Dipl.-Ing. L. KÖHLER, KDT*

Zur optimalen Abstimmung des Maschinenverhaltens auf die Instandsetzungsstrategie landtechnischer Arbeitsmittel

1. Einleitung

Mit dem Übergang zu industriemäßigen Produktionsmethoden in der Landwirtschaft unserer Republik werden immer mehr hochproduktive Maschinen und Anlagen eingesetzt. Im gesamten landwirtschaftlichen Produktionsprozeß sind diese in Maschinenketten eingegliedert. Der Ausfall einer Einzelmaschine kann dabei den Stillstand der ganzen Kette herbeiführen. Unökonomisches Auslasten und zum Teil enorm hohe Verlustkosten technologischer und biologischer Art sind die Folge. Die Kenntnis des Maschinenverhaltens stellt deshalb einen wesentlichen Ausgangspunkt zur wirtschaftlichen Nutzung der Arbeitsmittel dar. Optimalwerte sind nur dann zu erreichen, wenn die Kosten — bezogen auf das landwirtschaftliche Endprodukt — unter Berücksichtigung von Herstellung, Nutzung und Instandhaltung minimiert werden. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen schon bei der Projektierung und Konstruktion von Maschinen die Anforderungen der Nutzer und Instandhalter berücksichtigt werden, beziehungsweise sind realisierbare Anforderungen von den Herstellern an die Nutzer und Instandhalter zu stellen.

Das zu projektierende System muß daher in seinem Maschinenverhalten auf die Instandsetzungsstrategie abgestimmt werden.

2. Definition wichtiger Begriffe

Das Maschinenverhalten ist in /1/ definiert:

„Veränderung der Betriebstauglichkeit in der Nutzungsdauer und Beziehung zur Wiederherstellung der Betriebstauglichkeit".

Unter System und Element soll in diesem Zusammenhang verstanden werden:

System: Menge von Elementen und Menge von Relationen, die zwischen diesen Elementen bestehen /2/. Ein System besitzt eine definierte Grenze, die die eigenen Elemente von den Elementen anderer Systeme abgrenzt.

Element: Bestandteil eines Systems.

3. Darstellung des Maschinenverhaltens

Das Maschinenverhalten kann durch eine der Kennziffern der Zuverlässigkeitstheorie, der Überlebenswahrscheinlichkeit, der Ausfallwahrscheinlichkeit, der Ausfallrate oder der Dichtefunktion der Ausfälle charakterisiert werden /3/.

Die Zuverlässigkeit als Überlebenswahrscheinlichkeit dargestellt betrachtet die Elemente jedoch nur bis zu ihrem ersten Ausfall. In der Praxis sind aber mehrere Elemente zu einem System zusammengefaßt, dessen normative Nutzungsdauer zumeist höher als die durchschnittliche Grenznutzungsdauer eines Großteils der Elemente ist. Deshalb muß die Ausfallwahrscheinlichkeit über der gesamten Nutzungsdauer dargestellt werden. Wir treffen hier die Annahme, daß nach einem Ausfall eines Elements das jeweilige Element gegen ein betriebstaugliches ausgetauscht wird. Das Ersatzelement kann neu oder instand gesetzt sein.

Dieser Prozeß ist mit einem bei BEICHELT /4/ beschriebenen Erneuerungsprozeß vergleichbar. Es treten hierbei dieselben mathematischen Beziehungen auf.

Der betrachtete Prozeß ist eine Folge x_i ($i = 1, 2 \ldots$) identisch verteilter, positiver Zufallsgrößen. Mit x_i wird die Grenznutzungsdauer des i-ten sich im Nutzungsprozeß befindlichen Elementes bezeichnet.

