

# Analyse des Ölverlustes beim Motor 4 VD 14,5/12-1 SRW — ein Beitrag zur Feststellung des Schädigungsverhaltens von Verbrennungsmotoren

Dr.-Ing. K.-D. Borrmann, KDT/Dr.-Ing. K. Leopold, KDT, Ingenieurschule für Landtechnik „M. I. Kalinin“ Friesack

## 1. Ausgangssituation

Die weitere Durchsetzung der Materialökonomie verlangt, bei der intensiven Grundfondsreproduktion betriebspezifische Mittel und Möglichkeiten verstärkt zu nutzen. Ein Beitrag zur besseren Ausnutzung der Restnutzungsdauer und zum effektiven Schmieröleinsatz bei Verbrennungsmotoren ist die Analyse des Ölverlustes.

Theoretische Überlegungen von Eichler [1] waren der Ausgang für praktische Untersuchungen zum Verlauf der Schädigungsgeschwindigkeit am Motor 4 VD 14,5/12-1 SRW.

Die Optimierung des Aufwands für die Technische Diagnostik setzt die gesicherte Kenntnis des Zusammenhangs zwischen Schädigungsgeschwindigkeit und Nutzungsdauer für Baugruppen landtechnischer Arbeitsmittel voraus. Neben anderen Autoren wird vor allem von Ihle/Gäbler [2], Mauritz [3], Jofinov [4] und Eichler [5] auf die Bedeutung und Notwendigkeit der Klärung dieser Problematik verwiesen.

Erste Untersuchungen zur Ermittlung des Schädigungsverlaufs in der Kolben-Gleitbuchsen-Gruppe von Dieselmotoren unter Praxisbedingungen von Aleksandrov [6], Michlin/Selcer [7], Bauermeister und Berg [8] sowie Harji [9] lassen klar die Schwierigkeiten der Ermittlung des funktionalen Zusammenhangs zwischen Nutzungsdauer und Schädigungsgeschwindigkeit bei Verbrennungsmotoren erkennen. Der derzeitige Erkenntnisstand zur Schädigungsgeschwindigkeit ist bei Michlin/Selcer [7], Pogorelyi [10], Mauritz [3] und Ihle/Gäbler [2] dargestellt und analysiert worden. In der Theorie wurde der Schädigungsverlauf unter der Wirkung spezieller Schädigungsbedingungen untersucht [3]. Diese Untersuchungen beruhen z. T. auf theoretischen Überlegungen bzw. auf Versuchsergebnissen und beziehen sich in den meisten Fällen auf den Verschleiß bestimmter Schadausparungen unter speziellen Versuchsbedingungen.

Ziele der durchgeführten Untersuchungen waren:

- Gesicherte Ermittlung der Parameter des Verlaufs der Schädigungsgeschwindigkeit über der Nutzungsdauer als Grundlage für die Restnutzungsdauerprognose
- Ermittlung einer praktikablen Methode zur Erfassung und Auswertung der Schädigungsgeschwindigkeit unter Praxisbedingungen.

Die Komplexität des Schädigungsprozesses macht es erforderlich, den Schädigungsbetrag demontagelos durch indirekte Meßverfahren zu ermitteln. Die dadurch gewonnenen Daten solcher

indirekten Meßgrößen sind mit Fehlern behaftet, da auch durch sie der Schädigungsprozeß in seiner Komplexität nicht umfassend widerspiegelt wird.

Thum [11] und Ihle/Gäbler [2] konnten nachweisen, daß der Ölverlust je Leistungseinheit eine indirekte Meßgröße darstellt, die den Schädigungszustand der Kolben-Gleitbuchsen-Gruppe eines Verbrennungsmotors hinreichend genau charakterisiert. Die in [12] [13] [14] ermittelten Ursachen für den Ölverlust lassen sich konkreten Betriebsbedingungen eindeutig zuordnen, wodurch Aussagen zur Wirkung dieser Einflüsse auf das Schädigungsverhalten getroffen werden können (Bild 1).

Die Stichtag-Erfassung der Primärdaten wurde in 100 Nutzerbetrieben von ZT 300 organisiert, wobei von 242 Motoren der Ölverbrauch als Funktion des verbrauchten Kraftstoffs über der Nutzungsdauer listenmäßig erfaßt wurde.

