

Zeitschrift: IABSE journal = Journal AIPC = IVBH Journal
Band: 4 (1980)
Heft: J-10: Failure analysis of construction equipment

Artikel: Untersuchung des Ausfallverhaltens von Baumaschinen
Autor: Swoboda, Hans Wolfgang
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-24960>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 03.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Untersuchung des Ausfallverhaltens von Baumaschinen

Failure Analysis of Construction Equipment

Analyse des pannes de machines de chantier

Hans Wolfgang SWOBODA

Dr.-Ing.

Technische Universität Braunschweig
Braunschweig, Bundesrepublik Deutschland

ZUSAMMENFASSUNG

Das Ausfallverhalten der Bauteile von Baumaschinen läßt sich mit der mathematischen Statistik beschreiben. Die methodischen Grundlagen werden zusammengestellt, an einem Bauteil wird beispielhaft die Berechnung der Ausfallverteilung und Ausfallrate gezeigt. In einem Ersatzmodell wird der kostenminimale Ersatzzyklus berechnet und damit gezeigt, daß Lebensdauerdaten von Bauteilen als Entscheidungshilfe für ein wirtschaftliches Instandsetzen genutzt werden können.

SUMMARY

The failure behaviour of the components of construction equipment can be described by statistical methods. The basics of the mathematical approach are presented and an example for the computation of the failure frequency function and the hazard rate shown. In a model the most economical replacement cycle is computed. It shows that analysis of the reliability of components may be used to economize on repairs to construction equipment.

RÉSUMÉ

Les pannes d'éléments de machines de chantier peuvent être décrites à l'aide de la statistique. Les règles fondamentales sont présentées: la distribution et la fréquence des pannes sont illustrées à l'aide d'un exemple pour un élément de machine. Le cycle de remplacement pour un coût minimal est calculé à l'aide d'un modèle de remplacement. La connaissance de la durée de vie des éléments est un critère de décision utile pour une maintenance économique des machines de chantier.



1. EINFÜHRUNG

Die wichtigste Voraussetzung einer planmäßigen Instandsetzung von Baumaschinen ist die Kenntnis der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Lebensdauer ihrer Bauteile. Mit ihr kann das Ausfallverhalten eines Baumaschinentyps beurteilt und der wirtschaftliche Ersatzzeitpunkt errechnet werden.

Die Lebensdauer eines Bauteiles kann grundsätzlich auf zwei Arten ermittelt werden:

- Die indirekte Methode zur Bestimmung der technischen Lebensdauer eines Bauteiles besteht darin, die Belastung des betreffenden Bauteiles zu verfolgen und daraus seine Abnutzung abzuleiten. Hierzu müssen sowohl die Beziehung zwischen den Einflußfaktoren und der daraus resultierenden Abnutzung als auch die Belastung selbst in jedem Zeitpunkt bekannt sein. Die Messung dieser Beziehungen sowie der Belastungen ist mit erheblichem Aufwand verbunden.
- Bei der empirischen Vorgehensweise wird die Ausfallverteilung von Bauteilen anhand statistischer Aufzeichnungen ermittelt. Versuchs- und Beobachtungsergebnisse werden systematisch erfaßt und mit mathematisch-statistischen Methoden ausgewertet. Die empirisch gewonnene Verteilung der Merkmalswerte einer Stichprobe erlaubt Aussagen über das Ausfallverhalten der Bauteile sowie über zukünftig zu erwartende Lebensdauern.

Da die quantitativen Einflüsse der einzelnen Lebensdauerfaktoren noch weitgehend unbekannt sind, wird hier der empirischen Vorgehensweise gefolgt.

2. MATHEMATISCHE GRUNDLAGEN DER STATISTISCHEN LEBENSDAUERERMITTLUNG

2.1 Begriffe und Definitionen

Die Zufallsgröße ist bei der Lebensdaueruntersuchung die Betriebszeit T eines Bauteiles zwischen Inbetriebnahme und Ausfall.

