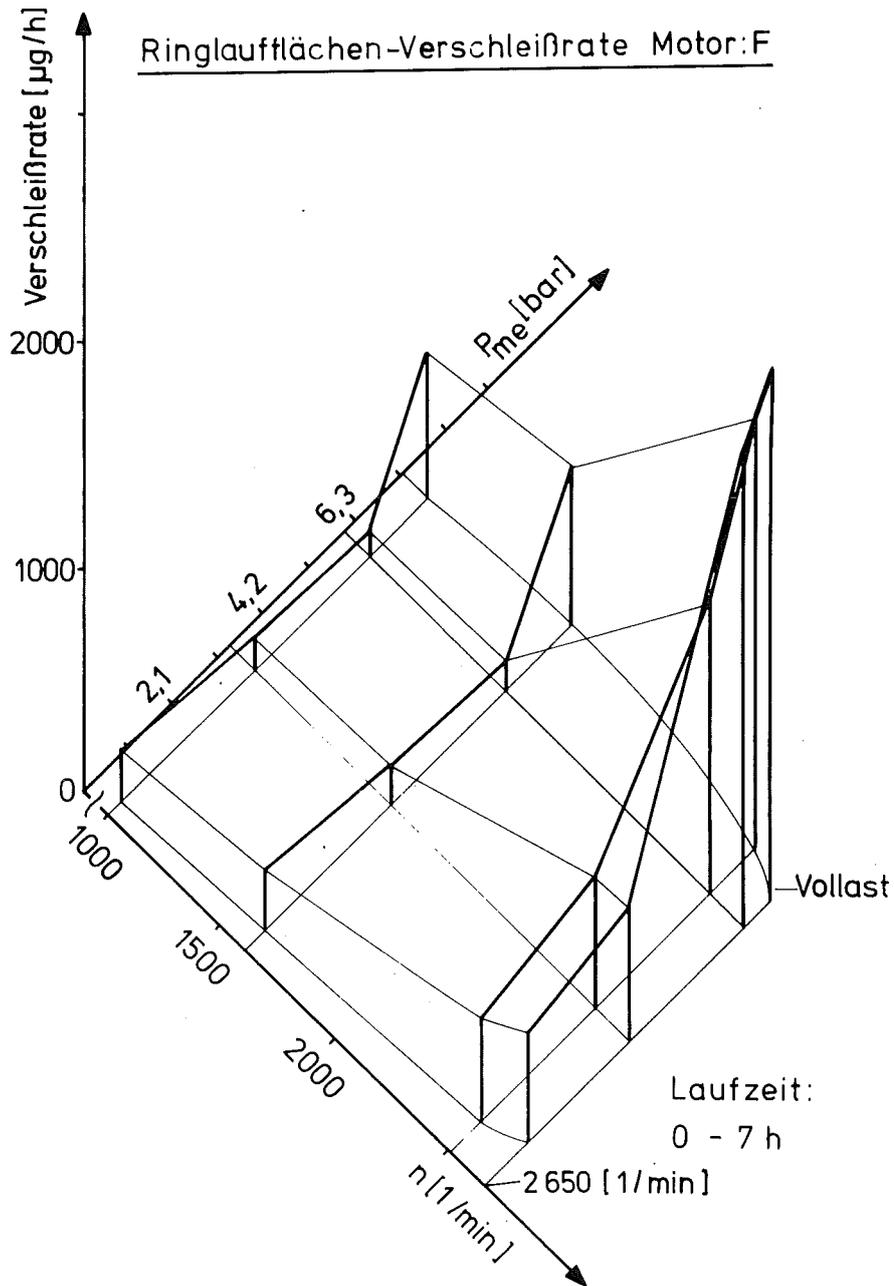


Abb.19 Kennfeld der Ringlaufflächenverschleißrate von Motor F im Grobeinlauf

In Abb.19 ist das Ringlaufflächenkennfeld des Motors F im Grobeinlauf dargestellt. Auch bei diesem Motor zeigt sich ein sehr ausgeprägtes Ansteigen der Verschleißrate zur Volllastkennlinie hin, trotz des langen vorhergehenden Fahrens von Teillastbedingungen. Ein großer Anteil dieses Verschleißratenanstiegs ist auf einen noch nicht erreichten Einlauf zurückzuführen, wie

Abb.20 zeigt, die dasselbe Kennfeld im anschließenden Feineinlauf wiedergibt.

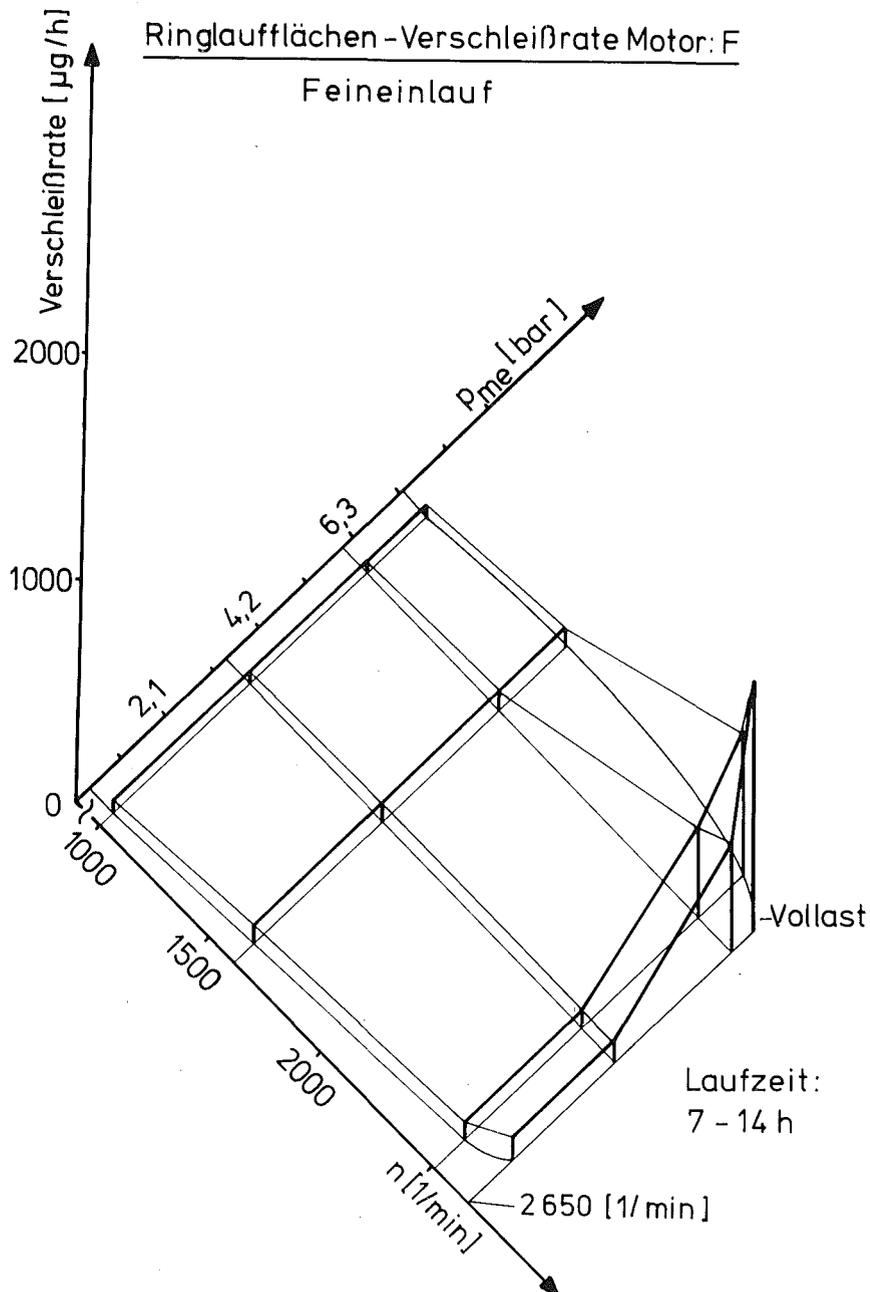


Abb.20 Kennfeld der Ringlaufflächenverschleißrate von Motor F im Feineinlauf

Deutlich sind die im nahezu gesamten Kennfeld niedrigen Verschleißraten zu erkennen. Auch die im Grobeinlauf relativ hohen Verschleißraten im Bereich der Nennleistung sind auf etwa die Hälfte zurückgegangen. Offensichtlich wurde erst mit dem Einlauf

im Nennleistungspunkt, der die höchste Verschleißrate aufwies, der Grobeinlauf abgeschlossen. Die Ergebnisse lassen sich so interpretieren, daß auch durch längeres Fahren des neuen Motors offensichtlich der Einlauf nicht erreicht werden kann, wenn die übergeordneten Bedingungen nicht gefahren wurden.

Die Ergebnisse der Kennfelduntersuchungen zeigen, daß Betriebspunkte auf der Vollastkennlinie bezüglich des Einlaufbeitrags übergeordnet sind. Sie müssen noch einlaufen, obwohl vorher schon über relativ lange Laufzeiten niedrigere Belastungspunkte eingefahren wurden. Für das System wäre es von großer Bedeutung, wenn bezüglich der Betriebspunkte ein Untermengenverhalten in der Form gegeben ist, daß durch das Einlaufen jeweils übergeordneter Betriebspunkte die untergeordneten mit einlaufen, ohne selber gefahren worden zu sein. Dies würde zur Konsequenz haben, daß ein Einlauf bei der in der Rangfolge höchsten Betriebsbedingung alle anderen Betriebspunkte beinhaltet. Das ergäbe eine erhebliche Vereinfachung des Programmaufbaus. Die Bedingung, für die diese Eigenschaft bestätigt werden kann, soll im folgenden Schlüsselbetriebspunkt genannt werden.

Um zu überprüfen, ob diese Eigenschaft für die in den Kennfeldversuchen gefundenen Betriebspunkte mit der höchsten Verschleißrate zutrifft, muß mit jeweils neuer Paarung dieser Betriebspunkt in einer zur Vermeidung von Schäden vorsichtigen Programmstufung angefahren werden. Zweckmäßigerweise wird dazu erst die festgelegte Drehzahl bei Nulllast angefahren und dann die Last stufenweise bis zur Vollast gesteigert. Danach wird der Rest des Betriebskennfeldes auf erfolgten Einlauf überprüft, indem die Vollastkennlinie nachgefahren wird. Dieses Verfahren wurde in einigen Versuchen durchgeführt.

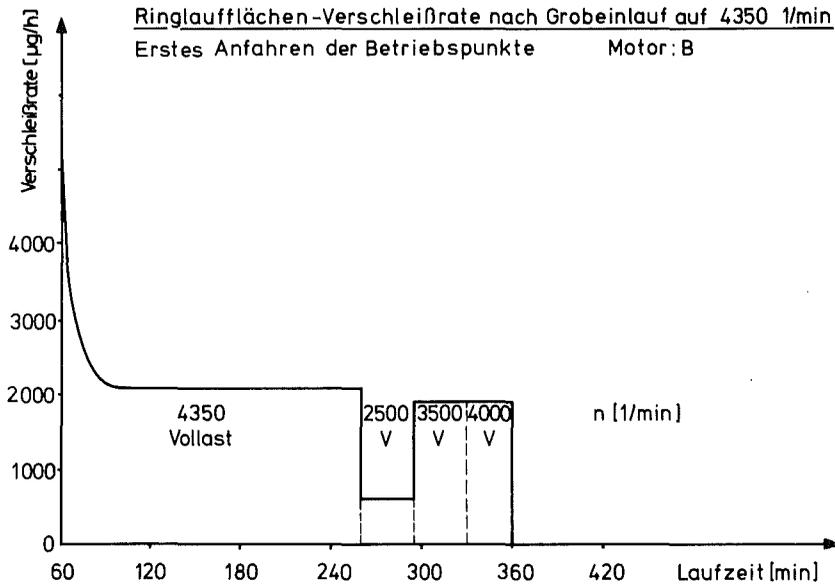


Abb.21 Kontrolle des Untermengenverhaltens mit Hilfe der Vollastkennlinie von Motor B

In Abb.21 ist aus einem solchen Versuch der interessante Versuchsabschnitt anhand der Ringlaufflächenverschleißrate von Motor B dargestellt. Nach Erreichen einer konstanten Verschleißrate bei 4350 1/min/Vollast ergaben sich auch für die anderen Vollastbetriebspunkte konstante Verschleißraten. Sie zeigten keinen Einlaufeffekt mehr, obwohl sie zum ersten Mal angefahren wurden.

In Abb.22 ist ein entsprechender Versuch für Motor F dargestellt. Nach dem Einlauf auf den Schlüsselbetriebspunkt (2650 1/min/Vollast) und Erreichen einer konstanten Verschleißrate wurden weitere Vollastbetriebspunkte angefahren. Auch bei diesem Versuch zeigte sich kein weiterer Einlaufeffekt für die zuvor nicht angefahrenen Betriebspunkte.

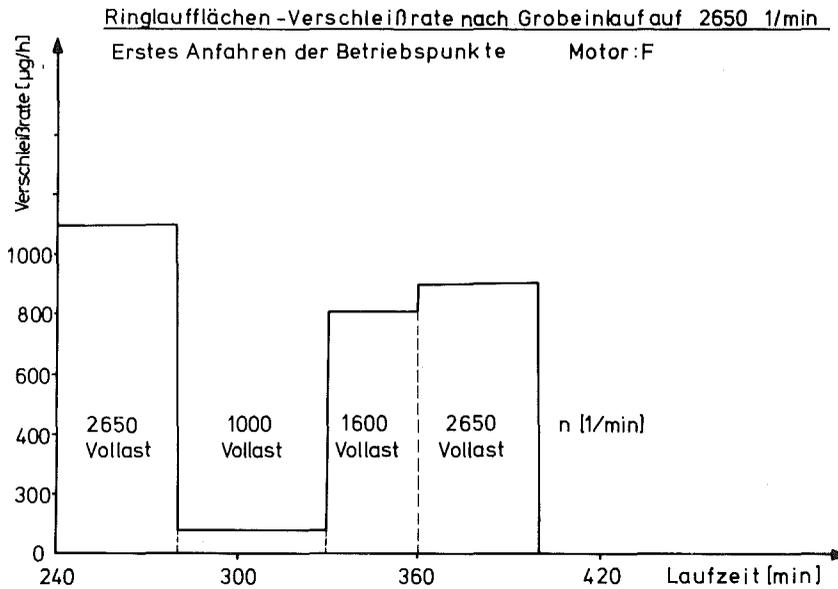


Abb.22 Kontrolle des Untermengenverhaltens mit Hilfe der Vollastkennlinie an Motor F

Für Motor A zeigten entsprechende Versuche, daß der bei den Kennfeldversuchen gefundene Betriebspunkt höchster Verschleißrate (4200 1/min/Vollast) und der Betriebspunkt 4500 1/min/Vollast, der bei den Kennfeldversuchen geringere Verschleißraten aufwies, hinsichtlich des Einlaufs praktisch gleichwertig sind.

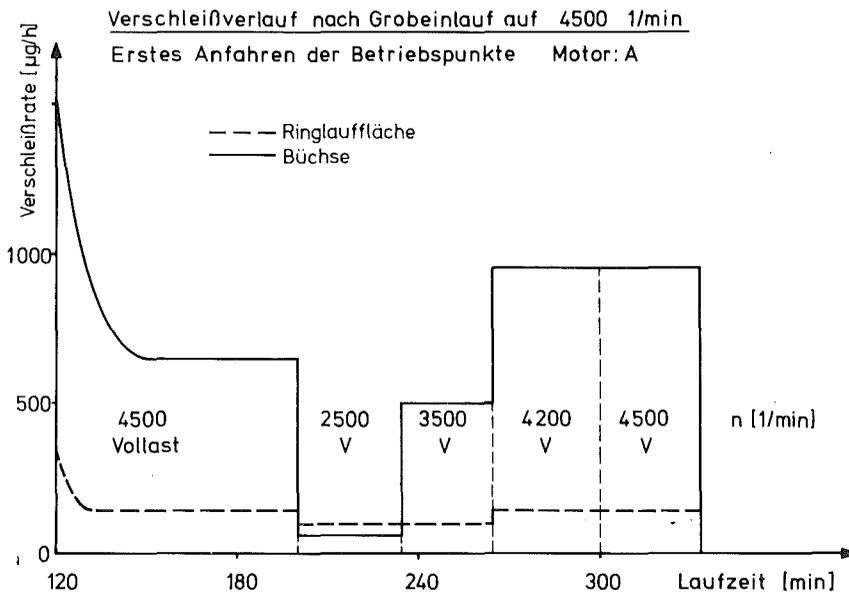


Abb.23 Kontrolle des Untermengenverhaltens mit Hilfe der Vollastkennlinie an Motor A

In Abb.23 ist bei einem Einlauf auf 4500 1/min zu erkennen, daß nach Stabilisieren der Verschleißrate in diesem Betriebspunkt Die Ringverschleißratenwerte der anschließend gefahrenen Volllastkennlinie niedriger oder gleich hoch sind. Die Büchsenverschleißrate desselben Motors liegt bei 4200 1/min/Vollast zwar etwas höher, aber auch der zur Kontrolle erneut gefahrene Betriebspunkt 4500 1/min/Vollast liegt im Vergleich zum ersten Anfahren höher, so daß hier möglicherweise eine andere Ursache, z.B.eine höhere Büchsenwandtemperatur, die nicht auf den Einlaufzustand zurückzuführen ist, vorliegt.

Dies Beispiel zeigt aber, wie auch die zuvor genannten Überlegungen zum Drehzahleinfluß, daß das Optimierungssystem mit einer Kontrolle, z.B. über Fahren einer Volllastkennlinie, versehen werden muß, mit deren Hilfe die Richtigkeit der in den Kennfeldversuchen gefundenen Schlüsselbetriebspunkte überprüft werden kann. Diese Erkenntnis wird auch durch Versuchsergebnisse an Motor D ergänzt.

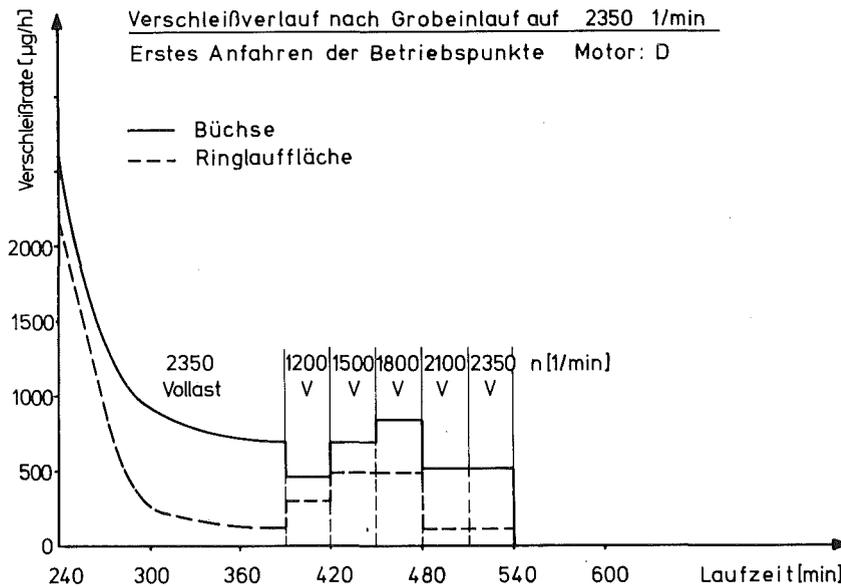


Abb.24 Kontrolle des Untermengenverhaltens mit Hilfe der Volllastkennlinie an Motor D

In Abb.24 sind die Verschleißraten von Ring- und Büchsenlauffläche nach dem Einlauf auf die Schlüsselbetriebsbedingung

(2350 1/min/Vollast) aufgezeigt. Die anschließende Vollastkennlinie scheint einen zusätzlichen Einlauf für die Betriebspunkte 1200, 1500, 1800 1/min/Vollast anzudeuten. Diese trifft jedoch nicht zu, da bei diesem Motortyp nach dem Grobeinlauf die höchsten Verschleißraten bei Drehzahlen unter der Nenndrehzahl auf der Vollastkennlinie liegen, wie umfangreiche Messungen an verschiedenen neuen Motoren dieses Typs im Feineinlauf und eingelaufenen Zustand bis zu mehreren 1000 Stunden [44] gezeigt haben. Außerdem trat der für einen erneuten Einlauf typische degressive Verschleißratenverlauf nicht auf.

Eine zusätzliche Kontrollmessung durch einen Einlauf mit neuer Paarung auf 1800 1/min/Vollast und anschließendes Fahren der Vollastkennlinie bestätigte die Richtigkeit des 2350 1/min/Vollastbetriebspunkts als Schlüsselbedingung ebenfalls.

Wichtig für die Kenntnisse zum Schlüsselbetriebspunkt sind auch die Ergebnisse von Motortyp C. Wie in Kapitel 4.1.2.1 beschrieben, zeigte das Kennfeld dieses Motors im Einlauf ein von den anderen untersuchten Motorentypen stark abweichendes Verhalten. Die Maximalverschleißraten im Einlauf lagen im Bereich von 1000 bis 1400 1/min/Vollast und nicht bei Nenndrehzahl. Dieses Verhalten wurde auch im Feineinlauf durch mehrere Messungen bestätigt.

Weil dies ungewöhnlich war, wurde die nächste neue Paarung noch einmal auf 2175 1/min/Vollast eingefahren, obwohl nach den Kennfeldversuchen 1400 1/min/Vollast Schlüsselbedingung sein müßte. Das Ergebnis ist in einer dreidimensionalen Darstellung in Abb.25 zu sehen. Die Reihenfolge der Betriebspunkte ist durch Pfeile in der Drehzahl-Lastebene zu erkennen. Nach Erreichen der Nennleistung wurden auf der Vollastkennlinie nacheinander 1000, 1400, 1800 und wieder die Nenndrehzahl angefahren. Deutlich ist zu erkennen, daß bei 1000 und 1400 1/min die Verschleißraten höher liegen als beim ersten Anfahren von 2175 1/min (a), und daß beim zweiten Anfahren von 2175 1/min (b) die Verschleißraten stark zurückgegangen sind. Das deutet an, daß ein anderer Betriebspunkt Schlüsselbetriebspunkt ist, wie auch die

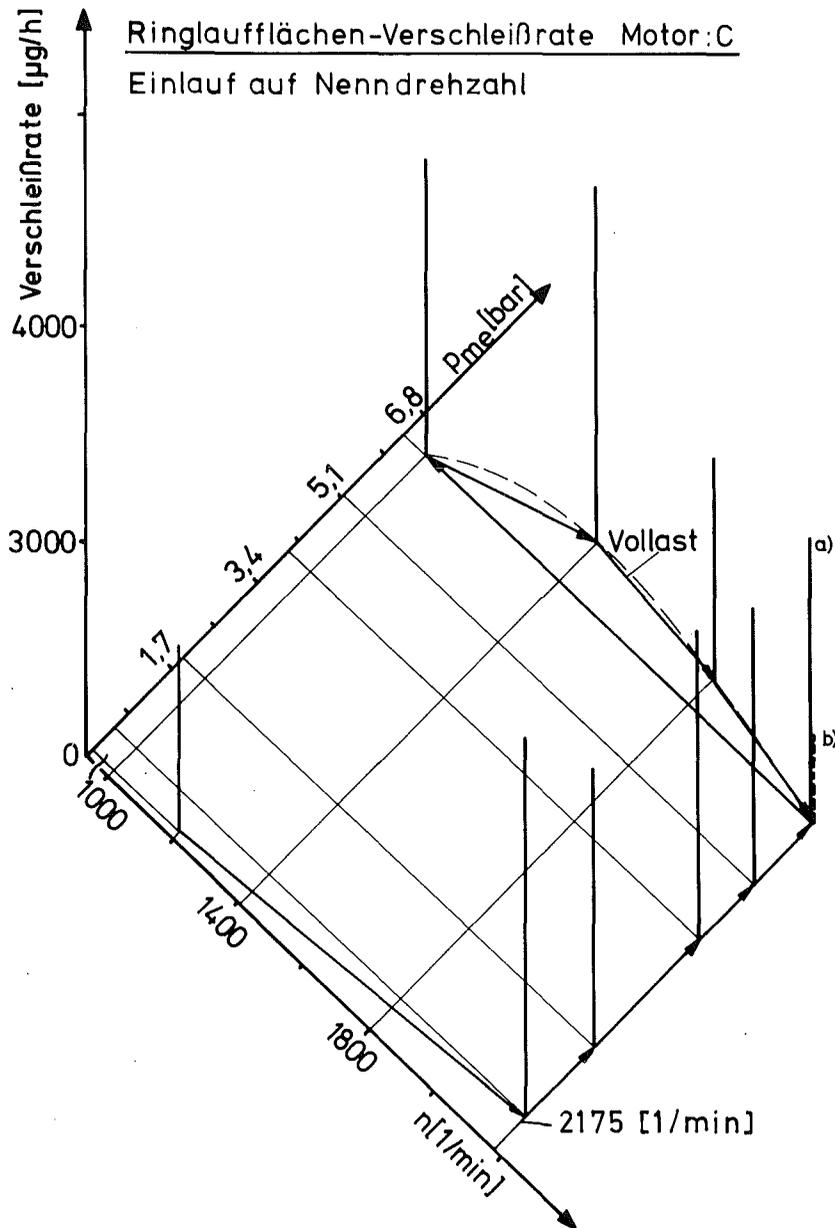


Abb.25 Verschleißverlauf im Kennfeld von Motor C beim Einfahren auf Nenndrehzahl im Grobeinlauf

Kennfeldergebnisse im Grobeinlauf (vgl. Abb.15) angezeigt haben. Im nächsten Versuch wurde deshalb auf 1400 1/min eingefahren. In Abb.26 ist dieser Versuch in der gleichen Darstellung zu sehen. Nach Erreichen der 1400 1/min/Vollast werden 1800 1/min (a) und 2175 1/min/Vollast angefahren. Sie zeigen bereits niedrige Ver-

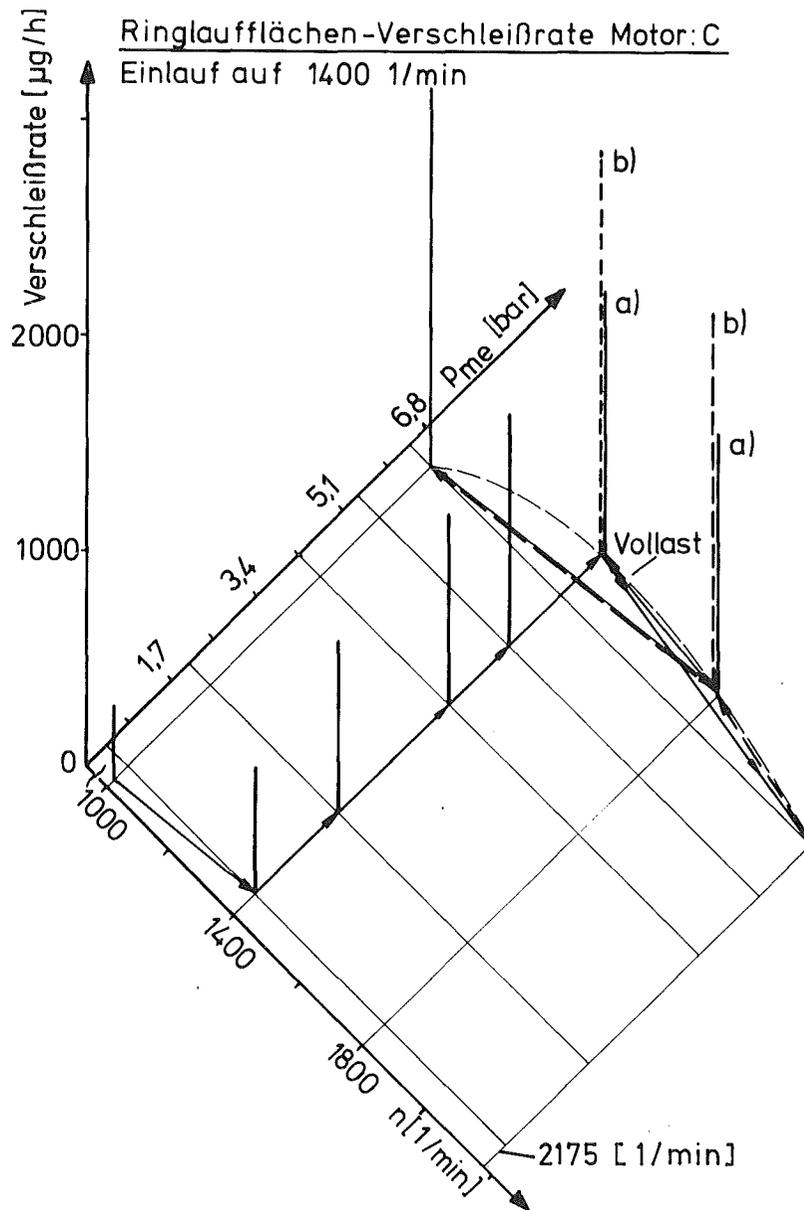


Abb.26 Verschleißverlauf im Kennfeld von Motor C beim Einfahren auf die Drehzahl des maximalen Drehmoments im Grobeinlauf

schleißraten. Die höheren Verschleißraten beim Anfahren von 1000 1/min/Vollast deuten darauf hin, daß diese Bedingung noch nicht eingelaufen ist.

Da jedoch auch die zu Kontrollzwecken erneut angefahrenen 1800 und 1400 1/min/Vollast (b) höher liegen als beim ersten An-

fahren, muß eine andere Ursache vorliegen, zumal sich die richtige Rangfolge bei erneutem Fahren der Vollastkennlinie nach einem Ölwechsel wieder einstellte. Die Richtigkeit von 1400 1/min/Vollast als Schlüsselbetriebsbedingung konnte in weiteren Versuchen an neuen Paarungen nachgewiesen werden. Sie wurde weiterhin durch die guten praktischen Erfahrungen mit einem auf 1400 1/min/Vollast als Schlüsselbedingung aufgebauten optimierten Programm bestätigt.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß bei allen Motortypen die aus den Kennfeldern mit Hilfe der Verschleißratenhöhe bestimmten Schlüsselbetriebsbedingungen bestätigt werden konnten. Sie lagen in allen Fällen auf der Vollastkennlinie und meistens bei Nenndrehzahl. Eine Kontrolle der Schlüsselbedingungen über die Vollastkennlinie hat sich als notwendig erwiesen.

#### 4.1.3.2 Interpretation von Untermengenverhalten und Schlüsselbetriebspunkten

Für das Untermengenverhalten läßt sich aufgrund der Vorstellung, daß im Einlauf die Anpassung der Oberflächen an die aufgegebene Belastung und die statischen und dynamischen Verzüge von Kolbenringen und Zylinderbüchse erfolgen muß, folgende Interpretation geben. Mit zunehmendem  $P_{me}$  bei konstanter Drehzahl steigt die Belastung der Oberflächen von Kolbenring und Zylinderbüchse, da durch den zunehmenden Gasdruck die Normalkräfte auf die Gleitbahnen erhöht werden und durch die mit zunehmender Wandtemperatur abnehmende Viskosität des Schmiermittels die Schmierung ungünstiger wird.

Die höchsten Gaskräfte treten auf der Vollastkennlinie im Bereich des maximalen Drehmoments auf. Neben der Belastung durch Gaskräfte erfolgt aber auch durch die mit zunehmender Drehzahl zunehmenden Einflußgrößen Leistung, Massenkraft und Wandtemperatur eine weitere Einwirkung auf Schmierzustand und Verzüge von Kolbenring und Zylinderlaufbahn. Faßt man diese Einflußfaktoren zusammen, so ist es vorstellbar, daß in einem bestimmten Betriebsbereichsbelastungs-, Schmierungs- und Verzugsbedingungen entstehen, die einen maximalen Beanspruchungszustand ergeben. Nach Anpassung der Oberflächen von Kolbenringen und Zylinderbüchse an diese Maximalbedingungen ist für alle

anderen Betriebspunkte des Kennfeldes die Anpassung der Oberflächen ebenfalls ausreichend, so daß sich für sie, auch ohne neuen Einlauf, konstante Verschleißraten einstellen. Welche Betriebsbedingungen diesen maximalen Beanspruchungszustand hervorrufen, ist von vielen Faktoren abhängig. Er liegt, wie auch die Ergebnisse der Einlaufversuche bestätigt haben, auf der Vollastkennlinie, wobei die höchsten Gaskräfte bei der Drehzahl des maximalen Drehmoments entstehen. Mit zunehmender Drehzahl bei Vollast wird über die mit steigender Leistung ansteigenden Wandtemperaturen die Schmierung verschlechtert. Gleichzeitig werden auch die dynamischen Verzüge der Büchse und Verformungen der Ringe durch Temperaturverteilung, Reibungs-, Massen- und Gaskräfte größer. Es ist deshalb erklärlich, daß der maximale Beanspruchungszustand durch diese bei jedem Motortyp individuell unterschiedlichen Einflußgrößen bei unterschiedlicher Drehzahl auf der Vollastkennlinie liegen kann. Der starke Einfluß der Verzugs- und Verformungszustände wird auch durch die bei den verschiedenen Motortypen nach dem Einlauf gefundene unterschiedliche Verteilung der Glättung der Honstruktur der Oberfläche der Zylinderbüchse und die unterschiedliche Lage der Tragspur der Kolbenringlauffläche nach dem Grobeinlauf bestätigt (vgl. Kapitel 4.2.3.2).

#### 4.1.3.3 Folgerungen für das Optimierungssystem

Die Überlegungen zu den Ursachen der Schlüsselbedingung bestätigen, daß je nach Motortyp sehr verschiedene Betriebspunkte auf der Vollastkennlinie den für einen bestimmten Motortypischen maximalen Beanspruchungszustand bewirken können, an den sich die Paarung Kolbenring - Zylinderbüchse im Einlauf anpassen muß. Um diese Schlüsselbetriebsbedingung für eine Programmvereinfachung im System verwenden zu können, müssen bei jedem neuen Motortyp Kennfelder im Grob- und Feineinlauf aufgenommen werden, die gute Hinweise auf Untermengenverhalten und Schlüsselbetriebspunkte geben, wie die Untersuchungen gezeigt haben. Zur Überprüfung der aus Ergebnissen von Kennfeldversuchen bestimmten Schlüsselbetriebspunkte müssen in das System auch Versuche

einbezogen werden, mit deren Hilfe, durch das Fahren von Vollastkennlinien, nach dem Einlauf auf den Schlüsselbetriebspunkt dessen Richtigkeit überprüft wird und gegebenenfalls eine Korrektur ermöglicht wird. Diese Kontrolle der Schlüsselbedingung über die Vollastkennlinie, deren Wichtigkeit die gezeigten Meßergebnisse bestätigen, ist aber auch deshalb zwingend notwendig, weil der Einfluß des mit veränderter Drehzahl variierenden wirksamen Gleitwegs auf die Verschleißrate, wie in Kapitel 4.1.3.1 erläutert, nicht genau erfaßt werden kann.

#### 4.1.4 Einfluß der Steigerung von Kühlmittel- und Schmieröltemperatur im Grobeinlauf

Um Kenntnisse darüber zu erhalten, ob eine Steigerung von Schmieröl- bzw. Kühlmitteltemperatur einen Einfluß auf das Einlaufverhalten im Grobeinlauf hat, wurden Versuche an Motor A gefahren, indem am Ende des Grobeinlaufs bei Nennleistung diese Temperaturen gesteigert wurden. Dabei wurden aber nur stationäre Bedingungen aus dem normalen Betriebskennfeld dieses Motors untersucht, da eine weitergehende Untersuchung (z.B. instationäre Bedingungen) erheblichen Aufwand verursacht hätte und eine Verwendung von Serienmotoren und Serienprüfständen für das Einlaufsystem ausgeschlossen hätte.