## 2. Auswertung

### 2.1. Grundlagen

Von den Nutzern erfaßt wurde der Ölverbrauch. Nach Abzug der Normativmengen für Ölwechsel und Filterpflege entsprechend den betrieblichen Pflegevorschriften wurde der Ölverlust (angegeben in l Öl) in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer (angegeben in l DK) ermittelt.

Wird der Ölverlust als Kennzahl für den Schädigungsbetrag angesehen, so lassen sich die im Bild 2 gezeigten allgemeinen Relationen als Grundlage für die Auswertung formulieren.

Für das Nutzungsdauerintervall  $t_1$  bis  $t_2$  bestehen die folgenden mathematischen Relationen:

$Q_1$  kumulativer Ölverlust zum Nutzungszeitpunkt  $t_1$

$Q_2$  kumulativer Ölverlust zum Nutzungszeitpunkt  $t_2$ .

Ausgehend von der allgemeinen Definition der Geschwindigkeit ergibt sich für die Schädigungsgeschwindigkeit:

$$v_c = \frac{dQ}{dt} = \tan \gamma \quad (1)$$

Für das betrachtete Intervall läßt sich die mittlere Schädigungsgeschwindigkeit nach Gl. (2) ermitteln:

$$v_{m,1,2} = \tan \gamma_{1,2} = \frac{Q_2 - Q_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

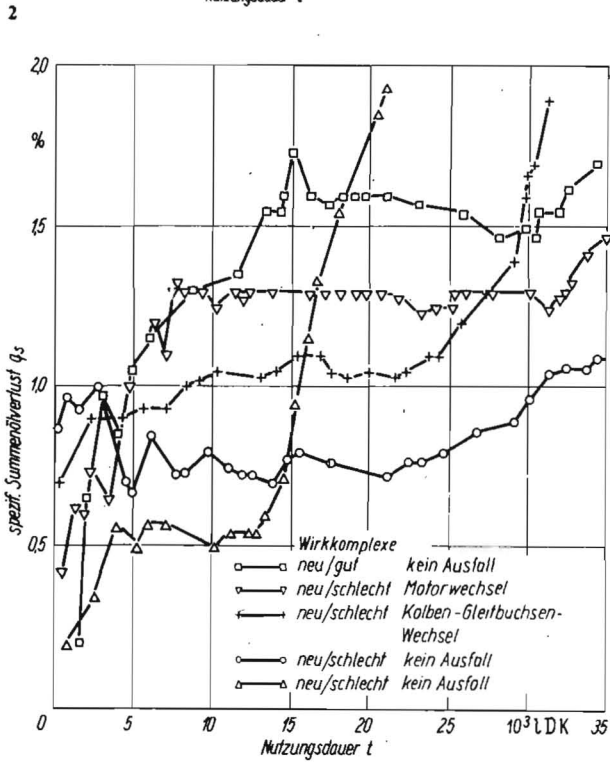
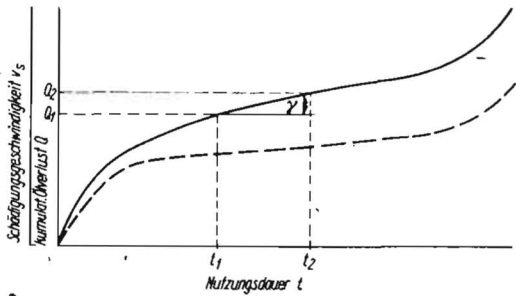
Wirk-komplexe	gutes Pflegeniveau		schlechtes Pflegeniveau	
	Neufertigung	Instandsetzung	Neufertigung	Instandsetzung
Einflüsse auf den Ölverlust	Durchlaufwiderstand zwischen Verbrennungsraum und Kurbelgehäuse			
	Kraftstoff und Ölqualität			
	einwandfreie Kraft- und Schmierstoffe sowie saubere Verbrennungsluft vorschriftsmäßige Lagerhaltung und Filterpflege		verunreinigte Kraft- und Schmierstoffe sowie verunreinigte Verbrennungsluft nachlässige Lagerhaltung und Filterpflege	
	schädigungshemmende Belastung und Bedienung (Einhaltung der Betriebsvorschriften)		schädigungsfördernde Belastung und Bedienung (mechanische und thermische Überlastung)	
	Einhaltung der Ölwechselintervalle		sporadische Ölwechselinterv. (Ülterung)	
	vorschriftsmäßige Einstellung der Arbeitselemente		verstellte Arbeitselemente	
	Werkstoff- u. Herstellungsqualität des Kolben-Gleitbuchsen-Systems	Werkstoff- u. Instandsetzungsqualität des Kolben-Gleitbuchsen-Systems	Werkstoff- u. Herstellungsqualität des Kolben-Gleitbuchsen-Systems	Werkstoff- u. Instandsetzungsqualität des Kolben-Gleitbuchsen-Systems