Die Zufallsgröße T ist stetig, da sie beliebige reelle Zahlen t in einem Intervall $0 < t < t_{\max}$ annehmen kann. Zur stetigen Zufallsgröße T gehört die Verteilungsfunktion (Ausfallfunktion) $F(t)$:

$$F(t) = P(T \leq t)$$

Sie beschreibt die Wahrscheinlichkeit, daß ein Bauteil der Grundgesamtheit bis zu einem vorgegebenen Lebensalter t ausfällt.

$$B(t) = 1 - F(t)$$

gibt die Überlebenswahrscheinlichkeit an, daß ein zum Zeitpunkt 0 installiertes Bauteil zum Zeitpunkt t noch nicht ausgefallen ist.

Die Wahrscheinlichkeitsdichte (Ausfallrate) der Lebensdauer ist die erste Ableitung der als differenzierbar angenommenen Verteilungsfunktion.⁽¹⁾

$$f(t) = \frac{F(t)}{dt} \geq 0 \quad \text{mit} \quad \int_0^{\infty} f(\tau) d\tau = 1$$

Da $f(t) = 0$ für $t < 0$, kann die untere Grenze 0 gesetzt werden.

Die mittlere Lebensdauer ist der Erwartungswert $E(t)$. Für stetige Verteilungen gilt mit $f(t) = 0$ für $t < 0$:

$$E(t) = \int_0^{\infty} t f(t) dt$$

Als Maß für die Streuung der Werte wird die Varianz $VAR(t)$ bzw. σ_t^2 und die Standardabweichung σ_t verwendet. Die Varianz einer stetigen Verteilung ist definiert als:

$$VAR(t) = \int_0^{\infty} [t - E(t)]^2 f(t) dt = \sigma_t^2$$

Die Ausfallrate $q(t)$ ist der Quotient aus Ausfalldichte und Überlebenswahrscheinlichkeit und beschreibt die Ausfallintensität oder relative Ausfallneigung eines Bauteiles zum Zeitpunkt t . Sie ist definiert durch

$$q(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{B(t)}$$

Die Ausfallrate beschreibt besonders anschaulich die unterschiedlichen Ausfallmechanismen von Bauteilen. Dabei kann zwischen fallenden, konstanten und steigenden Ausfallraten unterschieden werden (Bild 1).

Phase I: Frühausfälle beruhen auf Fehlern in der Herstellung, Montage, Installation und Instandsetzung. Sie treten zu einem relativ frühen Zeitpunkt der Lebensdauer eines Produktes auf.

Die fallende Ausfallrate besagt, daß die Wahrscheinlichkeit des Ausfalls eines Bauteiles mit zunehmender Betriebszeit sinkt.

Phase II: Zufallsausfälle treten zu den verschiedensten Zeitpunkten im Laufe der zu erwartenden Lebensdauer einer Baumaschine auf. Verborgene Mängel, Bedienungsfehler, Wartungsfehler und übermäßige Beanspruchung verursachen den Ausfall einzelner Bauteile und damit den der Baumaschine zu nicht vorhersehbaren Zeitpunkten.

Die konstante Ausfallrate besagt, daß alle Zeitpunkte für den Ausfall eines Bauteiles gleich wahrscheinlich und damit unabhängig von der Betriebszeit sind.

Phase III: Abnutzungsausfälle treten auf, wenn ein Bauteil durch Verschleiß seine Funktion nicht mehr erfüllt. Die weitgehend unvermeidbaren Abnutzungsausfälle haben ihre Ursache z.B. in der Materialermüdung, Korrosion und chemischen Zersetzung, Strahlungs-

⁽¹⁾ Bei einer diskreten Zufallsvariablen tritt an die Stelle der Dichtefunktion die Wahrscheinlichkeitsfunktion. Hier erfolgt eine Beschränkung auf den stetigen Fall.



schäden und Schwingungen. Die steigende Ausfallrate bedeutet, daß die Wahrscheinlichkeit des Ausfalles eines Bauteiles mit der Betriebszeit steigt.