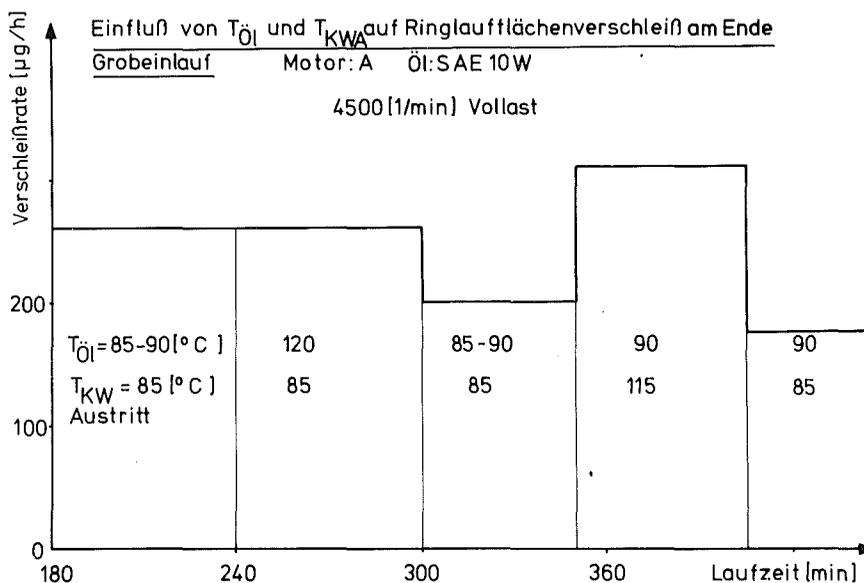


Abb.27 Einfluß von Ölsumpf- und Kühlmittelaustrittstemperatur auf das Verschleißverhalten nach Ende des Grobeinlaufs von Motor A

In Abb.27 ist die Verschleißrate der Ringlauffläche über der Laufzeit aufgetragen. Nachdem sich am Grobeinlaufende eine praktisch konstante Verschleißrate eingestellt hatte, wurde bei sonst konstanten Betriebsbedingungen zunächst die Öltemperatur auf 120°C gesteigert. Dabei blieb die Verschleißrate unverändert. Nach dem Zurückfahren auf 85°C zeigte sich eine Verschleißratenverminderung um etwa 60 µg/h. Bei anschließendem Steigern der Kühlmittelaustrittstemperatur auf 115°C bei konstanter Öltemperatur stieg die Verschleißrate deutlich an, erreichte aber beim Zurückfahren auf die normale Temperatur ein niedrigeres Verschleißratenniveau als vor der Temperatursteigerung. Der gesamte Verschleißratenrückgang durch Steigerung von Öl- und Kühlmitteltemperatur betrug nur ca. 80 µg/h. Dabei muß beachtet werden, daß während der ganzen Zeit mit 4500 1/min/Vollast gefahren wurde, so daß durch den Feineinlauf über etwa 4 Stunden ohnehin eine Verschleißratenabnahme zu erwarten ist.

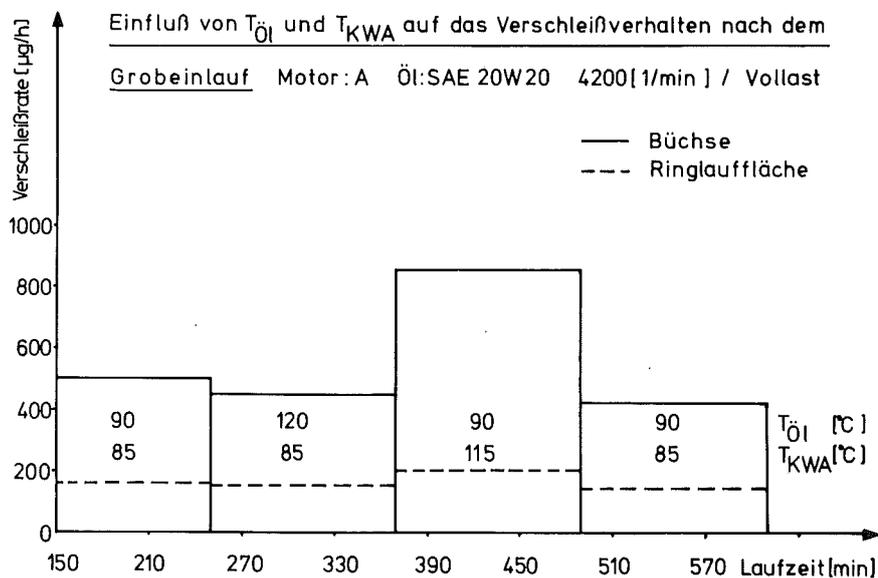


Abb.28 Einfluß von Ölsumpf und Kühlmittelaustrittstemperatur auf das Verschleißverhalten nach Ende des Grobeinlaufs von Motor A

Ein ähnlicher Versuch wurde mit einer neuen Paarung mit einem anderen Öl (HD SAE 20 W 20) wiederholt. Hier wurde auch der Büchsenverschleiß in OT mitgemessen. Das Ergebnis ist in Abb.28

dargestellt. Auch bei diesem Versuch bewirkte eine Steigerung der Öltemperatur praktisch keine Verschleißratenänderung. Die Steigerung der Kühlmittelaustrittstemperatur erzeugte, wie beim ersten Versuch, eine deutliche Verschleißratenerhöhung, die bei der Büchse besonders ausgeprägt war. Nach dem Zurückfahren auf das normale Temperaturniveau stellte sich, wie im ersten Versuch, eine etwas niedrigere Verschleißrate ein als vor den Temperatursteigerungen. Ein Teil dieser geringen Abnahme ist wieder auf den zunehmenden Feineinlauf zurückzuführen.

Die fehlende Reaktion auf Änderungen der Öltemperatur bei konstanter Kühlmitteltemperatur und die deutliche Verschleißratensteigerung bei Erhöhung der Kühlmitteltemperatur, vor allem bei der Büchse, lassen sich wie folgt interpretieren. Für den Schmierzustand im Bereich Zylinder - Kolbenringe ist die Viskosität des Schmiermittels in der Reibstelle wichtig. Diese wird aber wesentlich durch die Zylinderwandtemperatur beeinflusst, wie durch umfangreiche Radionuklidmessungen anhand des Verschleißverhaltens bestätigt wurde [17,46] .

Hält man die Kühlmitteltemperatur konstant, so zeigt eine Erhöhung der Öltemperatur im Sumpf praktisch keine Auswirkung, da die Öltemperatur in der Reibstelle über die Wandtemperatur beeinflusst wird, die bei sonst konstanten Betriebsbedingungen direkt von der Kühlmitteltemperatur abhängt. Entsprechend erhöht sich die Verschleißrate bei Steigerung der Kühlmitteltemperatur, da der Schmierzustand schlechter wird. Dies wirkt sich vor allem im OT-Bereich aus, wo die höchsten Wandtemperaturen auftreten. Deswegen stieg auch die Verschleißrate der nur hier aktivierten Büchse stark an. Für die Ringlauffläche ist der Anteil des Verschleißes aus dem OT-Bereich am Gesamtverschleiß kleiner, so daß der Verschleißratenanstieg durch die Erhöhung der Kühlmitteltemperatur wesentlich geringer ist als bei der Zylinderbüchse.

Faßt man die Ergebnisse zusammen, so bewirkt die Steigerung der Kühlmittel- und Öltemperatur nur einen im Vergleich zu den Einlaufbeiträgen im Grobeinlauf vernachlässigbaren Gewinn. Eine Einbeziehung in das System ist, in Anbetracht des

zusätzlichen Aufwands und des geringen Nutzens, nicht gerechtfertigt. Ohnehin ist eine kontrollierte Steigerung der Zylinderwandtemperatur, die von beiden Meßgrößen den stärkeren Einfluß zeigte, nur bei wassergekühlten Motoren ohne größeren Aufwand möglich.

#### 4.1.5 Einfluß des im Schmieröl mitgeführten Abriebs aus dem Einlauf auf das Einlaufverhalten

Da während des Einlaufs von Neumotoren mehr Verschleißteilchen in gröberer Korngrößenverteilung [47] ins Öl gelangen, die möglicherweise das Verschleißverhalten im Einlauf beeinflussen [2], muß untersucht werden, ob diese Einflüsse Konsequenzen für das System, wie z.B. das Einhalten bestimmter Ölwechselzeiten, erfordern.

Dazu wurden in Motoren, die zur besseren Erfassung des Verschleißverhaltens feineingelaufen waren, nacheinander Frischöl und zum Vergleich ein Öl gleicher Sorte, das 2-3 h im Einlauf eines Motors gleichen Typs verwendet wurde, gefahren. Da das gebrauchte Öl maximal 3 h gelaufen war, können Einflüsse durch Ölalterung mit großer Sicherheit ausgeschlossen werden.

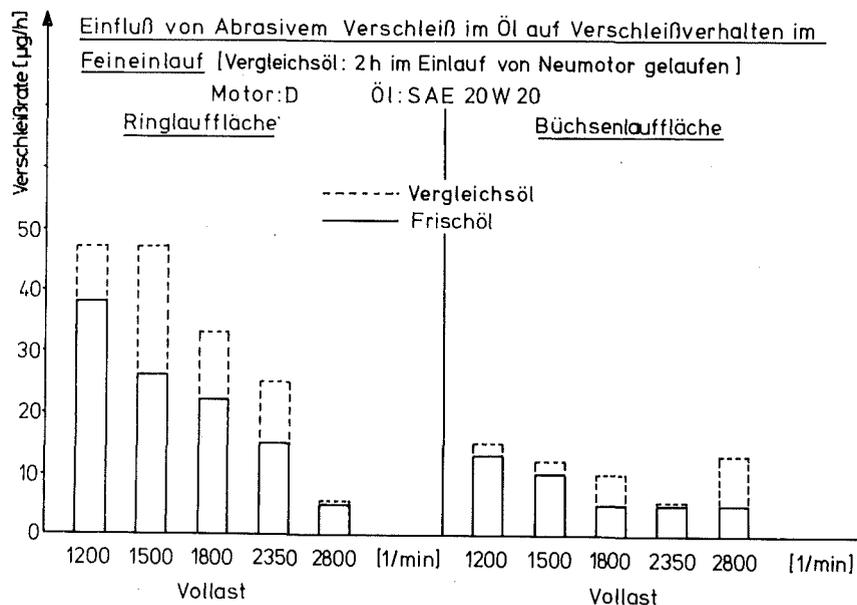


Abb.29: Einfluß des im Schmieröl mitgeführten Abriebs aus dem Einlauf auf das Verschleißverhalten von Motor D im feineingelaufenen Zustand

In Abb.29 ist das Ergebnis eines solchen Versuchs für Motor D dargestellt. Zum Vergleich sind die Verschleißraten von Ringlauffläche und Büchse eingezeichnet. In fast allen Betriebspunkten liegen die Verschleißraten des feineingelaufenen Motors mit dem Vergleichsöl meßbar höher als mit dem Frischöl. Ein Wiederholungsversuch mit einem weiteren Motor gleichen Typs bestätigte die Aussage.

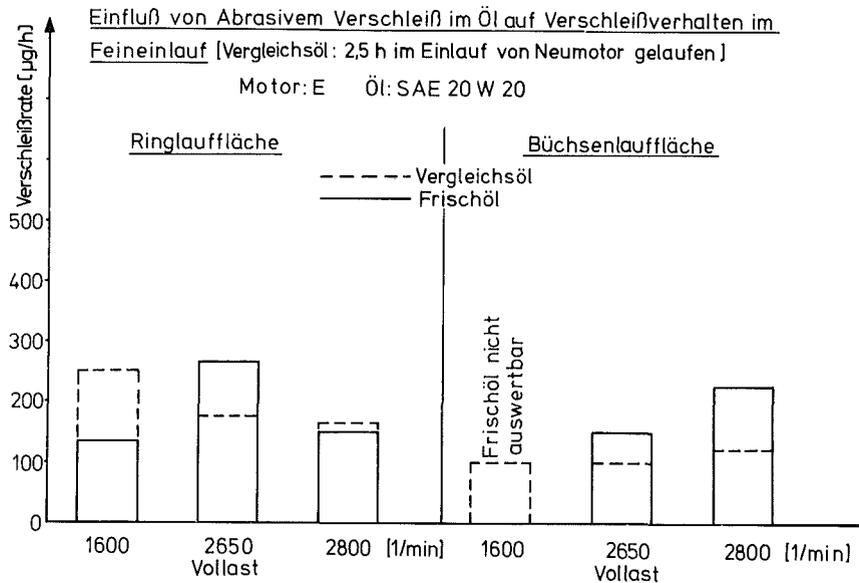


Abb.30 Einfluß des im Schmieröl mitgeführten Abriebs aus dem Einlauf auf das Verschleißverhalten von Motor E im feineingelaufenen Zustand

In Abb.30 ist ein gleicher Versuch mit Motor E dargestellt. Bei diesem Motortyp war der Einfluß nicht eindeutig. Die Verschleißraten mit dem Vergleichsöl lagen nur zum Teil höher.

Obwohl aufgrund dieser Versuchsergebnissen eine Verschleißratenerhöhung durch den Einlaufverschleiß im Öl zu erwarten ist, ergibt sich dennoch keine Notwendigkeit, dies im System besonders zu berücksichtigen, da die gemessenen Verschleißratenerhöhungen nur für die für einen feineingelaufenen Motor typischen niedrigen Verschleißraten interessant sind. Im Grobeinlauf sind sie gegenüber den dabei auftretenden hohen Verschleißraten im allgemeinen zu vernachlässigen, so daß sich ein Ölwechsel erübrigt. Der Einfluß der abrasiven Verschleißteil-

chen im Öl muß jedoch z.B. bei Parameterstudien im feineinge-  
laufenen Motor berücksichtigt werden.

Der gefundene geringe Einfluß abrasiver Partikel im Öl wird auch durch Beobachtungen aus Einlaufversuchen an den anderen Motoren bestätigt, bei denen im Grobeinlauf zur Verbesserung der Empfindlichkeit der Radionuklidmessung ein Ölwechsel vorgenommen wurde. In der Mehrzahl der Fälle wurde keine Änderung der stationären Verschleißrate festgestellt, wenn nach dem Ölwechsel wieder die alten Betriebsbedingungen gefahren wurden. In einigen wenigen Fällen gingen die Verschleißraten geringfügig zurück. Bei all diesen Versuchen war die Gesamtlaufzeit des Öls so gering, daß eine wesentliche Beeinflussung der Meßergebnisse durch Ölalterung nicht zu erwarten war.

Trotz dieser Ergebnisse muß Verschleißgut im Öl beim Einlauf von Neumotoren, wie einige Versuchsergebnisse zeigen, Beachtung gezollt werden. Nach der Demontage am Ende des Grobeinlaufs wurden an einigen Neumotoren auf Zylinderlaufbahn und Kolbenhemd an Druck- und Gegendruckseite einzelne Längsriefen festgestellt. In diesen Fällen wurden auch in den Lagern Riefen in Umfangsrichtung gefunden. Diese Oberflächenschäden traten nur bei Neumotoren auf und nur, wenn zur Vermeidung von Meßfehlern bei der Radionuklidtechnikverschleißmessung ohne Schmierölfilter gefahren wurde.

Ursache dieser Schäden sind mit großer Wahrscheinlichkeit Metallteilchen aus der Fertigung (Neumotoren!), die trotz Reinigungsmaßnahmen im Motor übriggeblieben waren. In einigen Fällen konnten solche Partikel, eingebettet im Kolbenhemd bzw. im Lager, und die entsprechenden Riefen im Laufpartner gefunden werden.

Das Ausbleiben dieser Schäden bei Verwendung eines Ölfilters läßt sich durch die Größe solcher Partikel erklären, die eine sofortige Abscheidung im Filter ermöglicht.

Diese Erfahrungen führten zu der Konzeption einer Radionuklidverschleißmeßanlage, mit der auch der im Ölfilter zurückgehaltene Verschleiß erfaßt wird. Mit dieser Anlage können die erforderlichen Einlaufversuche mit der für den Motortyp üblichen

Filterbestückung gefahren werden (vgl. Kapitel 3.1.1).

#### 4.2. Verschleißverhalten von Kolbenring- und Zylinderlauf- fläche als Steuergröße für die Optimierung von Ein- laufprogrammen

In diesem Kapitel wird erläutert, welches der beiden möglichen Bauteile-Kolbenring und Zylinder-für die Steuerung der Einlaufoptimierung für das System am günstigsten eingesetzt wird, und wie diese Steuerung mit Hilfe des Verschleißverhaltens erfolgt. Außerdem wird erklärt, wie sich die Optimierung mit Hilfe des Verschleißverhaltens von Kolbenringen und Zylinderbüchse auf die konventionellen Einlaufkriterien-Leistung, spezifischer Verbrauch an Kraftstoff und Öl, Leckgasmenge und Oberflächenzustand auswirkt. Das Kapitel wird mit einer kurzen Diskussion der Auswirkungen der Einlaufoptimierung im Zylinder-Kolbenringbereich auf andere einlaufkritische Motorteile abgeschlossen.

##### 4.2.1 Auswahl\_eines\_Steuerbauteils

Für die Optimierung des Einlaufprogramms nach dem Verschleißverhalten können aus den in Kapitel 1.1 genannten Gründen grundsätzlich Ring- und Büchsenlauffläche als Steuerbauteil eingesetzt werden. Darunter soll das Bauteil verstanden werden, mit dessen über die Radionuklidtechnik erfaßten Verschleißverhalten im Einlauf die Optimierung der Einlaufprogramme im Rahmen des Systems erfolgt. Bei der Auswahl müssen folgende Kriterien beachtet werden:

1. Das Bauteil mit der höheren Beanspruchung sollte gewählt werden, um einen Schaden durch Überlastung möglichst früh zu erkennen.
2. Das Bauteil sollte eine Aussage über möglichst den ganzen Hub erlauben.
3. Die Aktivierung sollte einfach, billig und mit ausreichender spezifischer Aktivität für eine größere Anzahl von Bauteilen möglich sein.

Wendet man diese Kriterien für Kolbenringe und Zylinderbüchse an, so ergibt sich ein deutlicher Vorteil für die Kolbenringe. Sie repräsentieren den Verschleiß über den Umfang und den ganzen Hub, was bei der Zylinderbüchse nur möglich ist, wenn die ganze Oberfläche der Büchse im Hubbereich aktiviert würde. Bei Anwendung der Dünnschichtaktivierung würden dabei zur Zeit für eine Büchsenaktivierung Kosten in Höhe von ca. 10.000,--DM bei Büchsenabmessungen, wie sie beispielsweise bei Motor D vorliegen, anfallen. Die erheblich billigere Reaktoraktivierung wäre nur unter Verwendung von mit speziellen Materialien, die einen hohen Wirkungsquerschnitt für thermische Neutronen aufweisen, legierten Zylinderbüchsen möglich [14]. Diese Lösung scheidet neben den durch die Zulegierung zu erwartenden Schwierigkeiten auch aus Strahlenschutzgründen aus, da sie aufgrund der hohen Gesamtaktivität nur an speziellen Prüfständen in Radionuklid-Laboratorien eingesetzt werden kann.

Neben den hohen Kosten für die Dünnschichtaktivierung der Zylinderbüchsen ergeben sich auch technische Schwierigkeiten, wenn die Zylinderlaufbahn von Blockmotoren aktiviert werden muß. In diesen Fällen muß der gesamte Motorblock sehr genau im Strahl der geladenen Teilchen bewegt werden, was erheblichen Aufwand für eine geeignete Bestrahlungsvorrichtung erfordert.

Die Aktivierung der Kolbenringe ist vergleichsweise einfach. Die Laufflächen verchromter Kolbenringe lassen sich mit thermischen Neutronen billig aktivieren. Bei molybdängespritzten Ringen muß wegen der kurzen Halbwertszeit des im Neutronenfluß entstehenden Isotops  $^{99}\text{Mo}$  ( $T_{1/2} = 2,8 \text{ d}$ ) mit geladenen Teilchen auf  $^{96}\text{Tc}$  aktiviert werden. Die Kosten für eine solche Dünnschichtaktivierung betragen je Ring z.Z. etwa 500,--DM, wenn von Abmessungen und Verschleißverhalten wie beim Motor F ausgegangen wird.

Das Bauteil mit der höchsten Beanspruchung ist der oberste Kompressionsring [48]. Er nimmt den größten Teil des Gasdrucks auf, erhält den geringsten Schmierölanteil aller Ringe und muß einen hohen Anteil der Verbrennungswärme vom Kolben auf die Zylinderwand übertragen. Gegenüber der Zylinderlaufbahn läuft er unter höherer Temperatur. Seine Oberfläche ist über den ganzen

Hub ständig beansprucht, während die Zylinderlaufbahn jeweils nur beim Überlauf der Kolbenringe beansprucht wird. Außerdem unterliegt der erste Kompressionsring noch starker mechanischer Beanspruchung mit entsprechender Verformung durch Gasdruck und Reibungs- und Beschleunigungskräfte.

Diese höhere Beanspruchung des Rings im Vergleich zur Büchse wird auch in der Literatur durch die Feststellung erhärtet, daß beim Auftreten von Brandspuren diese ausschließlich oder aber zuerst auf dem Ring entstehen und sich dann erst auf die Büchse übertragen [31,32] Auch eigene Ergebnisse zeigen, daß leichtere Schäden nur auf der Lauffläche des obersten Rings, nicht aber auf der Büchse, auftreten.

Aus den genannten Gründen bietet sich die Verwendung des obersten Kompressionsringes für die Optimierung an. Es bleibt jedoch noch zu klären, inwieweit aufgrund des Ringeinlaufs auch Rückschlüsse auf das Einlaufen der Zylinderlaufbahn möglich sind.

Da die beiden Laufflächen gegeneinander laufen, müssen sie im zeitlichen Verlauf der Verschleißraten qualitativ übereinstimmen, weil eine Änderung der Beanspruchung sich auf beiden Laufflächen in derselben Richtung auswirkt. Die Höhe der Verschleißraten kann jedoch aufgrund unterschiedlicher Beanspruchung und Fläche stark unterschiedlich sein. Diese Überlegungen wurden durch frühere Verschleißversuche mit Radionukliden, die an einem MWM KD 12 E Dieselmotor gefahren wurden, bestätigt.

Bei diesen Versuchen zeigte sich in mehreren Einläufen trotz unterschiedlicher Verschleißratenhöhe eine sehr gute zeitliche Korrelation im Verschleißverhalten von oberstem Kompressionsring und Zylinderlauffläche, die hier vollständig aktiviert worden war [14] .

Auch eigene Untersuchungen zeigten bei den meisten Motortypen, obwohl hier aus Kostengründen nur der OT-Bereich der Zylinderbüchse aktiviert worden war, eine im Verlauf recht gute Übereinstimmung.

Stellvertretend für die anderen Motoren ist in Abb.31

Einlaufstufenprogramm mit Vollastkennlinie Motor: E

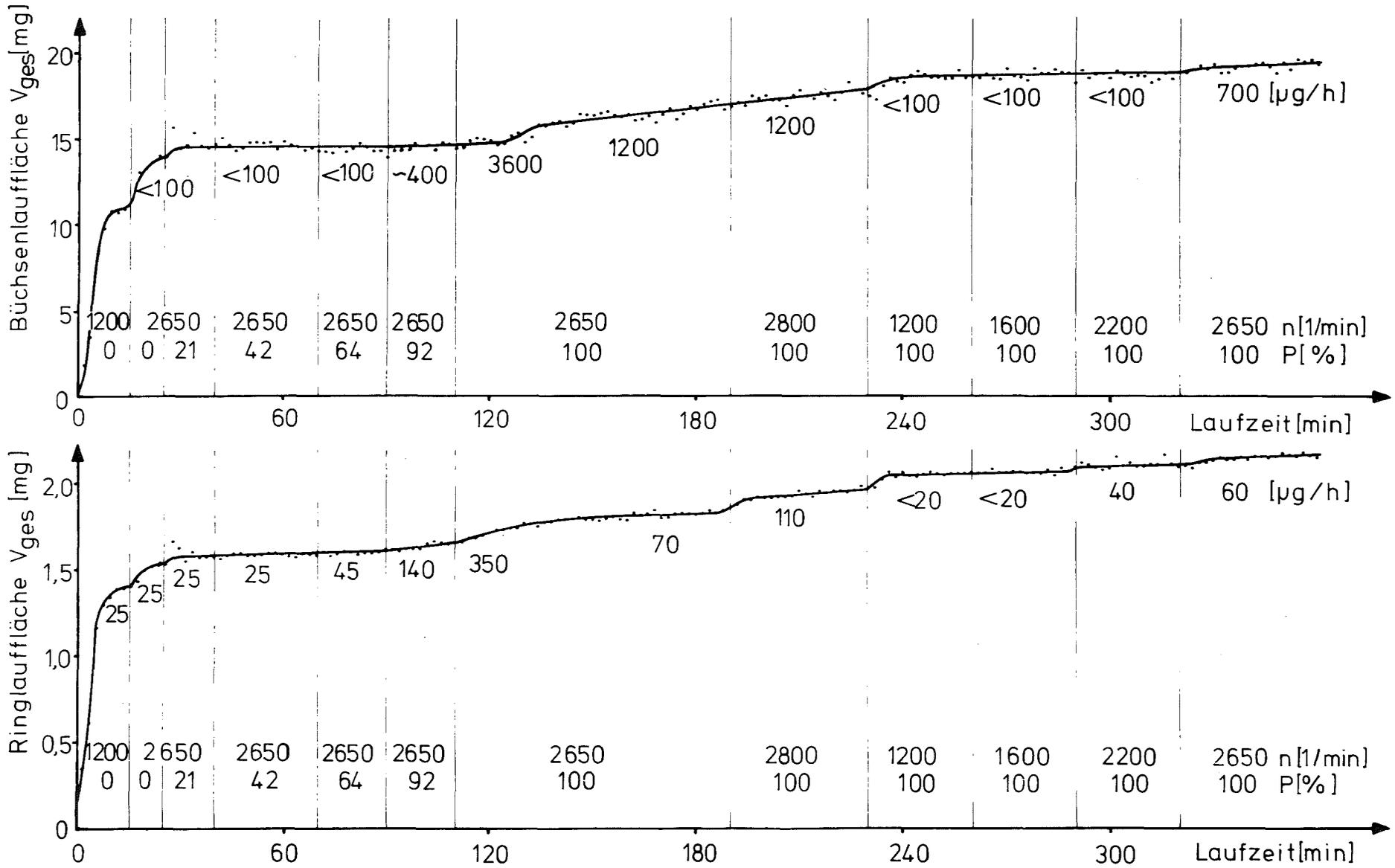


Abb.31 Verlauf des Gesamtverschleißes von Kolbenring- und Büchsenlaufläche von Motor E im Grobeinlauf

der Verschleißverlauf von Ring- und Büchsenlauffläche des Motors E über der Zeit im Grobeinlauf dargestellt. Auch hier ist die recht gute Übereinstimmung im Verlauf bei stark unterschiedlicher Verschleißratenhöhe zu sehen.

Um zu überprüfen, inwieweit der Einlauf der Kolbenringlauffläche durch den Einlaufzustand der Zylinderoberfläche beeinflusst wird, wurden bei Motor A in feineingelaufene Zylinderbüchsen neue Kolbenringe und Kolben eingesetzt. Dabei zeigte sich, daß die Ringlauffläche in wenigen Stunden die Vollastverschleißraten erreichte, die in ihrer Höhe für den feineingelaufenen Zustand typisch sind. Außerdem wurde festgestellt, daß die Gefahr einer Schädigung beim Einlauf eines neuen Ringes in bereits eingelaufenen Zylinderbüchsen erheblich größer ist. Diese Ergebnisse lassen sich dahingehend interpretieren, daß, wenn durch die Zwischenmontage keine neuen Verzüge der Zylinderlaufbahn entstehen, nur noch der Ring eine der Belastung angepaßte Laufflächengeometrie im Einlauf erreichen muß. Das Erreichen des Feineinlaufzustands erfolgt sehr schnell. Treten durch die Zwischenmontage zusätzliche Verzüge der Zylinderlaufbahn auf, so entstehen durch die weitgehend glatten Oberflächen der eingelaufenen Zylinderbüchse (hoher Traganteil) u.U. örtliche Überlastungen, die zu Schäden führen können.

Auch in Versuchen an Motor C, bei dem ebenfalls in feineingelaufenem Zustand der Zylinderbüchse neue Kolben und Kolbenringe eingesetzt wurden, wurde eine erhöhte Einlaufgeschwindigkeit festgestellt. Alle diese Ergebnisse bestätigen die starke Abhängigkeit des Einlaufvorgangs von der Zylinderlaufbahn. Sie zeigen aber auch, daß der Ringlaufflächenverschleiß ein guter Indikator für den Einlaufzustand auch der Zylinderlaufbahn ist.

Faßt man alle Überlegungen und Ergebnisse, die in diesem Kapitel dargelegt wurden, zusammen, so ergibt sich, daß für das Optimierungssystem der Laufflächenverschleiß des obersten Kompressionsrings als Steuergröße sinnvoll eingesetzt werden kann. Im Normalfall wird man durch ihn ausreichende Information auch über den Büchsenverschleiß erhalten. In Ausnahmefällen, so z.B. bei starken Verzugserscheinungen wie bei Motor C, kann die Er-

fassung des Büchsenverschleißes für eine genauere Untersuchung zusätzlich erforderlich werden. Die relativ hohen Aktivierungskosten müssen dann in Kauf genommen werden.

#### 4.2.2 Verwendung des Verschleißratenverlaufs für die Steuerung der Optimierung

Für die Steuerung des Belastungsprogramms im Einlauf stehen im Prinzip Höhe und zeitlicher Verlauf der Verschleißrate der Kolbenringlauffläche zur Verfügung. Nach den in Kapitel 2.3.2 wiedergegebenen Überlegungen kann eine für einen bestimmten Motortyp sinnvolle maximal zulässige Verschleißrate für die Verwendung im Optimierungssystem im voraus nicht angegeben werden. Abschätzungen über die zulässige Verschleißrate müssen anderweitig gewonnen werden. Angaben aufgrund bereits vorliegender Versuchsergebnisse anderer Motortypen sind hier nur beschränkt brauchbar, da, wie ebenfalls in Kapitel 2.3.2 beschrieben, für verschiedene Motortypen unterschiedliche Ausfallwahrscheinlichkeiten bei ähnlicher Verteilung der maximalen Verschleißraten zu erwarten sind.

Motortyp	Maximale Verschleißrate Anfahrverschleiß ( $\mu\text{g/h}$ )	Maximale Verschleißrate Grobeinlauf ( $\mu\text{g/h}$ )
A	6000	9500
B	35000	25000
C	2000	7200
D	2000	1100
E	6000	600 <sup>+</sup>
F	12000	400
F	9000	12000

<sup>+</sup>ungebonderte Büchse

Alle Werte auf volle Hundert auf- oder abgerundet

Tafel 4: Maximale Verschleißrate in Anfahrverschleiß und Grobeinlauf ohne Schädigung der Oberfläche

In Tafel 4 sind die gemessenen Maximalverschleißraten der Kolbenringlauffläche in Anfahrverschleiß und Grobeinlauf für die im Laufe des Vorhabens untersuchten Motorentypen zusammengestellt. Die Unterschiede bei den verschiedenen Motoren sind beträchtlich. Auffällig sind die sehr hohen Verschleißraten der molybdängespritzten Kolbenringe, die ohne Schädigung ertragen wurden.

Da die Höhe der Verschleißraten aus den genannten Gründen nur als Anhaltswert dienen kann, muß im wesentlichen der Verschleißratenverlauf über der Zeit für die Optimierung herangezogen werden. Eine wesentliche Erkenntnis der Untersuchungen ist, daß, wenn während des gesamten Einlaufs nur degressiver oder konstanter Verschleißratenverlauf festgestellt wurde, keine durch direkte Begutachtung sichtbare Schäden (Brandspuren) an den Laufflächen von Ringen und Büchsen gefunden wurden.

In Abb.32 ist ein Versuchsergebnis von Motor B dargestellt, in dem der typische degressive Verschleißratenverlauf der Kolbenringlauffläche bei sehr hohem Verschleißniveau deutlich zu erkennen ist. Die Oberflächen des molybdängespritzten Kolbenrings aus diesem Einlaufversuch sind in Kapitel 4.2.3.2, Abb.47 und 48, dargestellt. Ring- und Zylinderlauffläche wiesen keine Schäden auf.

In zwei Fällen wurden jedoch bei Motor D nach dem Einlauf leichte Schäden an der Lauffläche des ersten Kompressionsrings festgestellt. In beiden Fällen zeigte sich während des Einlaufs für eine längere Zeit ein progressiver Verschleißratenverlauf, was, wie in Kapitel 2.3.2 erläutert, auf einen instabilen Beanspruchungszustand, der bis zur Schädigung führen kann, hinweist.

In Abb.33 ist der Verlauf der Ringlaufflächenverschleißrate über der Zeit für den Motortyp D für einen gebonderten und einen ungebonderten Zylinder im Einlauf eingezeichnet. Im Verschleißratenverlauf mit der gebonderten Zylinderbüchse tritt im Nennleistungsbetrieb nach einer relativ niedrigen Anfangsverschleißrate ein progressiver Anstieg auf, der etwa den 4,5-fachen Wert der Anfangsverschleißrate erreicht und dann aber wieder abnimmt.

