

Die Senkung der Instandhaltungskosten für landtechnische Arbeitsmittel setzt u. a. voraus, daß das Abnutzungsverhalten und insbesondere das Verschleißverhalten aller Baugruppen und Maschinenelemente wissenschaftlich analysiert wird. Darauf aufbauend muß eine objektive Schadensgrenzenbestimmung erfolgen, die das o. g. Ziel folgendermaßen erfüllen hilft:

- objektive Grundlage für die Schadensaufnahme im LIW und KfL und damit Verbesserung der Qualität der Instandsetzung
- weitgehende Ausnutzung der Restnutzungsdauer der Einzelteile und Baugruppen
- objektive Grundlage für den Konstrukteur, für eine weitgehende Grenznutzungsdauerabstimmung

1. Methoden der Schadensgrenzenbestimmung

Aus den in der Literatur [1] [2] [3] dargelegten Kriterien für die Schadensgrenzenbestimmung stellte ULRICH [4] folgende Methoden zusammen:

- analytische Berechnung
- experimentelle Bestimmung
- Bestimmung nach der Verschleißgeschwindigkeit
- empirische Bestimmung

Im folgenden soll auf die Methode zum Bestimmen der Schadensgrenze mit Hilfe der Verschleißgeschwindigkeit näher eingegangen werden. Grundlage für diese Methode ist das technische Kriterium, das „...die technisch mögliche Nutzungsdauer...“ [2] bestimmt. Es ist zu bemerken, daß der Begriff „Verschleißgeschwindigkeit“ in diesem Zusammenhang nicht exakt ist, da sich die gesamte Schädigung in Form der Abnutzung in der bekannten Verschleißkurve widerspiegelt. Unter Beachtung dieser Tatsache soll weiterhin der Begriff „Verschleißkurve“ verwendet werden.

Im Bild 1 sind die möglichen Korrelationen in Form der Kurven *a* und *b* angegeben.

Die Form — Bild 1, Kurve *a* — wurde bei praktischen Untersuchungen in einigen Fällen bestätigt [2] [5] [6] [7].

TARTAKOWSKI [6] quantifizierte die Funktion $V = f(t)$. Er weist darauf hin, daß statistische Untersuchungen die Vielfalt der wirkenden Faktoren, z. B. spezifischer Druck auf die Berührungsflächen, Verschmutzung des Schmiermittels u. a., erfassen und diese in Form der Dispersion sowohl der Verschleißgeschwindigkeit als auch der Nutzungsdauer widerspiegeln (Bild 2).

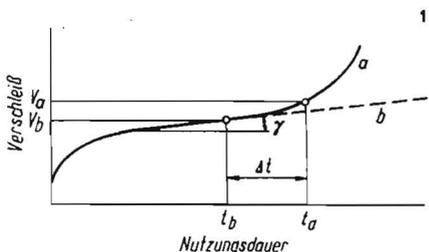
TARTAKOWSKI [6] gibt folgenden mathematischen Zusammenhang für die einzelnen Kurven an:

$$\text{für } a \quad t = (1 + m) A_1 \lg \frac{h_1 + V}{h_1 - V_{E1}} + t_{MP} \quad (1)$$

* Sektion Landtechnik der Universität Rostock (Direktor: Prof. Dr.-Ing. habil. CHR. EICHLER)

Bild 1. Qualitative Korrelation zwischen Verschleiß *V* und der Nutzungsdauer *t* bis zur nächsten planmäßigen Überprüfung oder Instandsetzung; V_a Aussonderungsgrenze, V_b Betriebsgrenze, $\tan \gamma$ Verschleißgeschwindigkeit

Bild 2. Verschleißkurve nach I. B. TARTAKOWSKI



$$\text{für } b \quad t = (1 + m) A_2 \lg \frac{h_2 + V}{h_1 - V_{E2}} + t_{MP} \quad (2)$$

$$\text{für } c \quad t = A_3 \lg \frac{h_3 + V}{h_3 - V_{EM}} + t_{MP} \quad (3)$$

Darin bedeuten:

- m* Koeffizient der Streuung (in Abhängigkeit von der Genauigkeit der Berechnung)
 $0 \leq m \leq 0,2$
- $V_{E1} + V_{E2}$ untere und obere Grenze der Abweichung des Teiles nach dem Einlaufen
- V_{EM} Medialwert der Verteilung des Verschleißes des Teiles nach dem Einlaufen
- V* laufender Verschleiß des Teiles
- t* Nutzungsdauer des Teiles
- h_1, h_2, h_3 Koeffizienten der Verschiebung der Verschleißkurve
- A_1, A_2, A_3 Koeffizienten der Lebensdauer (Nutzungsdauer)

2. Zusammenhang Verschleißkurve — Schadensgrenzen

Bild 1, Kurve *a* zeigt die Verschleißkurven mit dem progressiven Anstieg, der zum Festlegen der Aussonderungsgrenze V_a herangezogen wird. Nach TGL 80-22278 ist die Aussonderungsgrenze der „Kennwert für den Schädigungszustand, von dem an die Betriebstauglichkeit in unzulässiger Weise gemindert ist“.