Die x_1, $x_1 + x_2$, $x_1 + x_2 + x_3$, ... heißen Ausfallpunkte. Jeder dieser Punkte ist die Basis für einen neuen Nutzungsprozeß. Bei der mathematischen Betrachtung geht man von der Verteilungsfunktion der Ausfallzeitpunkte aus.

$$\dot{x}_n = \sum_{i=1}^{n} x_i \qquad (1)$$

Damit kann die Wahrscheinlichkeit der Anzahl der Ausfälle im Intervall $[0, t]$ bestimmt werden.

$$F^{(n)}\{t\}^1 = P\{\dot{x}_n < t\} \qquad (2)$$

Daraus läßt sich die minimale Anzahl von Reserveelementen berechnen, um den Nutzungsprozeß mit einer bestimmten Sicherheitswahrscheinlichkeit gewährleisten zu können.

$$1 - F^{(n)}\{t\} \geqq 1 - \alpha \qquad (3)$$

wobei $1 - \alpha$ die vorgegebene Sicherheitswahrscheinlichkeit bedeutet. Für $F^{(n)}\{t\}$ ergibt sich das $(n - 1)$-fach gefaltete Integral.

$$F^{(n)}\{t\} = \int_0^t F^{(n-1)}\{t - u\} \cdot dF\{u\} \qquad (4)$$

Durch Differentiation erhält man die Dichte

$$f^{(n)}\{t\} = \int_0^t f^{(n-1)}\{t - u\} \cdot f\{u\} \cdot du \qquad (5)$$

Diese Integrale sind nur für die Exponentialverteilung geschlossen lösbar. Es besteht aber die Möglichkeit, mit der Laplace-Transformation Näherungslösungen für andere Verteilungsfunktionen zu erhalten. Zur Charakterisierung des Maschinenverhaltens über der Nutzungsdauer sind folgende Kennziffern notwendig:

a) Mittlere Anzahl von Instandsetzungen $N\{t\}$ im Zeitraum $(0, t)$

b) $n\{t\}$ als Instandsetzungsintensität.

Die nachstehenden mathematischen Beziehungen ergeben sich:

$$N'\{t\} = n\{t\} \qquad (6)$$

$$N\{t\} = \sum_{n=1}^{\infty} F^{(n)}\{t\} \qquad (7)$$

Mit Formel (4) ist:

$$N\{t\} = \int_0^t [1 + N\{t - u\}] \cdot dF\{u\} \qquad (8)$$

Durch Differentiation ist die Instandsetzungsintensität gleich:

$$n\{t\} = f\{t\} + \int_0^t n\{t - u\} \cdot f\{u\} \cdot du \qquad (9)$$

Die Instandsetzungsintensität eines aus n-Elementen bestehenden Systems errechnet sich durch additive Verknüpfung der Instandsetzungsintensitäten der Elemente:

$$n_{ges}\{t\} = n_1\{t\} + n_2\{t\} + \cdots + n_n\{t\} \qquad (10)$$

Es wurde schon darauf hingewiesen, daß die explizite Lösung der Gleichung (4) und (5) und damit auch der Gleichung (9) nur in seltenen Fällen möglich ist.

KOZNIEWSKA /5/ entwickelte deshalb ein primär vom Verteilungsgesetz unabhängiges Modell, das eine Näherungslösung für $n\{t\}$ ergibt.

$$n\{t\} = \sum_{i=1}^{t} n_{t-i} \cdot p_i \qquad (11)$$

* Technische Universität Dresden, Sektion Kraftfahrzeug-, Land- und Fördertechnik (Direktor: Prof. Dr. agr. habil. R. THURM)

[1] { } bedeutet: Funktion von bzw. Funktionswert an der Stelle

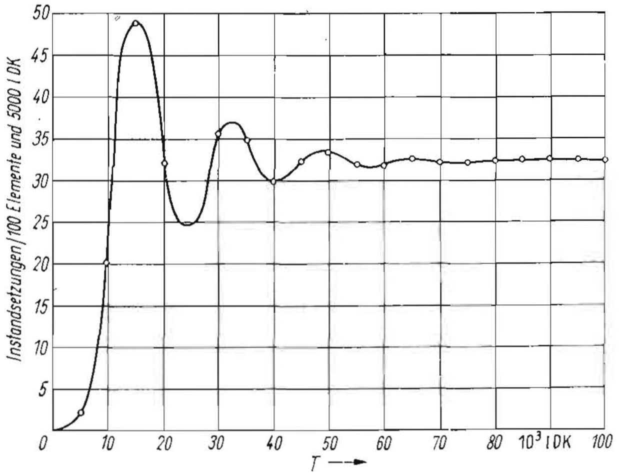


Bild 1. Darstellung der Instandsetzungsintensität beim Steuerblock des MTS-50 über der Nutzungsdauer