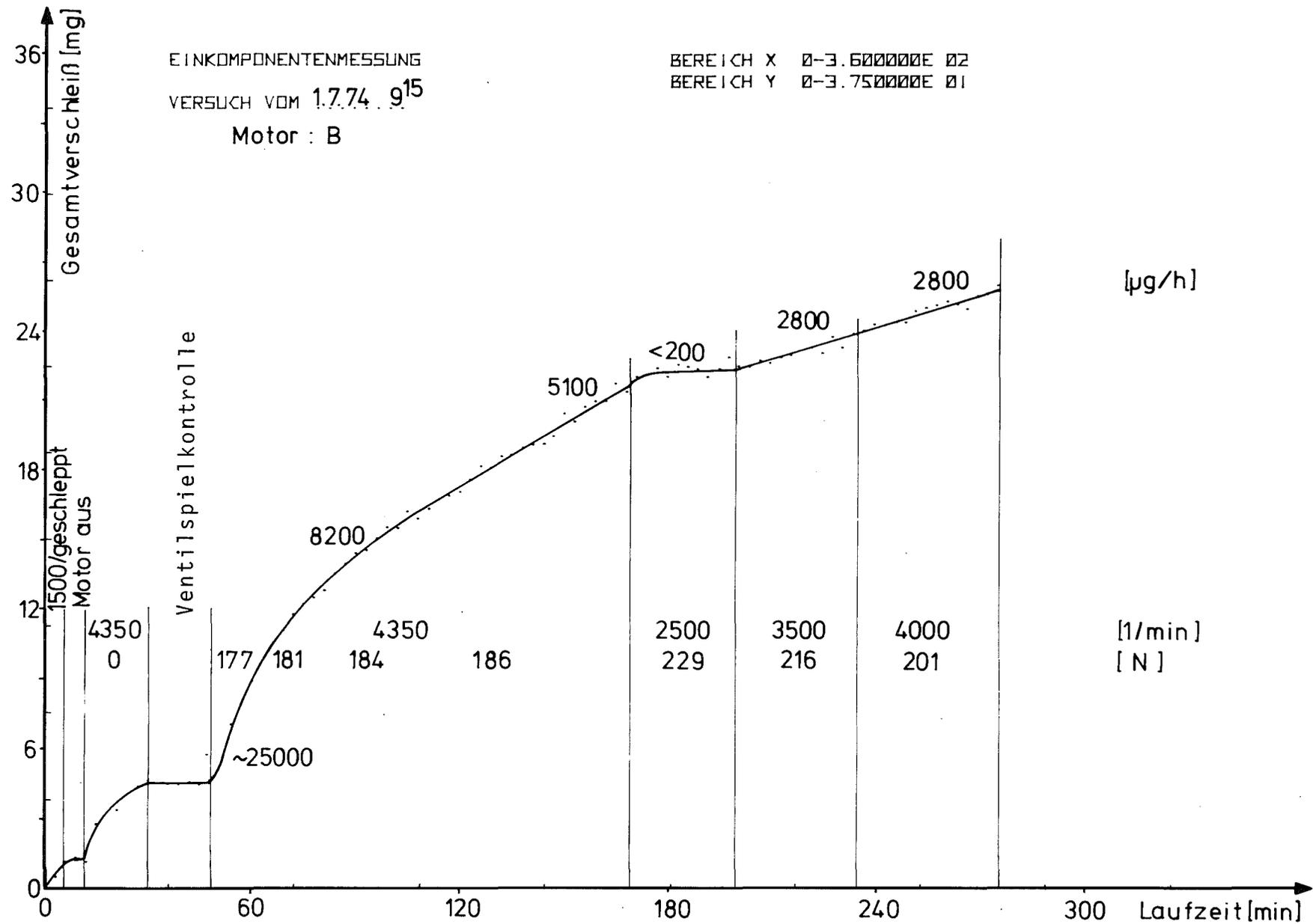


Abb.32 Verlauf des Gesamtverschleißes der Kolbenringlauffläche von Motor B im Grobeinlauf (Plot der Originalmeßwerte)

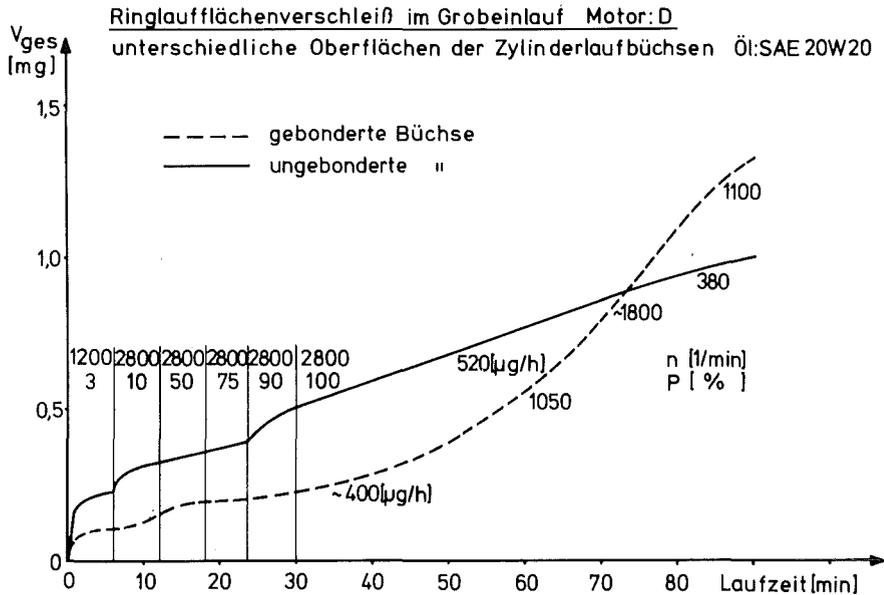


Abb.33 Vergleich des Verlaufs der Ringlaufflächenverschleißraten zweier Versuche mit Motor D im Grobeinlauf

Obwohl keine sehr hohen absoluten Verschleißratenwerte erreicht wurden, wurden nach der Demontage die in Abb.34 dargestellten Schäden der Ringoberfläche im Bereich des Stoßes gefunden. Die Büchsenlauffläche war ohne Befund. Im Vergleich dazu ist in Abb.35 ein Ausschnitt der Ringlauffläche im Stoßbereich aus dem ebenfalls in Abb.33 eingezeichneten Versuchslauf mit normalem Verschleißratenverlauf zu sehen. Hier wurde keine Schädigung festgestellt.

In einem weiteren Versuch am selben Motortyp wurde progressiver Verschleißratenanstieg bis auf etwa den 2,5-fachen Wert der Anfangsverschleißrate im Nennleistungsbetrieb gemessen. Auch bei diesem Versuch zeigten sich nach der Demontage Schäden der Ringlauffläche, die sich aber auf kleinerer Fläche erstreckten. Die wahrscheinlichen Gründe einer Korrelation von progressiver Verschleißrate und Schädigung und die Möglichkeit einer Stabilisierung wurden bereits in Kapitel 2.3.2 erläutert. Für die Abschätzung eines groben Anhaltswerts für die bei solchen Schädigungen entstehenden Verschleißratensteigerungen wurde angenommen, daß der progressive Verschleißanteil allein aus dem nach dem Versuch gefundenen geschädigten Oberflächenanteil entstanden ist.

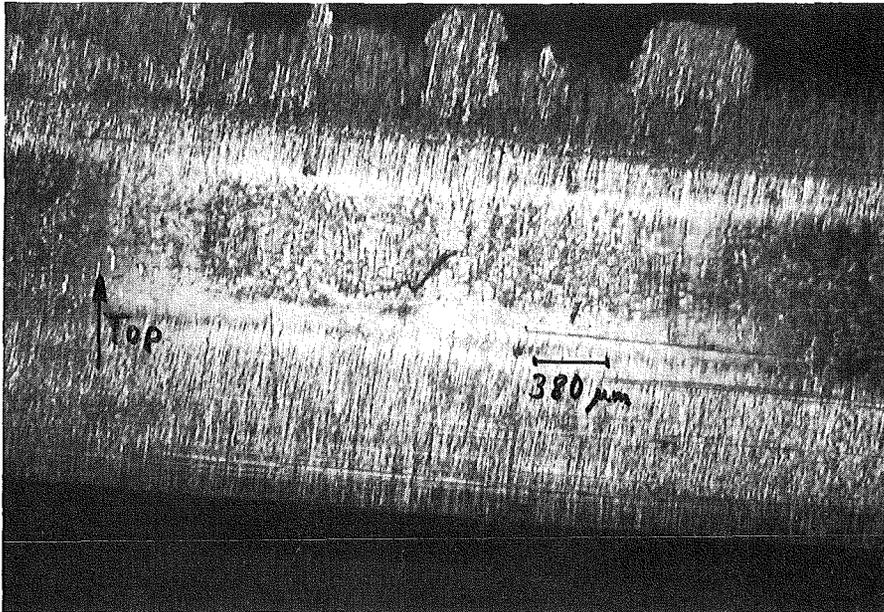


Abb.34 Lauffläche des obersten Kompressionsrings  
Motor D in der Nähe vom Stoß, gebonderte  
Zylinderbüchse (Versuch in Abb.33 dargestellt)

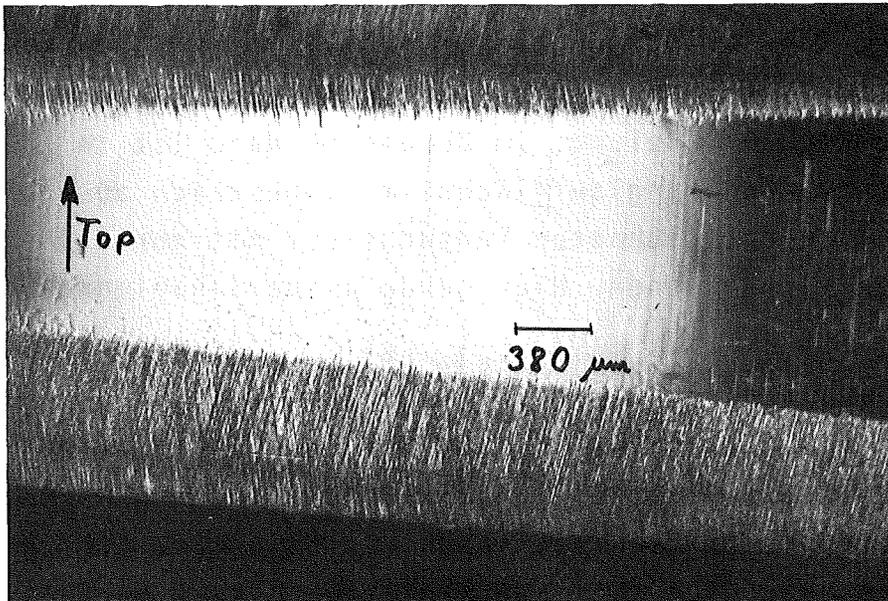


Abb.35 Lauffläche des obersten Kompressionsrings  
Motor D in der Nähe vom Stoß, ungebonderte  
Zylinderbüchse (Versuch in Abb.33 dargestellt)

Durch Bezug der progressiven Verschleißratenzunahme auf diese Flächenanteile wurde in einem Fall eine Verschleißratensteigerung um etwa das 180-fache, im anderen um ca. das 220-fache gegenüber der Anfangsverschleißrate abgeschätzt. Mit diesen Anhaltswerten lassen sich ungefähre Angaben über die bei verchromten Ringen zu erwartenden Anstiege der integralen Verschleißraten bei Annahme einer bestimmten Schädigungsausdehnung errechnen. Unter der Annahme einer für verchromte Oberflächen im Mittel 200-fachen Verschleißratenerhöhung in der geschädigten Zone errechnet sich, daß bereits eine Schädigung von nur 1% des Ringumfangs eine Erhöhung der Verschleißrate um das 2-fache ergibt.

Daraus ist ersichtlich, daß auch kleinere Schädigungen durch den progressiven Verschleiß empfindlich angezeigt werden können, wenn die Progressivität nicht durch andere Einflüsse überdeckt wird. Für die Handhabung der Progressivität der Verschleißraten als Hinweis auf eine Schädigung ist jedoch zu beachten, daß generell nach dem Umstellen auf einen schärferen Betriebspunkt in den ersten Minuten mit einem progressiven Verschleißratenanstieg zu rechnen ist. Da jedoch, wenn man die Ergebnisse am Motor D verallgemeinert, eine Progressivität mit Schadensfolge über längere Zeit (im vorliegenden Fall zwischen 20 und 35 Minuten) anhält, ist nur bei einem länger anhaltenden progressiven Anstieg nach Betriebspunktwechseln mit einer Schädigung zu rechnen.

Eine solche länger anhaltende Progressivität der Verschleißraten muß nach den vorliegenden Ergebnissen als Anhalt für eine Schädigung gewertet werden. Andererseits darf aus ihrem Ausbleiben nicht geschlossen werden, daß keine Schädigung erfolgt ist. Es ist z.B. möglich, daß weitaus der größte Teil der Ringoberflächen im Einlauf degressiv und nur ein kleiner Oberflächenteil progressiv verschleißt und geschädigt wird. In der gemessenen integralen Verschleißrate wird der progressive Anteil dann vom degressiven Anteil überdeckt werden, so daß ein konstanter und sogar degressiver Verlauf gemessen wird. Allerdings wurden bei keinem der untersuchten Neumotoren bei degressivem oder konstantem Verschleißratenverlauf nach der De-

montage am Grobeinlaufende sichtbare Schäden an den Ring- oder Zylinderlaufflächen festgestellt. Trotzdem muß nach jedem Einlauf eine Kontrolle der Oberflächen durch Demontage der Versuchsteile erfolgen. Eine Aufnahme dieser Demontagen in das Optimierungssystem ist notwendig.

Der zeitliche Verlauf der Verschleißrate wird außer zur Schadensbeurteilung auch zur Festlegung der Dauer der einzelnen Programmstufen des jeweiligen Programms herangezogen. Fällt die Verschleißrate degressiv, so kann schon nach kurzer Laufzeit auf einen Punkt höherer Belastung umgestellt werden, da, erkennbar an den degressiven Verschleißraten, der Einlaufbeitrag schnell geringer wird. Die Auswahl der Höhe der einzelnen Belastungsstufen muß dabei aufgrund von Erfahrungen aus den Kennfeldversuchen in Grob- und Feineinlauf und iterativ im Verlauf der Optimierungsversuche selbst erfolgen, wie noch ausführlich bei der Systembeschreibung in Kapitel 5. erläutert werden wird. Bei konstanter Verschleißrate in einem Betriebspunkt sollte nicht länger als 20 bis 30 Minuten gefahren werden, da eine über eine so lange Zeit konstante Verschleißrate anzeigt, daß der Anpassungsvorgang entweder relativ langwierig oder bereits erfolgt ist. Hier kann für eine Beurteilung auch die Höhe der konstanten Verschleißrate herangezogen werden. In jedem Falle soll aber bei konstanter Verschleißrate versucht werden, durch Fahren höherer Belastungsstufen den Einlaufvorgang zu beschleunigen.

Wird bei Nennleistung im Einlauf degressiver Verschleißratenverlauf erreicht, so kann, mit der zuvor genannten Unsicherheit, angenommen werden, daß der Motor diese Belastung betriebs-sicher erträgt. Es kommt jedoch vor, daß bei Nennleistung über längere Zeit praktisch konstante Verschleißraten festgestellt werden. Hier muß bei der Programoptimierung der Nennleistungsbetriebspunkt über einige Stunden gefahren werden, um zu überprüfen, ob evtl. noch eine Progressivität einsetzt.

Für die Festlegung des Endes des Grobeinlaufs kann

neben dem zeitlichen Verlauf zusätzlich auch die Höhe der Verschleißraten im Nennleistungsbetrieb herangezogen werden, da Anhaltswerte aus den Kennfeldversuchen im Grob- und Feineinlauf bekannt sind. Das Einlaufende kann außerdem noch aufgrund der Stabilisierung bestimmter konventioneller Einlaufparameter festgelegt werden. Hierauf wird im Rahmen der Systembeschreibung in Kapitel 5.2 noch näher eingegangen.

Ein wichtiges Kriterium für die Eignung der Ringlaufflächenverschleißrate zur Einlaufoptimierung ist die Vergleichbarkeit der Verschleißmeßergebnisse im Grob- und Feineinlauf, da durch das System, aufbauend auf den jeweils zuvor gefahrenen Verschleißversuchen im Einlauf, die Optimierung iterativ erfolgt. Dabei wird auch die Verschleißratenhöhe für die Steuerung eingesetzt, so z.B. bei der Festlegung des Einlaufendes. Eine Kenntnis der zu erwartenden Streuungen ist deswegen notwendig.

In Tafel 5 sind die Streuungen der Endverschleißraten der Kolbenringlaufflächen bei erstmaligem Anfahren der Nennleistung im Grobeinlauf aus verschiedenen Einlaufversuchen für die Motortypen A, B, C und F zusammengestellt. Die Standardabweichungen liegen mit 20 bis 30% für die Motortypen B, C und F auf dem aus der Literatur bekannten Niveau für Radionuklidmessungen an Verbrennungsmotoren [14,17,49] .

Die erheblich höhere Standardabweichung bei Motor A ist wahrscheinlich auf die hier stärker variierenden Versuchsprogramme zurückzuführen, da dieser Motortyp zu Grundsatzuntersuchungen eingesetzt wurde. Diese Vermutung wird auch durch die ebenfalls in Tafel 5 eingetragenen Ergebnisse aus dem Feineinlauf von Motor A bestätigt, bei denen die Standardabweichung in etwa die Größenordnung der anderen Motortypen erreicht. Hier wirken sich die unterschiedlichen Einlaufprogramme nicht mehr so stark aus.

Um den Einfluß der unterschiedlichen Versuchsprogramme zu eliminieren und die motor- und montagebedingten Streuungen bei sorgfältig konstant gehaltenen Versuchsbedingungen erfassen zu können, wurde eine spezielle Versuchsserie am Motor D gefahren. Zur Untersuchung des Einflusses bei einer Änderung eines

Motortyp	Arithm. Mittel der Endverschleißrate bei Nennleistung im Grobeinlauf [ $\mu\text{g/h}$ ]	Standardabweichung [%]	Anzahl der verwendeten Motoren
A	735	$\pm 71$	9
	225	$\pm 35$	8 <sup>+</sup>
B	3360	$\pm 29$	5
C	780	$\pm 27$	4
F	1860	$\pm 19$	5

<sup>+</sup>Vergleichswerte bei wiederholtem Anfahren der Nennleistung während des Feineinlaufs

Tafel 5: Streuungen der Endverschleißrate der Kolbenringlauffläche bei erstmaligem Anfahren der Nennleistung im Grobeinlauf

wesentlichen Motorparameters auf das Einlaufverhalten, wurden hier sowohl gebonderte als auch ungebonderte Zylinderbüchsen eingesetzt.

Mit einem Motorblock wurden insgesamt sechs neue Paarungen (Büchsen, Kolben, Kolbenringe), davon drei mit gebonderten und drei mit ungebonderten Zylinderbüchsen, jeweils abwechselnd nach einem festen Einlaufprogramm auf dem in Kapitel 3.2.1 beschriebenen rechnergeregelten Prüfstand über 90 Minuten eingefahren. Nach diesem Einlaufprogramm wurden jeweils noch vier Punkte der Vollastkennlinie über je 1 Stunde gefahren. In Tafel 6 sind die Verschleißmeßergebnisse der Versuche zusammengefaßt. Dabei zeigte sich für die ungebonderte Büchse, daß die Standardabweichungen für den Gesamtverschleiß im Grobeinlauf und die Verschleißratenwerte der Vollastkennlinie zwischen 8 und 15% lagen. Nur die Endverschleißrate bei Nennleistung im Grobeinlauf lag mit ca. 30% Standardabweichung deutlich höher. Diese Werte zeigen eine gute Wiederholbarkeit, wenn man berücksichtigt, daß normale Serienteile mit entsprechenden Toleranzen verwendet wurden. Die Meßgenauigkeit der Radionuklidmessungen, die unter günstigen Verhältnissen durchgeführt werden konnten (Aktivierung der Teile in der gleichen Charge, gleiche Eichung), ist mit etwa  $\pm 5\%$  anzusetzen. Die verbleibenden Streuungen in der Größenordnung von 10% sind auf Montage-, Motor- und Betriebseinflüsse zurückzuführen.

Betrachtet man die Ergebnisse der gebonderten Büchsen, so fallen hier die erheblich höheren Streuungen in allen Werten deutlich auf. Im Mittel sind die Standardabweichungen mehr als doppelt so groß als bei den ungebonderten Büchsen. Diese Erhöhung der Streuung muß ausschließlich auf die Änderung der Oberflächen durch die Bonderung zurückgeführt werden, da die Versuche unter gleichen Bedingungen wie bei den ungebonderten Büchsen jeweils im Wechsel mit diesen gefahren wurden.

Dieses Ergebnis ist in zweierlei Hinsicht interessant. Zum einen zeigt es, wie sehr die Änderung eines einzelnen aber wichtigen Motorparameters die Verschleißmeßergebnisse im Einlauf beeinflussen kann. Daraus läßt sich ableiten, daß große Vor-

	Gesamtverschleiß (mg) Ende Grobeinlauf	Verschleißrate ( $\mu\text{g/h}$ ) 2800/Voll,Grobeinlauf	Mittl. Verschleißrate im Vollastbetrieb ( $\mu\text{g/h}$ )			
			1500	1800	2350	2800 1/min
Gebonderte Zylinder- büchse	0,87 ( $\pm$ 40) <sup>+</sup>	700 ( $\pm$ 52)	525 ( $\pm$ 25)	765 ( $\pm$ 29)	1060 ( $\pm$ 35)	650 ( $\pm$ 36)
Ungebonderte Zylinder- büchse	0,98 ( $\pm$ 9)	360 ( $\pm$ 31)	325 ( $\pm$ 8)	290 ( $\pm$ 9)	220 ( $\pm$ 11)	250 ( $\pm$ 15)

<sup>+</sup>Arithmetischer Mittelwert (Standardabweichung in %)

Mittlere Standardabweichung (%) aller Verschleißratenwerte: gebondert  $\pm$  36%

ungebondert  $\pm$  15%

Tafel 6: Wiederholbarkeit der Radionuklidverschleißmessung der Ringlauffläche bei verschiedenen Oberflächen der Büchse an Motor D

sicht geboten ist, wenn man z.B. ein für einen bestimmten Motortyp optimiertes Einlaufprogramm für einen geänderten Motor übertragen will.

Zum zweiten bestätigen diese Versuche eine von Motorfachleuten genannte Erfahrung. Bei gebonderten Zylinderlaufbahnen ergeben sich häufig Schwierigkeiten mit stark schwankender Qualität der Bonderschichten, was sich, wie in den vorliegenden Versuchen, durch größere Streuungen bemerkbar macht.

Faßt man die in diesem Kapitel dargestellten Versuchsergebnisse zusammen, so zeigt sich die gute Eignung des Verschleißes der Kolbenringlauffläche im zeitlichen Verlauf und in der absoluten Höhe als Steuergröße für das System. Dabei ist jedoch zu beachten, daß motor- und montagebedingte Streuungen in der Größenordnung von 30% und mehr auftreten können, und daß die Aussagen über Schädigungen der Lauffläche aufgrund des Verschleißverlaufs unbedingt durch Kontrollen der Oberflächen nach Demontage der Versuchsteile ergänzt werden müssen.

#### 4.2.3 Auswirkung der Optimierung nach dem Verschleißverhalten auf die konventionellen Einlaufkriterien

Neben den Beurteilungsgrößen Betriebssicherheit und Verschleißverhalten sind auch die konventionellen Kriterien Leistung, spezifischer Kraftstoffverbrauch, spezifischer Ölverbrauch und, mit Einschränkung, Leckgasmenge, die bei laufender Maschine gemessen werden, für die Beurteilung des Einlaufzustandes wichtig; zusätzlich ist nach der Demontage des Motors der Oberflächenzustand der Einlaufbauteile zur Beurteilung heranzuziehen.

##### 4.2.3.1 Bei laufender Maschine überprüfbare konventionelle Einlaufkriterien

Um Aussagen über den bei der Optimierung nach dem Verschleißverhalten des Steuerbauteils erreichten Stand bei den Kriterien Leistung, spezifischer Kraftstoffverbrauch, Ölverbrauch und Leckgasmenge zu erhalten, wurde bei verschiedenen Neumotoren

zusätzlich zum Verschleißratenverlauf der Verlauf dieser Größen bei Nennleistung im Grobeinlauf bestimmt. Dabei ist für die Leistungsmessung zu beachten, daß bei Dieselmotoren die jeweilige Maximalleistung stark über die Einspritzmenge beeinflusst wird. Bei der Leistungsbeurteilung muß deshalb immer der spezifische Verbrauch oder die Einspritzmenge mit beurteilt werden.

In Abb.36 sind über der Laufzeit die konventionellen Einlaufkriterien und der Verschleißratenverlauf der Kolbenringlauf-  
fläche für Motor B im Nennleistungsbetrieb des Grobeinlaufs dargestellt. Die Ergebnisse stammen aus verschiedenen Einlaufversuchen, bei denen die Nennleistung nach unterschiedlichen Laufzeiten angefahren wurde.

Der für das Einlaufen typische degressive Verlauf der Verschleißrate zeigt bei allen drei Motoren eine Stabilisierung bei 100 - 120 Minuten Laufzeit.

Auch die effektive Leistung und der spezifische Verbrauch zeigen diesen Einlaufeffekt, der ebenfalls im Bereich von 100 - 120 Minuten zu einer Stabilisierung führt. Die hohen Nennleistungswerte von Motor 1 und Motor 2 sind zum Teil in höheren Einspritzmengen begründet. Ein Teil der höheren Leistung muß jedoch auf das Einlaufprogramm zurückgeführt werden, wie auch umfangreiche Praxisversuche (vgl. Kapitel 6.) gezeigt haben. Die bei diesen beiden Motoren deutlich höheren Verschleißraten am Grobeinlaufende sind zum Teil auf die höhere Leistung zurückzuführen, da im Bereich der Vollast schon relativ geringe Laststeigerungen bei Dieselmotoren zu deutlich erhöhten Verschleißraten führen, wie im Kapitel 4.1.2 gezeigt wurde. Dies konnte auch hier nachgewiesen werden, indem, nach Zurücknahme der Einspritzmenge und damit der Leistung auf die Sollwerte, Motor 1 die niedrigen Verschleißratenwerte von Motor 3 erreichte. Die Berücksichtigung einer evtl. erhöhten Endleistung ist demnach für die Beurteilung der jeweils erreichten Endverschleißrate wichtig.

Konventionelle Einlaufkriterien und VR-Verlauf  
 bei 4350 [l/min]/Vollast am Ende Grobeinlauf  
 Motor: B

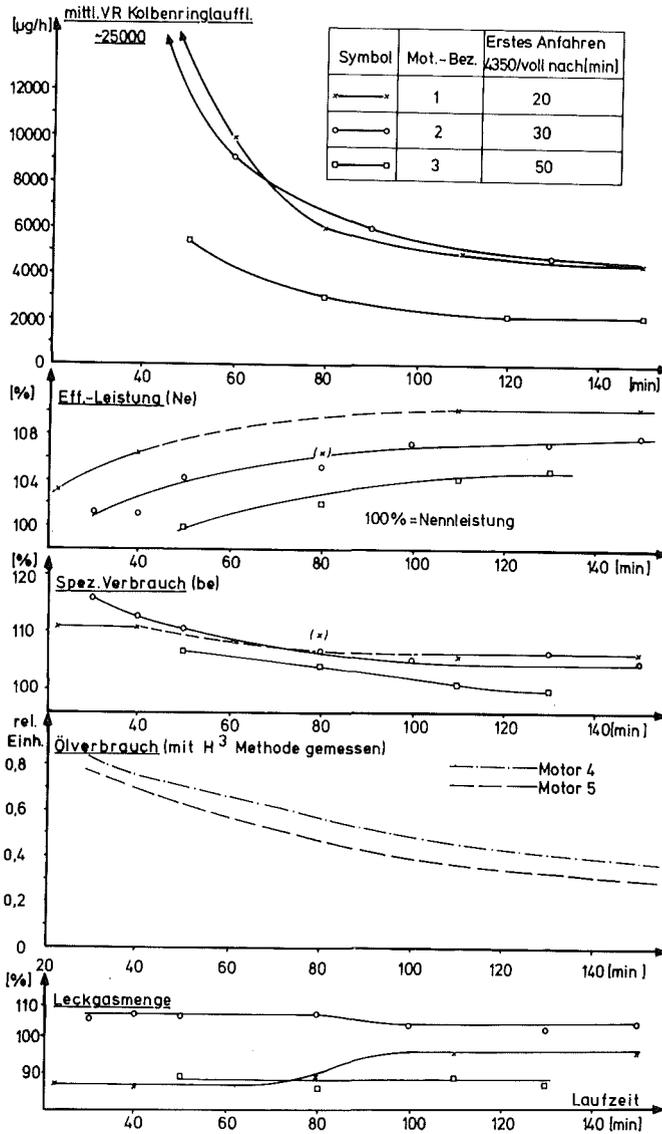


Abb.36 Verlauf der Verschleißraten und der konventionellen Einlaufkriterien von Motor B im Nennleistungsbetrieb am Ende des Grobeinlaufs

Interessant ist auch der Verlauf der Ölverbrauchskurve über der Zeit. Der Ölverbrauch wurde in Zusammenarbeit mit der Daimler-Benz AG nach einer kontinuierlichen Verbrauchsmeßmethode mit Tritium erfaßt.

Diese Versuche wurden mit einem etwa 10 Stunden in einem anderen Motor vorgealterten Meßöl gefahren, um Meßfehler durch

mangelhafte Markierung des Öls mit Tritium zu verringern. Durch eine schlecht angepaßte Siedelinie der tritiierten Ölanteile an die Siedelinie des Versuchsöls wird sonst vor allem in der ersten Betriebsphase zu hoher Ölverbrauch vorgetäuscht [43]. Außerdem sollte durch das Voraltern der Einfluß des Öleinlaufs (die leichtflüchtigen Bestandteile des Öls ergeben in der ersten Betriebszeit einen hohen Verbrauch) verringert werden, da in den vorliegenden Versuchen nur Aussagen über den Einfluß des Einlaufzustandes des Motors auf den Ölverbrauch gewonnen werden sollten.

In Abb.36 werden nur relative Einheiten für den Ölverbrauch angegeben, da die Absoluteichung des Tritiummeßverfahrens zu diesem Zeitpunkt aus verschiedenen Gründen (u.a. mangelhafte Markierung) trotz Voralterung zu große Fehler aufwies. Auch der Verlauf des spezifischen Ölverbrauchs zeigt den Einlaufeffekt und eine Stabilisierung im Bereich von 120 bis 140 Minuten, ähnlich wie bei den anderen konventionellen Kriterien.

Die ebenfalls in Abb.36 eingezeichnete Leckgasmenge zeigt keinen für das Einlaufen typischen Verlauf.

In Abb.37 ist der Verlauf von Ringlaufflächenverschleißrate und konventionellen Einlaufkriterien aus verschiedenen Einlaufversuchen an Motortyp F dargestellt. Auch bei diesem Motor zeigt sich der für das Einlaufen typische degressive Verschleißratenverlauf, der sich nach etwa 1,5 h ebenso wie Leistung ( $N_e$ ) und spezifischer Verbrauch ( $b_e$ ) stabilisiert. Die Meßergebnisse der Leckgasmenge konnten hier aus versuchstechnischen Gründen nicht sinnvoll ausgewertet werden und wurden deshalb nicht eingezeichnet.

Der Ölverbrauch wurde bei diesem Motortyp anschließend an die Einlaufversuche nach einer Abtropfmethode, gemittelt über jeweils 6 - 10 Stunden Nennleistungsbetrieb, gemessen. Er lag mit im Mittel ca. 2,2 g/kWh in einem für diesen Motor im eingelaufenen Zustand normalen Bereich.

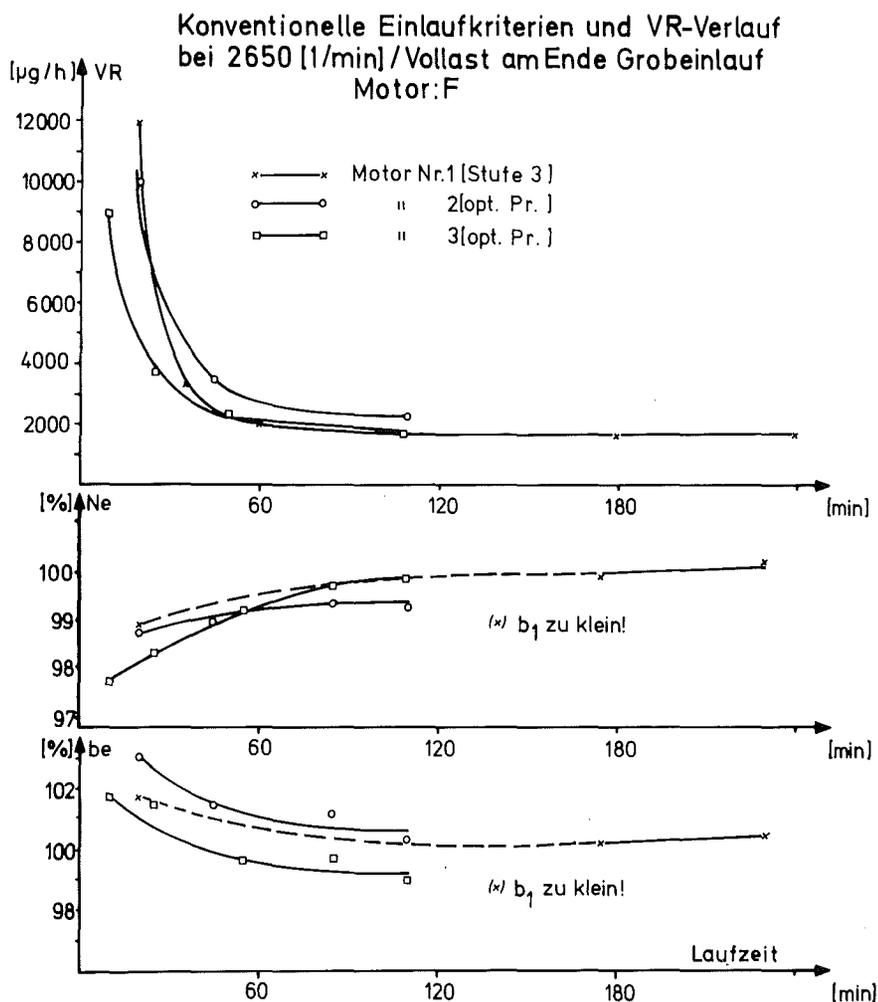


Abb.37 Verlauf der Verschleißraten und der konventionellen Einlaufkriterien von Motor F im Nennleistungsbetrieb am Ende des Grobeinlaufs

In Abb.38 sind Ergebnisse ähnlicher Versuche für Motor C eingezeichnet. Da bei diesem Motor, wie bereits erläutert, der Einlauf auf die Drehzahl des max. Drehmoments gefahren wird, ist der Motor bis zum Fahren der Nennleistung grob eingelaufen. Deshalb zeigt der Verschleißratenverlauf bei 2175 1/min/Volllast nur noch

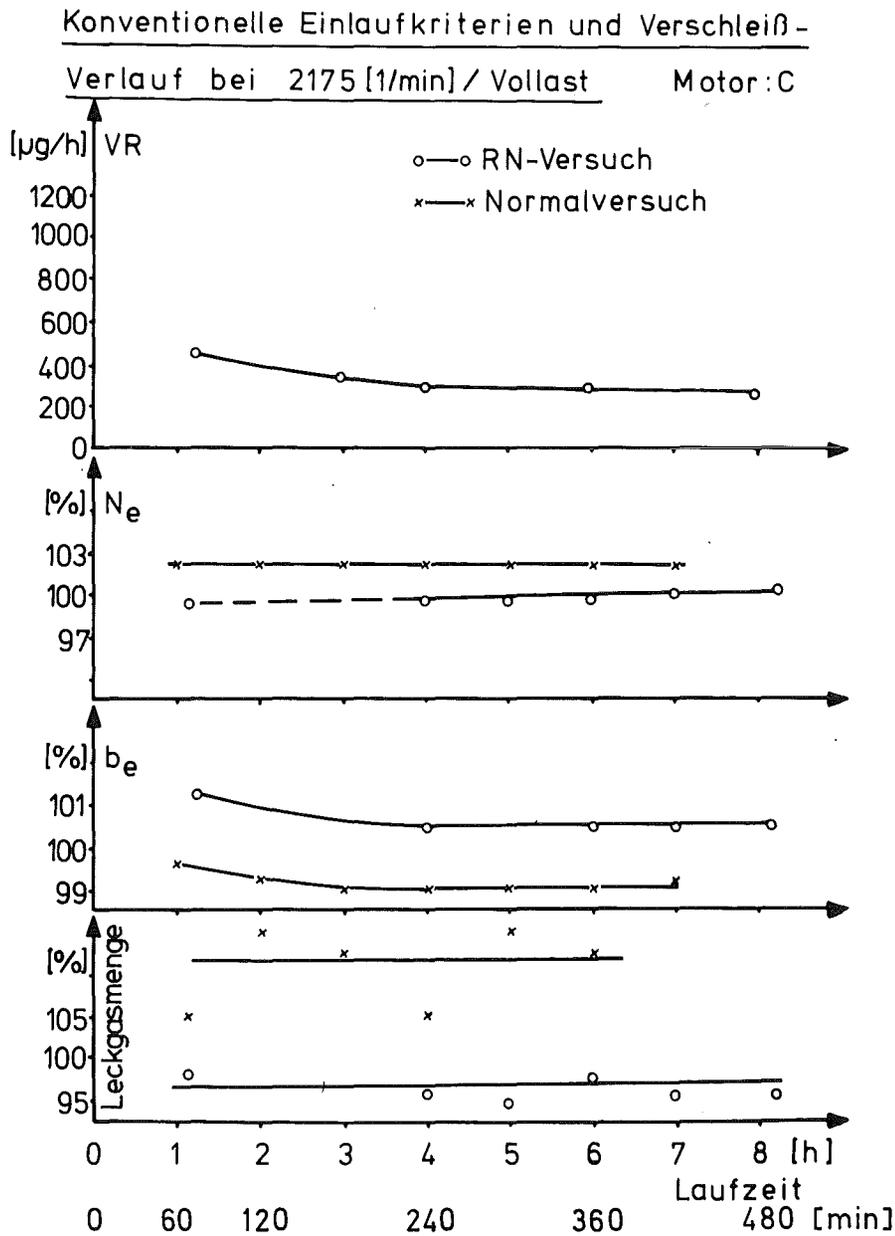


Abb.38 Verlauf der Verschleißraten und der konventionellen Einlaufkriterien von Motor C im Nennleistungsbetrieb am Ende des Grobeinlaufs

eine geringe Abnahme der Ringlaufflächenverschleißrate im Rahmen des Feineinlaufs. Die Leistung ( $N_e$ ) wurde bei diesen Versuchen über die Einspritzmenge weitgehend konstant gehalten. Der geringe zusätzliche Einlaufgewinn (über 3 Stunden weniger als 1%) ist aber an den abnehmenden Werten des spezifischen Kraftstoffver-

brauchs ( $b_e$ ) zu erkennen. Der Verlauf dieser drei Größen bestätigt damit, daß der wesentliche Einlaufbeitrag beim Fahren des maximalen Drehmoments bereits erzielt wurde. Die Leckgasmengen blieben konstant. Der Ölverbrauch, nach einer Abtropfmethode gemessen, lag mit 1,4 g/kWh nach 8 Stunden Laufzeit günstig.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß bei den untersuchten Motoren die Optimierung nach dem Verschleißverhalten auch gute Ergebnisse für die einlaufrelevanten konventionellen Einlaufkriterien ergab. Auch der zeitliche Verlauf der Verschleißraten und anderen Einlaufkriterien stimmte weitgehend überein. Nur die Leckgasmenge zeigte keinen für den Einlauf typischen Verlauf.