Die Aussonderungsgrenze ist Ausgangspunkt für das Festlegen des Betriebsgrenzmaßes V_b . TGL 80-22278 beinhaltet folgende Definition: Die Betriebsgrenze ist der „Kennwert für den Schädigungszustand, bei dem zu erwarten ist, daß unter normalen Betriebsbedingungen die Betriebstauglichkeit noch bis zur nächsten planmäßigen Überprüfung oder Instandsetzung erhalten bleibt“.

Wie aus Bild 1 ersichtlich ist, läßt sich V_b wie folgt berechnen:

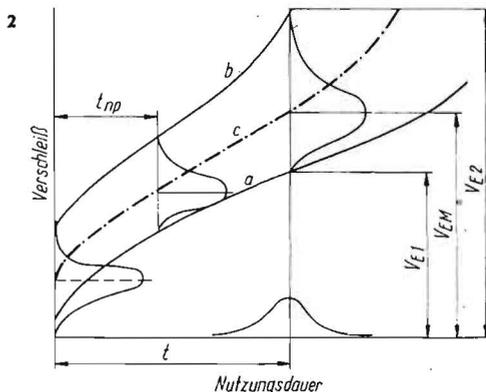
$$V_b = V_a - \tan \gamma \cdot \Delta t \quad (4)$$

Beachtet man die Dispersionen sowohl der Verschleißgeschwindigkeit als auch der Nutzungsdauer bis zur nächsten planmäßigen Überprüfung oder Instandsetzung (Bild 2), so ergibt sich folgende Gleichung:

$$V_b = V_a - \frac{dV}{dt} \left[1 + xS \left(\frac{dV}{dt} \right) \right] \cdot \Delta t \left[1 + xS(\Delta t) \right] \quad (5)$$

Hierin sind:

- x* Faktor der geforderten Sicherheit
- $S \left(\frac{dV}{dt} \right)$ Standardabweichung der Verschleißgeschwindigkeit in Prozent
- $S(\Delta t)$ Standardabweichung der Nutzungsdauer in Prozent



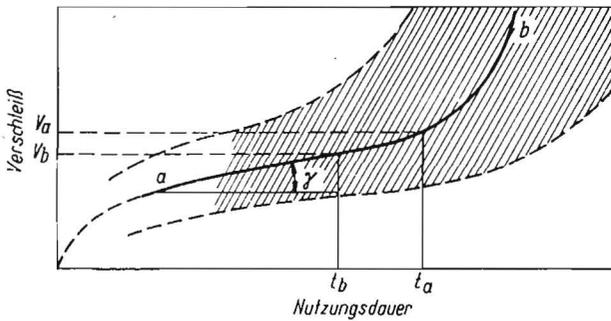


Bild 3. Auswertung einer Punktwolke mit Hilfe linearer und nicht-linearer Regression; a lineare Regressionsgerade, b nicht-lineare Regressionskurve

Um Gleichung (5) anwenden zu können, müssen folgende Größen untersucht werden:

- Aussonderungsgrenze V_a
- Verschleißgeschwindigkeit $\frac{dV}{dt}$

Es muß eine Methode erarbeitet werden, die es gestattet, schon während des Anlaufprozesses auf die mittlere Verschleißgeschwindigkeit zu schließen (Extrapolation)

- Standardabweichung $S \frac{dV}{dt}$, $S(\Delta t)$

Es ist zu untersuchen, mit welchen Größen der Standardabweichung zu rechnen ist.

3. Statistische Verschleißanalyse an den Kurbelwellen-Hauptlagern des FD 22

3.1. Untersuchungsmethode

Um über den Kurvenverlauf $V = f(t)$ etwas aussagen zu können, müssen Wertepaare X_i und Y_i ($i = 1 \dots n$) der Grundgesamtheit herangezogen werden [8].

Im vorliegenden Fall entsprechen die Y_i -Werte den Verschleißwerten V_i des Untersuchungsobjektes und die X_i -Werte der dazugehörigen Nutzungsdauer t_i .