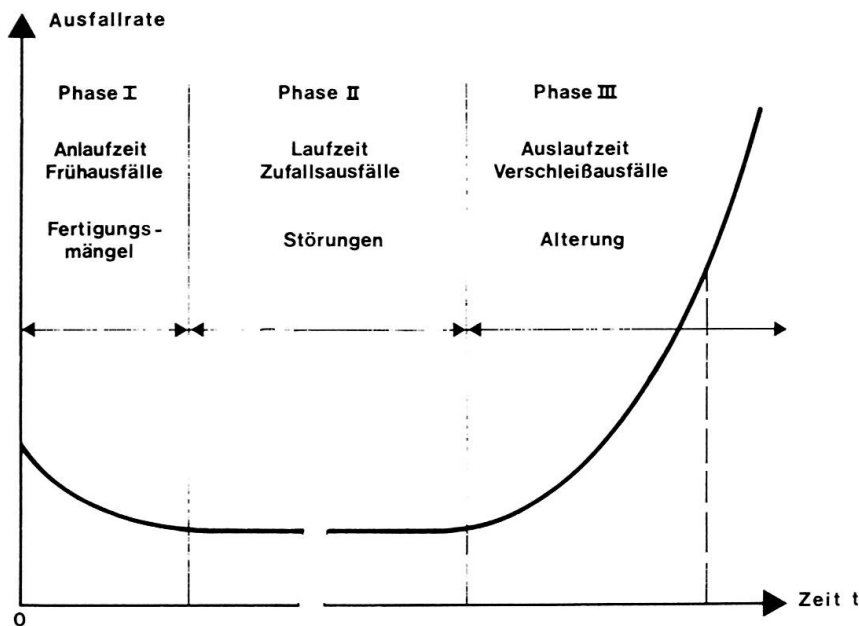


Bild 1 Ausfallrate als Funktion der Zeit

2.2 Typen von Lebensdauerverteilungen

Die empirisch gewonnenen Ausfalldaten können mit folgenden theoretischen Verteilungen angeglichen werden:

Die NORMALVERTEILUNG

Die Normalverteilung eignet sich zur Approximation empirischer Lebensdauerverteilungen.

Die Parameter der Normalverteilung sind der Erwartungswert μ und die Standardabweichung σ . Bei Lebensdaueruntersuchungen wird μ als mittlere Lebensdauer und σ als ihre Standardabweichung interpretiert.

Die Normalverteilung ist über dem Intervall $-\infty < t < +\infty$ definiert. Da die Lebensdauer eines Bauteiles nicht negativ ist, eignet sich die Normalverteilung nur dann als Lebensdauerverteilung, wenn die Wahrscheinlichkeit negativer Lebensdauern gering ist und damit $P(t < 0)$ vernachlässigt werden kann.

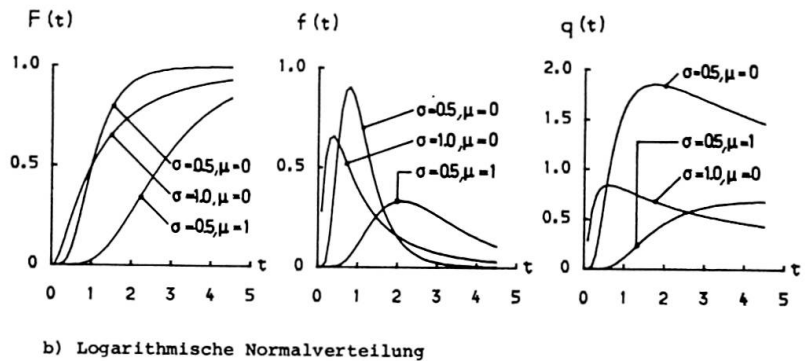
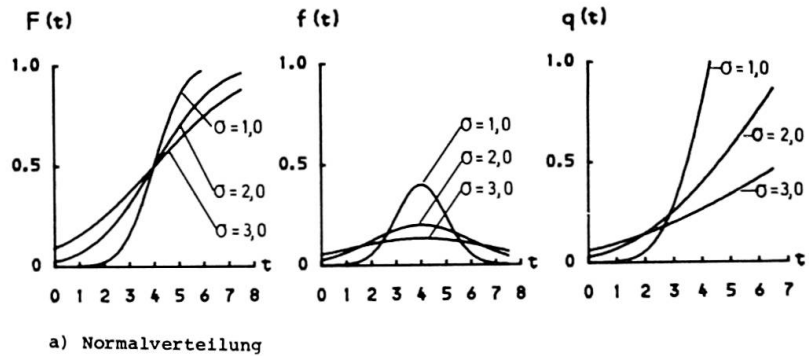
Die Ausfallrate $q(t)$ steigt mit der Zeit (Bild 2a). Mit der Normalverteilung können folglich Abnutzungsausfälle beschrieben werden.

