Technische Zuverlässigkeit und Prognose der Restnutzungsdauer von Maschinen-Baugruppen

Von Ladislav Pejša, Prag*)

DK 631.3:658.58:518.5

Die technische Zuverlässigkeit von Maschinen und Maschinen-Baugruppen hat insbesondere in der Landwirtschaft große Bedeutung, weil sie die Produktionskosten deutlich beeinflußt. Vor allem beim Saisoneinsatz der Maschinen hat das Ausfallrisiko und das Risiko des unökonomischen Betriebes erhebliche Auswirkungen. Aufgrund der bekannten Zuverlässigkeitskenngrößen und der Daten des momentanen Schädigungszustandes, d.h. der technischen Diagnose, kann die optimale Instandhaltungsstrategie entworfen werden, die minimale Produktionskosten sichert.

1. Problemstellung

In den letzten Jahren hat sich im Rahmen der Zuverlässigkeitstheorie [1 bis 7] eine Spezialdisziplin, die sogenannte technische Diagnostik, entwickelt, die für die notwendigen Rationalisierungsmaßnahmen bei Einsatz und Instandhaltung der Landmaschinen einen wichtigen Beitrag bringen kann. Die Hauptaufgaben der technischen Diagnostik können folgendermaßen umrissen werden:

1. Diagnose, d.h. eine Aussage über den momentanen Schädigungszustand der Maschine und ihrer Elemente
2. Prognose, d.h. eine Aussage über die wahrscheinliche Entwicklung des Schädigungszustandes der Maschine und ihrer Elemente
3. Bestimmen des Erneuerungsoptimums, d.h. eine Aussage über den optimalen Schädigungszustand für die Erneuerung der ganzen Maschine oder ihrer Elemente.

Diese Aufgaben veranschaulichen, daß die technische Diagnostik nicht nur auf deterministischen Gesetzen aufgebaut werden kann. Die Zukunft eines mechanischen Systems wird aus der Gegenwart geboren, doch der momentane Schädigungszustand legt nur die Bedingungen fest, die die Möglichkeit der weiteren Entwicklung bestimmen. Was entsteht und wie es sich ereignet, ist teilweise zufällig. Dieser Zufall kann aber zielgerichtet durch ökonomische Zielfunktionen und entsprechende Maßnahmen beeinflußt werden, um die minimalen Betriebskosten der bestimmten Maschine zu bekommen.

Aus oft mit großem Aufwand durchgeführten Versuchen werden unter anderem die Zuverlässigkeitskenngrößen gewonnen, die zur fortlaufenden Verbesserung der Maschinenkonstruktion sehr gut dienen können, die aber leider für die Anwendung im Rahmen der technischen Diagnostik entweder nicht zur Verfügung stehen oder nur einen geringen Wert haben.

Viele Maschinen sind sehr gut konstruiert, und es kann sein, daß sich bei manchen die Erneuerung durch Instandsetzen einzelner Baugruppen nicht lohnt und daß die Aussonderung der ganzen Maschine nach einem bestimmten Zeitpunkt die beste Lösung ist. Das muß aber ökonomisch bewiesen sein und kann dann erst für die breite Anwendung empfohlen werden. Auch für diesen Fall bleibt für die technische Diagnostik die sehr wichtige Aufgabe, die optimale Zeit für eine solche Erneuerung festzustellen.

Im vorliegenden Beitrag werden behandelt:

- die grundsätzlichen Anforderungen an Versuche zur Überprüfung der Zuverlässigkeit von Landmaschinen und Schleppern und die Auswahl von Zuverlässigkeitskenngrößen aus der Sicht der technischen Diagnostik
- die Methodik der Auswertung der Zuverlässigkeitskenngrößen zusammen mit den Werten des momentanen Schädigungszustandes für die Restnutzungsdauerprognose und zur Festlegung des Erneuerungsoptimums von Maschinen-Baugruppen.

2. Anforderungen an eine in der Diagnostik verwendbare Kenngröße der Zuverlässigkeit

Maschinen und Maschinensysteme bestehen aus einer Summe von Elementen, die üblicherweise nach Abnutzung oder nach Ausfall erneuert werden können. Die Erneuerung wird durch den Austausch mit neuen oder instandgesetzten Elementen vorgenommen. Hier taucht die Frage auf, ob überhaupt und bei welchem Schädigungszustand oder nach welcher Nutzungsdauer die vorbeugende Erneuerung eines bestimmten Elementes ökonomisch vertretbar ist.