In einem kartesischen Koordinatensystem stellen die Werte der Stichprobe eine Punktwolke dar (Bild 3). Mit Hilfe der Regressionsanlage wird der korrelative Zusammenhang der Zufallsgrößen V und t ermittelt.

Wie aus Bild 3 zu erkennen ist, sind die Realisierungen V_i bei fest vorgegebenen Werten t_i unterschiedlich. Diese Unterschiede sind damit zu erklären, daß neben der Zufallsgröße t noch eine Anzahl zufälliger Faktoren Einfluß haben. Im speziellen Fall treten neben der Zufallsgröße der Nutzungsdauer, die Belastungsart, die Parameter der Maschinenelemente — Härte, Härtetiefe, Oberflächengüte u. a. — auf.

Derartige Untersuchungen können nur aussagekräftig sein, wenn eine stochastische Abhängigkeit der einzelnen Zufallsgrößen vorliegt. Eine statistische Untersuchung und Auswertung muß folgende Hauptpunkte beinhalten:

- Funktion der Regressionslinie
- Signifikanznachweis der Regressionskoeffizienten
- Signifikanznachweis der korrelativen Abhängigkeit
- Berechnung des Konfidenzintervalles.

3.2. Durchführung der Verschleißanalyse

- Auswahl des Untersuchungsobjektes

Zu untersuchen war nicht eine spezielle Verschleißcharakteristik, sondern die Methode. Zu diesem Zweck war ein Untersuchungsobjekt auszuwählen, das in sehr großer Stückzahl zentral instand gesetzt wird und einen konstruktiven Aufbau hat, der mit minimalem Aufwand die Verschleißermittlung gestattet. Diesen Anforderun-

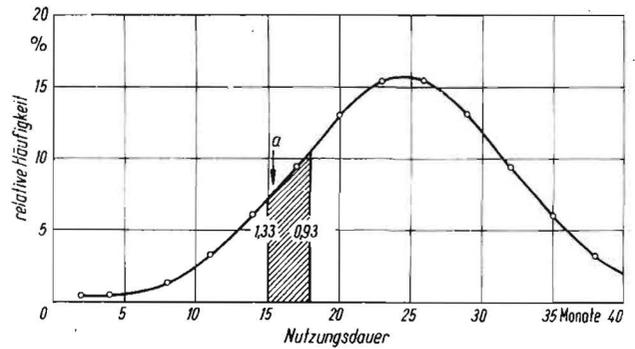


Bild 4. Verteilungsfunktion $\Phi(x)$ der normierten Verteilung zur Berechnung der in der Zeitspanne $a-b$ zu erwartenden Motore; a geplanter Untersuchungszeitraum; Ergebnisse der Voruntersuchung: $\bar{x} = 24,5$, $s = \pm 7,5$, $n = 231$;

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

$$\Phi(0,93) = 0,823\ 814$$

$$\Phi(1,33) = 0,908\ 241$$

$$\frac{0,074\ 427 \cdot 3000 \approx 220 \text{ Motore werden im geplanten Untersuchungszeitraum anfallen}}$$

genügt der Motor FD 22. Als Untersuchungsobjekt wurden die hydrodynamisch geschmierten Kurbelwellenhauptlager des FD 22 ausgewählt.

- Untersuchungszeitraum

Als Untersuchungszeitraum wurde die Zeitspanne zwischen zwei Grundüberholungen des Motors festgelegt.

Um rationell zu Ergebnissen zu kommen, waren Voruntersuchungen über den geeigneten Zeitpunkt für Messungen notwendig.

Ausgangspunkt für diese Voruntersuchungen war eine Stichprobe zum Ermitteln des mittleren Anfallsfaktors. Aus den Werten wurde die normierte Verteilungsfunktion (Normalverteilung) aufgestellt (Bild 4).

Die Verteilungsfunktion

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (6)$$

gestattet es, die in einem Zeitraum $X_1 - X_2$ zu erwartenden Objekte zu bestimmen.

Beispiel:

Im IV. Quartal 1968 (3 Monate) wurden 3000 Motore instand gesetzt. Der mittlere Anfallsfaktor wurde aus einer Stichprobe $n = 231$ mit $k = 0,5$ bestimmt. Es war zu berechnen, wie lange die Messungen ab dem Zeitpunkt $X_1 = 15$ Monate durchzuführen sind, um 200 Werte zu erhalten.