Als Form der Verteilung ist eine Normalverteilung zu erwarten, wenn sich viele, etwa gleich große und voneinander unabhängige Einflüsse additiv überlagern.

Die LOGARITHMISCHE NORMALVERTEILUNG

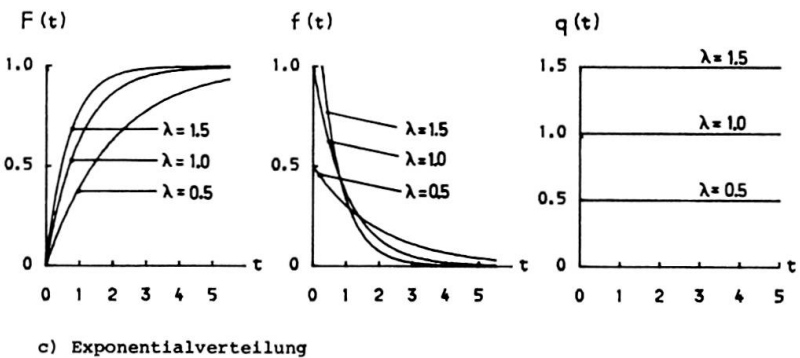
Die logarithmische Normalverteilung ist dadurch definiert, daß der Logarithmus der Lebensdauer des Bauteils einer Normalverteilung genügt. Mit dieser Merkmalstransformation wird erreicht, daß die Lebensdauer t keine negativen Werte annehmen kann (Bild 2b).

Die logarithmische Normalverteilung ist als theoretisches Modell für Lebensdauererwartungen geeignet, wenn sich viele voneinander unabhängige Einflüsse multiplikativ überlagern.



Die EXPONENTIALVERTEILUNG

Die Ausfallrate der Exponentialverteilung ist eine von der Betriebszeit t unabhängige Konstante (Bild 2c). Damit eignet sich die Exponentialverteilung als theoretisches Modell für die Beschreibung der Lebensdauererwartung von Systemen, Kollektiven, Zusammenbauten, deren Komponenten durch verschiedene, voneinander unabhängige und zufällig ausgelöste Ausfallursachen unabhängig von der erreichten Laufzeit ausfallen.



Die WEIBULL-VERTEILUNG

Die Parameter der Weibull-Verteilung sind der Form- oder Steigungsparameter b und der Maßstabsparameter θ (Bild 2d). Der Formparameter b beschreibt die Streuung der Merkmalswerte. Im später beschriebenen Weibull-Wahrscheinlichkeitspapier entspricht der

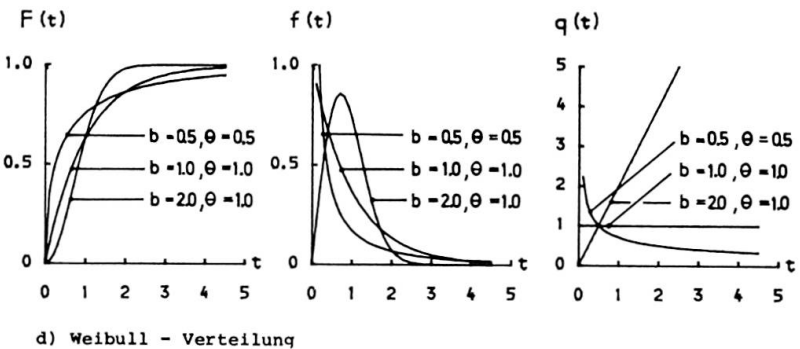


Bild 2 Verteilungsfunktion, Dichte und Ausfallrate von Lebensdauererwartungen



Formparameter b der Steigung der durch die Merkmalswerte einer Stichprobe gelegten Ausgleichsgeraden. Mit steigendem Wert von b sinkt die Streubreite der Merkmalswerte.