Je nach der Organisation der Instandsetzung kann unter dem genannten Element ein kleineres oder größeres Teil der Maschine verstanden werden. Meistens wird das Element mit einer Baugruppe gleichgestellt und so wird es auch im weiteren behandelt.

Der Schädigungszustand des Elementes kann mit Hilfe verschiedener physikalischer Größen, sogenannter diagnostischer Signale, bestimmt werden. Es handelt sich beispielsweise um den Betriebsdruck, die Lagertemperatur, den hydraulischen Widerstand, den spezifischen Kraftstoff- und Ölverbrauch und unter anderem auch die Nutzungsdauer, die auch eine Information über den Schädigungszustand des Elementes bringen kann.
Allgemein kann man ausdrücken:

$$S = f(x_1, x_2, ..., x_n) \qquad (1),$$

mit: S Schädigungszustand (Zufallsvariable, die in verschiedenen physikalischen Größen gegeben werden kann)
x_i diagnostisches Signal; $i = 1, 2, ...$.

Zur Feststellung des Schädigungszustandes S sollen solche Signale x_i gewählt werden, die gegenüber einer Veränderung von S ausreichend empfindlich sind. Die entsprechende Form von Gl. (1) kann entweder theoretisch als stetige Funktion hergeleitet oder auf experimenteller Basis bestimmt werden, aus Werten, die in diskreten Punkten gemessen und dann erst in eine stetige Funktion umgeformt werden.

Für einen Typ von Maschinenelementen kann man viele verschiedene Kombinationen der diagnostischen Signale x_i wählen. Man erhält auf diese Weise viele Möglichkeiten für die Ermittlung des Schädigungszustandes, wobei nur eine dieser Möglichkeiten aus technischer und ökonomischer Sicht die beste ist. Diese entspricht der optimalen Diagnose-Methode und kann aufgrund der im weiteren dargelegten vorliegenden Methodik bestimmt werden.

**) Dr.-Ing. L. Pejša ist Dozent an der Landtechnischen Hochschule in Prag (Tschechoslowakei). Er war vom 18.4.1977 bis 16.7.1977 Gastwissenschaftler am Institut für Agrartechnik (geschäftsführender Direktor: Prof. Dr.-Ing. Heinz Dieter Kutzbach) der Universität Hohenheim.*

Zur Lösung des vorliegenden Problems bietet sich eine Kostenrechnung an. Dazu setzen wir voraus, daß die geeignete Funktion Gl. (1) bekannt ist und daß eine Stichprobe von n Maschinenelementen eines bestimmten Typs unter normalen Betriebsbedingungen untersucht wird. Unter diesen Voraussetzungen können die wahrscheinlichen Gesamtkosten für den Betrieb und die Erneuerung pro Nutzungsdauereinheit, die bei dem konkreten Element zu minimieren sind, mit folgenden mittleren Kosten von der Stichprobe gleichgestellt werden:

$$u(S) = \frac{n\,N_0 + [n - m(S)]\,N_h + \sum_{i=1}^{n} N_{ei}(S) + v_d \sum_{i=1}^{n} t_i(S)}{\sum_{i=1}^{n} t_i(S)} \quad (2),$$

worin:
- $u(S)$ mittlere Gesamtkosten für den Betrieb und die Erneuerung des Elementes pro Nutzungsdauereinheit in Abhängigkeit vom Schädigungszustand S
- n Anzahl der Elemente in der Stichprobe bei Inbetriebnahme
- $m(S)$ Anzahl der beim Schädigungszustand S nicht ausgefallenen Elemente der Stichprobe
- N_0 mittlere Erneuerungskosten des Elementes
- N_h mittlere Ausfallkosten des Elementes (Kosten für Erneuerung beim Ausfall abzüglich der Kosten bei rechtzeitiger Erneuerung)
- $N_{ei}(S)$ unmittelbare Betriebskosten des i-ten Elementes vom Anfangszustand bis zum Schädigungszustand S oder bis zum Ausfall vor dem Zustand S (beispielsweise Kosten für Kraftstoff- und Ölverbrauch, für fallende Qualität der Arbeit des Elementes u.a.)
- v_d konstante, auf die Nutzungsdauer bezogene Kosten für die technische Diagnose bei Anwendung der Variablen S
- $t_i(S)$ Nutzungsdauer des i-ten Elementes vom Anfangszustand bis zum Schädigungszustand S.

Bei der Voraussetzung, daß die Stichprobe genügend groß ist, kann man die diskrete Funktion Gl. (2) in eine stetige Form überführen und damit leichter die Bedingungen für ihr Minimum ermitteln.