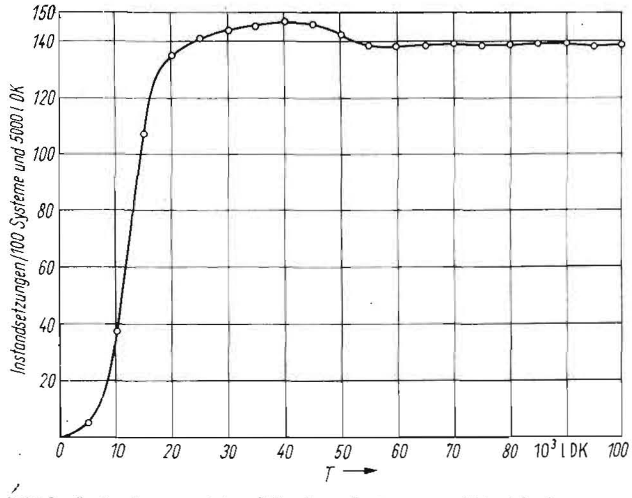


Bild 2. Instandsetzungsintensität eines Systems am Beispiel eines Traktors

Es bedeuten:

p_i Wahrscheinlichkeit der Instandsetzung nach i Zeitabschnitten, unter der Bedingung, daß das Element i Zeitabschnitte betriebstauglich war.

n_{t-i} Instandsetzungsintensität zum Zeitpunkt t — i.

Je kleiner das Zeitintervall i gewählt wird, um so genauer ist die Näherungslösung. Aufgrund der Summenbildung über der Zeit ist das Ergebnis von Gleichung (11) eine diskrete Funktion. Einschränkend muß noch gesagt werden, daß die Instandsetzungen in dem von KOZNIEWSKA aufgestellten Modell nur am Ende des jeweiligen Intervalls vorgesehen sind. Dadurch ergibt sich eine Verschiebung des 1. Maximums der Instandsetzungsintensität um $0{,}5\,i$ zu höherer Nutzungsdauer und des n-ten Maximums um $0{,}5 \cdot n \cdot i$.

Der Funktionsverlauf für die Instandsetzungsintensität nach Formel (11) ist für einen Steuerblock des MTS-50 im Bild 1 aufgezeichnet.

Zugrunde gelegt wurde zur Berechnung des Funktionsverlaufs eine Normalverteilung mit einer durchschnittlichen Grenznutzungsdauer $\mu = 13\,000\ l$ DK und einem Variationskoeffizienten $V = \sigma/\mu = 0{,}3$.

Für die Ersatzelemente ist die gleiche Verteilung in die Berechnung eingegangen. Prinzipiell bereitet es keine Schwierigkeiten, hier auch andere Verteilungen anzusetzen. Im Bild 1 ist zu sehen, daß die Instandsetzungsintensität eine Oszillation um den Ordinatenwert $1/\mu$ aufweist und Maxima bei $t = \mu, 2\mu, \ldots$ sowie Minima bei $t = 0, 3/2\mu, 5/2\mu \ldots$ besitzt. Diese Aussagen werden in der Literatur z. B. bei COX /6/ für Verteilungen mit einem Variationskoeffizienten $V < 1$ bestätigt.

Die Größe der Maxima und Minima nimmt, wie man im Bild 1 sehen kann, stetig ab bzw. zu. Die Instandsetzungsintensität weist bei sehr großen t eine Konstanz auf. Je kleiner der Variationskoeffizient ist, um so später wird der konstante Wert $1/\mu$ erreicht.