Die Lebensdauerzyklen von Bauteilen lassen sich bestimmten Formparametern zuordnen:

- $b < 1$: fallende Ausfallrate
Ausfallverhalten ist symptomatisch für Frühausfälle z.B. infolge schlechter Anfangsqualität in Fertigung oder Montage.
- $b = 1$: konstante Ausfallrate
Exponentialverteilung als Sonderfall der Weibull-Verteilung repräsentiert Zufallschäden, hervorgerufen durch unterschiedliche Einflußgrößen.
- $b > 1$: steigende Ausfallrate
Deutet auf Schäden durch Verschleiß hin.

Als Modell für die Beschreibung des Ausfallverhaltens der Bauteile von Baumaschinen wird aus folgenden Gründen die Weibull-Verteilung als Arbeitshypothese verwendet:

- Die Weibull-Verteilung hat für $b < 1$ eine fallende, für $b = 1$ eine konstante und für $b > 1$ eine wachsende Ausfallrate (Bild 2d) und ist damit für die Beschreibung von Früh-, Zufalls- und Abnutzungsausfällen geeignet.
- Die Parameter der Weibull-Verteilung können mit dem Weibull-Wahrscheinlichkeitspapier graphisch aus Stichproben, d.h. aus Lebensdauermeßwerten gewonnen werden [2].
- Die Ausfallrate $q(t)$ kann im doppelt logarithmischen Netz graphisch für das Verteilungsnetz und aus Lebensdauermeßwerten bestimmt werden [2].

2.3 Das Weibull-Wahrscheinlichkeitsnetz

Die Funktionen der Weibull-Verteilung sind:

Verteilungsfunktion:

$$F(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } t < 0 \\ 1 - \exp[-(\frac{t}{\theta})^b] & \text{für } t \geq 0; \theta, b > 0 \end{cases}$$

Dichtefunktion:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{b}{\theta} (\frac{t}{\theta})^{(b-1)} [\exp - (\frac{t}{\theta})^b] & \text{für } t \geq 0; \theta, b > 0 \\ & \text{für } t < 0 \end{cases}$$

Ausfallrate:

$$q(t) = \frac{b}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{(b-1)}$$

Aus der Verteilungsfunktion der Weibull-Verteilung ergibt sich durch Umstellung

$$\frac{1}{1 - F(t)} = \exp\left(\frac{t}{\theta}\right)^b$$

und zweimaliges Logarithmieren

$$\ln \ln \frac{1}{1 - F(t)} = b \ln t - b \ln \theta$$

Dies ist eine Geradengleichung in der Form $y' = b t' + c$ mit

$$y' = \ln \ln \frac{1}{1 - F(t)}, \quad t' = \ln t \quad \text{und} \quad c = b \ln \theta$$

Demnach führen doppelte logarithmische Teilung der Ordinate und logarithmische Teilung der Abszisse eines Koordinatenpapiers zum sogenannten Weibull-Wahrscheinlichkeitspapier, das eine lineare Darstellung der Ausfallhäufigkeit $F(t)$ und damit eine einfache Ermittlung der Verteilungsparameter gestattet (Bild 3).

Der Wert des Formparameters errechnet sich aus dem Tangens des Winkels ϑ zwischen der Ausgleichsgeraden und der Horizontalen. Die charakteristische Lebensdauer θ kann auf der Zeitachse in Höhe des Schnittpunktes der Ausgleichsgeraden mit der Waagerechten bei $F(t) = 1 - 1/e = 63,2 \%$ direkt abgelesen werden.

Die Parameter der bei der Lebensdaueruntersuchung benutzten Weibull-Verteilungsfunktion werden demnach aus der Ausfallverteilung von empirischen Daten wie folgt gewonnen:

Aus den absoluten Häufigkeiten der Merkmalswerte werden die relativen Summenhäufigkeiten berechnet und im Weibull-Wahrscheinlichkeitspapier über der entsprechenden Betriebszeit aufgetragen. Hieraus ergibt sich eine Punktfolge, durch die eine ausgleichende Gerade gelegt wird. Entsprechend den Ausführungen im letzten Abschnitt werden an der Ausgleichsgeraden die Parameter der Stichprobe, die als Schätzwerte für die entsprechenden Kennzahlen der zugehörigen Grundgesamtheit dienen, abgelesen.