Diese Erkenntnisse lassen sich über Modellvorstellungen wie folgt interpretieren. Der degressive Verschleißratenverlauf und die anschließende Stabilisierung deuten an, daß sich der Traganteil der Oberflächen günstig ausbildet. Die für den Anpassungsverschleiß benötigte Reibungsenergie wird geringer. Durch die verminderte Reibleistung steigt die effektive Leistung, der spezifische Verbrauch fällt. Eine zeitliche Korrelation mit dem Verschleißverhalten ist zu erwarten.

Der Ölverbrauch setzt sich nach neueren Erkenntnissen aus einem selektiven Verbrauchsanteil, der über Verdampfungsmechanismen zu erklären ist, und einem mechanischen Verbrauchsanteil durch Abschleudern von Öltropfen im Brennraum bzw. Ölverluste über die Ventilführungen zusammen [43]. Durch die beim Einlaufen verbesserte Anpassung von Ring- und Büchsenoberflächen werden stärkere Ölfilme an Stellen, wo Ring und Büchse aufgrund von Verzügen nicht angepaßt waren, vermieden. Auch das Negativvolumen der geglätteten Oberflächen wird geringer. Beides führt zu einer Verminderung des selektiven Ölverbrauchs, da die dem Verdampfungsprozeß ausgesetzte Ölmenge geringer wird [50]. Der mechanische Ölverbrauch im Zylinder-Kolbenringbereich wird mit zunehmendem Einlauf geringer, da durch die Oberflächenanpassung insgesamt weniger Öl in den Bereich des Verbrennungsraums gelangt und somit weniger abgeschleudert werden kann. Aus diesen

Gründen ist mit einer guten Übereinstimmung des Verlaufs von Verschleiß und Ölverbrauch zu rechnen.

Auch die schlechte Korrelation des Verlaufs der Leckgasmenge kann über Modellvorstellungen erklärt werden. Es ist anzunehmen, daß durch Verzüge der Laufbahn praktisch keine Hohlstellen zwischen Ring- und Büchsenlauffläche entstehen, da sie zum Teil durch das Formfüllungsvermögen der Kolbenringe vermindert werden [51] und evtl. verbleibende geringe Spalte durch das Schmieröl abgedichtet werden. Die Leckgasmenge im normalen Motorbetrieb ohne Schäden der Laufbahn entsteht deshalb im wesentlichen durch Gasdurchtritt beim Anlagewechsel der Ringe während des Arbeitspiels und durch die Kolbenringstöße. Aufgrund dieser Überlegungen ist eine Änderung der Leckgasmenge im Einlauf nicht zu erwarten, da sich die Anlagewechsel durch den Einlauf nicht verändern und die Erhöhung des Gasdurchtritts über die durch den Einlaufverschleiß geringfügig vergrößerten Ringstoßspiele unerheblich ist. Für Motor B, der die höchsten Einlaufverschleißwerte erreichte, ergab sich eine maximale Stoßspielvergrößerung von ca. 10 µm im Grobeinlauf.

Obwohl nach diesen Überlegungen und Meßergebnissen die Leckgasmenge nicht als Einlaufindikator verwendet werden kann, ist ihre Beobachtung doch sinnvoll, da, wie eigene Messungen zeigten, eine stark erhöhte Leckgasmenge (um mehr als das Doppelte der Normalwerte) mit starker Schwankung über der Laufzeit ein Hinweis auf eine stärkere Schädigung im Bereich der Zylinderlaufbahn ist. Im allgemeinen wird diese Erscheinung zusätzlich noch von Leistungsverlust begleitet.

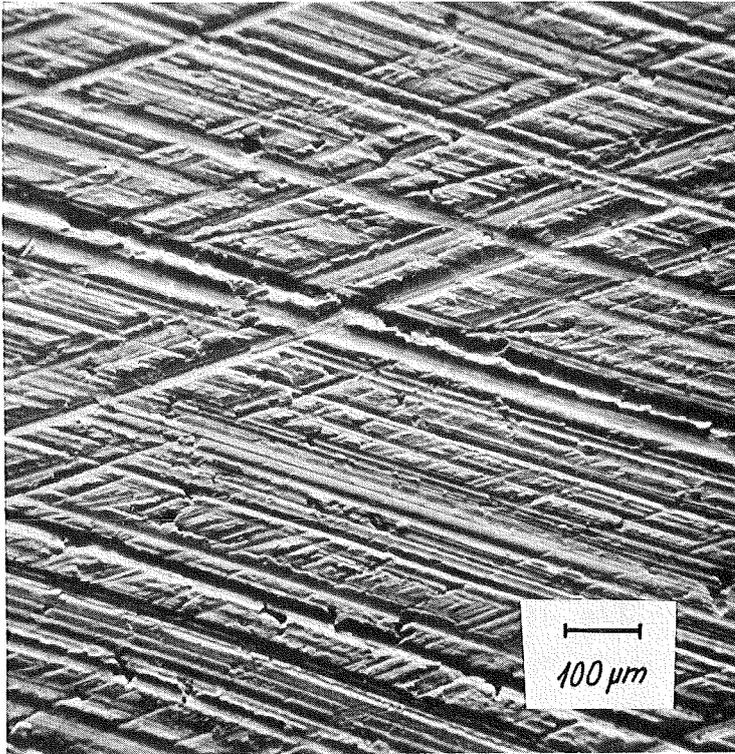
Trotz der nachgewiesenen guten Korrelation des Verschleißverhaltens mit Leistung, spezifischem Verbrauch und Ölverbrauch im Einlauf darf aber nicht gefolgert werden, daß eine systematische Optimierung des Einlaufprogramms mit den konventionellen Meßgrößen allein unter Verzicht auf das Verschleißverhalten möglich sei. Die gezeigten Korrelationen bezogen sich allein auf die Vollast bei Nenndrehzahl. Da aber der wesentliche Teil der Programoptimierung im Teillastbereich erfolgt, wobei hier die

Erfassung zeitlicher Veränderungen im Minutenbereich durch die Steuergröße möglich sein muß, kann nur die genaue und empfindliche Verschleißmessung mit Radionukliden eingesetzt werden, die als einzige der genannten Meßgrößen den Einlaufvorgang, d.h. die Anpassung der Oberflächen durch Verschleiß, direkt wiedergibt. Dies wird auch an den Verläufen der konventionellen Kriterien in Abb.36 und 37 deutlich, wenn man die im Vergleich zu den Verschleißmeßergebnissen starke Spreizung der Maßstäbe berücksichtigt. Die indirekten Einlaufbeurteilungsgrößen Leistung, spezifischer Verbrauch und Ölverbrauch sind außer vom Einlaufzustand auch noch von einer Reihe anderer Einflußfaktoren abhängig, wie z.B. Einstellwerten, Änderungen im Ansaug- und Einspritzsystem, Temperaturänderungen usw., die die ohnehin relativ geringen Änderungen aufgrund des Einlaufs noch überdecken. Obwohl sie deswegen nicht für die Durchführung der Optimierung geeignet sind, können sie aber mit gutem Erfolg, wie die Ergebnisse gezeigt haben, als zusätzliche Indikatoren für den erreichten Einlaufzustand und bei Bedarf für die Festlegung der Dauer des Einlaufprogramms verwendet werden, wenn die Herstellerfirma beispielsweise Sollwerte für die konventionellen Kriterien am Ende des Einlaufprogramms vorschreibt.

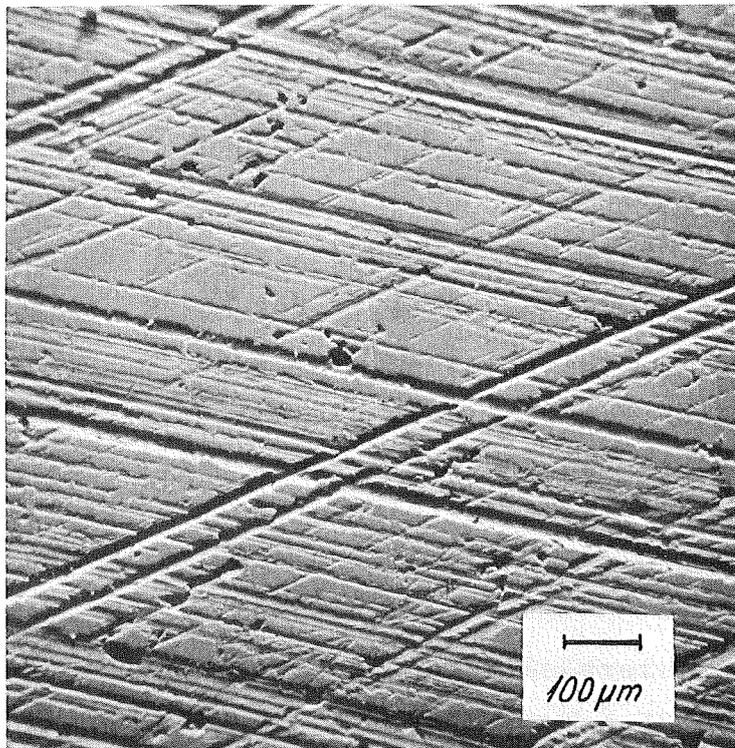
#### 4.2.3.2 Untersuchung des Oberflächenzustandes von Zylinder und Kolbenringen nach Demontage am Ende des Einlaufs

Um die Aussagen der Verschleißmeßergebnisse zu erhärten, müssen nach Beendigung der Versuchsläufe die Paarungen demonstert und deren Oberflächen begutachtet werden. Dabei werden die Oberflächen der Kolbenringe mit einem Mikroskop, die der Zylinderlaufbahnen im allgemeinen mit Faxfilmbildern qualitativ und mittels Perthometermessungen quantitativ erfaßt.

In Abb.39 sind Rasterelektronenmikroskopaufnahmen der Büchsenoberfläche von Motor A mit einer Vergrößerung von 100 : 1 im Neuzustand und im eingelaufenen Zustand nach 16 Stunden Laufzeit dargestellt. Im Vergleich dazu sind in Abb.40 Faxfilmbilder (Vergrößerung 64-fach) und Perthometerschriebe, ebenfalls von Motor A im Neuzustand und im eingelaufenen Zustand nach 20 Stunden

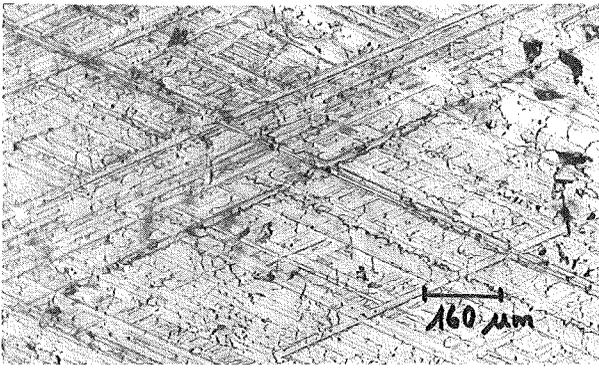


Neuzustand  
(100 : 1)

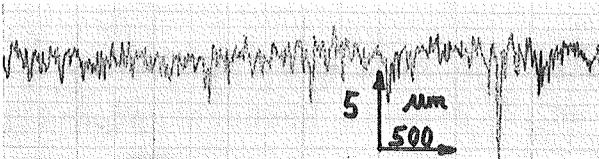


16 h Einlauf HM  
(100 : 1)

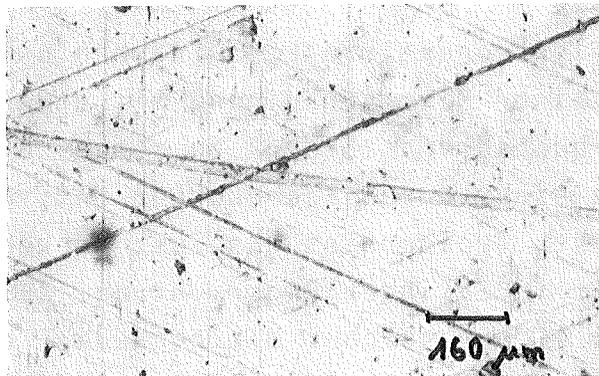
Abb.39 Rasterelektronenmikroskopaufnahmen der Zylinderlaufbahn vom Motor A (unterschiedliche Oberflächenbereiche)



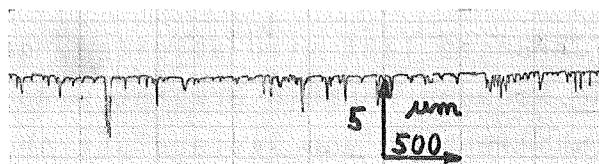
Neuzustand



Neuzustand



20 h gelaufen  
OT-Bereich



20 h gelaufen  
OT-Bereich

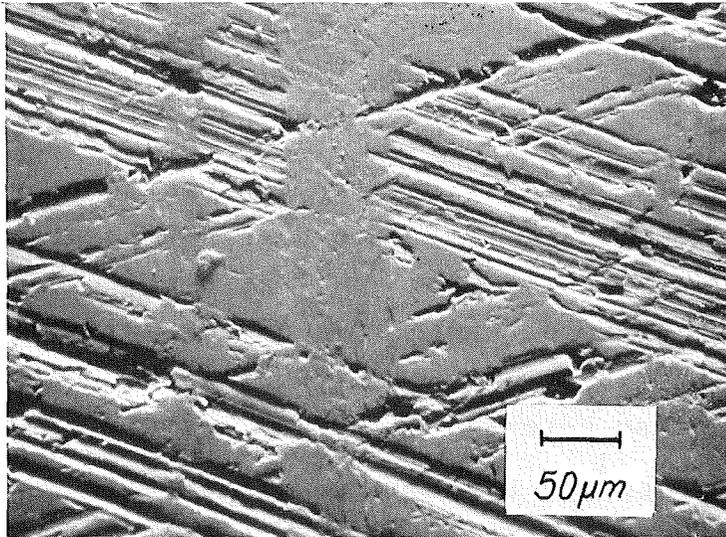
Abb.40 Vergleich von Faxfilmbildern und Perthometerschrieben der Zylinderlaufbahn im Motor A

Laufzeit beigefügt. Die REM-Aufnahmen zeigen aufgrund ihrer großen Tiefenschärfe deutlich die Ausbildung tragender, d.h. geglätteter Oberflächen. Diese Glättung ist aber auch auf den entsprechenden Faxfilmbildern zu erkennen und läßt sich anhand von Perthometermessungen quantitativ erfassen. Daraus läßt sich ableiten, daß bei Verwendung von Faxfilmbildern und Perthometerschrieben das relativ aufwendige Verfahren der Rasterelektronenmikroskopaufnahmen für eine Oberflächenbeurteilung nicht notwendig ist. Die gute Eignung von Faxfilmbildern ist auch aus der Literatur bekannt. [9,50 ]

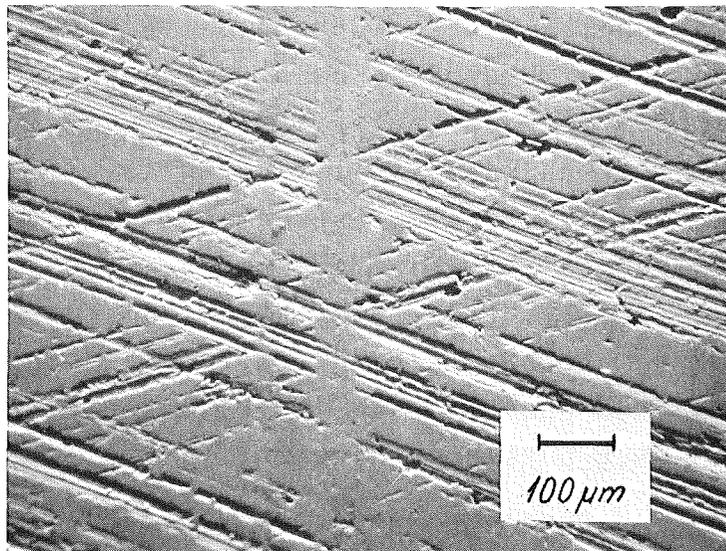
Schäden an den Laufbahnen von Ring und Zylinder mit mehr als 1/2 mm Breite lassen sich durch direkte Beobachtung mit bloßem Auge erkennen und z.B. von Schmutzdurchziehern unterscheiden. Faxfilme oder lichtoptische Vergrößerungen lassen jedoch auch noch wesentlich kleinere Schäden erkennen. Auch das soll anhand entsprechender REM-Aufnahmen und Faxfilmbilder gezeigt werden.

In Abb.41 sind Rasterelektronenmikroskopaufnahmen unterschiedlicher Vergrößerung von einer Mikroschädigung mit etwa 75 $\mu$ m Breite an einer Zylinderbüchse von Motor A zu sehen, die mit bloßem Auge nicht mehr von einer durch Fremdkörper entstandenen Riefe zu unterscheiden ist. Typisch ist das Zuschmieren der Honstruktur und der Verlauf in Zylinderlängsrichtung. Zum Vergleich ist ebenfalls in Abb.41 ein solcher Mikroschaden etwa gleicher Breite aus einem anderen Versuch am gleichen Motor anhand einer Faxfilmaufnahme dargestellt. Deutlich ist auch hier die Schadensspur an der veränderten Struktur erkennbar.

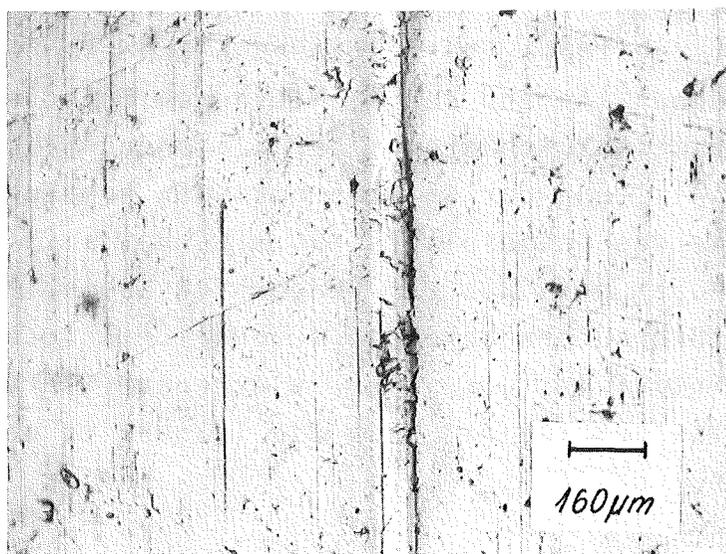
Aus diesen kurzen Ausführungen läßt sich ableiten, daß mit direkter Begutachtung grobe Schäden ohnehin erkannt werden und auch kleine Schäden ohne Zuhilfenahme von Rasterelektronenmikroskopaufnahmen über die Faxfilmtechnik sicher erkennbar sind. Dabei ist jedoch anzumerken, daß solche Mikroschäden, wie in den Aufnahmen der Abb.41 dargestellt, die Laufeigenschaften des Motors nach den Erfahrungen aus vielen Langzeitversuchen nicht beeinträchtigen und sich auch im Verschleißverhalten, selbst bei Verwendung der hochempfindlichen Radionuklidmeßmethode, praktisch



REM



REM



Faxfilm

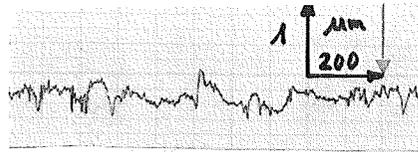
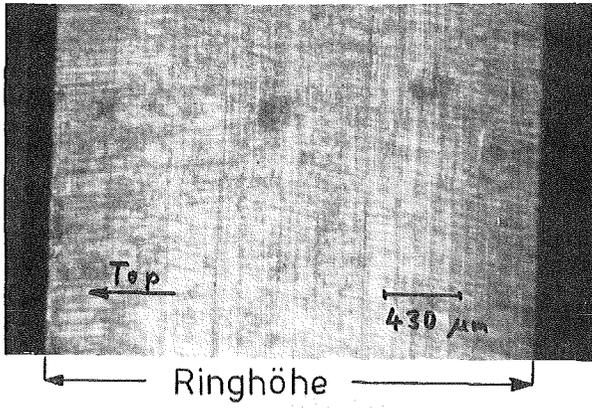
Abb. 41 Vergleich von Rasterelektronenmikroskopaufnahmen und Faxfilmbildern zur Erkennung von Mikroschäden der Zylinderlaufbahn (Faxfilm- und REM-Aufnahmen sind von unterschiedlichen Bauteilen)

nicht bemerkbar machen. Sie sind nicht als Schäden im Sinne einer Beeinträchtigung der Betriebssicherheit zu betrachten.

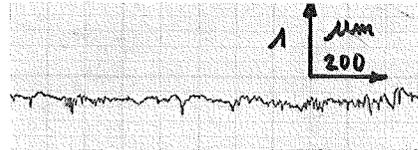
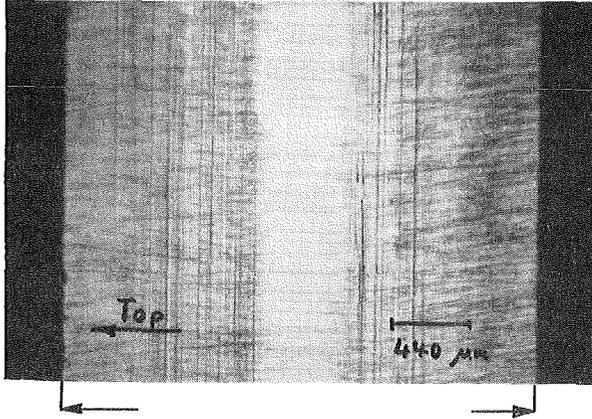
Eine quantitative Aussage über den Glättungszustand von Ringen und Zylinderlaufbahn läßt sich über Perthometermessungen erreichen, die zusätzlich in Form von Traganteilkurven (Abbotkurven) ausgewertet werden können. Die Brauchbarkeit der genannten Auswerteverfahren zur Beurteilung des Oberflächenzustandes nach dem Einlauf ist in der Literatur mehrfach nachgewiesen [9,19,50] .

Nach dieser kurzen Darstellung der Technik der Oberflächenbeurteilung im Rahmen des Einlaufoptimierungssystems sollen am Beispiel des Motors D die typischen Oberflächenveränderungen von Zylinderbüchse und Ringlauffläche während des Einlaufvorgangs dargestellt werden. Dazu wurde je eine neue Paarung nach 15 und 90 Minuten und nach 30 Stunden Laufzeit untersucht. Die 15 Minuten-Paarung wurde bei Nulllast bis zur Nenndrehzahl gefahren (Anfahrverschleiß). Die 90 Minuten-Paarung hatte dasselbe Nulllastprogramm und anschließend ein Grobeinlaufprogramm bis zur Nennleistung, dessen Vollastlaufzeit 1 Stunde betrug. Die 30-Stunden-Paarung wurde nach demselben Programm wie die 90 Minuten-Paarung eingefahren und anschließend im Vollastbetrieb bei wechselnden Drehzahlen 28,5 h feineingelaufen.

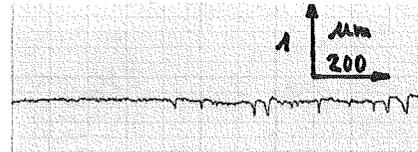
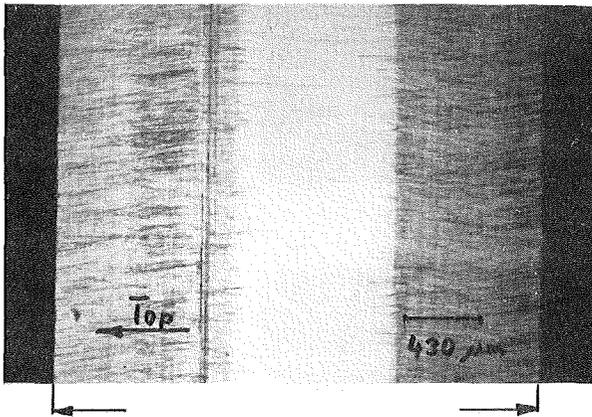
In Abb.42 sind Oberflächenbilder der Kolbenringe und die entsprechenden  $R_t$ -Schriebe aus dem Mittenbereich der Kolbenringoberfläche zusammengestellt. Deutlich ist die mit zunehmendem Einlauf breitere Ausbildung der tragenden Fläche im Bereich der Ringmitte zu erkennen. Anhand der  $R_t$ -Messungen ist die hohe Glättung der Laufsicht im Bereich der tragenden Flächen zu sehen, wobei die starke Glättung der Spitzen nach den ersten 15 Minuten auffällt. Mit Ende des Grobeinlaufs (90 min) hat sich eine tragende Oberfläche über etwa 30% der Ringbreite ausgebildet. Die aus den Verschleißversuchen bekannte, wesentlich langsamere Anpassung im Feineinlauf ist auch hier zu erkennen. In den weiteren 28,5 Stunden Vollastbetrieb hat sich die Tragbreite noch nicht einmal verdoppelt.



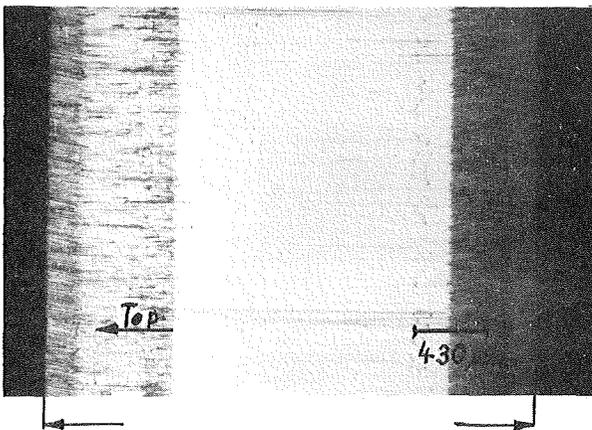
Neuzustand



15 min Anfahrverschleiß

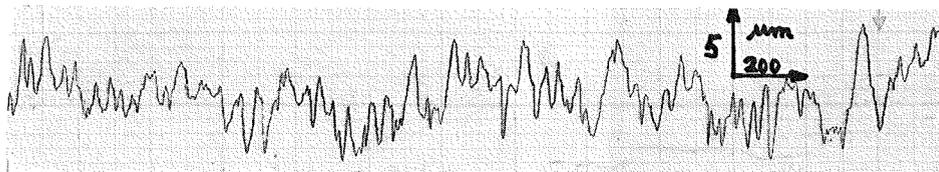


90 min Grobeinlauf

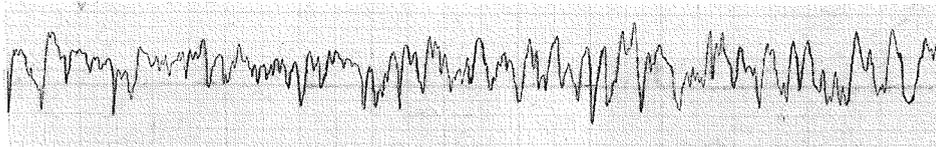


30 h Feineinlauf

Abb.42 Vergleich der Ringlauffläche von Motor D nach verschiedenen Einlaufphasen

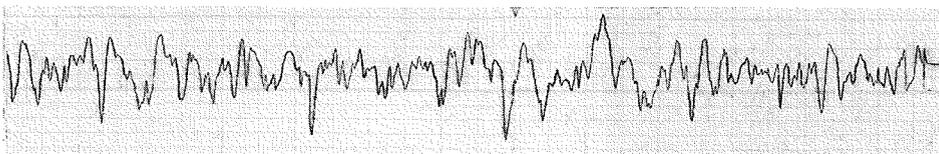


Neuzustand

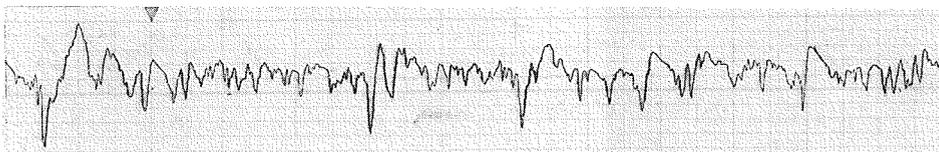


OT

15min Anfahr-  
verschleiß

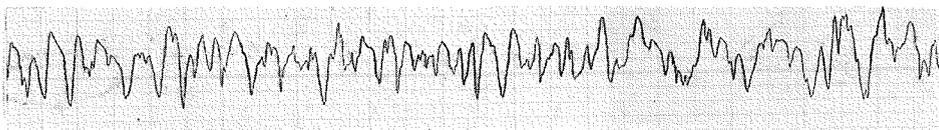


HM

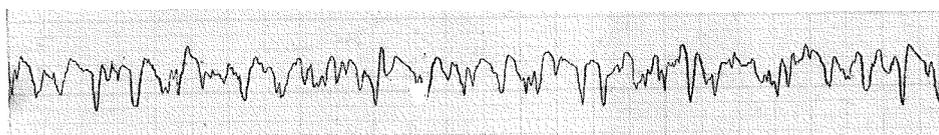


OT

90min Grob-  
einlauf

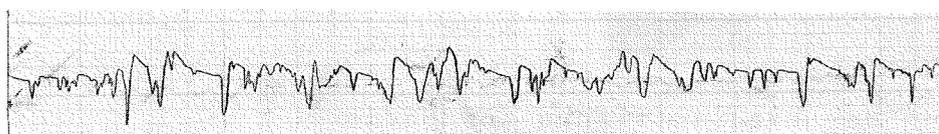


HM



OT

30h Fein-  
einlauf



HM

Abb. 43 Perthometerschriebe der Zylinderlaufbahn im Motor D in verschiedenen Einlaufphasen (Alle Schriebe gleicher Maßstab)

Die auf dem 4. Bild erkennbare außermittige Lage (bei diesem Doppeltrapezring nach unten verschoben) der tragenden Fläche ist wahrscheinlich auf Formabweichungen und Verformungen des Rings unter Gas- und Reibungskräften zurückzuführen. In Abb.43 sind aus den genannten Versuchen die zugehörigen Rauigkeitsschriebe der gebonderten Zylinderbüchsen auf der Druckseite in OT und Hubmitte zusammengestellt. Auch bei den Zylinderbüchsen ist zu erkennen, daß nach der Nullastphase im Anfahrverschleiß, bei der die ersten Rauigkeitsspitzen abgebaut wurden, im Vollastbetrieb eine zunehmende Glättung stattfindet. Der Verlauf dieser Glättung in OT und Hubmitte ist besser aus den in Abb.44 dargestellten Mikrotraganteilkurven zu erkennen.

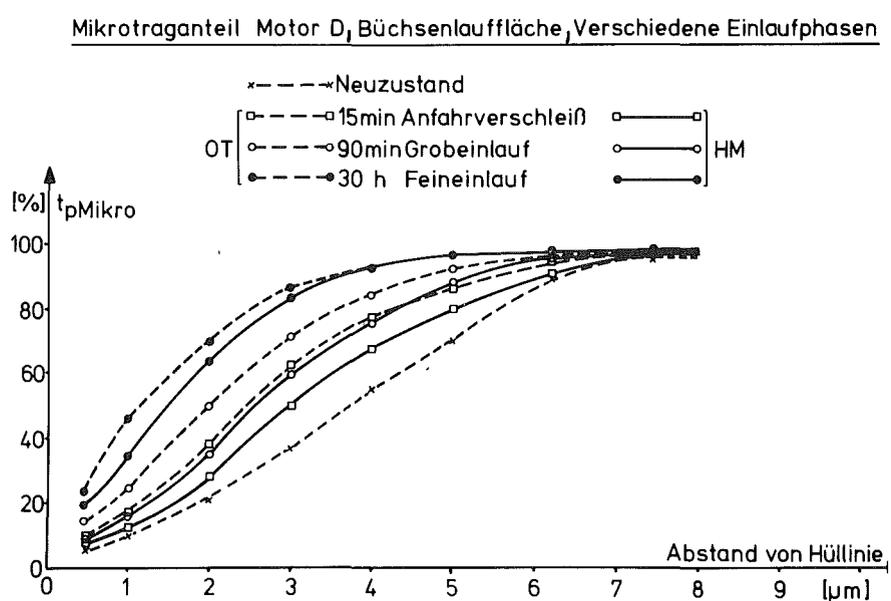


Abb.44 Verlauf des Mikrotraganteils der Zylinderlaufbahn von Motor D in OT und HM nach verschiedenen Einlaufphasen

Hier sieht man, wie mit zunehmendem Einlauf der Mikrotraganteil über der Profiltiefe zunimmt. Interessant ist, daß die Änderung von 90 Minuten auf 30 Stunden zwar noch deutlich feststellbar ist, der Zuwachs aber, ähnlich wie bei der tragenden Fläche des Kolbenrings, im Vergleich zu der langen Vollastlaufzeit gering ist. Typisch für Dieselmotoren ist auch die besonders im Grobeinlauf (15 und 90 min) geringere Glättung im Hubmittenbereich. Trägt man den Traganteil für die Schnittiefen 1 und 3 µm über

der Laufzeit auf, so sieht man, wie in Abb.45 dargestellt, daß er im Grobeinlauf stark, im Feineinlauf nur noch geringfügig zunimmt. Dieser Verlauf hat Ähnlichkeit mit dem Verlauf des Gesamtverschleißes der Kolbenring- und Büchsenlauffläche in Grob- und Feineinlauf. Hier zeigt sich der enge Zusammenhang zwischen Verschleißverhalten und Oberflächenveränderungen im Einlauf.