Man kann definieren:

$$m(S) = n\,R(S) \quad (3),$$

mit $R(S)$ Überlebenswahrscheinlichkeit des Elementes in Abhängigkeit von der Zufallsvariablen S.

Nach Gl. (3) gilt:

$$n - m(S) = n \int_{S_a}^{S} f(x)\,dx \quad (4),$$

worin:
- $f(x)$ Dichtefunktion für den Ausfall des Elementes in Abhängigkeit von der Zufallsvariablen S
- S_a Anfangszustand des Elementes.

Im besonderen Fall, wenn als Parameter des Schädigungszustandes unmittelbar die Nutzungsdauer t gewählt wird, d.h. für $S = t$ und $S_a = 0$, gilt:

$$n - m(t) = n \int_{0}^{t} f(x)\,dx \quad (5).$$

Aus obigen Ausführungen kann man folgendes entnehmen:

Die grundsätzlichen Zuverlässigkeitskenngrößen sollten in Abhängigkeit von der allgemeinen Zufallsvariablen, d.h. dem Schädigungszustand S, und nicht nur von der konkreten Zufallsvariablen, der Nutzungsdauer t, experimentell bestimmt werden.

Weiterhin muß in Betracht gezogen werden, daß im Rahmen der Diagnostik die unmittelbare Messung der Kosten $N_{ei}(S)$ nicht regelmäßig möglich ist; viel einfacher kann der Zuwachs $dN_{ei}(S)$ für einen entsprechenden Zuwachs $dt_i(S)$ gemessen werden. Demnach ist folgende Kenngröße einzuführen:

$$v_{ei}(S) = \frac{dN_{ei}(S)}{dt_i(S)} \quad (6),$$

mit: $v_{ei}(S)$ momentane unmittelbare Betriebskosten pro Nutzungsdauereinheit des i-ten Elementes beim Schädigungszustand S (beispielsweise aus momentanem Kraftstoffverbrauch und anderem Betriebsaufwand pro Motorstunde)

In dem Fall, daß das i-te Element schon vor Erreichen des Schädigungszustandes S ausgefallen ist, hat die Größe $v_{ei}(S)$ keine reale Bedeutung.

Weiter ist es nötig, auf experimentellem Wege als weitere Kerngröße festzulegen:

$$q_i(S) = \frac{dt_i(S)}{dS} \quad (7),$$

wobei: $q_i(S)$ Verschleißfestigkeit des i-ten Elementes (Widerstandsfähigkeit gegen eine Änderung des Schädigungszustandes).

In dem Fall, daß das i-te Element schon vor Erreichen des Schädigungszustandes S ausgefallen ist, hat die Größe $q_i(S)$ den Wert Null.

Mit Hilfe von Gl. (7) können einige Größen in Gl. (2) umgeformt werden:

$$\sum_{i=1}^{n} t_i(S) = n \int_{S_a}^{S} q(x)\,dx \quad (8)$$

$$\text{für:}\quad q(S) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} q_i(S) \quad (9),$$

somit ist $q(S)$ die mittlere Verschleißfestigkeit des Elementes.

Nach Gl. (8) gilt dann:

$$\bar{t}(S) = \int_{S_a}^{S} q(x)\,dx \quad (10)$$

$$\text{und}\quad d\bar{t}(S) = q(S)\,dS \quad (11),$$

wobei $\bar{t}(S)$ der Mittelwert der Nutzungsdauer beim Schädigungszustand S ist.

Im besonderen Fall, in dem als Parameter des Schädigungszustandes unmittelbar die Nutzungsdauer gewählt wird, d.h.: $S = t$ und $S_a = 0$, bekommt die Größe $q_i(S)$ aus Gl. (7) folgende Werte:

- $q_i(t) = 1$ für die Elemente, die in der Nutzungsdauer t noch nicht ausgefallen sind,
- $q_i(t) = 0$ für die Elemente, die während der Nutzungsdauer t ausgefallen sind.

Nach den Gln. (9) und (10) gilt also:

$$q(t) = R(t) \quad (12)$$

$$\text{und}\quad \bar{t}(t) = \int_{0}^{t} R(x)\,dx \quad (13),$$

wenn
- $R(t)$ Überlebenswahrscheinlichkeit des Elementes in Abhängigkeit von der Zufallsvariablen t
- $\bar{t}(t)$ Mittelwert der Nutzungsdauer bei der Nutzungsdauer t.