Aus Bild 4 und Gleichung (6) läßt sich der Zeitraum $X_1 - X_2 = 4$ Monat bestimmen.

Ebenso kann man nach der o. g. Methode ermitteln, wann mit den Untersuchungen begonnen werden muß (X_1), wenn in einem Zeitraum $X_1 - X_2$ Objekte ausgemessen werden sollen.

3.2.1. Verschleißmessungen im LIW Halle

Um den Verschleißbetrag zwischen beiden Grundüberholungen bestimmen zu können, mußte das Einbauspil (Mittelwert und Standardabweichung) aus den Meßblättern der Lebenslaufakte berechnet werden.

Die Werte sind für beide Lagerstellen gleich und betragen $7 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$.

3.2.2. Ermittlung der Nutzungsdauerwerte

Die Nutzungsdauerwerte wurden durch Befragen der landwirtschaftlichen Produktionsbetriebe ermittelt.

Es muß an dieser Stelle die Frage gestellt werden, ob in einer Reihe von landwirtschaftlichen Betrieben die Bedeu-

Tafel 1. Werte der Regressionsanalyse

Verschleißpaarung Verschleißteil	Regressionsgeraden- Gleichung	Konfidenzintervall des Regressions- Koeffizienten	Signifikanztest des Regressions- Koeffizienten	Bestimmtheits- maß	Standard- abweichung
	$V = a + b t$	$b \pm t \cdot Sb$ μm	t_B	B	μm
1 gehäuseseitig Hauptlagerwelle	$V = 5,83 + 0,001 t$	$b \pm 2,0 \cdot 10^{-3}$	$13,27 > t_{\alpha}, F$	0,404*	$\pm 2,16$
2 deckelseitig Hauptlagerwelle	$V = 4,07 + 0,0007 t$	$b \pm 0,1 \cdot 10^{-3}$	$11,67 > t_{\alpha}, F$	0,376*	$\pm 2,1$
1 gehäuseseitig Hauptlager	$V = 3,95 + 0,0009 t$	$b \pm 2,1 \cdot 10^{-3}$	$9 > t_{\alpha}, F$	0,279	$\pm 2,12$
2 gehäuseseitig Welle	$V = 1,11 + 0,0004 t$	$b \pm 5,5 \cdot 10^{-3}$	$7,5 > t_{\alpha}, F$	0,23	$\pm 1,27$
3 deckelseitig Hauptlager	$V = 3,7 + 0,0003 t$	$b \pm 0,9 \cdot 10^{-3}$	$4,4 > t_{\alpha}, F$	0,15	$\pm 1,74$
4 deckelseitig Welle	$V = 0,71 + 0,0005 t$	$b \pm 0,7 \cdot 10^{-3}$	$12,3 > t_{\alpha}, F$	0,33	$\pm 1,02$

$n = 31$
 $\alpha = 0,05$

$\bar{t} = 2470 t DK$

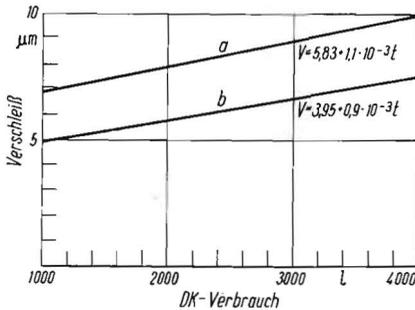


Bild 5. Regressionsgeraden; a Hauptlager - Welle (gehäuseseitig), b Hauptlager - Welle (deckelseitig)

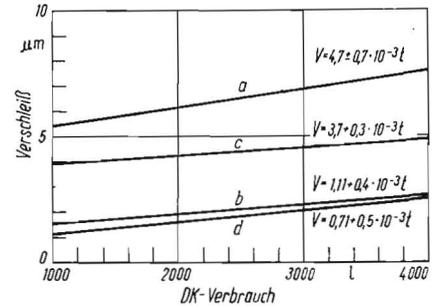


Bild 6. Regressionsgeraden der einzelnen Verschleißteile; a Hauptlager (gehäuseseitig), b Welle (gehäuseseitig), c Hauptlager (deckelseitig), d Welle (deckelseitig)

tung derartiger Untersuchungen richtig eingeschätzt wird. Das Hauptanliegen der Landwirtschaft, die Verfügbarkeit der landtechnischen Arbeitsmittel zu erhöhen, kann nur in kurzer Zeit realisiert werden, wenn die Nutzer der Landtechnik, die Konstrukteure und die Instandhalter enger zusammenarbeiten.