2.4 Der Zufallsstreibereich im Weibull-Wahrscheinlichkeitspapier

Jede aus einer Stichprobe gewonnene statistische Aussage kann nur mit einer begrenzten Genauigkeit auf eine Grundgesamtheit übertragen werden. Je mehr Lebensdauer-Meßwerte vorliegen und je mehr sich die Stichprobenverteilung der Verteilung der Grundgesamtheit nähert, desto sicherer sind die daraus gewonnenen Informationen und desto genauer ist der daraus folgende Schluß auf die Grundgesamtheit.

Der Unterschied zwischen der Ausfallhäufigkeitsfunktion der Grundgesamtheit und der ermittelten Stichprobenverteilung kann in Zu-



fallsschwankungen oder in signifikanten Abweichungen begründet liegen. Durch die Angabe eines Zufallsstrebereiches für die Stichprobenverteilung läßt sich feststellen, ob die Arbeitshypothese, daß die Stichprobenverteilung der Verteilungsfunktion der Grundgesamtheit entspricht, zu verwerfen ist oder nicht.

Die Grenzen des Streubereiches können in Abhängigkeit von der Anzahl der Stichprobenwerte, die aus einer bestimmten, normalen oder nicht normalen Grundgesamtheit stammen, mit den von Klein [3] abgeleiteten Formeln berechnet werden.

Bei einer statistischen Sicherheit α gilt für die untere Grenze des Zufallsstrebereiches

$$H_{j,u} = \frac{100}{1 + \frac{V_1}{V_2} F_{\alpha}(V_1, V_2)} \%$$

und für die obere Grenze

$$H_{j,o} = \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{V_1}{V_2} F_{\alpha}(V_1, V_2)}\right) 100 \%$$

mit $V_1 = 2(n + 1 - j)$ und $V_2 = 2j$

$F(V_1, V_2)$ sind die zu den Freiheitsgeraden V_1 und V_2 gehörenden Werte der F-Verteilung. Die gewählte (einseitige) Sicherheit α , unter der die F-Werte aus Tabellen abgelesen werden können, ist zugleich die statistische Aussagewahrscheinlichkeit, die zu den Schranken $H_{j,u}$ und $H_{j,o}$ gehört.

Die Werte für die obere und untere Streugrenze wurden für eine Aussagewahrscheinlichkeit von 90 %, 95 % und 99 % von Lipson und Sheth [4] tabelliert.

Die Übertragung dieser Werte in das Weibull-Wahrscheinlichkeitspapier ergibt eine Reihe von oberen und unteren Grenzen für die Summenhäufigkeiten H_j , die zu der betrachteten Grundgesamtheit gehören. Die durch diese Punkte gelegten Grenzkurven schließen den Bereich ein, der bei gewählter Aussagewahrscheinlichkeit alle aufgrund der Aussage der Stichprobe gewonnenen möglichen Ausfallhäufigkeitsfunktionen der Grundgesamtheit umfaßt.