Aus dieser Sicht ist die mittlere Verschleißfestigkeit q(S) die allgemeine Form der konkreten Kenngröße R(t) und sollte darum im Rahmen der Zuverlässigkeitsversuche untersucht werden.

Mit den Gln. (6), (7) und (9) kann ein weiterer Teil von Gl. (2) ausgedrückt werden:

$$\sum_{i=1}^{n} N_{ei}(S) = n \int_{S_a}^{S} v_e(x)\, q(x)\, dx \tag{14}$$

$$\text{für:} \quad v_e(S) = \frac{\sum_{i=1}^{n} v_{ei}(S)\, q_i(S)}{\sum_{i=1}^{n} q_i(S)} \tag{15}$$

wobei: $v_e(S)$ mittlere momentane unmittelbare Betriebskosten pro Nutzungsdauereinheit des Elementes beim Schädigungszustand S.

Auch die Kenngröße $v_e(S)$ scheint eine bedeutende Zuverlässigkeitskenngröße zu sein, die untersucht werden soll.

Es ist jetzt möglich, mit Hilfe der Gln. (2), (4), (8), (11) und (14) die Größe u(S) in folgender Form auszudrücken:

$$u(S) = \frac{1}{\bar{t}(S)} \left[N_0 + \int_0^{\bar{t}(S)} v(x)\, d\bar{t}(x) \right] \tag{16}$$

wobei: v(S) Summenkenngröße der Zuverlässigkeit als Funktion von S (mittlere momentane Betriebskosten pro Nutzungsdauereinheit des Elementes beim Schädigungszustand S).

$$v(S) = \lambda(S)\, N_h + v_e(S) + v_d \tag{17}$$

$\lambda(S)$ Ausfallrate beim Schädigungszustand S

$$\lambda(S) = \frac{f(S)}{q(S)} = \frac{-dR(S)}{d\bar{t}(S)} \tag{18}$$

Im besonderen Fall, wenn der Parameter des Schädigungszustandes S gleich der Nutzungsdauer t ist und Gl. (12) gilt, bekommt Gl. (18) die konkrete bekannte Form:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{-dR(t)}{d\bar{t}(t)} \tag{19}$$

wobei $\lambda(t)$ die Ausfallrate bei der Nutzungsdauer ist.

Die mittleren momentanen Betriebskosten pro Nutzungsdauereinheit v(S) beinhalten den Einfluß des Ausfallrisikos, des Risikos unökonomischen Betriebes sowie die Kosten für die Diagnostik. Aufgrund dessen wird hier die Funktion v(S) eine Summenkenngröße der Zuverlässigkeit genannt.

Für diskrete Punkte kann die Summenkenngröße v(S) experimentell bestimmt und daraus statistisch eine stetige Funktion abgeleitet werden. Eine grundsätzliche Bedingung zum Feststellen von v(S) ist die Durchführung von Versuchen in der oben gezeigten Form, um die benötigten Kenngrößen f(S), q(S) und $v_e(S)$ zu bekommen. Diese Kenngrößen können nicht aus den bisher üblichen Versuchen errechnet werden.

3. Festlegen des optimalen Punktes für die Erneuerung eines Maschinenelementes

Zum Festlegen des Optimums für die Erneuerung muß man einen optimalen Wert des Schädigungszustandes S_0 feststellen, bei dem minimale Kosten für u(S) nach Gl. (16) entstehen.

In Gl. (16) ist die unabhängige Variable die Größe $\bar{t}(S)$, die man leicht optimieren kann, um aus dem optimalen Wert $\bar{t}(S_0)$ die gesuchte Größe S_0 festzulegen.

Wir gehen von der ersten und zweiten Ableitung von u(S) aus:

$$u'(S) = \frac{v(S) - u(S)}{\bar{t}(S)} \tag{20}$$

$$u''(S) = \frac{v'(S) - 2\, u'(S)}{\bar{t}(S)} \tag{21}$$

Hiernach sind die Bedingungen für das Minimum u(S):

$$v(S_0) = u(S_0) \tag{22}$$

$$v'(S_0) > 0 \tag{22a}$$

wobei: S_0 Erneuerungsoptimum (optimaler Wert des Schädigungszustandes für die Erneuerung)
$v(S_0)$ Summenkenngröße der Zuverlässigkeit beim Erneuerungsoptimum S_0
$\bar{t}(S_0)$ Nutzungsdauermittelwert beim Erneuerungsoptimum S_0.