Es wurde in Testrechnungen ermittelt, daß

$$\mathrm{N}\,\{\mu\} = \sum_{t=0}^{\mu} \mathrm{n}\,\{t\} \approx 0.5 \qquad (12)$$

ist, und daß

$$\mathrm{N}\,\{(n+1)\cdot\mu\} - \mathrm{N}\,\{n\cdot\mu\} \approx 1 \quad n = 1, 2, \ldots \qquad (13)$$

ergibt.

Bei einem Variationskoeffizienten $V = 0{,}3$ und relativ kleinem μ gegenüber der normativen Nutzungsdauer T, $\frac{T}{\mu} \geqq 3$ kann man näherungsweise folgende Beziehung aufstellen:

$$\mathrm{N}\,\{T\} = \frac{T}{\mu} - 0{,}5 \qquad (14)$$

Bei der Bestimmung der Instandsetzungsintensität für das System geht man nach Gleichung (10) vor. Für einen in 7 Hauptbaugruppen untergliederten Traktor ergibt sich die im Bild 2 dargestellte Instandsetzungsintensität. (Die Verteilungsfunktionen und ihre Parameter wurden von HIERONIMUS /7/ übernommen.)

Im Bild 2 wird deutlich, daß die Instandsetzungsintensität für den Traktor sehr schnell einem annähernd konstanten Wert entgegenstrebt, d. h., daß die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls des Traktors durch eine beliebige Baugruppe über der Zeit konstant ist. Zugleich ergibt sich daraus, daß die ausfallfreie Zeit konstant ist.

Bei Systemen, die in Maschinenketten arbeiten, ist es aber notwendig, während der Einsatzzeit eine möglichst hohe ausfallfreie Zeit zu erhalten. Außerhalb der Einsatzzeit können die Systeme vorbeugend in einer Grundüberholung, Teilinstandsetzung oder Kampagnefestüberholung instand gesetzt werden. Soll eine solche Strategie angewendet werden, so kann der im Bild 2 gezeigte Verlauf der Instandsetzungsintensität nicht befriedigen.

Sind z. B. nach 20 000 l DK bzw. 40 000 l DK eine Grundüberholung bzw. eine größere Teilinstandsetzung vorgesehen, so wird durch sinnvolle Abstimmung der durchschnittlichen *Grenznutzungsdauern* die im Bild 3 gezeigte Instandsetzungsintensität für den Traktor erreicht.

Hier ergeben sich deutliche Maxima und Minima der Instandsetzungsintensität des Systems. Durch Anwendung einer geeigneten Instandsetzungsstrategie können damit konkrete Anforderungen an das Maschinenverhalten gestellt werden.

4. Darstellung der zulässigen Herstellungskosten

Bei der Abstimmung des Maschinenverhaltens der Elemente auf das System kann eine Änderung der durchschnittlichen Grenznutzungsdauer der Elemente notwendig sein. Daraus resultieren zulässige Herstellungskosten für die jeweiligen Elemente. Die zulässigen Herstellungskosten werden aus der Senkung bzw. Erhöhung der Instandhaltungskosten in der normativen Nutzungsdauer, die durch Änderung der durchschnittlichen Grenznutzungsdauer hervorgerufen wird, berechnet.

Ausgangspunkt sollte bei der Konzipierung einer neuen Maschine die Anforderung an die Kosten je landwirtschaftliches *Endprodukt sein*. Über die geforderte normative Nutzungsdauer, die geplante Leistung und die geplante Auslastung können die Gesamtkosten für Herstellung plus Instandhaltung berechnet werden. Die Kosten für die Nutzung werden gesondert berechnet und hier nicht mit betrachtet. Die Aufschlüsselung der Kosten des Systems auf die Kosten der Hauptbaugruppen ist notwendig. Im weiteren werden nur die Baugruppen betrachtet.