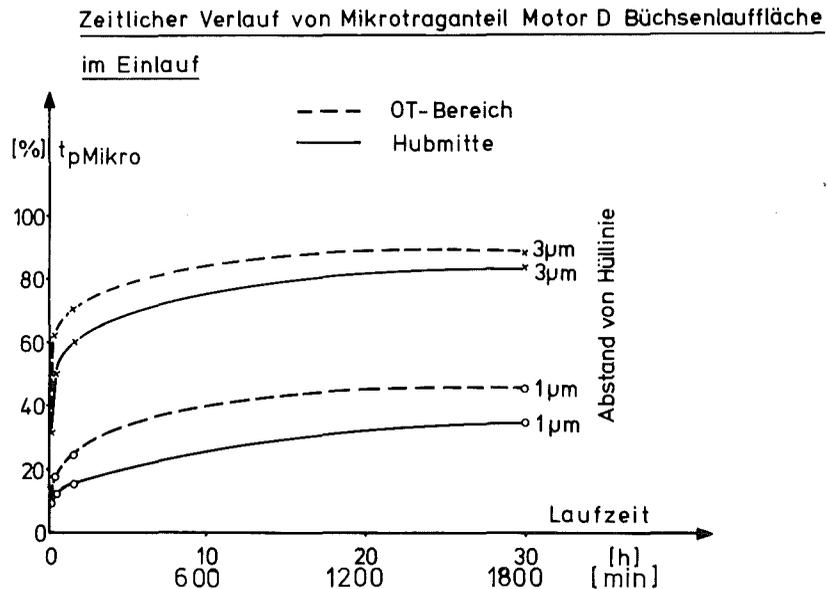


Abb.45 Verlauf des Mikrotraganteils der Zylinderlaufbahn von Motor D über der Motorlaufzeit

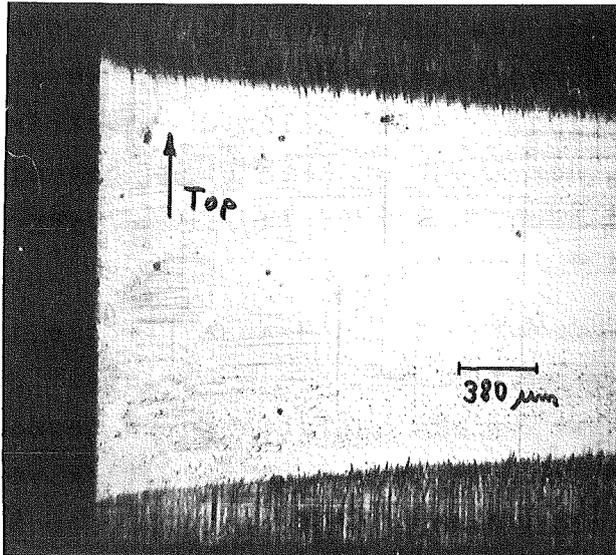
Im Folgenden sollen noch die weiteren wichtigen Erkenntnisse der Oberflächenuntersuchungen dargelegt werden. Auf den bei Motortyp D gefunden Zusammenhang zwischen progressivem Verschleißratenverlauf über längere Laufzeit und Makroschädigung der Ringlauffläche wurde bereits in Kapitel 4.2.2 ausführlich hingewiesen. Es fehlt aber noch die Beschreibung der typischen Oberflächenzustände von Kolbenringen und Büchsen bei konstanten Verschleißraten am Ende des Grobeinlaufs. Bei den Kolbenringlaufflächen zeigte sich in allen Fällen ein charakteristisches Tragbild, bei dem über den Umfang in unterschiedlicher Breite eine stark geglättete tragende Oberfläche zu erkennen ist. In den Fällen, in denen aufgrund des Gesamtabtrags diese Glättung noch nicht über die ganze Ringhöhe reicht (ballige Ringlauffläche), ist bei den meisten Ringen erkennbar, daß der Bereich der geglätteten tra-

genden Oberfläche nicht symmetrisch zur Ringmitte liegt, was durch Formabweichungen der Ringe und durch Verformungen unter Gasdruck und Reibungskräften hervorgerufen wird. Bei der Mehrzahl der untersuchten Doppeltrapezringe und bei allen Rechteckringen erfolgte die Verschiebung der Tragspur nach oben, bei einigen Doppeltrapezringen aber auch, wie z.B. in Abb.42 dargestellt, nach unten.

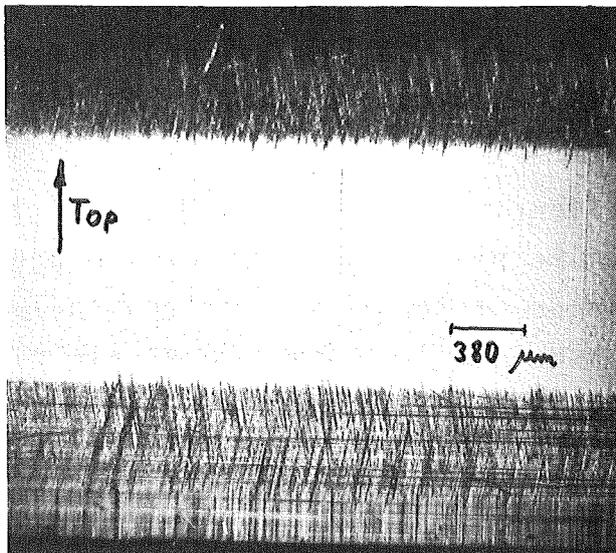
In Abb.46 ist von Motor C die Ringlauffläche in der Nähe vom Stoß und gegenüber vom Stoß nach dem Grobeinlauf dargestellt. Deutlich ist die Verschiebung der geglätteten tragenden Laufspur über die Ringmitte nach oben und die zum Stoß stark verbreiterte Tragspur zu erkennen. Diese verbreiterte Tragspur am Stoß bestätigt die auch theoretisch zu erwartende größere Beanspruchung durch erhöhte Andruckkräfte und erhöhte Temperatur [52] .

Charakteristisch für ein gutes Laufbild nach dem Grobeinlauf bei Chromringen ist die hellglänzende, stark geglättete Oberfläche der Tragspur ( $R_t$  ca. 0,1 bis 0,2  $\mu\text{m}$ ), die in konstanter Breite (mit Ausnahme des Stoßbereiches) über den ganzen Umfang reicht.

Auch bei den Kolbenringen mit molybdängespritzter Lauffläche wurde nach dem Grobeinlauf eine über den Umfang gleichmäßig ausgebildete Tragspur festgestellt. Allerdings war der Verschleiß bei Molybdänringen im allgemeinen höher als bei vergleichbaren Chromringen, wie auch die Verschleißmeßergebnisse in Kapitel 4.2.2 zeigen. Eine Ursache für diesen erhöhten Verschleiß liegt möglicherweise in der porösen Struktur der Molybdänlaufschicht.



Ringstoß



Ringmitte

Abb. 46 Lauffläche des obersten Kompressionsrings von Motor C in der Ringmitte und am Stoß nach dem Grobeinlauf

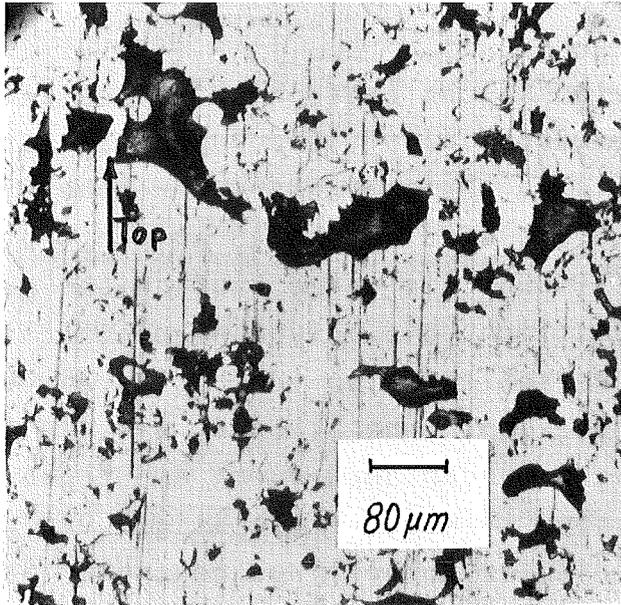


Abb.47 Ausschnitt der Lauffläche des molybdän-  
gespritzten obersten Kompressionsrings  
von Motor B nach dem Grobeinlauf  
(Maßstab 1:130)

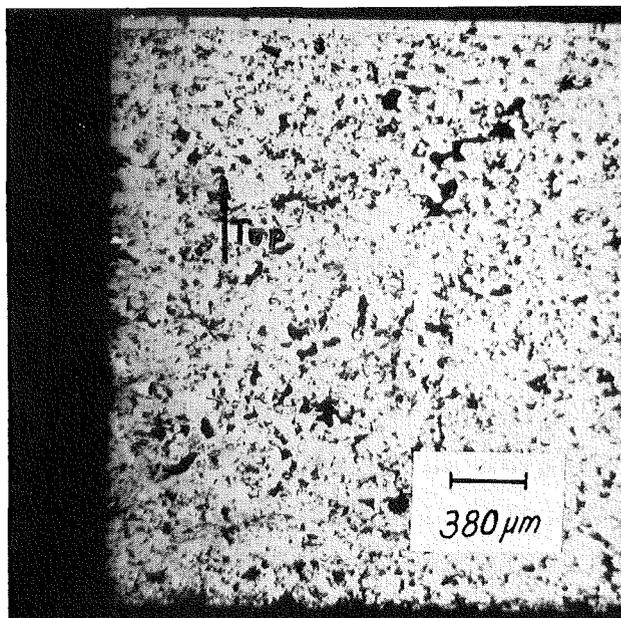
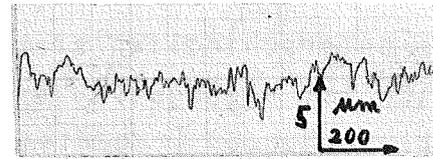
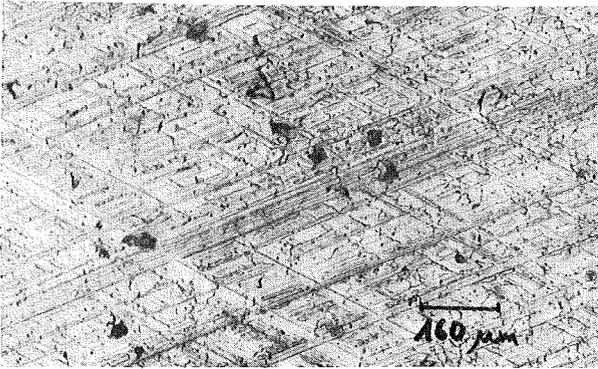


Abb.48 Lauffläche des molybdängespritzten  
obersten Kompressionsrings vom Motor B  
nach dem Grobeinlauf  
(Maßstab 1:26)

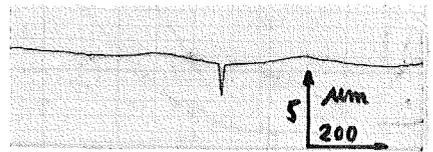
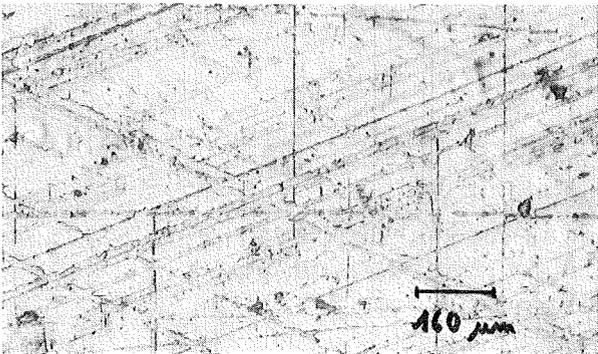
Abb.47 zeigt eine solche Laufschrift eines Kolbenrings von Motortyp B nach dem Grobeinlauf. Die Porosität ist anhand der dunklen Stellen im Bild gut erkennbar. Der hohe Einlaufverschleiß der Molybdänschicht wird in Abb.48 an der trotz ursprünglich balligem Ringprofil über die ganze Laufschrift reichenden tragenden Oberfläche deutlich. Die Molybdänlaufschichten ertragen die sehr hohen Verschleißraten von bis zu 25.000  $\mu\text{g/h}$ , wie z.B. bei Motor B gemessen, ohne Schäden, wie die Abb.47 und 48 zeigen. Diese Aussagen werden auch durch die Ergebnisse von molybdängespritzten Ringen im Motor F bestätigt. Das günstige Verhalten molybdängespritzter Kolbenringe gegenüber Schäden durch Brandspuren, aber auch der deutlich höhere Verschleiß, wird in der Literatur mehrfach berichtet [31,52,53] .

Faßt man die Ergebnisse der Oberflächenuntersuchungen an den Kolbenringen zusammen, so zeigt sich, daß nach dem Grobeinlauf bei weitgehend stabilisierten Verschleißraten eine tragende Fläche über den gesamten Ringumfang gebildet ist. Die Breite der Tragspur ist je nach Motortyp und Ringmaterial unterschiedlich hoch. Die außermittige Lage der Tragspuren zeigt den Einfluß von Formabweichung und Verformungen der Ringe unter Gasdruck und Reibungskräften, an die sie sich im Einlauf anpassen müssen. Diese Beobachtung gibt einen weiteren Hinweis dafür, daß der Kolbenring, wie die Einlaufuntersuchungen gezeigt haben, z.B. nicht nur durch Fahren im niedrigen Lastbereich vollständig eingefahren werden kann, da hier die maximalen Verformungen nicht auftreten.

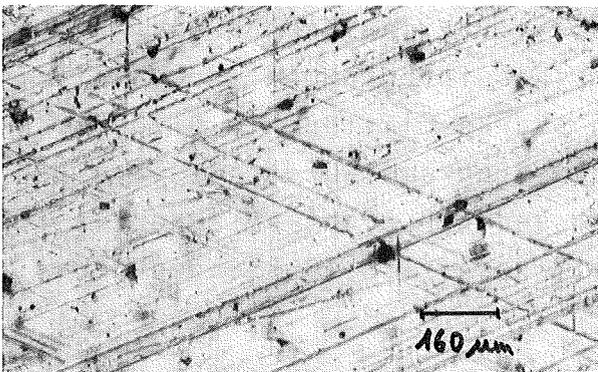
Die Oberflächenmessungen der Zylinderbüchse nach dem Grobeinlauf zeigen, wie aufgrund theoretischer Überlegungen bezüglich Belastung und Schmierung zu erwarten, im OT-Bereich eine höhere Glättung als im Bereich der Hubmitte (vgl. Abb.43/44 und Kap. 2.3.1). In Abb.49 sind Faxfilme und Perthometerschriebe der ungebonderten Büchsenlauffläche von Motor A im Neuzustand und nach dem Grobeinlauf dargestellt.



Neuzustand



Nach Grobeinlauf OT



Nach Grobeinlauf HM

Abb.49 Faxfilmbilder und Perthometerschriebe der Zylinderlaufbahn vom Motor A im Neuzustand und nach dem Grobeinlauf

Die unterschiedlich starke Glättung im OT- und im Hubmittenbereich ist hier gut zu erkennen und wird auch aus Abb.50 mit den entsprechenden Traganteilkurven ersichtlich.

Mikrotraganteil Motor A Büchsenlauffläche Neuzustand und Grobeinlauf

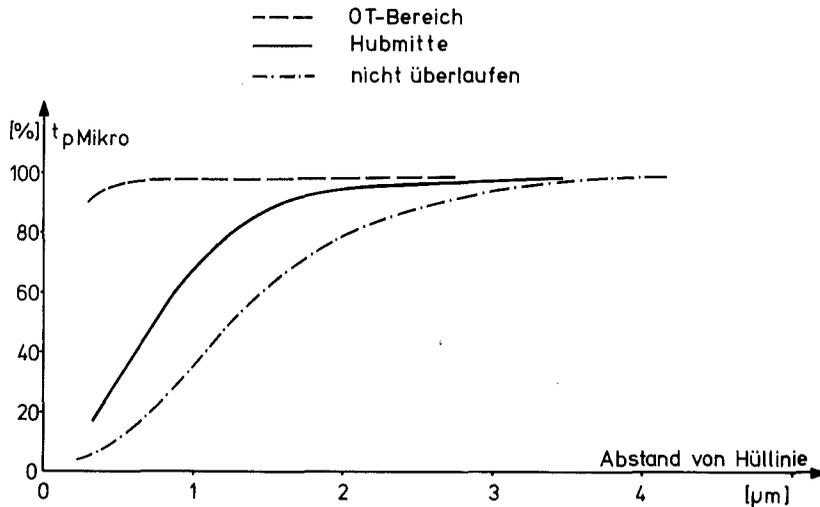
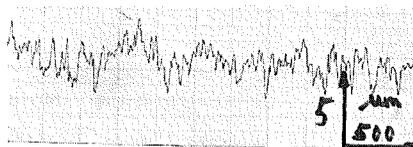
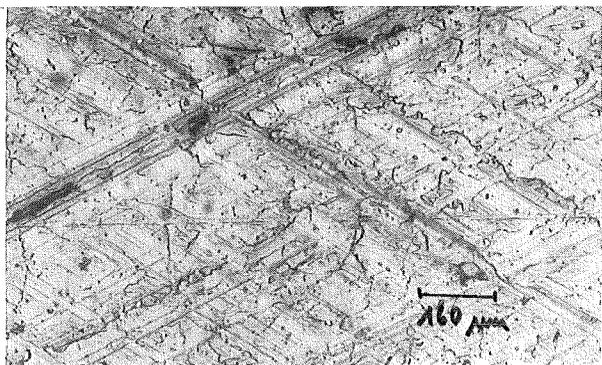


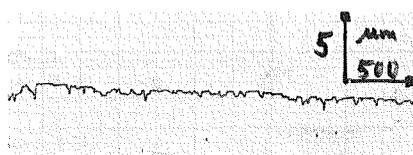
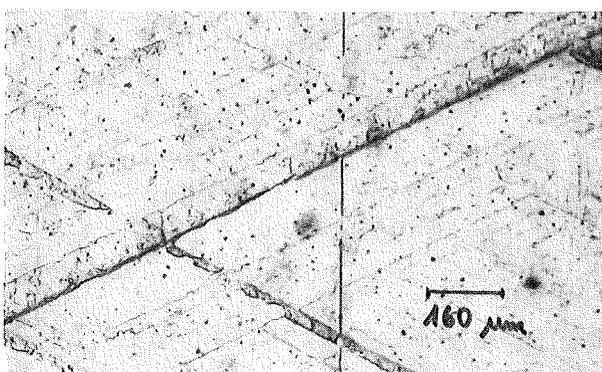
Abb.50 Verlauf des Mikrotraganteils der Zylinderlaufbahn von Motor A im Neuzustand und nach dem Grobeinlauf

Das zeigen auch die in Abb.51 dargestellten Faxfilmbilder und Perthometerschriebe der ungebonderten Oberfläche des Motortyps E.

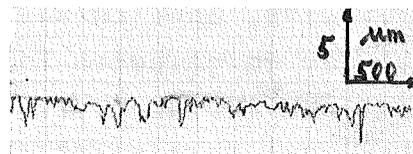
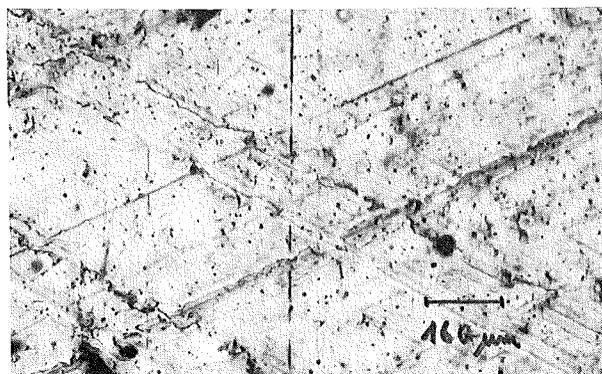
Ergänzend zu diesen Ergebnissen sind in Abb.52 Traganteilkurven aus dem OT-Bereich von Zylinderlaufbahnen des Motortyps F am Ende von verschiedenen Einlaufprogrammen dargestellt. Auch hier zeigt sich die typische starke Glättung im OT-Bereich am Einlaufende. Mit dem optimierten Programm wurde sie bereits nach 2 Stunden erreicht. Mit einem anderen nicht-optimierten Programm dagegen war der Traganteil noch nach 16 Stunden deutlich geringer.



Neuzustand



Grobeinlauf OT



Grobeinlauf HM

Abb.51 Faxfilmbilder und Perthometerschriebe der Zylinderlaufbahn vom Motor E im Neuzustand und nach dem Grobeinlauf

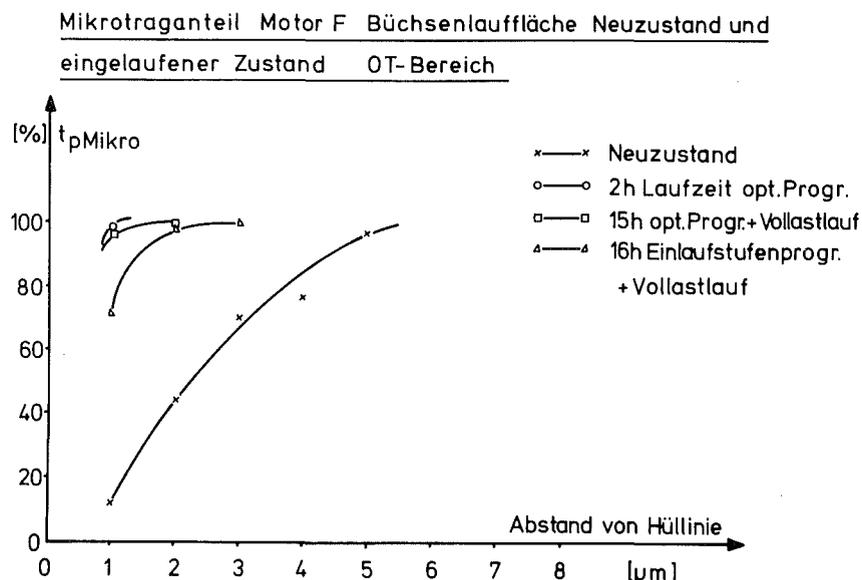


Abb.52 Verlauf des Mikrotraganteils der Zylinderlaufbahn von Motor F in OT nach verschiedenen Einlaufdauern und Programmen

Zusammenfassend läßt sich für den Oberflächenzustand der Zylinderbüchsen am Grobeinlaufende feststellen, daß sich ein ausgeprägt größerer Traganteil in OT als in Hubmitte ergibt. Die Größe des Traganteils ist aber je nach Motortyp verschieden, wie z.B. die Ergebnisse für Motor D und Motor A im Vergleich zeigen. Im Grobeinlauf wird, ähnlich wie bei den Kolbenringen, der wesentliche Anteil der im gesamten Einlauf erzielten Traganteilausbildung der Zylinderlaufbahn erreicht. Dies gilt vor allem für den OT-Bereich. Der Traganteil im Hubmitten-Bereich nimmt im Feineinlauf im allgemeinen noch zu.

Als ein interessantes Ergebnis der Oberflächenuntersuchungen ist noch anzumerken, daß bei verschiedenen Motortypen nach dem Einlauf, zusätzlich zu den typischen Unterschieden in OT und Hubmitte, eine örtlich stark unterschiedliche Traganteilausbildung der Zylinderlaufbahn zu erkennen war. Als extremes Beispiel kann hier Motortyp C gelten, der an der Zylinderbüchse an drei Stellen am Umfang über den Hub nach unten nach dem Einlauf Bereiche mit stark erhöhtem Traganteil bis zum völligen Abtrag der Honriefen aufwies, während die Nachbarbereiche noch eine normal eingelaufene Honstruktur zeigten. Auch bei Motor A konnte

festgestellt werden, daß an einigen Stellen, über Hub und Umfang verteilt, erhöhte Glättung stattgefunden hatte. Diese Beobachtungen bestätigen noch einmal den Einfluß des von Motor-konstruktion und Betriebsbedingungen abhängigen Verzugszustandes im Grob- und Feineinlauf.

#### 4.2.4 Auswirkungen der Einlaufoptimierung mit Hilfe des Verschleißverhaltens der Kolbenringe auf andere Motorbauteile

Im Prinzip müssen die Oberflächen aller gleitenden Teile eines Verbrennungsmotors einlaufen. Aufgrund der speziellen Beanspruchungen und Betriebsbedingungen ist außer an Kolbenring- und Zylinderlaufflächen nur noch an den Kolben und den Gleitlagern des Kurbeltriebs mit Einlaufproblemen zu rechnen. Die anderen Teile laufen i. a. ohne große Schwierigkeiten ein, wenn ihre konstruktive und schmiertechnische Auslegung richtig durchgeführt wurde.

Für die Kolben ist bei richtiger Auslegung aufgrund der relativ geringen spezifischen Belastung der Gleitbahnen am Kolbenhemd bei richtig gewähltem Kolbenspiel die Gefahr von Einlaufschäden gering. Sie werden außerdem zur Verbesserung des Einlaufverhaltens häufig mit einer speziellen, bleihaltigen Einlaufschicht versehen. Darüberhinaus werden Schäden an Kolben bereits frühzeitig auch durch erhöhten Kolbenringverschleiß angezeigt, wie die Ergebnisse von Radionuklidmessungen an Motortyp D zeigten. Hier traten durch zu geringes Spiel neuer Versuchskolben Freßerscheinungen an Kolben und Laufbüchse auf, die sich aber bereits in einem frühen Stadium durch stark progressiven Verschleiß der Kolbenringlauffläche anzeigten, obwohl für Leckgasmenge und Leistung zu diesem Zeitpunkt noch normale Werte gemessen wurden.

Bei den Haupt- und Pleuellagern des Kurbeltriebs ist normalerweise ebenfalls nicht mit einer negativen Auswirkung der Optimierung nach dem Kolbenringverschleiß zu rechnen, da sie bei richtiger Auslegung im hydrodynamischen Schmierzustand laufen. Falls während des Einlaufs dennoch örtlich eine Anpassung notwendig sein sollte, erfolgt diese aufgrund der sehr weichen

Lagerlaufschicht schnell und degressiv, wie umfangreiche Untersuchungen des Verschleißverhaltens von Gleitlagern mit Hilfe der Radionuklidmeßtechnik zeigten [54] .

Das unkritische Verhalten von Kolben und Gleitlagern im Einlauf wurde auch durch die während des gesamten Vorhabens durchgeführte Befundung der Versuchsmotoren nach der Demontage am Versuchsende bestätigt. Bei keinem Motor wurden Kolben- oder Lagerschäden gefunden, wenn man von den Riefen durch Schmutzpartikel absieht, die, wie in Kap. 4.1.5 beschrieben, bei Versuchen ohne Schmierölfilter zu beobachten waren. Auch die anderen Bauteile der demontierten Motoren zeigten keine Oberflächenschädigungen.

Um hier auch bei den weiteren Optimierungen sicher zu gehen, ist im Einlaufoptimierungssystem zur Überwachung der verschiedenen Bauteile nach dem Einlauf jeweils eine Demontage des Motors und Befundung der Oberflächen der Bauteile vorgesehen.

## 5. SYSTEM ZUR OPTIMIERUNG VON EINLAUFPROGRAMMEN

Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, muß das System zur Erreichung eines günstigen Verhältnisses von Nutzen und Aufwand in zwei Phasen ablaufen. In der ersten Phase wird mit einem festen Aufwand an Motoren und Bauteilen ein optimiertes Einlaufprogramm erstellt, dessen Optimierungsgrad je nach Motortyp unterschiedlich ist. Bei einem konstruktiv einlaufgünstig ausgebildeten Motor mit niedriger Belastung kann bereits in der Phase 1 ein Programm erstellt werden, dessen weitere Optimierung nicht

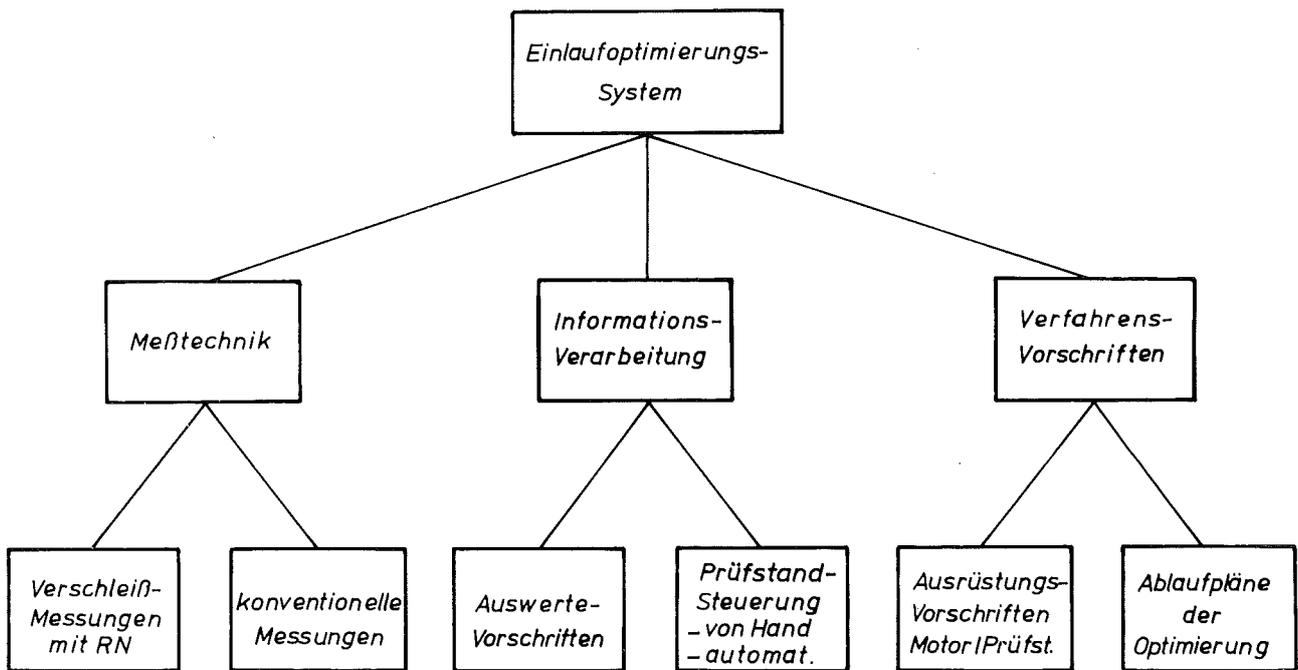
mehr sinnvoll ist. Stellt sich bei einem weniger einlaufgünstigen Motortyp jedoch heraus, daß das in Phase 1 erreichte Einlaufprogramm noch wesentlich verbessert werden kann, so kann mit einem aufgrund der Erfahrungen aus der Phase 1 und aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen festgelegten sinnvollen Aufwand die Optimierung zu einem optimalen Programm weitergeführt werden. Im Folgenden wird das Einlaufoptimierungssystem in seinem wesentlichen Aufbau in kurzer Form dargestellt, wobei die Phase 1 ausführlich behandelt wird und die wesentlichen Überlegungen zur Phase 2 erläutert werden.

### 5.1 Systemkomponenten und Einsatzbereich

In Abb.53 sind in einer Übersicht die Komponenten des Systems zusammengestellt. Das System ist unter Verwendung des Radionuklidmeßwagens oder einer firmeneigenen RN-Meßanlage für den Einsatz auf Prüfständen der Motorenhersteller eingerichtet. Es umfaßt Radionuklid- und konventionelle Meßtechnik (Prüfstand- und Motormeßdaten, Oberflächenmessungen), die erforderliche Informations- und Datenverarbeitung für die on-line Auswertung der Verschleißmeßdaten und die Prüfstandsteuerung von Hand oder mit Prozeßrechner (wenn eine entsprechende Einrichtung zur Verfügung steht) und alle notwendigen Vorschriften für die Ausrüstung der Motoren und Prüfstände, die Auswertung der Versuchsergebnisse und die erforderlichen Versuchsablaufpläne.

Im Anhang sind Listen für Ausrüstungsvorschriften und Datenverarbeitungsprogramme und ein Ablaufplan für die Optimierungsphase 1 beigefügt.

Das System ist in der konzipierten Form für alle Hubkolben-Dieselmotoren anwendbar, bei denen eine kontinuierliche Verschleißmessung der gesamten Kolbenringlauffläche nach dem in Kapitel 3.1 beschriebenen modifizierten Durchflußmeßverfahren möglich ist. Hier sind vor allem bei Motoren mit sehr großem Öl-volumen ( $>100$  l), das bei Einhalten der zulässigen Gesamtaktivitätsgrenzen eine zu geringe Meßempfindlichkeit des Durchflußmeßverfahrens verursacht, und bei Kreuzkopfmotoren ohne geschlossenen Ölkreislauf für den Zylinder-Kolbenringbereich Gren-



### Bausteine des Systems zur Einlaufoptimierung für Dieselmotoren

Abb.53 Übersicht über die Bausteine des Systems zur Einlaufoptimierung

zen gesetzt. Radionuklidverschleißmeßsysteme für solche speziellen Anforderungen sind in Arbeit, aber noch nicht einsatzbereit.

Außerdem ergeben sich bei solch großen und kostspieligen Motoren bei der Anwendung des Systems Schwierigkeiten in wirtschaftlicher Hinsicht. Hier muß bereits für die Phase 1 aufgrund der hohen Kosten für Versuchsteile und Laufstunden unter Beachtung der möglichen Einsparungen durch die Einlaufzeitverkürzung ein wirtschaftlich sinnvoller Aufwand abgeschätzt werden. Eine generelle Aussage über einen sinnvollen Aufwand ist in diesem Fall nicht möglich, da die einzelnen Einflußgrößen bei solchen Motoren zu unterschiedlich sind. Als Mindestaufwand sind jedoch zwei Neupaarungen zu betrachten, mit denen wenigstens die Basisversuche (vgl. Kapitel 5.2.2.4) gefahren werden sollten.

Die damit zu gewinnenden Informationen sind im selben Kapitel zu entnehmen.

### 5.2 Ablauf der Optimierungsphase 1

Der Ablauf der Optimierungsphase 1 teilt sich in die drei Abschnitte-Vorbereitung, Programmerstellung und Erprobung und Einführung-auf. In Abb.54 ist die Grobstruktur des Ablaufplans der Phase 1 dargestellt, wobei der Abschnitt der Programmerstellung in drei Arbeitspakete aufgeteilt ist.