1

Bild 1. Einflüsse auf den Ölverlust

Bild 2. Zusammenhang zwischen Nutzungsdauer und Schädigungsverlauf

Bild 3. Beispiele für den spezifischen Summenölverlust  $q$ , in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer bei Motoren 4 VD 14,5/12-1 SRW



Tafel 1. Anteile der untersuchten Motoren in den einzelnen Stufen der Schädigungsgeschwindigkeit

Stufenwerte für konstante Schädigungsgeschw. in %	Anteil der Motoren in %			
	Wirkkomplexe		instand ges./ gut	instand ges./ schlecht
	neu/ gut	neu/ schlecht		
0,50	27,0	30	21,5	23,0
0,75	28,5	29	18,5	17,5
1,00	27,0	29	24,0	39,0
1,25	13,5	9	24,0	16,5
1,50	4,0	3	12,0	4,0

und für ein beliebiges  $i$ -tes Intervall:

$$v_{s(i)} = \tan \gamma_i = \frac{Q_i}{t_i} \quad (3)$$

Ausgehend von der allgemeinen Definition der Beschleunigung ergibt sich für die Änderung der Schädigungsgeschwindigkeit

$$b_s = \frac{d^2 Q}{dt^2} \quad (4)$$

Für das Intervall  $t_1$  bis  $t_2$  wird damit die mittlere Änderung der Schädigungsgeschwindigkeit

$$b_{sm 1,2} = \frac{v_{s2} - v_{s1}}{t_2 - t_1} \quad (5)$$

## 2.2. Spezifischer Summenölverlust $q_s$

Diese u. a. in [9] angeregte Kennzahl zur Charakterisierung des Schädigungsverlaufs wurde für alle Motoren nach folgender Berechnungsvorschrift ermittelt:

$$q_s = \frac{Q_{t_j}}{t_j} \cdot 100 \quad (6)$$

$q_s$  spezifischer Summenölverlust in %

$Q_{t_j}$  kumulativer Ölverlust bis zur Nutzungsdauer  $t_j$  in l Öl

$t_j$  Nutzungsdauer des Motors, ausgedrückt durch den kumulativen Kraftstoffverbrauch bis zum Zeitpunkt  $j$  in l DK.

Neben den in [9] diskutierten Vorteilen dieser Kennzahl müssen bei der Auswertung vor allem folgende Nachteile beachtet werden:

- Infolge der Berechnungsvorschrift ist der spezifische Summenölverlust kein Maßstab für die Schädigungsgeschwindigkeit.
- Der spezifische Summenölverlust stellt den Schädigungsverlauf verzerrt dar und gestattet keine vergleichenden Betrachtungen zum erreichten Schädigungszustand.

Durch die Berechnungsvorschrift bedingt, werden die drei bekannten Phasen des Schädigungsverlaufs — Einlauf, Betrieb (mit annähernd konstanter Schädigungsgeschwindigkeit) und Betriebsuntauglichkeit — in der grafischen Darstellung deutlich abgebildet (Bild 3).

Die Auswertung der  $q_s$ -Kurven gestattet folgende Schlußfolgerungen:

- Nach dem Einlaufabschnitt mit stark streuendem  $q_s$ -Verlauf nähert sich der spezifische Summenölverlust bei rd. 95% aller untersuchten Motoren einem bestimmten Stufenwert, der bis zum Abschnitt der Betriebsuntauglichkeit annähernd konstant bleibt. Der Abschnitt der Betriebsuntauglichkeit ist ebenfalls durch stark streuende  $q_s$ -Werte gekennzeichnet. Zu Beginn dieses Abschnitts erfolgte in der Praxis bei rd. 80% der Motoren ein Kolben-Gleitbuchsen-Wechsel bzw. ein Motortausch. Den Anteil der Motoren in den einzelnen Stufen zeigt Tafel 1.
- Der kausale Zusammenhang zwischen der Wirkung der Wirkkomplexe und dem Ölverlust und damit der Schädigungsgeschwindigkeit über der Nutzungsdauer kann als bestätigt angesehen werden, denn die nichtoptimalen Wirkkomplexe verursachen erhöhte Ölverluste gegenüber optimalen Wirkkomplexen. Beweise dafür sind:

- Die Häufung fabrikneuer Motoren in den Stufen 0,5% und 0,75% und die Häufung instand gesetzter Motoren in den Stufen 1,0% und 1,25% (Tafel 1). Eine unterschiedliche Häufung bei unterschiedlichem Pflegeniveau ist nicht nachweisbar.