WEIBULL-WAHRSCHEINLICHKEITSNETZ

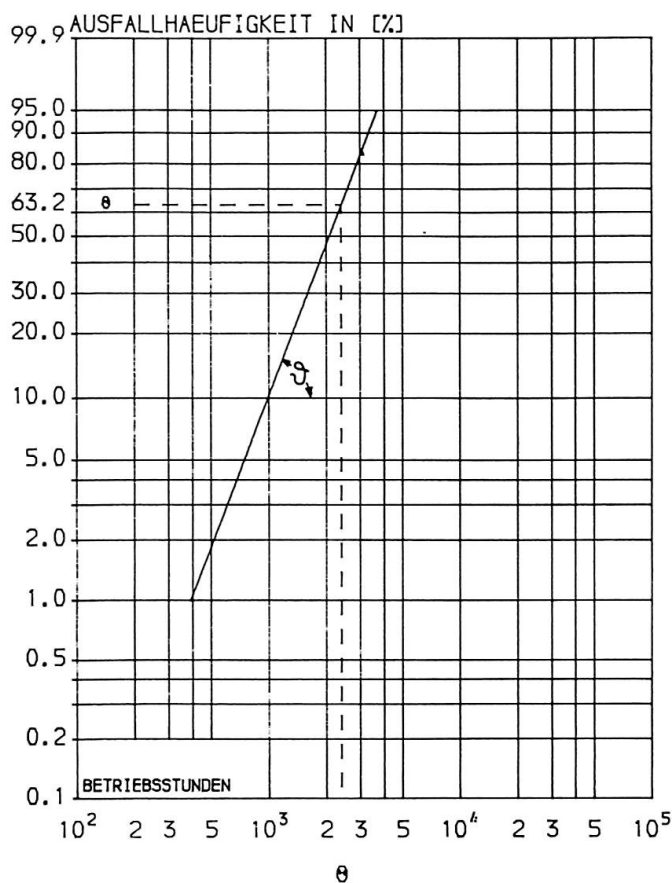


Bild 3 Weibull-Wahrscheinlichkeitsnetz mit einer Ausfallhäufigkeitsfunktion

3. LEBENSDAUERUNTERSUCHUNGEN AN BAUMASCHINENTEILEN

3.1 Daten zur Ermittlung der Lebensdauern

Für ausgewählte Bauteile von insgesamt 16 Radladern mit einer Gesamtbetriebszeit von 113.000 Stunden wurden anhand betrieblicher Schadensdatenaufzeichnungen Lebensdaueruntersuchungen durchgeführt. Die Lebensdauern der Bauteile wurden den Werkstattberichten und den Rechnungen für Fremdinstandsetzung entnommen. Der Ersatzzeitpunkt ist dabei durch die Angabe der Gesamtbetriebsstunden des Gerätes zum Zeitpunkt der Instandsetzungsaktion eindeutig festgelegt. Zusätzlich zum Betriebsstundenstand wurde auch die Kalenderzeit der Instandsetzungsaktion aufgezeichnet. Mit diesen Daten ließen sich die Aufschreibungen überprüfen und fehlende Werte interpolieren. Die Lebensdauer der Bauteile wurde dann aus der Differenz zweier Aktionszeitpunkte berechnet. Die Lebensdauern der nach einem Schaden ersetzten und noch funktionsfähigen Bauteile wurden ebenfalls berücksichtigt.

Folgende die Lebensdauern der Bauteile beeinflussenden Faktoren mußten vernachlässigt werden, da hierüber keine Aufzeichnungen vorlagen:

- Der Einfluß des unterschiedlich qualifizierten Bedienungs- und Instandsetzungspersonals wurde vernachlässigt.
- Während bei der plötzlichen Zustandsänderung eines Bauteils wie Bruch oder Riß der technisch bedingte Ersatzzeitpunkt und damit die Lebensdauer durch Funktionsunfähigkeit eindeutig festgelegt ist, sind Lebensdauern von Bauteilen, deren Lebensdauerende durch langsame Abnutzung herbeigeführt wird, nicht so eindeutig fixiert. Da Verschleißmessungen nur in Einzelfällen durchgeführt werden, hängt der Ersatzzeitpunkt bzw. das Lebensdauerende solcher Bauteile von der individuellen Beurteilung des Bedienungs- und Instandsetzungspersonals ab. Die sich dadurch ergebenden Ungenauigkeiten konnten nicht erfaßt werden.
- Durch den Ausfall eines Bauteiles können andere Bauteile der Baumaschine, die in ihrer Funktion von dem ausgefallenen Bauteil abhängen, nachteilig beeinflusst werden. Da aus den Schendaten nicht festgestellt werden kann, in welchem Maße der Ausfall eines Bauteiles die Lebensdauer weiterer, funktionsabhängiger Bauteile beeinflusst, wird in dieser Untersuchung von der Annahme ausgegangen, daß alle Bauteile unabhängig voneinander ausfallen.

3.2 Lebensdaueruntersuchung, dargestellt am Beispiel des Lenkachsbolzens eines Radladers

Die statistischen Gesetzmäßigkeiten des Ausfallverhaltens des Lenkachsbolzens eines Radladers werden anhand der empirisch gewonnenen Schendaten beispielhaft ermittelt.