Es bedeutet, daß das lokale Minimum u(S) im Schnittpunkt der Kurven v(S) und u(S) unter der Bedingung erreicht wird, daß die Funktion v(S) in diesem Bereich ansteigend ist. Generell kann die Funktion v(S) einen beliebigen Verlauf haben, und darum ist die Existenz mehrerer Extrempunkte nicht ausgeschlossen. Praktisch kann man aber voraussetzen, daß die Funktion v(S) nur zu Beginn der Inbetriebnahme der Maschine fallende Tendenz haben kann und nach der Einlaufzeit stetig ansteigend ist, **Bild 1**.

Bei der gegebenen Voraussetzung hat die Funktion u(S) nur ein Minimum, das gleichzeitig das gesuchte Absolutminimum darstellt.

Für die numerische Lösung ist es von Vorteil, die Gl. (22) mit Hilfe von Gl. (16) in folgende Gleichung umzuformen:

$$N_0 = \int_{v(S_a)}^{v(S_0)} \bar{t}(x)\, dv(x) \tag{23}$$

Gl. (23) stellt die Optimumsbedingung zur Erneuerung dar und hat breite praktische Bedeutung. Durch die Kurve v(S), die Ordinate und die Parallele zur Abszisse durch den Punkt $v(S_0)$ wird die Fläche begrenzt, die den Erneuerungskosten N_0 proportional ist. Zur praktischen Bestimmung des Wertes $\bar{t}(S_0)$ (eventuell S_0), muß man nur den Verlauf der Summenkenngröße v(S) und die Erneuerungskosten N_0 kennen.

Zur Auswertung des momentanen Schädigungszustandes des Elementes ist zweckmäßig die Größe der "relativen Nutzungsdauer" einzuführen, die folgendermaßen definiert werden kann:

Die relative Nutzungsdauer eines konkreten Maschinenelementes mit dem Schädigungszustand S ist identisch mit dem Nutzungsdauermittelwert $\bar{t}(S)$ der Stichprobe von Elementen, die denselben Schädigungszustand S erreicht haben.

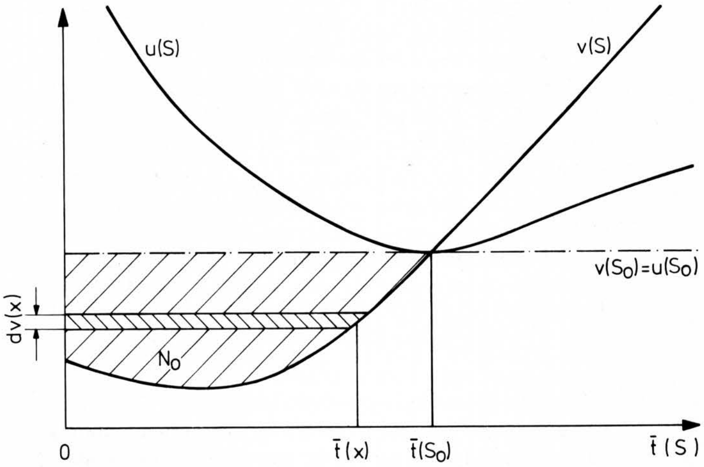

Bild 1. Beispiel zur Feststellung des Erneuerungsoptimums eines Elementes mit Gl. (23).

Diese Definition bedeutet, daß das Element der zufällig schlechteren Qualität wie "relativ älter" und das Element der zufällig besseren Qualität wie "relativ jünger" bewertet wird. Durch die relative Nutzungsdauer wird also die Diagnose gestellt und die Prognose des Schädigungszustandes kann schon einfach mit mittleren Werten, d.h. mit dem Verlauf der Summenkenngröße v(S) gemacht werden.

4. Wahl der optimalen Instandhaltungsmethode

Stehen für einen konkreten Typ eines Maschinenelementes mehrere unterschiedlich teuere und präzise Diagnose-Methoden zur Verfügung, dann ergibt sich das Problem, die objektiv vorteilhafteste Methode auszuwählen. Die Objektivität kann nur durch ein geeignetes Auswahlkriterium, d.h. durch das erreichbare Minimum u(S) gegeben werden.

Das Problem ist praktisch leicht lösbar. Die ökonomische Folge einer Anwendung verschiedener Diagnose-Methoden mit verschiedenen Schädigungsparametern S wird mit der Möglichkeit, die Diagnostik nicht anzuwenden, verglichen. Den Vor- oder Nachteil jeder Methode kann man entweder qualitativ oder quantitativ einschätzen. Bei qualitativer Schätzung wird nur die beste Methode gefunden, bei quantitativer Schätzung wird der Gewinn pro Zeiteinheit im Vergleich zum nichtdiagnostizierten Element ausgedrückt.