3.3.3. Ergebnisse der Verschleißanalyse

Eine Auswertung der Punktwolken, die sich aus den Verschleiß- und den Nutzungsdauerwerten ergaben, erfolgt mit Hilfe der Regressionsanalyse. Die Form der Punktwolke deutete lineare Korrelation an. In den Bildern 5 und 6 sind die entsprechenden Regressionsgeraden angegeben. In Tafel 1 ist der Signifikanztest der Regressionskoeffizienten ausgeführt, der eindeutig die Linearität ausweist.

Eine signifikante Korrelation zwischen Verschleiß und Nutzungsdauer konnte nur bei den Paarungen Hauptlager—Welle (gehäuseseitig) und Hauptlager—Welle (deckelseitig) nachgewiesen werden.

Aus den Punktwolken war ein progressiver Anstieg der Kurve nicht zu erkennen.

4. Auswertung und Schlußfolgerungen

Ziel der Untersuchungen war es, eine Methode zum Bestimmen der Schadensgrenzen (mit Hilfe der Verschleißgeschwindigkeit) auf ihre Anwendbarkeit hin zu überprüfen.

Derartige Untersuchungen können nur zum Erfolg führen, wenn der Nutzungszeitraum so groß gewählt wird, daß sich in der Punktwolke der Verschleiß- und Nutzungsdauerwerte eine progressive Veränderung der Verschleißgeschwindigkeit $\frac{dV}{dt}$ zeigt.

Die hier ermittelten Ergebnisse erlauben, folgendes festzustellen:

— es hat sich bestätigt, daß über einen gewissen Nutzungsdauerzeitraum eine lineare Korrelation zwischen Ver-

schleiß- und Nutzungsdauer zum Berechnen der Verschleißgeschwindigkeit auftritt. Die Signifikanz der Korrelation ist durch eine größere Anzahl von Meßwerten für jedes Verschleißteil nachzuweisen.

— Parallel zu derartigen statistischen Untersuchungen sind Prüfstandversuche zu fahren, um die technisch mögliche Verschleißgrenze zu ermitteln (Grenze ist das Nichtzustandekommen des erforderlichen Druckberges bei hydrodynamischer Schmierung). Ist die technisch mögliche Verschleißgrenze bekannt, dann kann etwas über die Lage der Untersuchungsergebnisse (Regressionsgeraden) in der Verschleißcharakteristik ausgesagt werden.

Literatur

- [1] EICHLER-RUDOLPH, u. a.: Grundlagen der Instandhaltung von Landmaschinen und Traktoren. Berlin: VEB Verlag Technik 1964
- [2] ULRICH, K.: Zur Bestimmung des zulässigen Verschleißes von Einzelteilen und Baugruppen landtechnischer Arbeitsmittel. Deutsche Agrartechnik 17 (1967) H. 9, S. 397
- [3] KASARZEW, W.: Ob osnovnyh kriterijach dlja ustanovlenja predelno dopustimych iznosov detalej mashin (Hauptkriterien zur Bestimmung zulässiger Verschleißgrenzwerte von Maschinenteilen). Vestnik S. / Ch. nauk 4 (1959) H. 3, S. 85 bis 91
- [4] ULRICH, K.: Beitrag zur Bestimmung der Verschleißgrenzen von Einzelteilen und Baugruppen landtechnischer Arbeitsmittel. Dissertationsschrift 1969 Dresden
- [5] WITTE, Ch., u. a.: Forschungsbericht des PVB Charlottenthal 1968. (unveröffentlicht)
- [6] TARTAKOWSKI, I. O.: Methode zur Verschleißberechnung bei Maschinenteilen. Wertnik maschinostroenie Moskau (1967) S. 34 bis 37
- [7] DAMIR: Vortrag zum 3. Oberflächenkolloquium 24. bis 26. Oktober 1969 an der TH Karl-Marx-Stadt
- [8] STORM: Wahrscheinlichkeitsrechnung, Mathematische Statistik. Statistische Qualitätskontrolle. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1965
NIEMANN: Maschinenelemente Bd. 1. Berlin: Springer-Verlag 1958
LANGE, L.: Anwendung der mathematischen Statistik zur Berechnung der optimalen Zeitspanne für die Durchführung von statistischen Erhebungen. Beleg an der Universität Rostock, Sektion Landtechnik 1969 (unveröffentlicht)
LANGE, L.: Erarbeitung einer Methode für das statistische Ermitteln von Verschleißkurven. Ingenieurarbeit Universität Rostock, Sektion Landtechnik 1970 (unveröffentlicht) A 8051