- Die mittleren Intervalllängen für den Betriebsabschnitt ( $q_s$  annähernd konstant) zeigen für die Wirkkomplexpaare ähnliche Verhältnisse wie die Verteilungsparameter der mittleren Grenznutzungsdauer. Bei instand gesetzten Motoren ist z. Z. die mittlere Länge des Intervalls um rd. 35% kürzer als bei neuen Motoren (Tafel 2).

## 2.3. Regressionsanalyse der Schädigungsgeschwindigkeit $v_s$

Die Ermittlung des Verlaufs der Schädigungsgeschwindigkeit für die Betriebsabschnitte erfolgte getrennt nach den Wirkkomplexpaaren mit Hilfe der Regressionsrechnung (Tafel 3).

Der Vorteil dieser Untersuchungsmethode liegt bei einer hinreichend großen Zahl von Untersuchungsobjekten (Motoren) in der hohen statistischen Sicherheit der Aussage zum Verlauf der Schädigungsgeschwindigkeit.

Nachteilig wirkt sich der hohe Aufwand in der Praxis zur Ermittlung der  $v_s$ -Werte für eine gesicherte Regression aus (Bild 4).

Die Analyse der Ergebnisse der Regressionsrechnung ergibt:

- Der lineare Ansatz  $y = ax + b$  für die Beschreibung des Verlaufs der Schädigungsgeschwindigkeit im Betriebsabschnitt ist zulässig. Der Test auf korrelativen Zusammenhang zwischen der Schädigungsgeschwindigkeit und der Nutzungs-

Tafel 2. Mittlere Länge der Intervalle für den Betriebsabschnitt

Stufenwerte für konstante Schädigungsgeschw. in %	mittl. Länge der Intervalle in l DK			
	neu/gut	neu/schlecht	instand ges./gut	instand ges./schlecht
0.50	22 000	17 500	12 500	13 420
0.75	21 520	19 450	10 610	13 450
1.00	13 770	20 300	9 750	14 660
1.25	19 920	23 320	9 875	16 000
1.50	15 000	11 300	11 390	7 000

Tafel 3. Ausgangsparameter für die Regression

Wirkkomplexpaarung	Regressionsintervall (Betriebsabschnitt)	Regressionsfunktion	Anzahl der in die Regression einbezogenen $v_s$ -Werte
	l DK		
neu/gut	3000...40 000	$y = ax + b$	1116
neu/schlecht	3000...30 000	$y = ax + b$	1983
instand ges./gut	2000...22 000	$y = ax + b$	727
instand ges./schlecht	2000...22 000	$y = ax + b$	837

dauer bestätigt die Richtigkeit der Annahme einer linearen Regression.

- Die Vertrauensbereiche der mittleren Schädigungsgeschwindigkeit auf der Basis der Regressionsfunktionen zeigen im Betriebsabschnitt  $v_{s1}$  weitgehende Übereinstimmung mit den Vertrauensbereichen der mittleren Schädigungsgeschwindigkeit auf der Basis der Untersuchungen in den Nutzungsdauerintervallen.

#### 2.4. Kumulativer Ölverlust Q

Der kumulative Ölverlust als direkter Ausdruck für den erreichten Schädigungszustand und als eine Ausgangsgröße zur Berechnung der Schädigungsgeschwindigkeit kann über ein grafisch-rechnerisches Verfahren unmittelbar zur Ermittlung der Schädigungsgeschwindigkeit für beliebige Intervalle benutzt werden. Dieses Verfahren gestattet ebenfalls eine Einschätzung des Verlaufs der Schädigungsgeschwindigkeit.

Mit Hilfe eines geeigneten Nomogramms (Schablone) ist aus den Q-Kurven (Bild 5) die Schädigungsgeschwindigkeit sowohl für die gesamte Kurve als auch für bestimmte Intervalle direkt ablesbar.