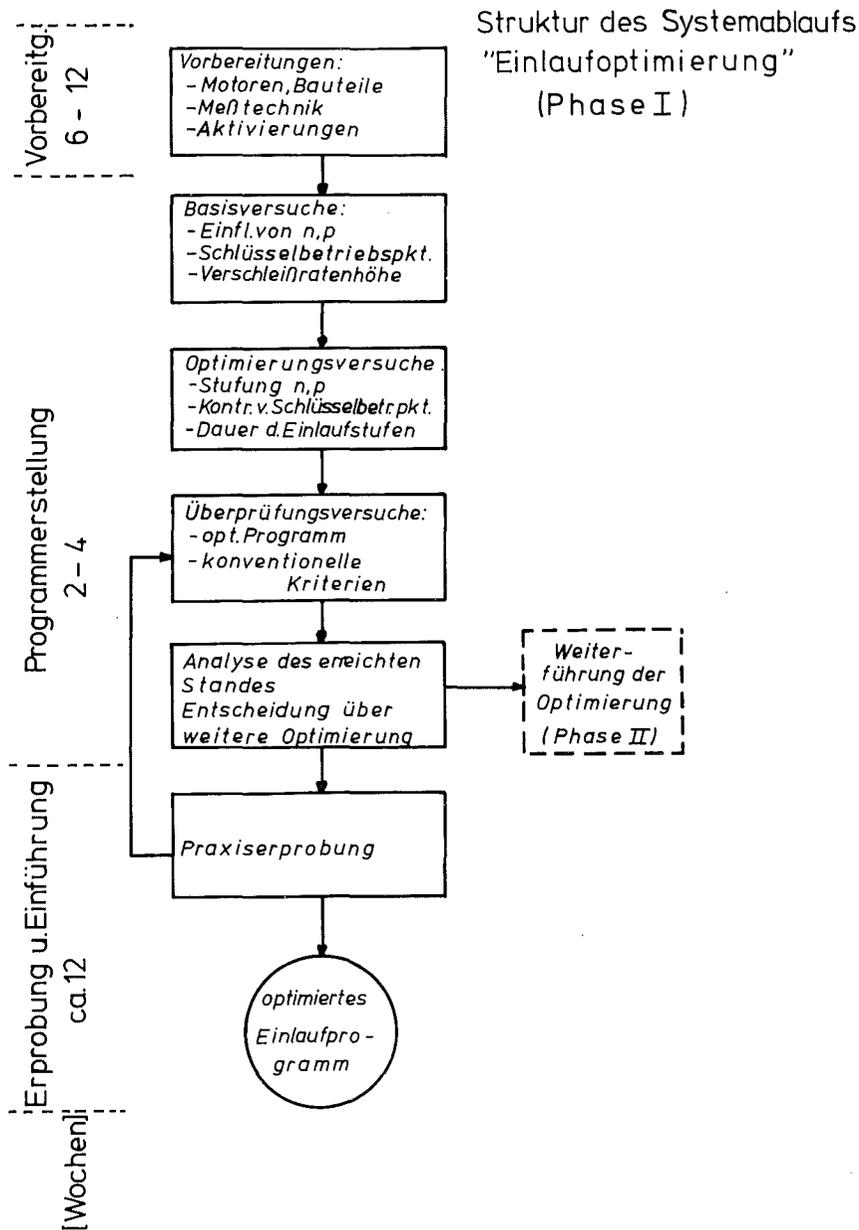


Abb.54 Grobstruktur des Ablaufplans der Systemphase 1

Im Anhang findet sich der zugehörige Ablaufplan mit Rahmenplänen für die Arbeitspakete der Programmerstellung und eine Motorenliste.

### 5.2.1 Vorbereitung

In der Vorbereitungsphase muß zunächst die Ausrüstung der zehn Versuchsmotoren, die Anforderung an die Prüfstands-ausrüstung, die Beschaffenheit der erforderlichen Versuchsteile und die ungefähre Terminplanung in enger Zusammenarbeit zwischen Motorenhersteller und dem die Optimierung durchführenden Institut abgesprochen werden. Hierbei kann für die Optimierungsphase 1 ein fester Aufwand an Prüfstandszeit und Personaleinsatz relativ genau angegeben werden. Nach dieser ersten Absprache bereitet das ausführende Institut die erforderlichen Aktivierungen vor und veranlaßt evtl. notwendige Anpassungsarbeiten für das Radionuklidmeßsystem an den jeweiligen Motortyp. Die Herstellerfirma stellt inzwischen die abgesprochenen Versuchsteile und Motoren bereit. Sie bereitet auch die notwendigen Prüfstände vor.

Nach Eintreffen der Versuchsteile werden die erforderlichen Aktivierungen vorgenommen, wobei sich die Termine hier nach Aktivierungsart und entstehenden Radionukliden richtet. Bei Aktivierungen von Molybdän ist aufgrund der relativ kurzen Halbwertszeit des entstehenden Meßnuklids eine genaue Terminierung der Aktivierung zu den Versuchen notwendig. Die vorgeschriebene strahlenschutzrechtliche Anmeldung der Versuche wird vom ausführenden Institut nach erfolgreicher Aktivierung vorgenommen.

Nach positiver Gütekontrolle der Aktivierungen erfolgt die Anfahrt des Meßwagens und der Aufbau der Meßanlagen. Bis zu diesem Zeitpunkt sind seit der ersten Kontaktaufnahme im günstigsten Falle ca. 6 Wochen vergangen, im Normalfall ist jedoch mit einer Zeit von 8 - 12 Wochen zu rechnen.

### 5.2.2 Programmerstellung

Die Phase der Programmerstellung gliedert sich in drei Abschnitte auf, die im Folgenden beschrieben werden.

### 5.2.2.1 Basisversuche

Nach Aufbau und Kontrolle der Meßeinrichtungen wird zunächst die Eichung der Radionuklidmeßanlage vorgenommen. Danach wird eine Kontrolle der Meßgenauigkeit beim vorliegenden Motortyp durchgeführt, indem in einem Blindversuch (Öl mit aktiven Verschleißteilchen wird im Versuchsmotor ohne aktiviertes Bauteil gefahren) Ablagerungen und Verschleißverlust gemessen werden. Diese bei jedem neuen Motortyp notwendige Kontrolle kann auch, wenn kein geeignetes Versuchsöl vorhanden ist, nach dem ersten Radionuklidversuch eingeschoben werden.

Nach diesem Kontrollversuch wird mit dem ersten Neumotor bzw. der ersten neuen Paarung das Verschleißverhalten im Grobeinlauf durch Fahren eines Betriebskennfeldes erfaßt. Die einzelnen Betriebspunkte des Kennfeldes werden bei jeweils konstanter Laststufe mit Drehzahlsteigerung gefahren, da bei dieser Vorgehensweise die hohen Lasten erst spät erreicht werden. Damit entspricht das Kennfeld einem sehr vorsichtigen Einlauf, so daß bei kritischen Motoren die Gefahr einer Schädigung gering ist.

Jeder Betriebspunkt sollte so lange gefahren werden, bis eine Stabilisierung der Verschleißraten erkennbar ist. In der Regel aber nicht länger als 30 Minuten, um bei ausreichender Anzahl von Betriebspunkten das Gesamtprogramm nicht zu lange werden zu lassen. Aus diesem Grund kann nur ein relativ grobes Raster im Betriebskennfeld angefahren werden. Es ergibt sich aus der Charakteristik des jeweiligen Motortyps. Je nach Größe der Drehzahl- bzw. Lastspanne müssen mehr Last- bzw. Drehzahlpunkte eingebaut werden. Die Laststufung reicht von Null- bis Vollast, die Drehzahlstufung muß in jedem Falle die niedrigste Vollastdrehzahl, die Drehzahl des maximalen Drehmoments, die Nenndrehzahl und, wenn aufgrund der Motorauslegung von dieser stark abweichend, auch die Maximaldrehzahl enthalten.

Nach dem Fahren des Kennfelds im Grobeinlauf wird ein Ölwechsel vorgenommen und das Kennfeld im Feineinlauf wiederholt. Daran schließt sich zur Kontrolle des Feineinlaufs noch eine Vollastkennlinie und bei Verwendung eines Neumotors auch ein Ölverbrauchslauf an. Der Basisversuch wird durch eine De-

montage und Befundung der Motorteile beendet.

Der gesamte Basisversuch wird mit einer weiteren neuen Paarung oder einem weiteren Neumotor wiederholt.

Aus den Versuchen können Grundinformationen für die Optimierung bezüglich der Höhe des Anfahrverschleißes, der Reaktionen auf Last- bzw. Drehzahlsteigerung, des Verschleißraten-niveaus des Motortyps im Grob- und Feineinlauf, der zeitlichen Änderungen der Verschleißraten und der Lage der Schlüsselbetriebsbedingung gewonnen werden. Nach der Demontage der Motoren am Versuchsende können Sollwerte der Oberflächen für den eingelaufenen Zustand erfaßt werden.

Bei Einsatz von Neumotoren können auch Aussagen über Verlauf und Einlaufendwerte von Leistung und Verbrauch an Kraftstoff und Öl erzielt werden.

#### 5.2.2.2 Optimierung von Zeit und Höhe der Programmstufen

Die folgenden Versuche müssen, um ein Maximum an Information zu geben, mit Neumotoren gefahren werden. Aufgrund der Ergebnisse der Basisprogramme wird das erste Stufenprogramm wie folgt festgelegt. Bei Nulllast wird die Drehzahl in Stufen auf die Drehzahl des Schlüsselbetriebspunkts gesteigert. Dann erfolgt die Steigerung der Last bis zur Volllast, wobei die Anzahl und Höhe der Stufen aufgrund des Verhaltens im Grobeinlaufkennfeld festgelegt wird. Jede Betriebspunktstufe wird so lange gefahren, bis eine deutliche Stabilisierung der Verschleißraten festgestellt wird. Bei konstantem Verschleißverhalten muß mindestens eine halbe Stunde gefahren werden. Ist eine weitgehend stabile Verschleißrate im Schlüsselbetriebspunkt erreicht, werden direkt die Drehzahlen der Basisversuche auf der Volllastkennlinie nachgefahren, um zu kontrollieren, ob auch die anderen Betriebspunkte eingelaufen sind (Untermengenverhalten). Daran schließt sich ein längerer Volllastlauf bei Nenndrehzahl an, um Leistungsentwicklung und spezifischen Kraftstoff- und Ölverbrauch (über eine Abtropfmethode) zu erfassen. Danach erfolgt die Demontage und Befundung der Oberflächen der wichtigen Motorteile. Aus diesem ersten Stufenprogramm werden einige Informationen für die

weitere Optimierung gewonnen. Die wichtigste ist die Bestätigung der Schlüsselbetriebsbedingung. Hierbei ist zu beachten, daß nur, wenn bei einer anderen Vollastdrehzahl ein erneuter Einlaufverschleiß eintritt, das Untermengenverhalten als nicht bestätigt angesehen werden sollte. Kurzer Verschleißratenanstieg mit stark degressivem Verlauf kann hier nicht gerechnet werden, da dies beim Umstellen von Betriebspunkten auch im eingelaufenen Zustand häufig festzustellen ist.

Eine weitere Überprüfung ist auch notwendig, wenn sich beim Fahren einer anderen Vollastbetriebsbedingung eine im Vergleich zum Schlüsselbetriebspunkt höhere aber konstante Verschleißrate einstellt. Hier kann, wie z.B. bei Motor D, im Einlauf und im eingelaufenen Zustand jeweils eine andere Betriebsbedingung die höhere Verschleißrate aufweisen. Die Schlüsselbetriebsbedingung wäre in diesem Fall trotzdem bestätigt (vgl. Abb.24).

Wird die Schlüsselbetriebsbedingung jedoch nicht bestätigt, so muß das nächste Stufenprogramm in ähnlicher Weise wie das erste Stufenprogramm auf die neue Schlüsselbetriebsbedingung ausgelegt werden. Danach wird kontrolliert, ob dadurch die alte Schlüsselbetriebsbedingung ebenfalls eingelaufen wird. Ist dies nicht der Fall, müssen beide Bedingungen ins Einlaufprogramm aufgenommen werden. Falls im Stufenprogramm 1 Betriebspunkte gefunden werden, deren Verschleißraten über mehr als 10 Minuten progressiv verlaufen und immer, wenn sich nach Demontage des Motors Schädigungen zeigen, muß das Stufenprogramm 1 mit einer vorsichtigeren Belastungssteigerung wiederholt werden.

Bei positiver Untermengenkontrolle und einwandfreiem Befund der Oberflächen wird das Stufenprogramm 2 wie folgt bestimmt. Alle Laststufen aus Programm 1, die nur einen geringen Einlaufbeitrag geleistet haben (Anfahrverschleißrate kleiner als die in den Basisversuchen festgestellte Maximalverschleißrate im Grobeinlauf), werden gestrichen. Ebenso werden die Betriebspunkte gestrichen, deren Endverschleißrate gleich der Anfangsverschleißrate der nächsten Laststufe ist. Die Laufzeiten der aus Stufenprogramm 1 beibehaltenen Betriebspunkte werden entsprechend dem Verschleißratenverlauf (Beginn der Stabilisierung) gekürzt.

Mit dem so festgelegten Einlaufstufenprogramm 2 wird der nächste Neumotor gefahren. Daran schließen sich wiederum eine Untermengenkontrolle, ein längerer Nennleistungslauf mit Ölverbrauchsmessung und die Demontage und Befundung der Oberflächen an. Aus den Ergebnissen des Stufenprogramms 2 wird in gleicher Weise das Stufenprogramm 3 erstellt. Nach erfolgreicher Beendigung dieses Programms können im Normalfall die Betriebspunkte für das optimierte Programm festgelegt werden.

Bei dieser iterativen Programmoptimierung werden einige grundsätzliche Erkenntnisse ausgenutzt: Progressive Verschleißraten zeigen die Möglichkeit einer Schädigung an. Degressive Verschleißraten zeigen trotz großer Verschleißratenhöhe an, daß eine Schädigung nicht wahrscheinlich ist. Dies muß in jedem Fall bei Versuchsende am demontierten Motorteil überprüft werden. Die minimal erforderliche Verschleißrate wird für jede Programmstufe aus der zuvor jeweils erreichten Maximalrate neu gebildet. Dabei können vor allem bei Molybdänlaufschichten extrem hohe Verschleißraten erreicht werden. Zusätzlich zu diesen Informationen werden wesentliche Kenntnisse über die Entwicklung von Leistung, spezifischem Kraftstoff- und Ölverbrauch bei der Stufenoptimierung gewonnen.

Sollte sich bei der Stufenoptimierung die Aufnahme eines neuen Schlüsselbetriebspunkts als nötig erweisen oder eine Wiederholung einer Programmstufe mit geringerer Belastungssteigerung aufgrund einer Schädigung nötig werden, so stehen im System zwei weitere Motoren dafür zur Verfügung. Werden sie nicht benötigt, so werden diese Motoren für den folgenden Test des optimierten Einlaufprogramms verwendet. Bei einlaufgünstig konstruierten Motoren kann sich bereits bei der Stufe 2 herausstellen, daß diese Motoren von Anfang an volllastfest sind. In diesem Fall stehen für den Test des optimierten Programms bis zu sechs Motoren zur Verfügung.

Am Ende des beschriebenen Versuchsabschnitts sind die einzelnen Betriebspunkte des optimierten Programms nach Dauer, Drehzahl und Last und Reihenfolge festgelegt, so daß mit der Erprobung des gesamten Programms begonnen werden kann. Bei diesem Test wird auch die Entwicklung der konventionellen Einlaufpara-

meter mitverfolgt.

#### 5.2.2.3 Test des optimierten Einlaufprogramms

Mit den aus der Stufenoptimierung verbleibenden Motoren wird das zuvor erstellte optimierte Programm gefahren, um zu kontrollieren, ob das Verschleißverhalten ohne Hinweis auf Schädigung bleibt und ob am Programmende im Rahmen der üblichen Streuungen die aus den Basisversuchen bekannten Verschleißraten erreicht werden. Jeder Motor wird im Anschluß an das optimierte Programm im Vollastbetrieb bei Nenndrehzahl weitergefahren, um Kenntnisse über die weitere Entwicklung der Verschleißraten im Feineinlauf zu erhalten.

Für die Erfassung der Entwicklung der konventionellen Einlaufkriterien ist es wichtig, daß mit Anfahren der Nennleistung im Grobeinlauf Leistung und spezifischer Kraftstoffverbrauch in kurzen Abständen erfaßt werden, um deren Entwicklung mitverfolgen zu können. Der Ölverbrauch muß nach einer Abtropfmethode über mindestens 3 Stunden gemessen werden, wenn nicht eine kontinuierliche Erfassung, z.B. nach der Tritiummethode möglich ist. Jeder Motor wird auch bei diesen Versuchen nach Versuchsende demontiert und der Oberflächenzustand aller kritischen Teile begutachtet. Sollten sich bei den konventionellen Kriterien starke Abweichungen ergeben, so ist in jedem Falle die Motoreinstellung und das Prüfstandsmeßsystem zu kontrollieren.

Nach Abschluß dieser Versuche kann die zur Erreichung der Betriebssicherheit notwendige Minimaldauer des Programms angegeben werden. Außerdem ist die Entwicklung der wesentlichen konventionellen Kriterien bekannt. Damit sind alle Voraussetzungen gegeben, um den erreichten Stand der Optimierung beurteilen zu können.

#### 5.2.3 Analyse des erreichten Standes der Optimierung und Entscheidung über eine Weiterführung

Nach Abschluß der Testläufe des optimierten Programms muß der erreichte Stand analysiert werden. Die Einlaufzeit und

und die erzielten Werte der konventionellen Einlaufkriterien müssen mit den vom Hersteller gewünschten Werten verglichen werden. Ist dieser mit dem erreichten Stand zufrieden, kann die noch nicht festgelegte Dauer des optimierten Programms für die Praxiserprobung und die anschließende Serienübernahme bestimmt werden. Dabei kann das Einlaufende je nach Wunsch der Herstellerfirma mit dem Erreichen der Betriebssicherheit oder aber, falls dies wirtschaftlich für sinnvoll erachtet wird, mit dem Erreichen bestimmter Mindestwerte für Leistung, Kraftstoff- und Ölverbrauch festgelegt werden. In Kapitel 6.1 wird die sich daraus ergebende unterschiedliche Einlaufdauer am praktischen Beispiel gezeigt.

Wenn die Analyse zeigt, daß der erreichte Stand nicht ausreicht, muß zunächst aufgrund der Meßergebnisse aus der Programmerstellungsphase abgeschätzt werden, welche Verbesserungen von einer weiteren Optimierung noch zu erwarten sind. Dabei müssen auch konstruktive bzw. schmiertechnische Maßnahmen in die Überlegungen einbezogen werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bilden zusammen mit wirtschaftlichen Gesichtspunkten des Motorenherstellers die Grundlage für die Weiterführung der Optimierung zum optimalen Einlaufprogramm, was in Kapitel 5.3 ausführlich erläutert wird.

#### 5.2.4 Programmerprobung

Für die Einführung des optimierten Programms in die Serie stellen die für das Einlaufsystem verwendeten zehn Motoren eine relativ kleine Stichprobe aus einer Grundgesamtheit von Motoren gleichen Typs dar. Obwohl, wie in Kapitel 2.3.2 gezeigt, eine Vielzahl von Einflußparametern das Einlaufverhalten jedes einzelnen Motors beeinflussen, ist, gestützt auf

die Erfahrungen während der Systemerstellung anzunehmen, daß diese relativ geringe Anzahl ausreicht, gravierende Mängel auszuschließen. Um die für eine Serieneinführung notwendige Absicherung zu erhalten, ist eine zusätzliche Erprobung ohne aktivierte Bauteile durch eine Einführung des optimierten Programms in den Versuchsbetrieb der Herstellerfirma im System vorgesehen. Hierbei kann von der Herstellerfirma entschieden werden, welchen Aufwand sie für sinnvoll erachtet, um die gewünschte Sicherheit für die Serieneinführung zu erhalten. Zusätzlicher Aufwand gegenüber den normalen Versuchseinläufen entsteht nur durch die umfangreiche Erfassung der interessierenden Meßdaten der Einlaufmotoren und die häufigeren Demontagen zur Oberflächenkontrolle. Zeigen sich bei dieser Praxiserprobung Nachteile, wie z.B. Ausfälle, die über die bisher gewohnte Ausfallrate hinausgehen, so muß zunächst beachtet werden, daß durch die im allgemeinen höhere Beanspruchung mit den optimierten Programmen auch eine verschärfte Gütesicherung z.B. gegen Fertigungsfehler gegeben ist. Deshalb muß erst eine genaue Analyse der Schadensursachen durchgeführt werden, bevor über eine Korrektur des Programms oder eine erneute Aufnahme der Optimierungsversuche entschieden wird.

Es bleibt anzumerken, daß bisher bei keiner der im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Optimierungen eine erneute Aufnahme der RN-Versuche zur Abänderung des optimierten Programms notwendig war.

### 5.3 Weiterführung der Optimierung zum optimalen Programm (Optimierungsphase 2)

Das grundsätzliche Vorgehen bei einer eventuell gewünschten Weiterführung der Optimierung des optimierten Einlaufprogramms in der Optimierungsphase 2 ist in Form eines Blockdiagramms in Abb.55 dargestellt. Wie daraus hervorgeht, müssen zunächst die möglichen Grenzen einer weiteren Optimierung aufgrund der vorliegenden Meßergebnisse der Phase 1 abgeschätzt werden. Danach kann der für das Erreichen dieser Grenze notwendige Aufwand ab-

geschätzt und in Relation zu den zu erwartenden Einsparungen mit dem optimalen Programm gesetzt werden.

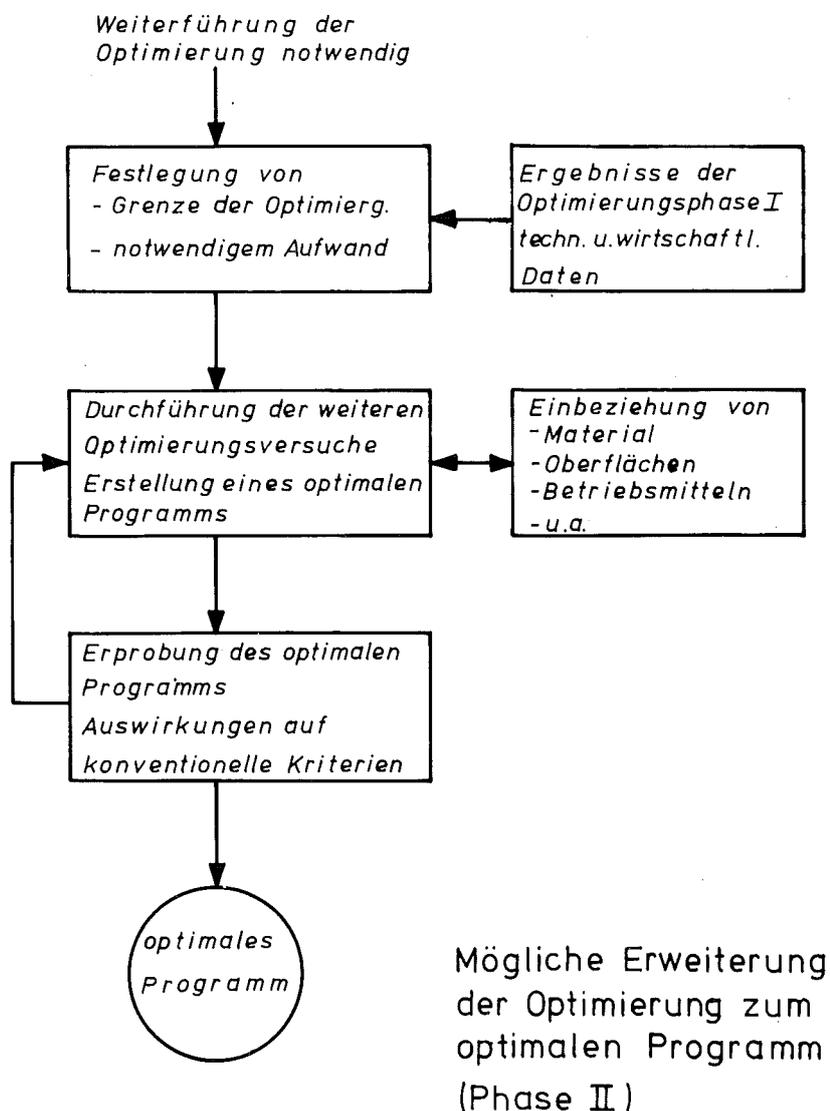


Abb.55 Übersicht über den Ablaufplan der Systemphase 2

Dabei müssen sowohl wirtschaftliche als auch technische Überlegungen einbezogen werden. Mit dem solchermaßen festgelegten Auf-

wand kann die Weiterführung der Versuche auf der Basis der Ergebnisse aus der Optimierungsphase 1, ähnlich wie bei den in Kapitel 5.2.2.2 beschriebenen Optimierungen der Betriebspunktstufungen bezüglich Reihenfolge, Höhe und Zeit, erfolgen. Auch in Phase 2 folgt dann eine Kontrolle des optimalen Programms und der konventionellen Kriterien, bevor nach einer Praxiserprobung das erstellte optimale Programm in die Serie eingeführt werden kann.

Im Gegensatz zur Phase 1, bei der von einem konstruktiv fest vorgegebenen Motortyp ausgegangen wird, muß in der Phase 2 sowohl die konstruktive Auslegung des Motors, z.B. bezüglich Material und Oberflächen, als auch die Auswahl des eingesetzten Schmiermittels in die Überlegungen einbezogen werden. Hierbei kann sich ein erheblicher Mehraufwand ergeben, der bei der Nutzen-Kostenanalyse berücksichtigt werden muß.

Auf eine detaillierte Ausarbeitung der weiterführenden Optimierungsphase 2 wurde im Rahmen dieses Vorhabens verzichtet, da die personelle und finanzielle Kapazität für eine Bearbeitung beider Phasen nicht ausreichte. Die Ergebnisse der im Rahmen der Erstellung der Phase 1 durchgeführten Einlaufoptimierungen haben gezeigt, daß auch mit der Phase 1 allein in den meisten Fällen für die Herstellerfirmen zufriedenstellende Einlaufprogramme erzielt werden können. Die Erstellung der Phase 2 mit den umfangreichen Vorarbeiten zur Einbeziehung von Konstruktion, Material und Schmiermittel kann deshalb ohne besonderen Zeitzwang in den nächsten Jahren erfolgen.

## 6. BEWAHRUNG DES SYSTEMS IM PRAKTISCHEN EINSATZ

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse von bereits durchgeführten Optimierungen im Rahmen der Entwicklung der Systemphase 1 zusammengefaßt. In je einem Abschnitt werden die erreichten optimierten Programme und die damit bei einigen Motortypen bereits vorliegenden Ergebnisse der Praxiserprobung bezüglich der konventionellen Einlaufkriterien dargestellt.

### 6.1 Bereits erstellte optimierte Einlaufprogramme

In Tafel 7 sind die wesentlichen Kenngrößen der bisher erstellten optimierten Programme im Vergleich zu den üblichen Firmenprogrammen dargestellt. Bei Motor B hätte sich ein optimiertes Programm ergeben, das, bei vier Betriebspunkten, 40 Minuten gedauert hätte, wenn allein das Kriterium der Betriebssicherheit ausschlaggebend gewesen wäre. Da die Herstellerfirma jedoch auch eine Stabilisierung der konventionellen Einlaufkriterien Leistung und spezifischer Verbrauch wünschte, ergab sich eine Programmdauer von 120 Minuten. Mit diesem um 50% kürzeren Programm werden zusätzlich gegenüber dem herkömmlichen Versuchseinlaufprogramm günstigere Ergebnisse der konventionellen Einlaufkriterien erreicht. Auch die durch Reduktion der Betriebspunktwechsel von 48 auf 4 vereinfachte Programmstruktur bietet besonders im Hinblick auf Automatisierung der Einlaufprozedur Vorteile.

Bei den Motoren C und D konnte eine Verkürzung um 35 bzw. 40 Minuten erreicht werden. Auch hier liegen günstige Erfahrungswerte aus der Praxiserprobung vor. Eine weitere Verkürzung des Programms durch Erweiterung der Optimierung zum optimalen Programm scheint bei Motor C möglich.

Die optimierten Programme haben in allen Fällen erhebliche Vorteile bezüglich Zeitdauer und konventionellen Einlaufkriterien erbracht. In einem Fall konnte der Programmaufbau erheblich vereinfacht werden. Diese guten Erfolge der ersten Optimierungen, die noch im Rahmen der Systemerstellung durchgeführt wurden, deuten die hohen Gewinne, die mit einer solchen gezielten Opti-

Motortyp	optimiertes Einlaufprogramm		Firmeneinlaufprogramm		Anmerkungen
	Dauer [min]	Anzahl d. Betriebs- punkte	Dauer [min]	Anzahl d. Be- triebspunkte	
B	120	4	240	48	Stabilisierung der konventionellen Kri- terien
	40	4	-	-	Betriebssicherheit
C	55	6	90	4	Betriebssicherheit
D	50	6	90	4	Betriebssicherheit
F	50	3	Funktions- und Ein- stelllauf ca. 35 min		Stabilisierung der konventionellen Kri- terien
	25	3	-	-	Betriebssicherheit

Tafel 7:

Vergleich von optimierten u. firmenüblichen Einlaufprogrammen für verschiedene Motortypen

mierung erreicht werden können, an. Sie zeigen jedoch auch, daß die konventionell erstellten Firmenprogramme von einem Optimum noch recht weit entfernt sind.

## 6.2 Praktische Bewährung der optimierten Einlaufprogramme

Für die Motorentypen B, C und D liegen Ergebnisse aus der Praxiserprobung mit den optimierten Programmen vor.

Für Motor B wurden aus einer Vielzahl von Versuchseinläufen 16 Versuche ausgewählt, die motor- und prüfstandseitig direkt vergleichbar sind. In Abb.56 sind die Ergebnisse der konventionellen Einlaufkriterien für das firmenübliche Versucheinlaufprogramm (4 h Dauer/48 Betriebspunktwechsel) eingetragen.

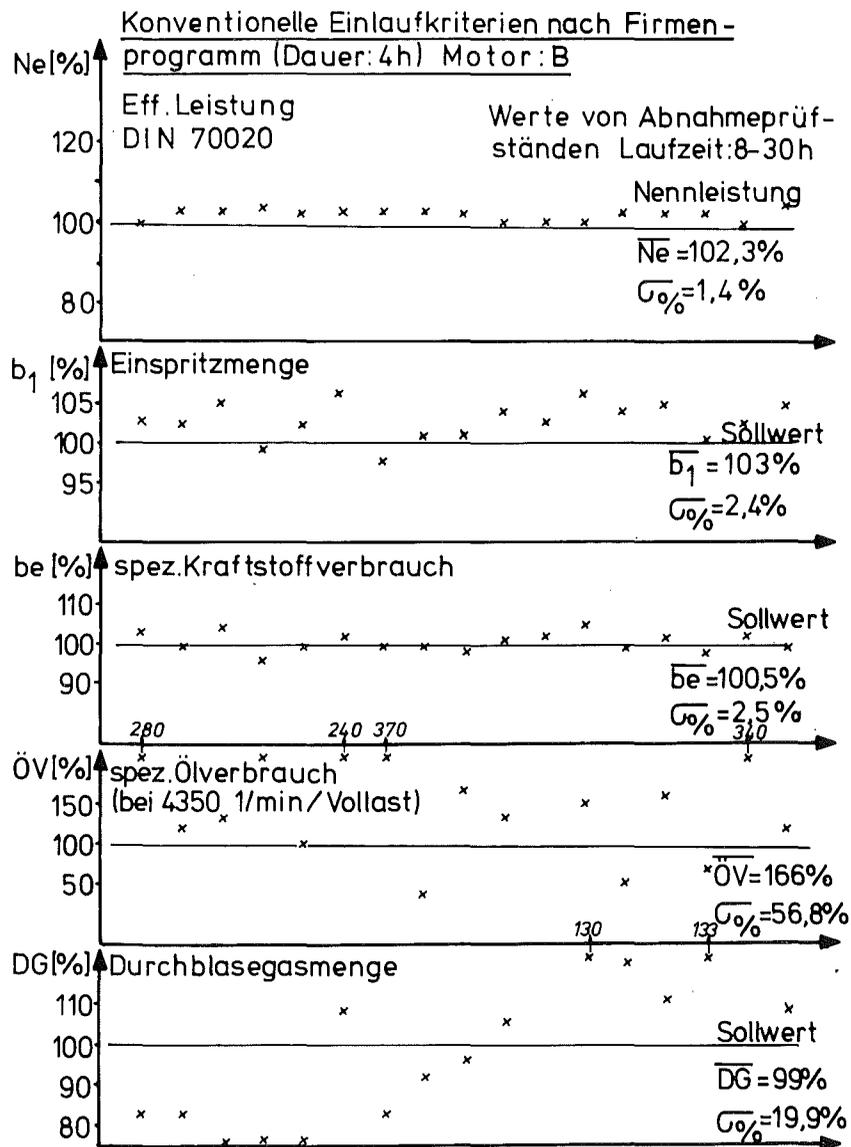


Abb.56 Entwicklung der konventionellen Kriterien nach dem Firmeneinlaufprogramm für Motor B (Werte von Abnahmeprüfständen)

Diese Motorwerte wurden auf speziellen Abnahmeprüfständen gemessen, wobei die Motoren frühestens nach 8. spätestens nach 30 Laufstunden auf diese Prüfstände kamen. Nach dieser Laufzeit erreichten die 16 ausgesuchten Motoren im Mittel 102,3% der angegebenen Nennleistung bei 100,5% des Sollwerts des spezifischen Verbrauchs. (Als Sollwert gilt im Folgenden immer der seitens der Firma für den eingelaufenen Zustand angegebene Wert.)

Diese geringe Mehrleistung von 2,5% ist wahrscheinlich auf eine mit im Mittel 103% zu hohe Einspritzmenge zurückzuführen, da der Mittelwert des spezifischen Verbrauchs bei 100,5% liegt. Die prozentualen Standardabweichungen (6 %) waren kleiner 2,5%. Der spezifische Ölverbrauch lag mit 166% erheblich über dem minimalen Sollwert. Auch die prozentuale Standardabweichung ist mit ca. 57% sehr hoch. Die Durchblasegasmenge erreichte im Mittel den Sollwert. Die Standardabweichung liegt bei 20%.

In Abb.57 sind die Ergebnisse von 6 ebenfalls auf Abnahmeprüfständen gefahrenen Vergleichsmotoren dargestellt, die mit dem optimierten Programm (2 h Dauer/4 Betriebspunktwechsel) eingefahren wurden. Eine größere Anzahl stand zum Vergleich leider nicht zur Verfügung, da durch eine inzwischen erfolgte Serienumstellung auf modifizierte Einspritzdüsen und Vorkammern die Vergleichbarkeit bezüglich Leistung und Verbrauch nicht mehr gegeben war. Die effektive Leistung lag mit 106,5% im Mittel um 4% höher, wobei die Einspritzmenge mit 102,5% derjenigen der nach dem Firmenprogramm eingelaufenen Motoren entspricht. Entsprechend liegt der spezifische Verbrauch mit 97% deutlich geringer als beim Firmeneinlaufprogramm, was einer Wirkungsgradverbesserung von ca. 3,5% entspricht. Die prozentuale Standardabweichung liegt mit 2,5% in derselben Größenordnung wie beim Firmenprogramm. Der spezifische Ölverbrauch war mit 85% des Sollwerts nur etwa halb so hoch, wobei auch die prozentuale Standardabweichung mit 17,3% erheblich günstiger liegt. Die Leckgasmenge liegt mit 93%, unter Berücksichtigung der Standardabweichung von 8%, im gleichen Bereich wie bei den nach dem Firmenprogramm eingelaufenen Motoren.