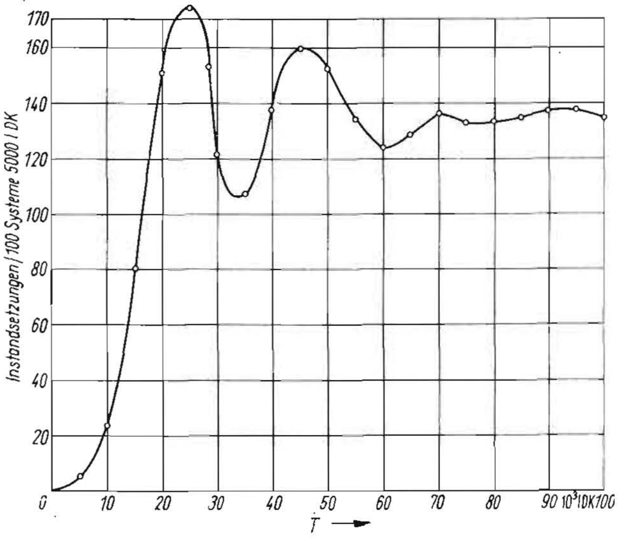
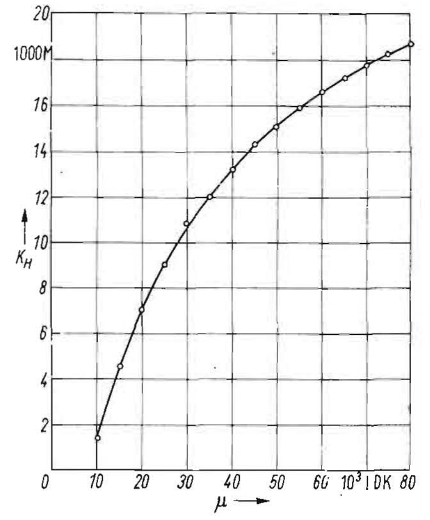


Bild 3
Durch sinnvolle Abstimmung der durchschnittlichen Grenznutzungsdauer ergeben sich deutliche Maxima und Minima der Instandsetzungsintensität des Systems

Bild 4
Zulässige Herstellungskosten über der durchschnittlichen Grenznutzungsdauer



$$K_G = K_H + K_J \qquad (15)$$

Darin bedeuten:

K_G Gesamtkosten
K_H Herstellungskosten
K_J Instandhaltungskosten

Die Gesamtkosten lassen sich auch unter Zuhilfenahme der Kosten für die Vorgängermaschine unter Berücksichtigung der notwendigen Kostensenkung für das neue Produkt berechnen.

Die Bestimmung zulässiger Herstellungskosten in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Grenznutzungsdauer soll hier nur für die Instandsetzungsmethode nach Ausfall berechnet werden. Bei anderen Instandsetzungsmethoden haben die Funktionen einen analogen Verlauf, der, sofern die Instandsetzungsmethode optimal angewendet wird, höhere zulässige Herstellungskosten ergibt. Die nachfolgenden Beziehungen stellen also einen unteren Grenzwert dar.

$$K_G^* = K_H^* + m_J^*$$

mit * wird die Vorgängermaschine bezeichnet.

$$K_G^* = x_1 \cdot K_G \qquad (15a)$$

x_1 ist der Faktor, der die Senkung der Gesamtkosten bei neuen Produkten berücksichtigt. Zur Vereinfachung der Darstellung wird er im folgenden mit 1 angesetzt. Die Kostengleichung ergibt sich nach (15a) wie folgt:

$$N\{T\} \cdot (C_{up}^* + K_A^*) + K_H^* = N\{T\} \cdot (C_{up} + K_A) + K_H \qquad (16)$$

Es sind:

K_A Kosten für die Austauschbaugruppe
C_{up} Kosten, die durch einen Ausfall entstehen (außer K_A)

Zur weiteren Vereinfachung muß K_A unabhängig von der durchschnittlichen Grenznutzungsdauer mit $K_A = x_2 \cdot K_H$ angenommen werden.

$$K_H = \frac{N^*\{T\} \cdot (C_{up} + K_A^*) + K_H^* - N\{T\} \cdot C_{up}}{[1 + x_2 \cdot N\{T\}]} \qquad (17)$$