Für die 242 Motoren wurden die Q-Kurven getrennt nach Wirkkomplexpaaren wie folgt ausgewertet:

- Ermittlung der Schädigungsgeschwindigkeit für den Betriebsabschnitt
- Ermittlung der Schädigungsgeschwindigkeit für Intervalle von

5000 l DK über der gesamten Nutzungsdauer des Motors. Bei einem jährlichen DK-Verbrauch von rd. 10 000 l DK bei ZT 300-Motoren und der Forderung, zwei Hauptüberprüfungen jährlich durchzuführen, entspricht das gewählte Untersuchungsintervall den praktischen Bedingungen.

Aus diesen Daten sind mit geeigneten statistischen Verfahren berechenbar:

- Verteilungsparameter der Schädigungsgeschwindigkeit bei Einfluß bestimmter Wirkkomplexe für beliebige Nutzungsdauerintervalle
- Dichtefunktionen der Schädigungsgeschwindigkeit in den Nutzungsdauerintervallen.

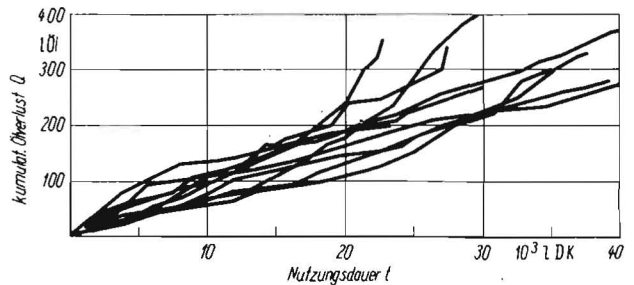
Die grafische Darstellung der Verteilungsparameter und der Dichtefunktionen der Schädigungsgeschwindigkeit (Ölwechselintervall 2000 l DK) wird am Beispiel des Wirkungskomplexes „neu/gut“ im Bild 6 gezeigt.

Die Analyse der Schädigungsgeschwindigkeit in den Nutzungsdauerintervallen von  $Q = 2000$  l DK zeigt:

- Der ermittelte Verlauf der Schädigungsgeschwindigkeit über der Nutzungsdauer bestätigt die drei bekannten Abschnitte.
- Der Variationskoeffizient der mittleren Schädigungsgeschwindigkeit nimmt mit der Nutzungsdauer zu.
- Die Dichtefunktionen der Schädigungsgeschwindigkeiten in den Nutzungsdauerintervallen zeigen maximale relative Häufigkeiten in der Größenordnung von 30 bis 40 %.

Die Aufbereitung von Daten der Schädigungsgeschwindigkeit benachbarter Nutzungsdauerintervalle gestattet Aussagen über die Änderung der Schädigungsgeschwindigkeit (Beschleunigung des Schädigungsvorgangs).

Aus den vorliegenden Daten wurden Dichtefunktionen für die Änderung der Schädigungsgeschwindigkeit berechnet und dargestellt (Bild 7). Die Dichtefunktionen der Änderung der Schädigungsgeschwindigkeit zeigen maximale relative Häufigkeiten von 25 bis 35 %. Diese Dichtefunktionen sind schief, d. h., mit der Nutzungsdauer steigt der Anteil der Motoren, deren Schädigungsgeschwindigkeit progressiv zunimmt.