Unter dem Gesichtspunkt der qualitativen Schätzung ist die ökonomisch günstigste Methode jene, die folgende Bedingung erfüllt:

$$v(S_{i0}) = \min \tag{24}$$

für: $i = 1, 2, \ldots$ die Nummern der Methoden.

Die Bedingung Gl. (24) wird aus der Forderung abgeleitet, daß das Minimum der mittleren Gesamtkosten $u(S_{i0})$ aus den gegebenen Möglichkeiten der Variable S_i das kleinste sein soll.

Bei der quantitativen Schätzung ist der Gewinn durch folgende Beziehung gegeben:

$$u(S_0) = \frac{N_0 + \int_0^{\bar{t}(t_0)} v(t)\, d\bar{t}(t)}{\bar{t}(t_0)} - \frac{N_0 + \int_0^{\bar{t}(S_0)} v(S)\, d\bar{t}(S)}{\bar{t}(S_0)} \tag{25},$$

mit: $u(S_0)$ der Gewinn pro Nutzungsdauereinheit, bei Anwendung der Diagnose-Methode mit der Variablen S im Vergleich zum nichtdiagnostizierten Element.

Aufgrund der möglichen Lösungen kann man alle Maschinenelemente generell in drei Gruppen einteilen und davon drei Instandhaltungsmethoden ableiten:

1. Instandsetzung nach Überprüfung kommt in dem Fall zur Anwendung, wenn beim Element mindestens eine der möglichen Variablen des Schädigungszustandes S nach Gl. (24) günstiger als die Variable Nutzungsdauer t ist. Nur in diesem Fall ist die technische Diagnostik zweckmäßig und das Element wird erneuert beim Schädigungszustand S_0.
2. Instandsetzung nach starrem Zyklus kommt in dem Fall zur Anwendung, wenn beim Element die günstigste ausgewählte Variable nach der Formel (24) die Nutzungsdauer t ist und wenn das Erneuerungsoptimum t_0 kleiner als die Lebensdauer der ganzen Maschine ist. Die Anwendung der technischen Diagnostik ist in diesem Fall zwecklos und das Element wird erneuert nach seiner Nutzungsdauer t_0.
3. Ausfallmethode kommt in dem Fall zur Anwendung, wenn beim Element die günstigste ausgewählte Variable die Nutzungsdauer t ist und wenn das Erneuerungsoptimum t_0 größer als die Lebensdauer der ganzen Maschine ist. Die Anwendung der Diagnostik ist in diesem Fall zwecklos und das Element wird erst nach dem Ausfall erneuert.

5. Restnutzungsdauerprognose von Maschinenelementen

Aufgrund der oben angeführten Theorie kann man weiter gehen und eine operative Leitung des Erneuerungsprozesses von Baugruppen realisieren. Eine solche Lösung erfordert den Einsatz eines Rechners, der unmittelbar mit der Diagnosestation verbunden ist und die operative Entscheidung laufend realisieren kann. Der erste Schritt zur Lösung dieses Problems ist es, die Methodik für die Restnutzungsdauerprognose festzulegen. Die Anwendung ist dann schon mit Hilfe einfacher Rechenmittel oder im Rahmen von automatischen Auswertungsverfahren möglich.

5.1 Lösung für ständig benutzte Maschinen

Für den Fall, daß die Maschine das ganze Jahr über eingesetzt wird, kann man die Restnutzungsdauerprognose einfach als Differenz zwischen dem Erneuerungsoptimum $\bar{t}(S_0)$ und der relativen Nutzungsdauer $\bar{t}(S)$ gewinnen:

$$\bar{t}(S_0, S) = \bar{t}(S_0) - \bar{t}(S) \tag{26}$$

und mit Gl. (10):

$$\bar{t}(S_0, S) = \int_S^{S_0} q(x)\, dx \tag{27},$$

worin: $\bar{t}(S_0, S)$ Restnutzungsdauerprognose, die der Veränderung des Schädigungszustandes vom momentanen Wert S bis zum optimalen Wert S_0 entspricht.

5.2 Lösung für Saison-Maschinen

Bei den saisonal eingesetzten Maschinen stellt man zuerst auch die Restnutzungsdauerprognose $\bar{t}(S_0, S)$ nach Gl. (26) oder (27), und dann kann erst über das weitere Vorgehen entschieden werden.