Mit Gleichung (14) ergibt sich:

$$K_H = \frac{N^*\{T\} \cdot (C_{up} + K_A^*) + K_H^* - C_{up}\left(\frac{T}{\mu} - 0{,}5\right)}{\left[x_2 \cdot \frac{T}{\mu} - x_2 \cdot 0{,}5 + 1\right]} \qquad (18)$$

In Gleichung (18) sind: C_{up}, T, $N^*\{T\}$, x_2, K_H^*, K_A^* konstante Werte, so daß sich die Gleichung sehr leicht in Abhängigkeit von μ mit Einführung neuer Konstanten darstellen läßt.

$$K_H = \frac{a \cdot \mu + b}{c \cdot \mu + d} \qquad (19)$$

Damit nimmt die Funktion der zulässigen Herstellungskosten über der durchschnittlichen Grenznutzungsdauer die Form eines Hyperbelastes an.

Für einen Motor wurde der Funktionsverlauf im Bild 4 dargestellt. Als Vorgängerbaugruppe wurde der Motor des MTS-50 betrachtet.

Die Ergebnisse des im Bild 4 dargestellten Diagramms sind natürlich nur auf einen dem Motor des MTS-50 analogen Motor anwendbar.

Die Asymptoten der im Bild 4 dargestellten Funktion lassen sich sehr leicht aus Gleichung (19) ableiten.

Dem Konstrukteur ist damit die Möglichkeit gegeben, das Maschinenverhalten im realisierbaren Bereich von Bild 4 zu variieren und damit auf die Instandsetzungsstrategie abzustimmen.

Zusammenfassung

Ausgehend von dem Maschinenverhalten von Systemen und Elementen wird die Instandsetzungsintensität über der normativen Nutzungsdauer dargestellt. Zur Realisierung vorgegebener Instandsetzungsstrategien werden Anforderungen an die Instandsetzungsintensität des Systems gestellt, die eine Abstimmung der Elemente im System bedingen. Daraus ableitend sind die zulässigen Herstellungskosten bei Änderung der durchschnittlichen Grenznutzungsdauer dargelegt. Damit ist eine optimale Abstimmung des Maschinenverhaltens auf die Instandsetzungsstrategie möglich.

Literatur

/1/ KÖHLER, L.: Studie zur Projektierung und Bestimmung des Maschinenverhaltens und der Instandsetzungsstrategie von landtechnischen Systemen. Forschungsbericht für den PVB Charlottenthal 1970 (unveröffentlicht)

/2/ KLAUS, G.: Wörterbuch der Kybernetik. Berlin: Dietz Verlag 1968

/3/ KÖHLER, L.: Zu den Grundlagen der Zuverlässigkeit. Deutsche Agrartechnik (1969) H. 4, S. 176 bis 179

/4/ BEICHELT, F.: Zuverlässigkeit und Erneuerung. Berlin: VEB Verlag Technik, Reihe Automatisierungstechnik, H. 101

/5/ KOZNIEWSKA, J.: Die Erneuerungstheorie. Berlin: Verlag Die Wirtschaft 1969

/6/ COX, G.: Erneuerungstheorie. München: Oldenbourg-Verlag 1966

/7/ HIERONIMUS, K.: Untersuchung über die Zweckmäßigkeit der Grundüberholung kompletter Traktoren unter technischen, technologischen und ökonomischen Gesichtspunkten. Diplom-Arbeit TU Dresden 1969 (unveröffentlicht)

Außerdem wurden folgende Quellen ausgewertet:

NITSCHE, K.: Instandhaltung landwirtschaftlicher Anlagen. Vortrag zur wissenschaftlichen Tagung „Landwirtschaftlicher Anlagenbau", 30. Sept./1. Okt. 1968 in Dresden

GNEDENKO, u. a.: Mathematische Methoden der Zuverlässigkeitstheorie. Akademie-Verlag Berlin 1968

A 8437