5

4

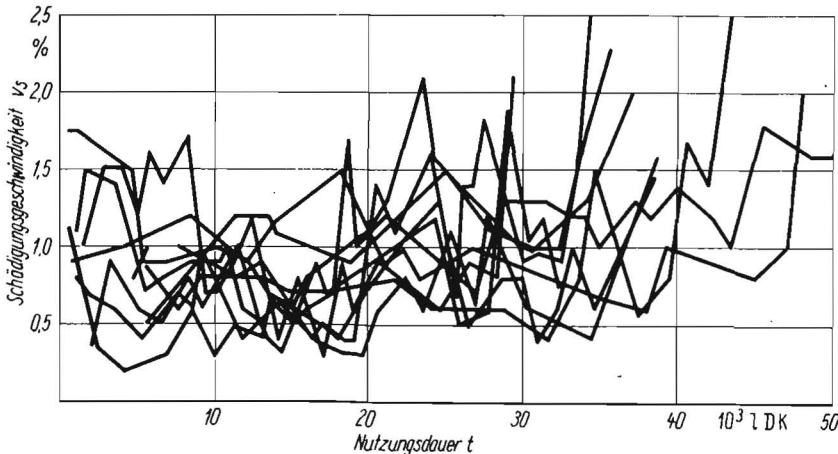
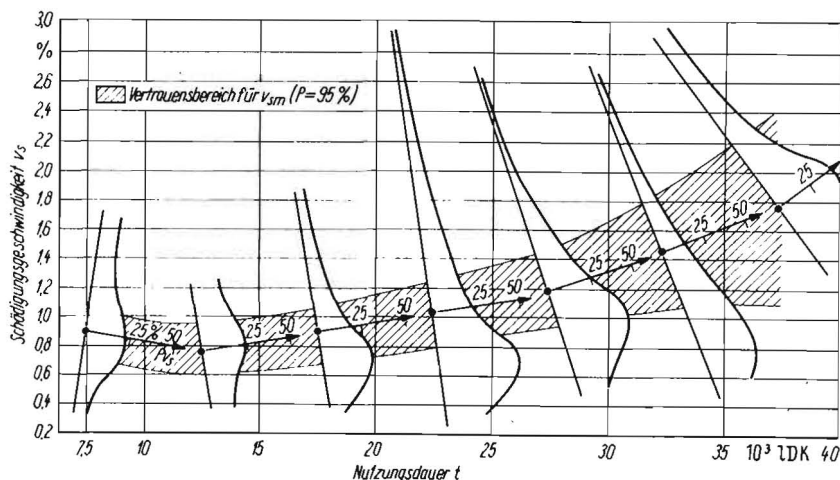


Bild 4. Schädigungsgeschwindigkeiten fabrikneuer ZT 300-Motoren, gutes Pflege-niveau

Bild 5. Kumulativer Ölverlust bei Motoren 4 VD 14,5/12-1 SRW mit dem Wirkungskomplex „Neufertigung/gutes Pflege-niveau“

Bild 6. Dichtefunktionen der Schädigungsgeschwindigkeit  $v_s = f(\Delta Q/2000 \text{ l DK})$  bei Motoren 4 VD 14,5/12-1 SRW (neu/gut)

Bild 7. Dichtefunktionen der Änderung der Schädigungsgeschwindigkeit  $b_s = (\Delta v_s/5000 \text{ l DK})$  bei Motoren 4 VD 14,5/12-1 SRW (neu/gut); 1) prozentualer Anteil der Motoren, deren Schädigungsgeschwindigkeit in den Intervallen zunimmt



Tafel 4. Subjektive Fehlerquellen

Einflüsse auf absoluten Fehler		Veränderung $\Delta a$ %
Verkleinerung	Vergrößerung	
Verkürzung des Ölwechselintervalls um 100 l DK	Verlängerung des Ölwechselintervalls um 100 l DK	0,05
1 x Luftfilteröl zusätzlich gewechselt	1 x Luftfilteröl nicht gewechselt bzw. Motorenaltöl verwendet	
max. Ölmenge (obere Markierung) abgelassen	min. Ölmenge (untere Markierung) abgelassen	0,1

### 2.5. Fehlerabschätzung

Das angewendete Erfassungssystem für die Primärdaten läßt eine grobe Fehlerabschätzung für die errechneten  $v_s$ -Werte zu, da keine Vergleichsdaten für die ermittelten Primärdaten verfügbar sind. Wird davon ausgegangen, daß der monatliche Kraftstoffverbrauch von den Nutzern mit einem Fehler von etwa  $\pm 3\%$  und der monatliche Ölverbrauch mit einem Fehler von etwa  $\pm 5\%$  (bedingt vor allem durch Rundung für ganzzahlige Litermengen und durch Fehlmengen beim Ölwechsel) erfaßt werden, so kann nach den Gesetzen der Fehlerrechnung ein zufälliger Fehler von etwa  $\pm 15\%$  für die errechneten  $v_s$ -Werte erwartet werden. Subjektive Fehler bei der Einhaltung der Pflegevorschriften führen ausgehend von einem Ölwechselintervall von 2000 l DK zu Veränderungen des absoluten Fehlers (Tafel 4).