Wenn gilt

$$\bar{t}(S_0, S) < T_s \tag{28},$$

mit: T_s Mittelwert der Saisonnutzungsdauer,
stehen generell drei Möglichkeiten der Erneuerung zur Verfügung, die auf dem **Bild 2** dargestellt sind:

1. vor der Saison, bei der relativen Erneuerungs r $\bar{t}(S_1)$, dem Schädigungszustand S_1 und der Summenkenngröße $v(S_1)$,
2. während der Saison, beim Erneuerungsoptimum S_0, dem Nutzungsdauermittelwert $\bar{t}(S_0)$ und der Summenkenngröße $v(S_0)$,
3. nach der Saison, beim Nutzungsdauermittelwert $\bar{t}(S_3)$, dem Schädigungszustand S_3 und der Summenkenngröße $v(S_3)$.

Die drei aufgeführten Möglichkeiten sind mit gewissen zusätzlichen Kosten belastet:

Bei der Erneuerung vor der Saison geht ein Teil der Nutzungsdauer des Elementes von $\bar{t}(S_1)$ bis $\bar{t}(S_0)$ verloren, dieses bedingt Verluste ΔN_1. Bei der Bestimmung von ΔN_1 geht man folgendermaßen vor:

– Im Vergleich zur Optimalerneuerung könnte in diesem Fall das Element noch die Nutzungsdauer $\bar{t}(S_0 - \bar{t}(S_1)$ arbeiten, mit folgenden mittleren Betriebskosten pro Nutzungsdauereinheit:

$$u_1 = \frac{\int_{\bar{t}(S_1)}^{\bar{t}(S_0)} v(x)\, d\bar{t}(x)}{\bar{t}(S_0) - \bar{t}(S_1)} \tag{29}.$$

– Wird das Element in der Nutzungsdauer $\bar{t}(S)$ erneuert, muß man für den weiteren Betrieb mit den mittleren Kosten $v(S_0)$ rechnen.

– Die gesuchten Verluste ΔN_1 sind durch die Differenz $v(S_0) - u_1$ gegeben, die während des Nutzungsdauerabstandes $\bar{t}(S_0) - \bar{t}(S_1)$ zur Auswirkung kommt:

$$\Delta N_1 = [v(S_0) - u_1]\ [\bar{t}(S_0) - \bar{t}(S_1)] \qquad (30).$$

Aus Gln. (29) und (30) kann man durch partielle Integration folgende Gleichung bekommen:

$$\Delta N_1 = \int_{v(S_1)}^{v(S_0)} [\bar{t}(x) - \bar{t}(S_1)]\, dv(x) \qquad (31).$$

Aus Gl. (31) geht hervor, daß die Verluste der schraffierten Fläche ΔN_1 auf dem Bild 2 proportional sind. Von der genauen Gleichung (31) kann man für die Praxis einen vereinfachten Ausdruck ableiten:

$$\Delta N_1 \approx \epsilon\, [\bar{t}(S_0) - \bar{t}(S_1)]^2 \qquad (32),$$

ϵ Kostante, die die Proportionalität der Verluste infolge der Abweichung vom Erneuerungsoptimum darstellt.

Wie zu sehen ist, wird durch Gl. (32) die Fläche ΔN_1 (Bild 2) in ein Dreieck umgeformt und die Konstante ϵ kann mit dem Ziel bestimmt werden, die kleinsten Fehler bei Anwendung von Gleichung (31) zu bekommen. Für die praktische Anwendung genügt folgender einfache Ausdruck:

$$\epsilon = \frac{v(S_0) - v(S_a)}{2\, \bar{t}(S_0)} \qquad (33).$$

Die Erneuerung während der Saison beim Erneuerungsoptimum S_0 ist nur mit folgenden zusätzlichen Kosten verbunden:

ΔN_2 Verlust durch Stillstand bei der Instandsetzung des Elementes während der Saison.

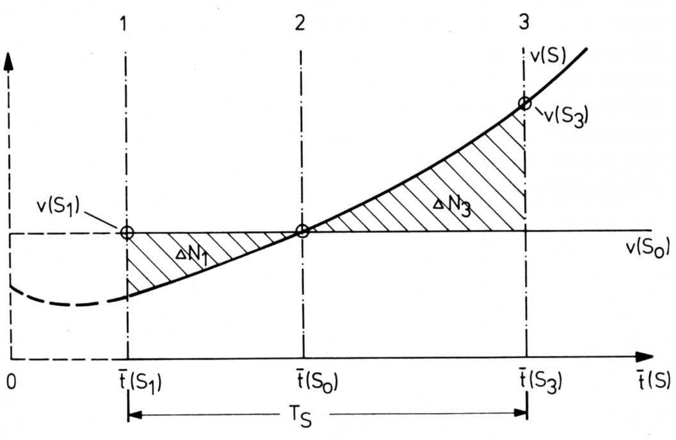

Bild 2. Die Erneuerung des Elementes bei der Saison-Maschine.