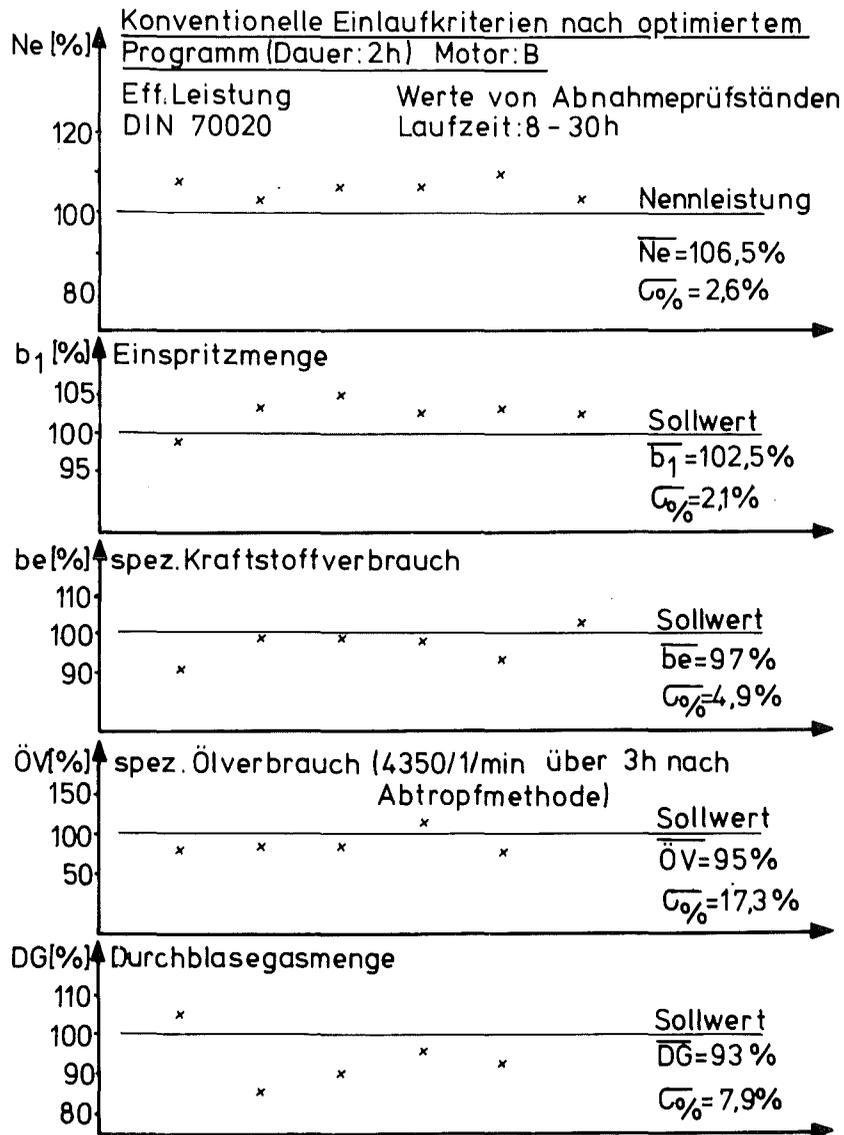


Abb.57 Entwicklung der konventionellen Kriterien nach dem optimierten Einlaufprogramm für Motor B (Werte von Abnahmeprüfständen)

Um die bisher gewonnenen Aussagen zu ergänzen, wurden noch 8 weitere Motoren, die ebenfalls nach dem optimierten Programm eingefahren wurden, zum Vergleich herangezogen.

Sie wurden allerdings, im Unterschied zu den bisher gezeigten Versuchsmotoren, auf normalen Versuchsprüfständen gefahren. Die Meßwerte, die bei diesen Motoren für die effektive

Leistung, die Einspritzmenge und den spezifischen Verbrauch bereits am Ende des optimierten Einlaufprogramms nach 2 h Laufzeit und für den Ölverbrauch und die Leckgasmenge nach 3 bis 8 h gemessen wurden, sind in Abb.58 eingetragen.

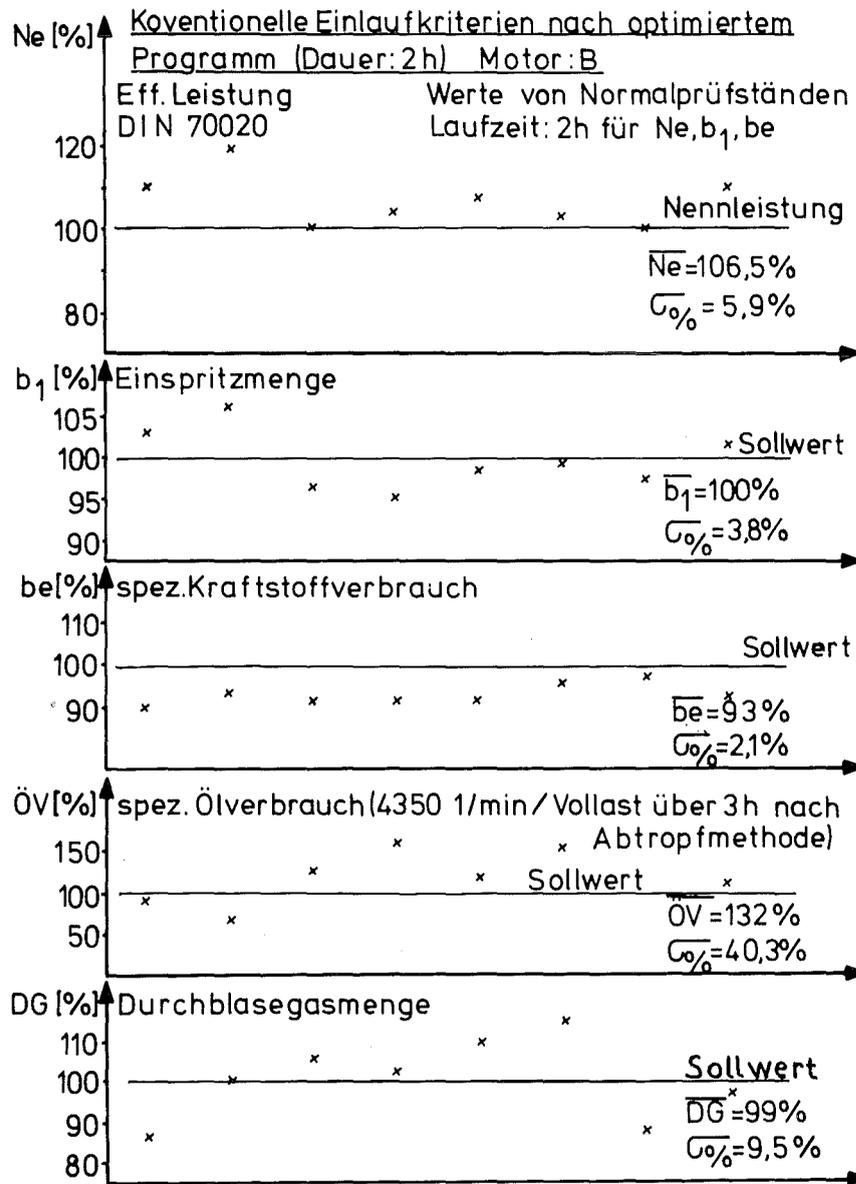


Abb.58 Entwicklung der konventionellen Kriterien nach dem optimierten Einlaufprogramm für Motor B (Werte von normalen Versuchsprüfständen)

Sie sind mit den Werten der Abnahmeprüfstände vergleichbar, wobei etwas größere Streuungen wegen der Normal-Prüfstände zu erwarten sind. Außerdem muß die deutlich geringere Laufzeit dieser Motoren berücksichtigt werden. Vergleicht man die Meßdaten, so ergibt sich, daß bei diesen Motoren die Leistung im Mittel ebenfalls 106,5% beträgt, bei allerdings etwa doppelt so großer Standardabweichung. Die Einspritzmengen lagen im Mittel bei nur 100%, so daß der spezifische Verbrauch mit 93% (Standardabweichung 2,1%) noch günstiger liegt als auf den Abnahmeprüfständen. Wahrscheinlich ist dieser trotz geringerer Laufzeit zusätzliche Gewinn auf den Normalprüfständen auf Abweichungen z.B. im Auspuffsystem zurückzuführen. Insgesamt bestätigen sich jedoch die günstigen Werte des optimierten Programms auf den Abnahmeprüfständen. Der spezifische Ölverbrauch liegt mit 132% erheblich höher als beim optimierten Programm auf den Abnahmeprüfständen aber immer noch wesentlich geringer als beim Firmeneinlaufprogramm. Hier ist wahrscheinlich das im Mittel frühere Fahren des Ölverbrauchlaufs die Ursache. Eine möglicherweise weniger sorgfältige Durchführung der Abtropfmeßmethode dürfte für die unterschiedlich hohen Standardabweichungen verantwortlich sein. Die Leckgasmenge ist unter Berücksichtigung der Streuungen auch hier in etwa gleich geblieben.

Zusammenfassend zeigt sich für den Motor B, daß die nach dem optimierten Programm eingelaufenen Motoren deutlich höhere Leistungswerte bereits am Ende des Einlaufprogramms erreichen. Der Leistungsgewinn ist nicht auf erhöhte Einspritzmengen zurückzuführen, so daß auch der spezifische Verbrauch deutlich geringer ist. Auch der spezifische Ölverbrauch ist bei den Motoren nach dem optimierten Einlaufprogramm erheblich niedriger. Die Leckgasmenge zeigt, da sie, wie bereits festgestellt, kein Einlaufkriterium ist, erwartungsgemäß keinen wesentlichen Unterschied. Die Unterschiede bei Leistung und spezifischem Verbrauch lassen sich durch eine Verbesserung der Reibleistung der Motoren erklären. Dies deutet ebenso, wie die günstigen Ölverbrauchswerte, auf eine verbesserte Anpassung der gleitenden Oberflächen (Kolben-

ringe, Zylinder, Gleitlager)hin. Leider ist eine genauere Analyse der Ursachen seitens der Herstellerfirma bisher nicht durchgeführt worden, so daß eine exakte Angabe darüber nicht möglich ist.

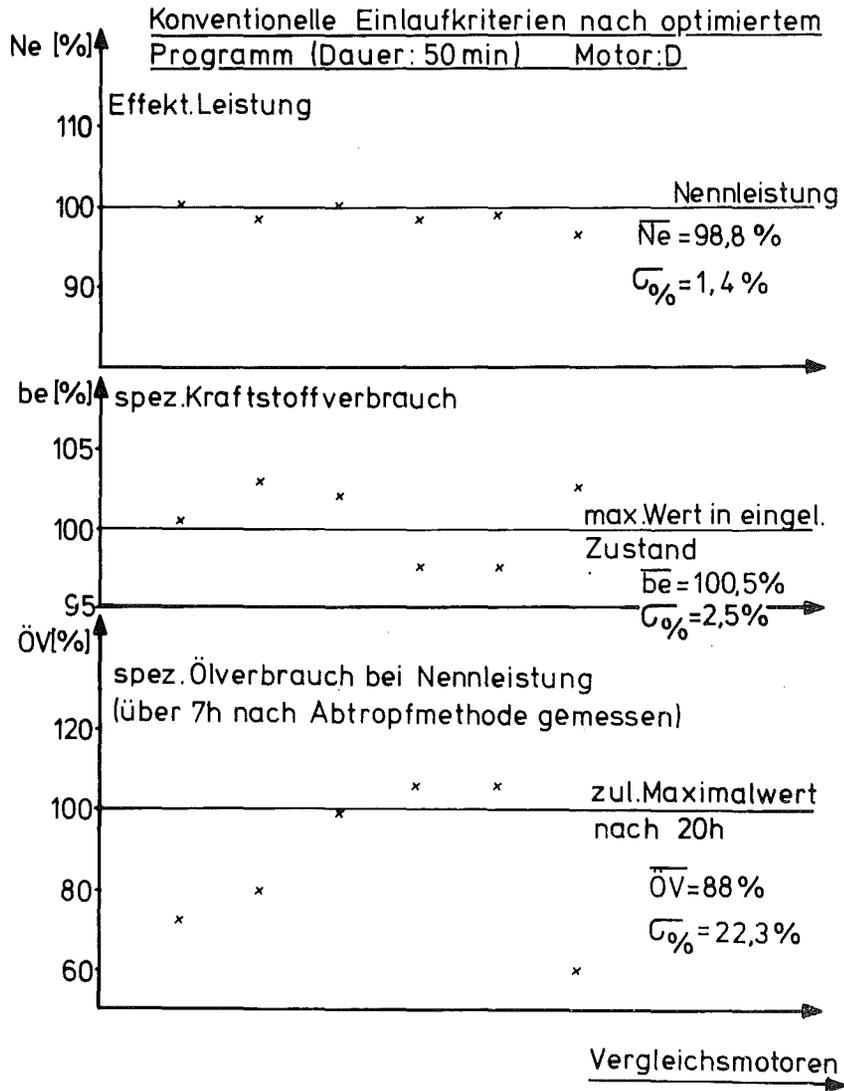


Abb.59 Entwicklung der konventionellen Kriterien nach dem optimierten Einlaufprogramm für Motor D

In Abb.59 sind Ergebnisse der Praxisversuche von 6 Motoren des Typs D dargestellt, die 50 Minuten nach einem optimierten Programm eingefahren wurden. Leistung und spezifischer Verbrauch wurden unmittelbar nach Einlauf gemessen, der Ölverbrauch über weitere 7 h nach einer Abtropfmethode bestimmt. Die Leistung lag im Mittel um 1,2% unter der Nennleistung, der spezifische Kraftstoffverbrauch geringfügig über 100%, wobei auch bei diesem Motor die prozentuale Standardabweichung kleiner als 2,5% lag. Beide Werte zeigen an, daß dieser Motortyp mit dem optimierten Programm (auf Betriebssicherheit ausgelegt) noch nicht voll eingelaufen ist. Dies bestätigen auch die in Kap.4.2.3.2 ausführlich dargestellten Ergebnisse der Oberflächenuntersuchungen, die noch eine zusätzliche Traganteilerhöhung im Feineinlauf aufzeigten. Der spezifische Ölverbrauch nach 8 h lag mit 88% bei einer prozentualen Standardabweichung von 22% unter dem für diesen Motortyp zulässigen Maximalwert nach 20 h, der allerdings relativ hoch angesetzt ist, wie Versuche mit zwei weiteren Motoren gezeigt haben, bei denen der Einlauf nach dem optimierten Programm erfolgte und Leistungsverhalten und Ölverbrauch über längere Laufzeiten verfolgt wurden. Dabei zeigte sich eine endgültige Stabilisierung der Nennleistung bei 100% bei einem spezifischen Verbrauch von 97,5% nach 20 Stunden. Der Ölverbrauch erreichte erst nach 40 bzw. 100 Stunden stabile Werte bei 60% des maximal zulässigen Ölverbrauchs.

In Abb.60 sind Ergebnisse der Praxiserprobung des Motortyps C nach dem Einlauf mit dem optimierten Programm dargestellt. Die Leistung erreicht nach 55 Minuten im Mittel bereits die Nennleistung bei einer prozentualen Standardabweichung von weniger als 1%. Dabei wird der maximal zulässige Sollwert für den spezifischen Kraftstoffverbrauch mit 96% (Standardabweichung 2,5%) deutlich unterschritten. Auch der Ölverbrauch nach 8 Stunden ergibt mit im Mittel 52% des maximal zulässigen Werts sehr günstige Werte, wobei auch die Standardabweichung mit 11% relativ gering ist.

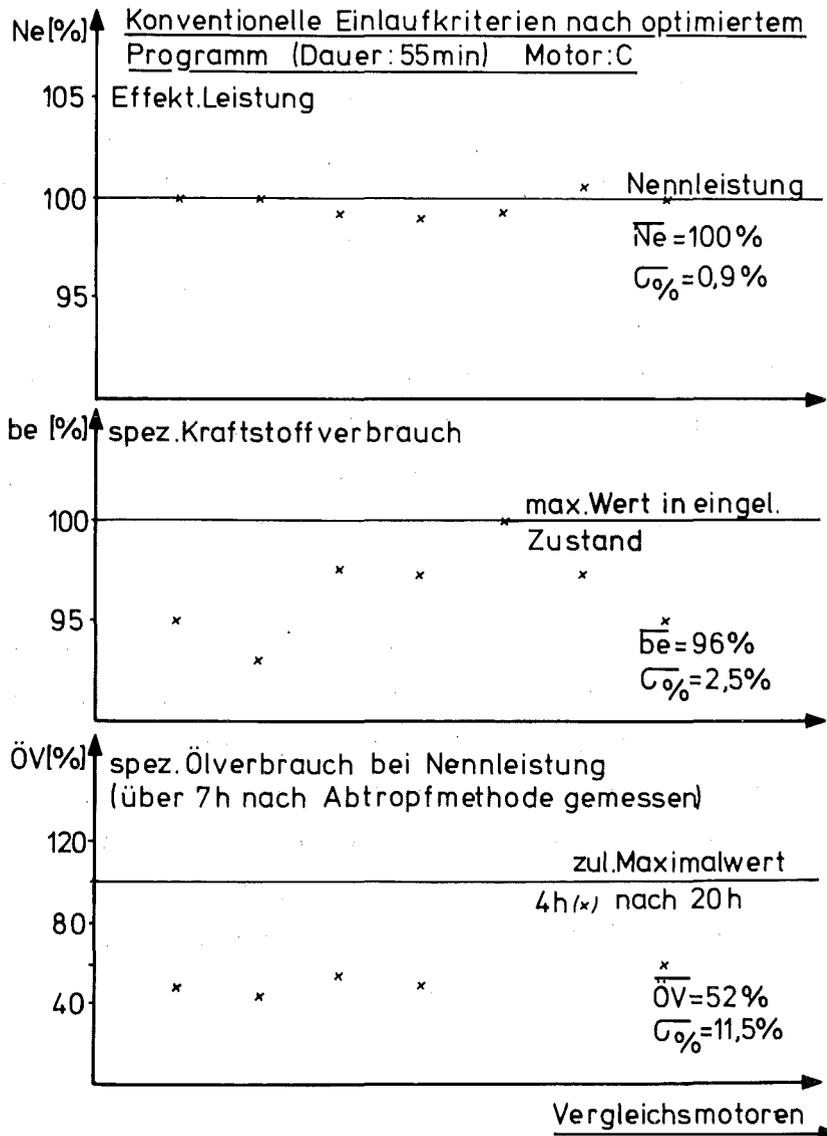


Abb.60 Entwicklung der konventionellen Kriterien nach dem optimierten Einlaufprogramm für Motor C

Auch bei diesem Motortyp werden mit dem optimierten Programm, wie bei Motortyp B, bereits am Einlaufende günstige Werte für Leistung, spezifischen Verbrauch und Ölverbrauch erreicht. Leider liegen für die Typen D und C keine Meßergebnisse von di-

rekten Vergleichsmotoren, die nach dem firmenüblichen Einlaufprogramm eingefahren wurden, vor.

Für den Motortyp F liegen zur Zeit noch keine Praxisergebnisse vor. Zieht man hier jedoch die in Abb.36 dargestellten Meßwerte aus den Optimierungsversuchen heran, so liegt die Effektivleistung nach 1,5 Stunden bereits bei 100,7% bei einem spezifischen Verbrauch von 100%. Die Nennwerte werden also bereits erreicht. Der Ölverbrauch wurde bis maximal 13 Stunden gemessen und lag mit im Mittel 106% nur noch geringfügig höher als der Sollwert für den eingelaufenen Zustand. Aufgrund dieser Werte ist zu erwarten, daß die Praxiserprobung für Motor F ebenfalls günstige Werte für das optimierte Einlaufprogramm ergeben.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, daß die optimierten Programme jeweils günstige Ergebnisse für die konventionellen Kriterien gebracht haben. Dabei ist zu beachten, daß die optimierten Programme bis zu 50% kürzer waren als die vergleichbaren Firmenprogramme. Die gute Eignung wird auch durch die Tatsache bestätigt, daß seitens der Motorenhersteller, trotz stark verkürzter Laufdauer, bisher keine Beanstandungen mit dem optimierten Programm festgestellt wurden.

## 7. H I N W E I S E F Ü R D I E W E I T E R F Ü H R U N G D E R A R B E I T

Im Folgenden sollen die Möglichkeiten der Erweiterung des Systems auf die Optimierung von Betriebsmittel und Materialien bzw. Oberflächen der Einlaufbauteile als Vorarbeiten für

die Optimierungsphase 2 und die Verwendbarkeit des Systems für Ottomotoren dargelegt werden.

### 7.1 Optimierung von Betriebsmitteln und Bauteilen für den Einlauf

Da bei dem vorliegenden System aus Kapazitätsgründen davon ausgegangen wurde, ein Einlaufprogramm für einen von der Herstellerfirma vorgegebenen Motortyp, d.h. mit vorgegebener Materialauswahl und vorgegebenem Schmiermittel, zu optimieren, wurden diese Einlaufparameter nicht näher untersucht. Es zeigte sich jedoch als Nebennutzen der Optimierungsuntersuchungen, daß die Materialien der Ringlauffläche, die Oberflächenbeschaffenheit der Zylinderlaufbahn und das eingesetzte Schmieröl einen erheblichen Einfluß auf den Einlaufvorgang haben und somit auch das optimierte Programm beeinflussen.

So wurde beispielsweise für den Motor D festgestellt, daß eine ungebonderte Zylinderlaufbahn sich im Einlauf günstiger verhält, als die serienmäßig gebonderte Ausführung. Das hatte zur Folge, daß die Herstellerfirma aufgrund dieser Ergebnisse, nach einer ausführlichen Überprüfung durch Dauerversuche, die Serienfertigung auf ungebonderte Zylinderbüchsen umstellen will.

Beim Motortyp A wurden zum Vergleich zwei unterschiedliche Öltypen im Einlauf gefahren. Hier zeigte sich mit dem Öl höherer Viskosität im Bereich hoher Zylinderwandtemperaturen ein 2- bis 3-fach günstigerer Zylinderverschleiß am Einlaufende.

Die Einlaufversuche mit molybdängespritzten Ringen zeigten, daß eine erheblich höhere Beanspruchung während des Einlaufs möglich ist, ohne die Gefahr einer Schädigung zu erhöhen. Allerdings war auch das Verschleißniveau im eingelaufenen Zustand deutlich höher als das vergleichbarer verchromter Ringe [31, 52, 53].

Alle diese Hinweise konnten aus Kapazitätsgründen nicht näher untersucht werden. Da ihre Bedeutung für den Einlaufvorgang jedoch groß ist und für eine richtige Bearbeitung der Systemphase 2 notwendig ist, erscheint eine gezielte Untersuchung als wichtige Grundlage für die Entwicklung einlaufgünstiger Motor-

konstruktionen unter Anwendung des Optimierungssystems als eine lohnende Aufgabe. Dies wurde auch seitens der Industrie erkannt, wie beispielsweise ein bereits formulierter Forschungsantrag, den Einfluß der Verzugerscheinungen im Zylinderbereich (Motor-konstruktion) gezielt zu untersuchen, beweist.

## 7.2 Verwendbarkeit des Optimierungssystems für Ottomotoren

Eine umfangreiche Versuchsserie an einem Sechszylinder-Ottomotor hat gezeigt, daß eine Übertragbarkeit des Systems auf Ottomotoren nicht ohne weiteres möglich ist. Es zeigte sich zwar, daß mit dem System eine Optimierung des Einlaufverschleißes des Kolbenrings auf Betriebssicherheit möglich ist. Der bei Dieselmotoren gefundene Zusammenhang zwischen Verschleißverhalten der Kolbenringe und Entwicklung der konventionellen Kriterien Leistung, spezifischer Verbrauch und Traganteil der Zylinderoberfläche besteht nach diesen Messungen beim Ottomotor nicht. So wurde festgestellt, daß der Einlaufgewinn im Traganteil der Zylinderlaufbahn sehr gering und nur im Hubmittenbereich auf Druck- und Gegendruckseite nach längerer Laufzeit deutlich ausgeprägt ist, was wahrscheinlich durch das Kolbenhemd verursacht wurde. Der typische Traganteilverlauf im eingelaufenen Zustand in OT und Hubmitte bei Dieselmotoren fehlte.

Wenn man die an einem Ottomotorentyp gewonnenen Ergebnisse verallgemeinert, so wirken sich wohl die geringeren Spitzendrücke des Ottoverfahrens im Vergleich zum Dieserverfahren, die für ein erheblich geringeres Verschleißniveau sorgen, in der Einlaufphase ungünstig aus. Eine wirtschaftlich tragbare Optimierung zur Erreichung von günstigen konventionellen Einlaufgrößen ist deswegen nicht allein über das Einlaufprogramm möglich, so daß andere Beeinflussungsmöglichkeiten, wie z.B. Einlaufbeschleuniger in Kraftstoff oder Schmiermittel und spezielle Einlaufoberflächen, mit in die Optimierung einbezogen werden müssen. Eine Bearbeitung ist mit Hilfe der RN-Meßtechnik, aufbauend auf dem System für Dieselmotoren, möglich.

## 8. Z U S A M M E N F A S S U N G

Zunächst werden die Ursachen für die Notwendigkeit eines Einlaufs der Paarung Kolbenring-Zylinder von Verbrennungsmotoren dargelegt und die wirtschaftliche Bedeutung einer Verkürzung der bei Dieselmotoren üblichen Einlaufprogramme erläutert. Darauf wird als Ziel des Vorhabens ein "System zur Optimierung von Einlaufprogrammen in Dieselmotoren bezüglich Dauer und Betriebssicherheit unter Anwendung der Radionuklidverschleißmeßtechnik" eingeführt. Die aus Kapazitätsgründen notwendigen Zieleinschränkungen werden erläutert.

Nach einer ausführlichen Darstellung der Verschleißvorgänge im Bereich Zylinder-Kolbenringe, auch anhand von Modellvorstellungen, und den daraus abgeleiteten Möglichkeiten einer Optimierung des Einlaufprogramms mit Hilfe des Verschleißverhaltens der genannten Bauteile wird der Lösungsweg aufgezeigt. Dabei wird besonders auf die aus technischen und wirtschaftlichen Gründen notwendige Aufteilung der Optimierung in zwei Phasen eingegangen, wovon aus Prioritäts- und Kapazitätsgründen nur die Phase 1 im vorliegenden Vorhaben erstellt werden konnte.

Im folgenden Kapitel werden übersichtshalber alle für das Vorhaben eingesetzten Mittel zusammengestellt. Hier sind auch die für eine systematische Untersuchung erforderlichen verschiedenen Motortypen beschrieben.

Der Teil der Arbeit, der sich mit den Grundlagen der Einlaufoptimierung mit Hilfe des Verschleißverhaltens von Kolbenring und Zylinder befaßt, wird mit einer Analyse des Einlaufvorgangs aufgrund von Verschleißmessungen begonnen. Hier wird zunächst die für Verständnis und Darstellung wichtige Aufteilung des Gesamteinlaufvorgangs in den für die Programoptimierung besonders wichtigen Grobeinlauf auf Betriebssicherheit und den daran anschließenden, relativ lang dauernden Feineinlauf dargelegt. Danach werden die Ergebnisse des Einflusses der Betriebsgrößen Drehzahl und Last auf das Einlaufverhalten dargestellt und mit Hilfe einer Modellvorstellung interpretiert. Neben dem starken Einfluß der Last zeigte sich ein uneinheitlicher Einfluß der

Drehzahl. Dies führte, in Verbindung mit den Vorstellungen über Schmierzustand und Verschleißbedingungen im Zylinder-Kolbenringbereich, zu der Einführung des Begriffs eines wirksamen Gleitwegs, der, im Gegensatz zu Modellexperimenten bei trockener Reibung, nicht einfach über die Zeit und Gleitgeschwindigkeit berechnet werden kann.

Ein großer Teil der weiteren Arbeiten zur Analyse des Einlaufprogramms beschäftigt sich mit der Untersuchung der gegenseitigen Abhängigkeit (Untermengenverhalten) der Betriebspunkte im Einlaufkennfeld bezüglich ihres Einlaufbeitrags. Hier konnte gezeigt werden, daß eine erhebliche Vereinfachung des Programmaufbaus mit Hilfe des Untermengenverhaltens und einer Schlüsselbetriebsbedingung möglich ist. Diese wichtigen Erkenntnisse werden interpretiert und die Einbeziehung in das System in Form einer systematischen Suche, Kontrolle und Verwendung dargelegt. Die Analyse des Einlaufvorgangs schließt mit der Untersuchung des Einflusses von Kühlmittel- und Öltemperatur und der Auswirkung von Verschleißteilchen aus dem Einlauf im Schmieröl auf den Einlaufvorgang der Bauteile Kolbenring und Zylinderlaufbahn. Hier zeigte sich, daß diese Einflüsse gering sind.

Die folgenden Arbeiten befassen sich mit den Einzelheiten der Steuerung der Einlaufoptimierung mit Hilfe des Verschleißverhaltens der Einlaufbauteile. Es kann gezeigt werden, daß eine Steuerung der Optimierung in den meisten Fällen allein mit Hilfe des obersten Kompressionsrings erfolgen kann, was erhebliche Vorteile bezüglich der Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit des Systems ergibt. Die Einzelheiten der Steuerung mit Hilfe des progressiven, konstanten oder degressiven Verschleißverlaufs und der Verschleißratenhöhe des Steuerbauteils werden dargelegt. Ausführlich wird die gute Übereinstimmung des Verschleißverhaltens des Steuerbauteils mit der Entwicklung der für den Einlauf interessanten konventionellen Kriterien Leistung und spezifischer Kraftstoff- und Ölverbrauch aufgezeigt, was auch aufgrund von Modellvorstellungen interpretiert wird. In diesem Zusammenhang wird auf die schlechte Eignung der bisweilen ebenfalls als Einlaufkriterium herangezogenen Leckgasmenge zur Beurteilung des Einlauffortschritts hingewiesen. Der sich einstellende typische Oberflächenzustand der

Einlaufbauteile im Grob- und Feineinlauf wird anhand von Oberflächenaufnahmen, Faxfilmbildern und Perthometerschrieben dargestellt. Hier zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Ausbildung tragender Oberflächen an Kolbenring- und Zylinderlaufbahn mit dem Verlauf des Verschleißes im Grob- und Feineinlauf. Die z.T. unterschiedliche Verteilung der Traganteile über die Laufflächen von Kolbenringen und Zylindern bestätigt den starken Einfluß von statischen und dynamischen Verformungs- und Verzugerscheinungen auf das Einlaufverhalten. Das Kapitel wird mit einer kurzen Darstellung der Erfahrungen über Auswirkungen der Optimierung mit Hilfe des Steuerbauteils auf andere Motorbauteile, wie z.B. Gleitlager, abgeschlossen. Hier ergaben sich keine negativen Hinweise.

Aufbauend auf den zuvor dargestellten Ergebnissen und Überlegungen wird das Optimierungssystem zusammengestellt und beschrieben. Zunächst werden die Systembausteine erläutert und die Einsatzgrenzen dargelegt. Danach folgt eine ausführliche Beschreibung der Systemphase 1, die durch im Anhang beigefügte Ablaufpläne und Versuchslisten ergänzt wird. Die Beschreibung der Phase 1 enthält die Abschnitte Vorbereitung, Programmerstellung (mit Basisversuchen, Stufenoptimierung, Test des optimierten Einlaufprogramms und Analyse des erreichten Standes) und Erprobung des optimierten Programms in Praxisversuchen. Eine kurze Übersicht zu den wesentlichen Arbeitspaketen der Phase 2, die im Rahmen dieses Vorhabens nicht bearbeitet wurde, ergänzt die Systembeschreibung. In dieser Phase müssen auch Konstruktion, Materialzusammenstellung und Schmierstoff in die Untersuchung einbezogen werden.

Hierauf folgt eine ausführliche Beschreibung der im Rahmen der Systementwicklung bereits erstellten optimierten Einlaufprogramme und der damit vorliegenden Erfahrungen aus praktischen Erprobungen. Dabei wird als wesentliches Ergebnis die bereits bei der Systemerstellung festgestellte positive Auswirkung der stark verkürzten optimierten Programme auf die Entwicklung der konventionellen Einlaufkriterien bestätigt.

Im abschließenden Kapitel werden Hinweise für eine Weiterführung der Arbeiten bezüglich der Einbeziehung von Konstruktion, Material und Schmiermitteln als Vorbereitung für die Er-

stellung der Systemphase 2 gegeben. Eine kurze Darstellung der Möglichkeit einer Übertragbarkeit des für Dieselmotoren erstellten Systems auf Ottomotoren, die sich auf Erfahrungen aus einer umfangreichen Einlaufserie an einem Ottomotor stützt, schließt den Bericht ab. Hier zeigte sich, daß eine direkte Übertragbarkeit nicht gegeben ist. Hinweise für eine eventuelle weitere Bearbeitung sind beigefügt.

Im Anhang finden sich, ergänzend zu den Ausführungen im Bericht, Listen der Auslegungsdaten der eingesetzten Motortypen, ein ausführlicher Ablaufplan für das System mit den notwendigen Ergänzungen und eine Liste der für Durchführung und Auswertung zur Verfügung stehenden Datenverarbeitungsprogramme.