### 3. Gesamteinschätzung

Die statistische Untersuchung [15] des Ölverlustes von 242 Motoren 4 VD 14,5/12-1 SRW läßt folgende Einschätzungen zur Ermittlung der Schädigungsgeschwindigkeit zu:

- Der Ölverlust ist eine geeignete Kennzahl zur Bestimmung der Schädigungsgeschwindigkeit der Kolben-Gleitbuchsen-Gruppe des Motors 4 VD 14,5/12-1 SRW.
- Als Basis für die Restnutzungsdauerprognose dienen
  - Regressionsfunktionen für den Verlauf der Schädigungsgeschwindigkeit im Betriebsabschnitt
  - Dichtefunktionen der Schädigungsgeschwindigkeit und ihre Änderung in Intervallen.
- Die Streuung der Schädigungsgeschwindigkeit im Betriebsabschnitt nimmt mit steigender Nutzungsdauer zu. Der Variationskoeffizient von  $v_s$  erhöht sich dabei von rd. 30% auf rd. 50%.

- Unterschiedliche Betriebsbedingungen, charakterisiert durch Wirkkomplexe, beeinflussen den Verlauf der Schädigungsgeschwindigkeit über der Nutzungsdauer unterschiedlich.
- Der spezifische Summenölverlust charakterisiert den Verlauf der Schädigungsgeschwindigkeit unzureichend. Geeignet ist die statistische Analyse des kumulativen Ölverlusts in Nutzungsdauerintervallen.

### Literatur

- [1] Eichler, C.; Schiroslawski, W.: Einige Probleme der Restnutzungsdauerprognose für Elemente technischer Arbeitsmittel. Wissenschaftliche Zeitschrift der Universität Rostock, Math.-naturwiss. Reihe 23 (1974) H. 6/7, S. 437—442.
- [2] Ihle; Gäbler: Optimierung des Aufwandes für die technische Diagnose. PVB Charlottenthal, Forschungsbericht B 55/72 (unveröffentlicht).
- [3] Mauritz, P.: Instandhaltungsprozesse. Universität Rostock, Sektion Landtechnik, Forschungsabschlußbericht 1972 (unveröffentlicht).
- [4] Jofinov; Agejev: Grundlagen der technischen Nutzung des Maschinen- und Traktorenparkes. Leningrad: Verlag Kolos 1972.
- [5] Eichler, C.: Grundlagen der Instandhaltung. Berlin: VEB Verlag Technik 1973.
- [6] Aleksandrov: Prognostizierung des Verschleißes und der technischen Lebensdauer der Teile von Schiffsdieselmotoren. Vestnik mašinostroenija (1969) H. 12, S. 28—29.
- [7] Michlin; Selcer: Methodische Anleitungen zur Ausarbeitung von Prognosen des technischen Zustandes von Maschinen. Moskau: Verlag Kolos 1972.
- [8] Bauermeister; Berg: Zur Ermittlung von Verschleißnormen und Möglichkeiten der demontagetägigen Verschleißüberwachung von Kfz. IH Zwickau, Sektion Kraftfahrzeugtechnik, (1972) H. 2, S. 89.
- [9] Harji: Untersuchungen über den Ölverbrauch von Fahrzeugdieselmotoren. TU Dresden, Sektion Kraftfahrzeug-, Land- und Fördertechnik, Diplomarbeit 1972 (unveröffentlicht).
- [10] Pogorelyi, E. P.: Statistische Darstellung äußerer Bedingungen und Prozesse mobiler Aggregate. Mech. i elektrif. soc. selsk. choz. (1971) H. 11.
- [11] Thum, E.: Untersuchungen über Leistungsabfall und spezifischen Kraftstoffverbrauch an Schleppermotoren... Martin-Luther-Universität Halle, Landmaschinen-Institut, Dissertation 1961 (unveröffentlicht).
- [12] Englisch, C.: Kolbenringe, Bd. II Betriebsverhalten und Prüfung. Wien: Springer-Verlag 1958.
- [13] Fabian, V.: Statistische Methoden. Berlin: Verlag Die Wirtschaft 1970.
- [14] Holzer: Untersuchungen zum Verschleiß im Zylinder von Verbrennungsmaschinen. München: Springer-Verlag 1952.
- [15] Borrmann, K.-D.; Leopold, K.: Untersuchungen zu schädigenden Einflüssen auf Baugruppen landtechnischer Arbeitsmittel. Universität Rostock, Sektion Landtechnik, Dissertation 1975 (unveröffentlicht).