0	Betriebsbeginn des Elementes
1,2,3	Erneuerung vor, während und nach der Saison
T_s	wahrscheinliche Dauer der Saison
ΔN_1	Verluste infolge zu früher Erneuerung vor der Saison (nicht genutzte Lebensdauer des Elementes)
ΔN_3	Verluste infolge zu später Erneuerung nach der Saison (unwirtschaftliche Arbeit des Elementes)

Bei der Erneuerung nach der Saison arbeitet die Maschine im Teil der Nutzungsdauer des Elementes von $\bar{t}(S_0)$ bis $t(S_3)$ schon unwirtschaftlich mit einem höheren Wert von $v(S)$. Die entsprechenden zusätzlichen Kosten kann man ähnlich wie im ersten Fall (vor der Saison) ausdrücken:

$$\Delta N_3 = \int_{v(S_0)}^{v(S_3)} [\bar{t}(S_3) - \bar{t}(x)]\, dv(x) \qquad (34),$$

$$\Delta N_3 \approx \epsilon\, [\bar{t}(S_3) - \bar{t}(S_0)]^2 \qquad (35),$$

wobei:

$$\bar{t}(S_3) = \bar{t}(S_1) + T_s \qquad (36).$$

Aus den Gln. (35) und (36) folgt:

$$\Delta N_3 \approx \epsilon\, [\bar{t}(S_0) - \bar{t}(S_1) - T_s]^2 \qquad (37).$$

Aufgrund o.a. Analyse kann man folgendes feststellen:

1. Die Bedingung für die Erneuerung des Elementes vor der Saison:

$$\Delta N_1 < \min(\Delta N_2, \Delta N_3) \qquad (38)$$

2. Die Bedingung für die Erneuerung des Elementes während der Saison:

$$\Delta N_2 < \min(\Delta N_1, \Delta N_3) \qquad (39)$$

3. Die Bedingung für die Erneuerung des Elementes nach der Saison:

$$\Delta N_3 < \min(\Delta N_1, \Delta N_2) \qquad (40).$$

6. Zusammenfassung

Die Zuverlässigkeitskenngrößen von Maschinenelementen sollten in allgemeiner Form als funktionelle Abhängigkeiten von der Zufallsvariablen "Schädigungszustand" und nicht nur von der Nutzungsdauer gegeben werden. Außerdem ist die Summenkenngröße der Zuverlässigkeit einzuführen, die das momentane Ausfallrisiko und das Risiko des unökonomischen Betriebes ausdrückt. Nach den ökonomischen Kriterien kann man bei jedem Maschinenelement die optimale Instandhaltungsmethode wählen, mit Hilfe der Diagnose die Restnutzungsdauerprognose festlegen und die optimale Erneuerungszeit empfehlen.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

[1] ● *Eichler, Ch.:* Instandhaltungstechnik. Berlin: VEB Verlag Technik 1977.

[2] ● *Kaufmann, A.:* Zuverlässigkeit in der Technik. Wien – München: R. Oldenbourg Verlag 1970.

[3] ● Messerschmitt-Bölkow-Blohm GmbH: Technische Zuverlässigkeit. Berlin – Heidelberg – New York: Springer-Verlag 1971.

[4] *Michlin, V.M.:* Methodiceskie ukazania po prognozirovaniu techniceskovo sostojania maschin (Methodik zur Prognose des Schädigungszustandes von Maschinen). Moskau: KOLOS 1972.

[5] *Pejša, L.:* Optimalizace diagnostiky poruch strojnich prvku (Optimierung der Diagnose von Maschinenelementen). Zemedelska technika Bd. 23 (1977) Nr. 1, S. 9/21.

[6] *Pejša, L.:* Vyuziti diagnostiky pro optimalni obnovu strojnich prvku (Anwendung der Diagnose zur optimalen Erneuerung von Maschinenelementen). Zemedelska technika Bd. 23 (1977) Nr. 5.

[7] *Pejša, L.:* Beitrag zur Auswahl eines optimalen Diagnoseverfahrens. Wiss. Zeitschrift der Universität Rostock, Mathematisch-Naturwiss. Reihe 25 (1976) Nr. 4, S. 417/24.