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

1. N.N.                    Le Rodage, phénomène encore bien ténébreux  
Machine Moderne, Juli 1968, S.27-34
2. Bell.A.G.,            Ein neuer Weg zur Verkürzung der Einlaufzeit  
Staats,W.:                von Kolbenmotoren  
Erdöl und Kohle-Erdgas-Petrochemie, 14.Jhg.,  
März 1961, Nr.3, S.185-89
3. Moser,A.:             Vermessungen an Zylinderbohrungen von Ver-  
brennungsmotoren  
ATZ 68 (1966) 8, S.277-79
4. Eberle,F.:            Zur Mechanik der Kolbenringdichtung  
MTZ 28 (1967) 3, S.101-105
5. v.Bennigsen,G.:      Verminderung von Laufbuchsenverzügen an Kol-  
benmotoren durch Gestaltung der Einfassungs-  
bördel an Flachdichtungen  
MTZ 29 (1968) 8, S.309-11
6. Stecher,F.:           Zylinderverformungen  
MTZ 31 (1970) 12, S.505-11
7. Brosinsky,H.:        Forderungen moderner Dieselmotoren, speziell  
schnellaufender Fahrzeugdieselmotoren, an die  
Motorenöle  
VDI-Berichte Nr.177, 1972, S.5-12
8. Schilling,A.:         Automobile Engine Lubrication, Volume II  
Scientific Publications (G.B.) Ltd. 1972,  
S.7.72-7.83
9. Brosinsky,H.:        Stereoscan-Aufnahmen und Fax-Film-Bilder von  
Oberflächen gußeisener Motorzylinder  
TZ für praktische Metallbearbeitung 64, 1970,  
1, S.6-10
10. Wiemann,L.:         Einlaufverhalten und Brandspurbildung in Abhängig-  
keit von verschiedenen Oberflächenbearbeitungs-  
zuständen bei Zylinderlaufbüchsen  
Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen  
Frankfurt/Main, Heft R 71, 1967

11. Kramp: Die Entwicklung von Meßverfahren zur Ermittlung der wesentlichsten Einlaufkriterien  
FVV, Heft R 88, 1967
12. Ayel, J.: Le Rodage, Periode Critique De La Vie Des Moteurs  
Institut Francais du Petrol (IEP), Ref.Nr.21276,  
Mai 1973
13. Walker, S.T.: A running-in procedure for diesel engines  
Mechanical Power, April 1963, S.114-16
14. Kamm, H.: Untersuchung des Einflusses von Einlaufmitteln auf den Verschleiß und die Oberflächenbeschaffenheit von Kolbenring und Zylinderlaufbüchse während des Einlaufens mit Hilfe radioaktiver Isotope  
FVV-Forschungsbericht Nr.2-213/11
15. Tödte, B.: Erstellung und Erprobung einer modifizierten Standard-Radionuklidmeßanlage zur Erfassung des Verschleißverhaltens von Motorbauteilen im Fahrzeugeinsatz  
Diplomarbeit Universität Karlsruhe, 1974
16. Conte, J.: Sujetions mécaniques et géométriques du rodage  
Ingenieurs de l-Automobile, Juni 1960, S.325-35
17. Eberan-Eberhorst, C.: Die motorische Prüfung des Verschleißschutzes von Schmierölen mit Hilfe von Radionukliden  
Compendium der 3.DGMK-Fachgruppentagung vom 6.bis 8.10.1975 in Hannover, S.396-98
18. Wiemann, L.: Das motorische Verhalten von Schleudergußbüchsen bei unterschiedlich bearbeiteter Oberfläche  
FVV-Heft 104, 1968
19. Brosinsky, H.: Erkenntnisse über das Einlaufverhalten gußeiserner Motorzylinder durch Vergleich zwischen Fax-Film-Bildern und Stereoscan-Aufnahmen  
Technische Zeitung (TZ) für praktische Metallbearbeitung 64 (1970) 2, S.65-69
20. Hager, K.: Einlaufuntersuchungen an Motoren-Zylindern  
Habilitationsschrift TH Magdeburg, 1966

21. Uetz, H.: Einfluß der Honbearbeitung von Zylinderlaufbüchsen auf die innere Grenzschiicht und den Einlaufverschleiß  
MTZ 30 (1969) 12, S.453-60
22. Willn, J.E.: A Test Rig for Investigating Piston Ring and Cylinder Bore Scuffing  
Preprint of Institute of Petroleum Symposium Montreux, April 1973
23. Baumgarten, D.: Reibung und Verschleiß von Kolbenringen und Zylinderbüchsen  
Dissertation TU Berlin 1968
24. v. Winsen, F.H.: Der Mercedes-Benz Personenwagen-Dieselmotor  
Conrad, U.: ATZ 74 (1972) 3, S.96-102
25. Szatzschneider, K.: Reibung und Verschleiß trockener Oberflächen (Stand 1973/74)  
KFK 2144, 1975
26. Archard, J.F., The wear of metals under unlubricated conditions  
Hirst, W.: Proceedings of Royal Society Vol.236, A, 1956  
S.397-410
27. Oesterlee, R.: Oberflächenschichten von Reibpartnern  
MTZ 30 (1969) 12, S.465-71
28. Stecher, F., Reaktionsschichtbildung  
Gaukler, FVV-Bericht, Heft 176, 1975  
Wildner:
29. Sakurai, T., Wear Rate of Copper under Boundary Lubrication  
Okabe, H., American Society of Lubrication Engineers (ASLE)  
Matsumura, I.: Transactions 14 (1971) S.221-25
30. Sakurai, T., The Mechanism of Adhesive Wear of Copper Under  
Okabe, H., Boundary Lubrication  
Nakayama, K.: American Society of Lubrication Engineers (ASLE)  
Transactions, Vol.16 (1972) S.91-96
31. Wiemann, L.: Die Bildung von Brandspuren auf den Laufflächen der Paarung Kolbenring-Zylinder in Verbrennungsmotoren  
MTZ 32 (1971) 2, S.43-52

32. Bäumler, H.: Brandspurversuche in einem Fahrzeugdieselmotor  
MTZ 24 (1963) 9, S.299-302
33. Heckmatt, H., Ring and Bore Scuffing in Gasoline Engines  
Webster, A.B.: Preprint of Institute of Petroleum Symposium  
Montreux, April 1973
34. Pywell, R.F., The Effect of Lubricants on Piston Ring Scuffing:  
Pike, W.C.: Part 1 - Development of an Engine Test  
Preprint of Institute of Petroleum Symposium  
Montreux, April 1973
35. Beyer, H.: Stand und Möglichkeiten der Entwicklung von  
Kolbenringwerkstoffen und Laufflächenbeschich-  
tungen  
Fachschrift K 11, Goetzwerke AG, Burscheid
36. Morris, P.J., A Comparison of the Scuffing Tendency of Lubri-  
Willn, J.E., cating Oils in Bench and Engine Tests  
Williams, G.: Preprint of Institute of Petroleum Symposium  
Montreux, April 1973
37. Gervé, A.: Die wichtigsten Verschleißmeßmethoden der Iso-  
topentechnik  
Kerntechnik, Isotopentechnik und Chemie, 14.Jhg.,  
72, Heft 5, S.204-209
38. Lausch, W.: Moderne Möglichkeiten der Verschleißmessung mit  
Radionukliden  
KFK-Nachrichten 4.Jhg., 4, 72, S.20-26
39. Schäfer, J.: Radionuklid-Verschleißmeßsystem zur gleichzeitigen  
Erfassung des Verschleißes im Schmieröl und im  
Ölfilter von Verbrennungsmotoren  
Diplomarbeit Universität Karlsruhe, 1976
40. Barth, H., Dünnschichtaktivierungen von Maschinenteilen  
Gervé, A.,  
Herkert, B., KFK-Bericht 1783, April 1973  
Katzenmeier, G.,  
Rühl, E.:

41. Katzenmeier, G.,  
Volz, J.: Einsatzmöglichkeiten eines Radionuklidmeßwagens  
im Maschinenbau  
Possibilities of application of a radionuclide  
measuring van in mechanical engineering  
Kerntechnik 16 (1974), S.145-51
42. Gervé, A.,  
Volz, J.,  
Stöber, D.: Einsatz eines Prozeßrechners zur Automation eines  
Verbrennungsmotorenprüfstands  
FVV-Forschungsbericht Heft 185, 1975
43. Fritzsche, G.: Grundlagen zur Markierung von Schmierstoffen für  
Ölverbrauchsmessungen  
FVV-Forschungsbericht, Heft 193, 1975
44. Lausch, W.,  
Volz, J.: Motorverschleißprogramme  
Zwischenbericht zum Stand der Arbeiten:  
I Optimierung von Motoreinlaufprogrammen  
II Extrapolation des Kurzzeitverschleißverhaltens  
auf den Langzeitverschleiß  
FVV-Forschungsbericht, Heft R 279, 1976
45. Williams, K.R.,  
Daniel, G.S.: Über den Einlaufvorgang in Verbrennungsmotoren  
und die Wahl der Oberflächenbeschaffenheit  
Shell Petroleum Company Ltd., Vortrag vom 8.2.65  
vor dem Institute of Mechanical Engineers
46. Rüdinger, V.,  
Schwannecke, H: Die motorische Prüfung des Verschleißschutzes  
von Schmierölen mit Hilfe von Radionukliden  
Compendium 75/76 3. DGMK-Fachgruppentagung vom  
6. bis 8.10.76 in Hannover, S.385-96
47. Fautz, M.: Ein Verfahren zur Teilchengrößenanalyse von  
Verschleißteilchen  
KFK-Bericht Nr. 2343 ,1976
48. N.N. Kolbenring-Handbuch  
Goetzwerke AG Burscheid, 2.Auflage 1973
49. Kaiser, W.: Der Einfluß verschiedener Kolbenring- und Nut-  
formen sowie der Nutwerkstoffe auf den Ring- und  
Nutverschleiß in einem 6-Zylinder-Dieselmotor  
(Experimentelle Untersuchungen mit Hilfe von  
Radioisotopen)  
KFK-Bericht 1568, 1972

50. Brosinsky, H.: Fax-Film-Bilder zur Beurteilung der Laufeigen-  
schaft von Oberflächen gegossener Motorzylinder  
Technische Zeitschrift (TZ) für praktische Me-  
tallbearbeitung, 62.Jhg., Mai 1968, Heft 5, S.221-29
51. Mierbach: Berechnung der Radialdruckverteilung von Kolben-  
ringen in verzogenen Zylinderbüchsen  
Fachschrift K 15 Goetzwerke AG Burscheid
52. Aue, G.K.: Mechanismus einer Kolbenringdichtung  
Technische Rundschau Sulzer, 1 (1974), S.3-18
53. N.N.: Piston Ring Scuffing  
Bericht von der Konferenz der Tribologie Gruppe  
Tribology News, Sept. 1975, Heft 27, S.9
54. Katzenmeier, G.: Das Verschleißverhalten und die Tragfähigkeit  
von Gleitlagern im Übergangsbereich von der  
Vollschmierung zu partiellem Tragen (Untersuchungen  
mit Hilfe von Radioisotopen)  
KFK-Bericht 1569, 1972

## A N H A N G

(1-11)

Auslegungsdaten der zur Systemerstellung eingesetzten Versuchsmotoren

Systemablaufplan mit Ergänzungen

- Ausrüstungsplan für Motoren und Prüfstände
- Rahmenplan für den Zeitbedarf der einzelnen Versuchsläufe der Programmerstellungsphase des Systems
- Motoren- und Zeitplan für einen Standardablauf der Programm-erstellungphase des Systems
- Ablaufplan der Phase 1 des Systems zur Einlaufoptimierung

Liste der im Optimierungssystem einsetzbaren Datenverarbeitungsprogramme

Motor bezeichnung	Zylinder- konstruktion	Verbrennungs- verfahren	Kühlung	Büchsenober- fläche	Kolbenring- lauffläche	form	Ölsorte
A	Block R <sup>+</sup>	Vorkammer	Wasser	ungebondert	verchromt	Rechteck	HD-Motoren- öl SAE10W
B	Block R <sup>+</sup>	Vorkammer	Wasser	ungebondert	Molybdän	Rechteck	Einlauföl SAE 10W40
C	Block R <sup>+</sup>	Direkt	Wasser	ungebondert	verchromt	Doppel- trapez	HD-Diesel- motorenöl 20 W 20
D	Einzel R	Direkt	Luft	gebondert/ ungebondert	verchromt	Doppel- trapez	HD-Diesel- motorenöl 20 W 20
E	Einzel V	Direkt	Luft	ungebondert	verchromt	Rechteck	HD-Diesel- motorenöl 20 W 20
F	Einzel V	Direkt	Luft	gebondert	Molybdän	Doppel- trapez	HD-Diesel- motorenöl 20 W 20

R = Reihomotor

<sup>+</sup> trockene Laufbüchse

V = V-Motor

Tafel I: Wichtige Kenndaten der eingesetzten Versuchsmotoren

Motortyp	Hubvolumen	Hub	Bohrung	Zylinderzahl	Eff. Leistung (Drehzahl)		mittl. eff. Druck
	cm <sup>3</sup>	mm	mm		PS/KW	l/min	
A	1988	83,5	87	4	55/40,5	4200	5,9/5,8
B	3005	92,4	91	5	80/59	4000	6,0/5,9
C	4160	120	105	4	65/48	2175	6,5/6,3
D	2826	120	100	3	55/40,5	2800	6,3/6,2
E	8482	125	120	6	170/125	2650	6,8/6,7
F	15950	130	125	10	320/235	2650	7,1/7,0

Tafel II: Auslegungsdaten der eingesetzten Versuchsmotoren

## Ausrüstungsplan für Motoren und Prüfstand

### a) Vorschriften für die Versuchsmotoren im Optimierungssystem

Die Motoren müssen dem Serienstand entsprechen, für den das Programm erstellt werden soll.

Einstellung der Einspritzpumpe bzgl. Förderbeginn und Einspritzmenge wie Serie.

Die Motoren dürfen auf keinen Fall gelaufen sein. Auch der Serienabnahmelauf darf nicht absolviert worden sein.

Das Ansaug- und Auspuffsystem muß mit dem Serienzustand vergleichbar sein.

Die Betriebsmittel werden wie bei der Serie gewählt.

### b) Vorschriften über die notwendige Meßwerterfassung und Ausrüstung der Prüfstände

Leistung: Drehzahl und Bremslast

Verbräuche: Kraftstoffverbrauch, Ölverbrauch (Integral nach Abtropfmethode)

Temperaturen: Kühlmittelintritt und -austritt (bei luftgekühlten Motoren Zylinderwandtemperaturen auf Zuluft- und Abluftseite), Ölsumpf, Ansaugluft, Abgas, Kraftstoffzulauf, Büchsenwandtemperatur am RN-Meßzylinder.

Sonstige Meßgrößen: Luftdruck, Öldruck, Durchblasegasmenge

Im Prüfraum müssen ca. 2 m<sup>2</sup> Grundfläche für den RN-Meßkopf vorhanden sein.

Die Verwendung zweier nebeneinanderliegender Prüfstände ist für eine schnelle Versuchsdurchführung unabdingbar.

Rahmenplan für den Zeitbedarf der einzelnen Versuchsabschnitte  
der Programmerstellungsphase des Systems<sup>+</sup>

a) Basisversuche (25 Betriebspunkte à 1/2 h, je nach Drehzahl-  
und Lastspanne aufgeteilt)

Kennfeld im Grobeinlauf mit Spülen und Ölwechsel	ca. 15 h
Wiederholung im Feineinlauf	ca. 15 h
Vollastkennlinie (5 Punkte à 2 h)	ca. 10 h
Nennleistungslauf mit Ölverbrauch	<u>ca. 5 h</u>
Gesamt	ca. 45 h

Zeitbedarf je Basisversuch mit Ölwechseln und Kontrollen ca.  
2 Tage (24 h-Betrieb).

b) Einlaufstufenprogramme

Einlauf (0-Last bis Vollast) maximal	ca. 8 h
Vollastkennlinie (5 Punkte à 1 h)	ca. 5 h
Nennleistungslauf mit Ölverbrauch	<u>ca. 5 h</u>
Gesamt (maximal)	ca. 18 h

Zeitbedarf je Stufenprogramm einschließlich Kontrollen ca.  
1 Tag (24 h-Betrieb).

c) Kontrollversuche mit optimiertem Programm

Optimiertes Programm (Erfahrungswert)	ca. 2 h
Nennleistungslauf mit Ölverbrauch	<u>ca. 5 h</u>
Gesamt (maximal)	ca. 8 h

Zeitbedarf je Kontrollversuch ca. 1/2 Tag (Anmerkung: Aber  
nur mit zwei Prüfständen und entsprechender Montagekapazität  
sind zwei Versuche je Tag möglich).

<sup>+</sup>Die angegebenen Zeiten sind einschließlich kleiner Wartungs- und  
Reparaturarbeiten gerechnet. Die Zeiten für die Montage der Mo-  
toren und das Aufsetzen auf den Prüfstand müssen noch hinzuge-  
rechnet werden.

Motoren- und Zeitplan für den Standardablauf der Programmier-  
stellungsphase des Systems zur Einlaufoptimierung

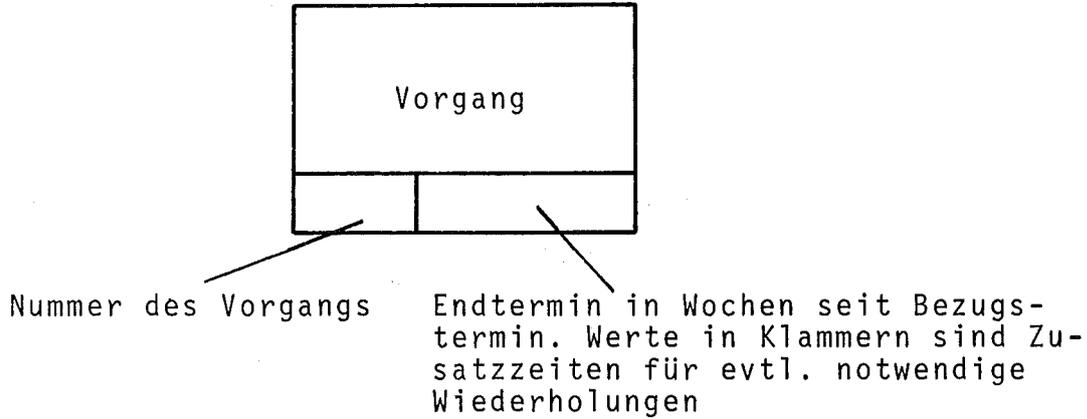
Die Zeiten sind unter der Annahme berechnet, daß zwei Prüfstände wechselweise zur Verfügung stehen, daß z.T. im 24 h-Betrieb gefahren werden kann, und daß genügend Personal zur Verfügung steht, um die notwendige Montage und Demontage parallel zu den Versuchen durchführen zu können.

Systemabschnitt	Motor Nr.	ungefähre Laufdauer (h) einschl. kleiner Wartungsarbeiten	Zeitbedarf (d) einschl. Montagen und Aufsetzen auf Prüfstand
Basisversuch 1	1	45	} 5
Basisversuch 2	2	45	
Einlaufstufenprogramm 1	3	18 (Maximaldauer)	1
" 2	4	18 "	1
" 3	5	18 "	1
Wiederholungsversuche	6	18 "	1 Werden die Motoren 6 und 7 nicht für die Stufenprogramme benötigt, so erhöht sich die Anzahl der Kontrollversuche entsprechend
"	7	18 "	1
Kontrollversuch opt. Programm 1	8	8	} 2
2	9	8	
3	10	8	

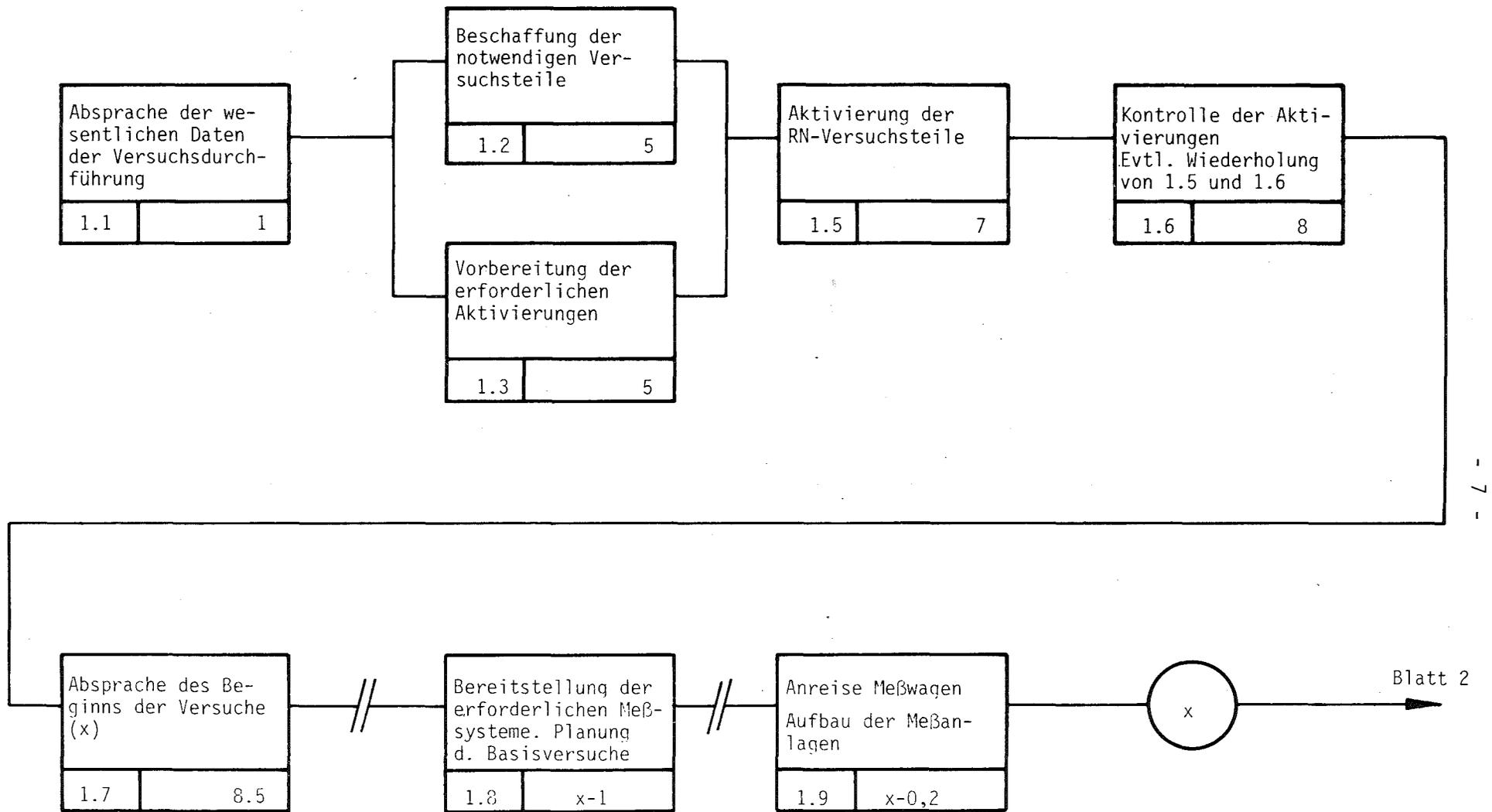
Gesamtdauer minimal ca. 2,5 Wochen (im 24 h-Betrieb)

Anmerkungen zum Ablaufplan "Einlaufoptimierung Phase 1"

1) Legende



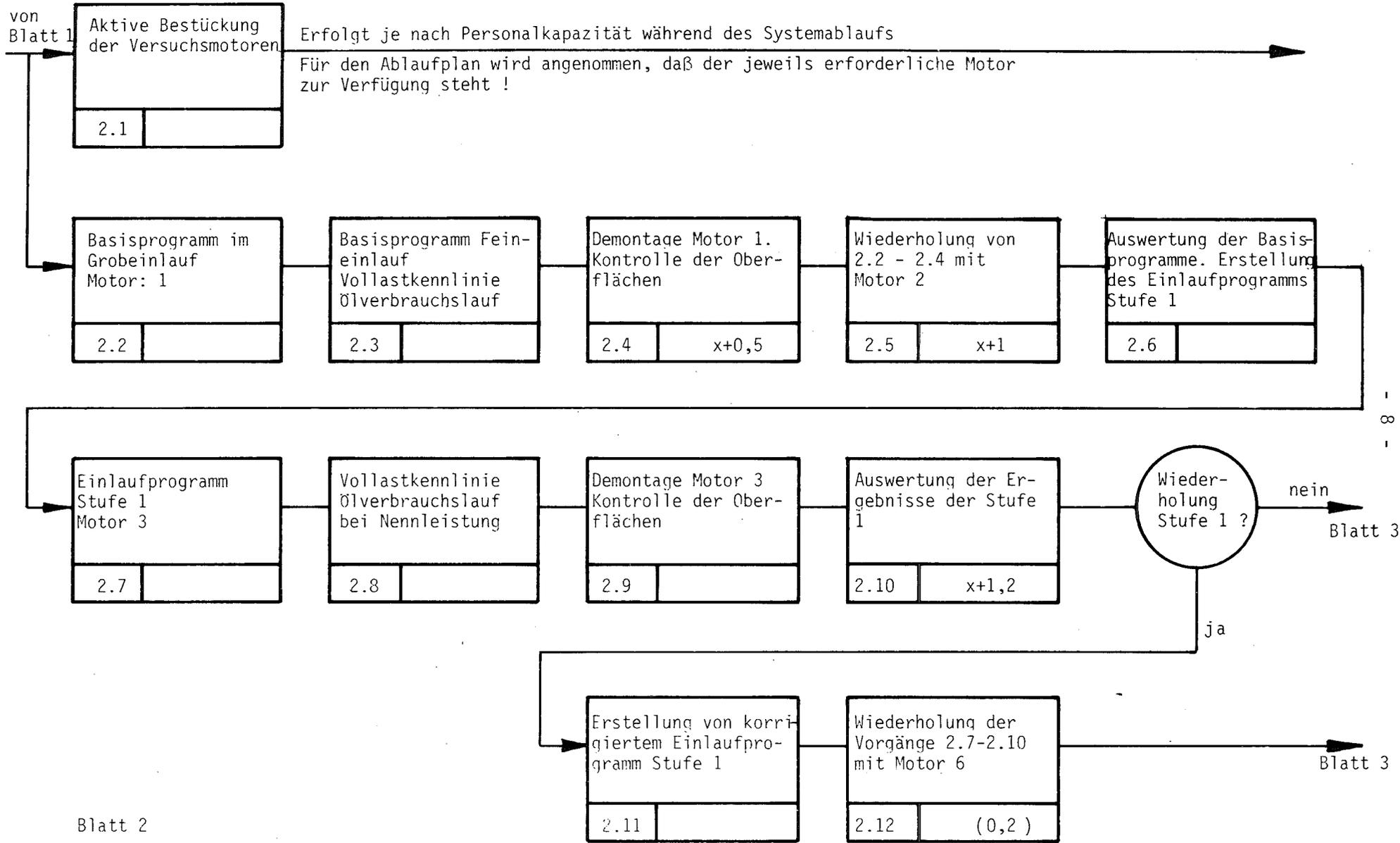
- 2) Die angegebenen Zeiten sind Anhaltswerte. Für die Zeiten der Programmerstellungsphase (x + ...) wurde 24 h-Betrieb zugrundegelegt.
- 3) Von den in den Vorgängen 2.1 2; 3.7 und 3.1 4 bedarfsweise vorgesehenen Wiederholungsversuchen sind erfahrungsgemäß nicht mehr als 2 notwendig. Je nach Anzahl dieser Wiederholungsversuche verändert sich die Zahl der in den Vorgängen 4.2 - 4.5 festgelegten Kontrollversuchen für das optimierte Programm.
- 4) Die Zeit von 12 Wochen für die Praxiserprobung ist eine Minimalzeit. Sie ist stark von dem Umfang und der Art der Durchführung der Praxisversuche abhängig.

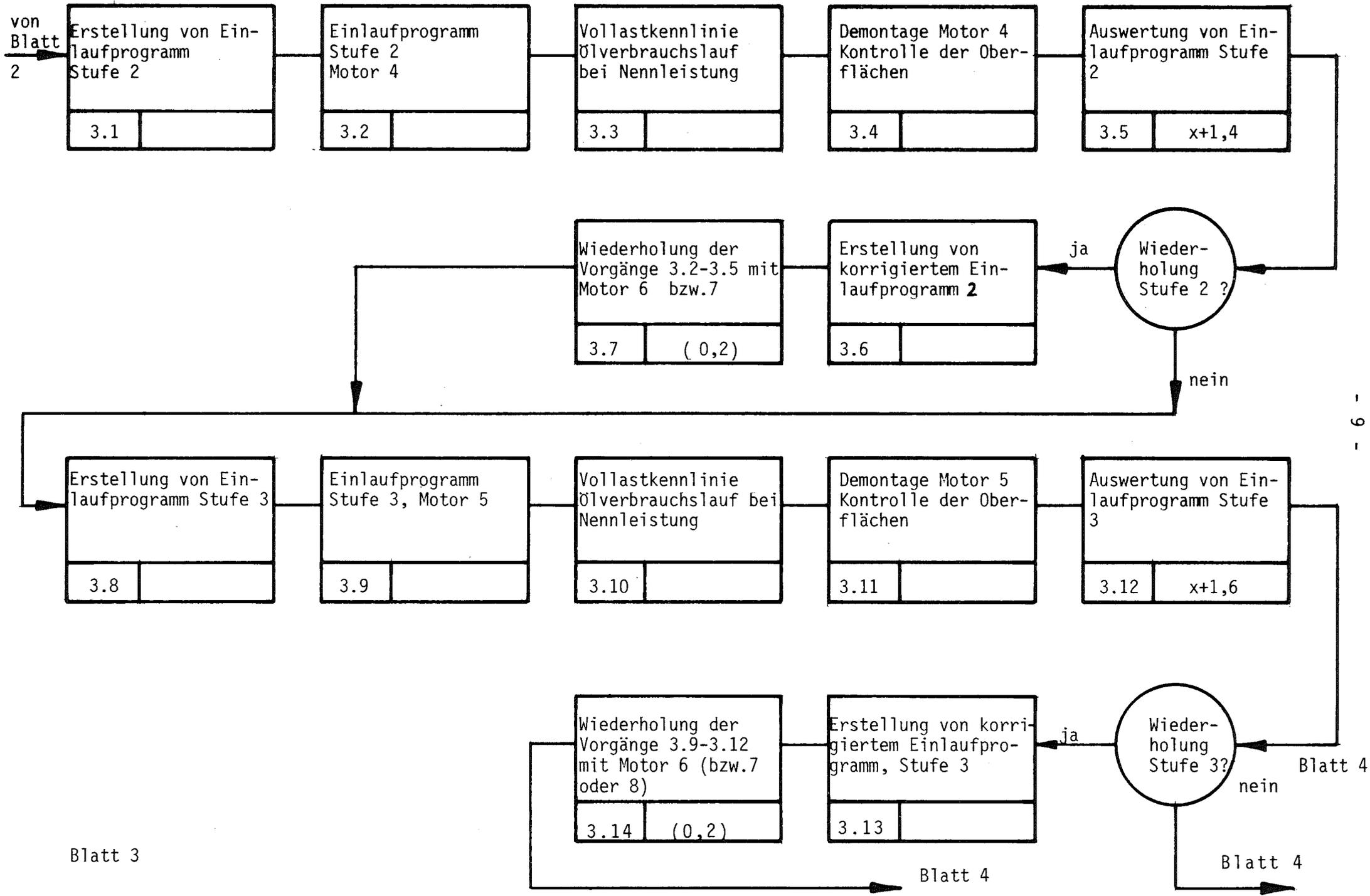


- 7 -

Systemablauf "Einlaufoptimierung Phase 1"

x = Beginn der Programmerstellungsphase



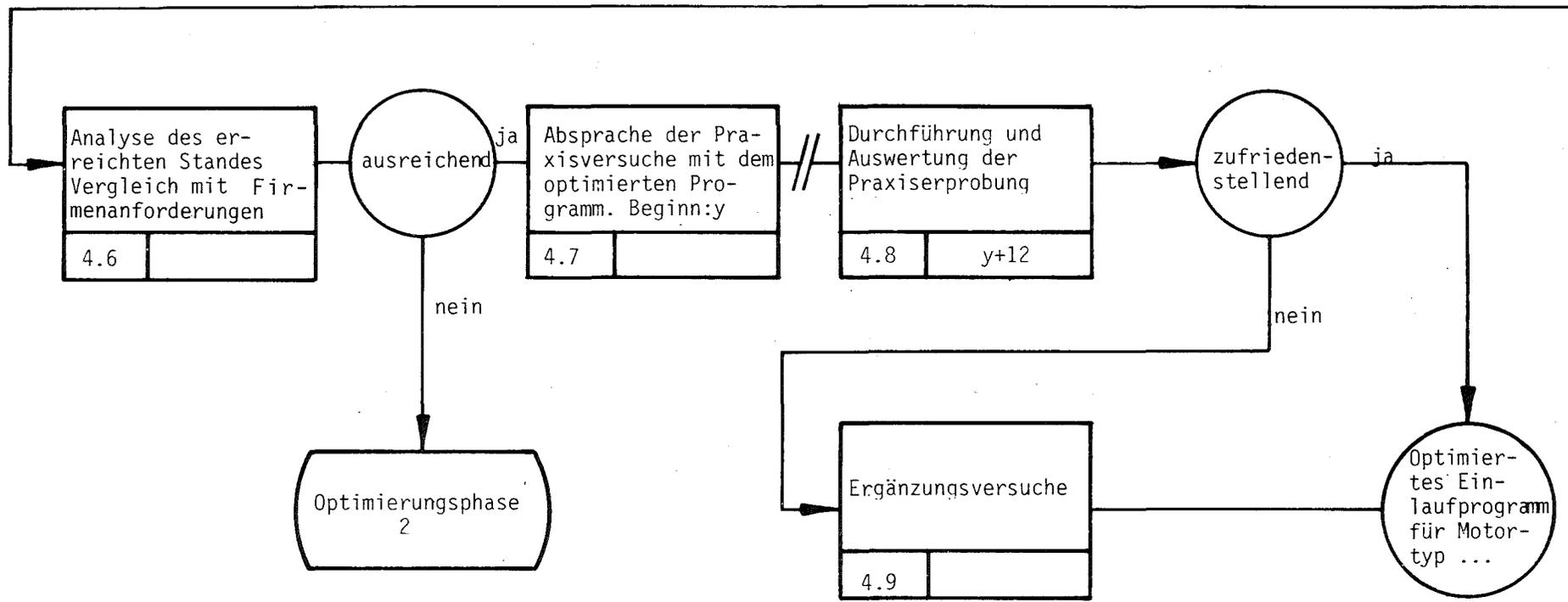
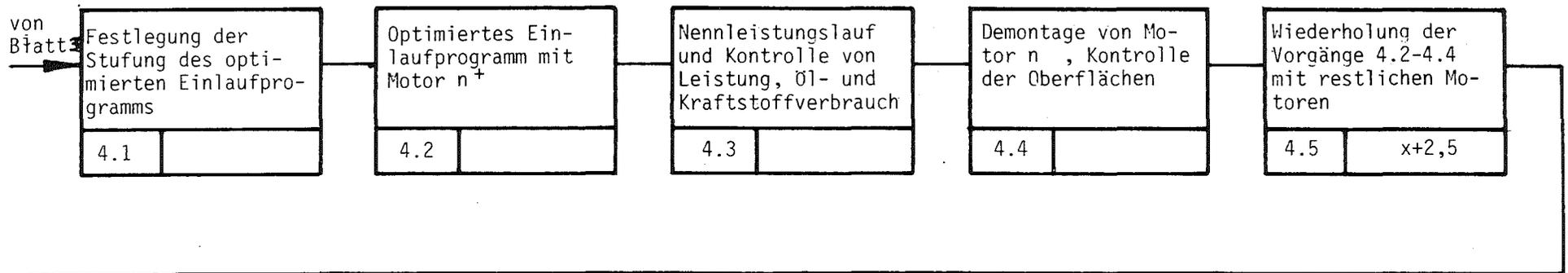


Blatt 3

Blatt 4

Blatt 4

Blatt 4



Blatt 4

<sup>+</sup> n = Nummer des nächsten Versuchsmotors, der noch nicht eingesetzt war.  
 y = Beginn der Praxiserprobung

Liste der im Optimierungssystem einsetzbaren Datenverarbeitungsprogramme

a) Tischrechner\_HP\_9820\_(Meßwageneinsatz)

- Programm für die on-line Auswertung ein oder mehrerer Verschleißkomponenten mit Plot und Speicherung auf Magnetkassette
- Plot-Programme für die Meßwerteingabe von Hand oder von Magnetkassette

b) Prozeßrechner\_HP\_2114\_und\_ähnliche\_(Basic-Programme\_für\_LIT-Prüfstand)

- Programme zur halbautomatischen Eichung von RN-Mehrkomponentenverschleißmessungen
- Programme zur automatischen Steuerung und Überwachung des rechnergesteuerten Motorenprüfstand des LIT mit on-line Verschleißauswertung für bis zu drei Komponenten und Speicherung der Meßdaten auf Lochstreifen in verschiedenen Ausführungen
- Diverse Plot-Programme und Glättungsprogramme zur Auswertung von RN-Verschleißmessungen