Die Summenhäufigkeiten der Merkmalswerte der Stichprobe und die Ausgleichsgerade werden im Weibull-Wahrscheinlichkeitsnetz dargestellt und durch die zulässigen Streugrenzen überprüft.



Der Formparameter b wird als Tangens des Winkels zwischen der Ausgleichsgeraden und der Horizontalen berechnet. Die charakteristische Lebensdauer θ wird auf der Zeitachse unter dem Schnittpunkt der Ausfallhäufigkeit von 63,2 % mit der Ausgleichsgeraden abgelesen.

Die Ausfallrate wird aus den Merkmalswerten der Stichprobe und dem Verteilungsgesetz im doppelt-logarithmischen Netz dargestellt. Der Verlauf der Ausfallrate zeigt, ob die Voraussetzung vorbeugender Instandsetzungsmaßnahmen, d.h. eine mit der Betriebszeit wachsende Ausfallwahrscheinlichkeit ($b > 1$) gegeben ist.

Beschreibung des Bauteiles: Der Lenkachsbolzen ist ein Kreiszylinder aus gehärtetem Stahl. Durch ein Sicherungsblech ist der Bolzen am Lenkachsträger befestigt. Die drehbar gelagerte Lenkachsaufhängung ist auf den Bolzen aufgesteckt.

Funktion des Bauteiles: Der Lenkachsbolzen verbindet die Bauteile Lenkachsträger und Lenkachsaufhängung.

Schadenbild: Der Ausfall des Bauteiles wird durch Dreh-, Schlag- und Schwingungsbeanspruchung verursacht (Strukturschaden). Die Beanspruchung des Lenkachsbolzens verursacht Abrieb, hieraus resultiert eine allmählich schlechter werdende Bolzenpassung.

Folgeschäden: Schlechte Bolzenpassung führt zum Ausfall des Bauteiles und zum Ausschlagen der Lagerstellen von Lenkachsträger und Lenkachsaufhängung.

Untersuchungsergebnisse

Alle wichtigen Zahlen und Untersuchungsergebnisse sind in der folgenden Übersicht zusammengestellt:

Anzahl der ausgefallenen Bauteile n	23
Anzahl der untersuchten Bauteile N	33
Formparameter b	1,56
Charakteristische Lebensdauer θ	4.941 h
Arithmetischer Mittelwert t	4.441 h
Standardabweichung s	2.904 h

Die Darstellung der aus den Stichprobenwerten berechneten Summenhäufigkeiten im Weibull-Wahrscheinlichkeitsnetz zeigt eine Punktfolge, die durch eine Gerade angenähert werden kann (Bild 4).

Für die in einigen Bereichen aufgetretenen Abweichungen der Stichprobenwerte von der Ausgleichsgeraden konnte aus den Schadendaten keine technische Erklärung gefunden werden.

Alle aus der Stichprobe berechneten Ausfallhäufigkeiten liegen innerhalb des eingezeichneten Zufallsbereiches. Damit muß die Annahme, daß das Ausfallverhalten des untersuchten Lenkachsbolzens durch eine Weibull-Verteilung mit den Parametern $b = 1,56$ und $\theta = 4.941$ h mit 95 % Aussagesicherheit angenähert werden kann, aufgrund der Ergebnisse aus der Stichprobe nicht verworfen werden.

Die Steigung der aus den Stichprobenwerten und dem Verteilungsnetz ermittelten und in das doppelt logarithmische Netz eingereichten Ausfallrate (Bild 5) ist mit einer Steigung von $\beta = b - 1 = 0,56$ verhältnismäßig flach.

Hieraus kann geschlossen werden, daß der Lenkachs-bolzen eine näherungsweise konstante Widerstandsfähigkeit besitzt und seine Beanspruchung sehr gleichmäßig ist.

Die grundlegende Voraussetzung für einen vorbeugenden Austausch des Lenkachs-bolzens ist mit einem Formparameter $b > 1$ erfüllt.

Die wichtigen Zahlen und Ergebnisse der übrigen in dieser Arbeit untersuchten Bauteile sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

WEIBULL-WAHRSCHEINLICHKEITSNETZ

LEBENSDAUER-VERTEILUNG: $F(T) = 1 - \exp(T/4941)^{1.563}$

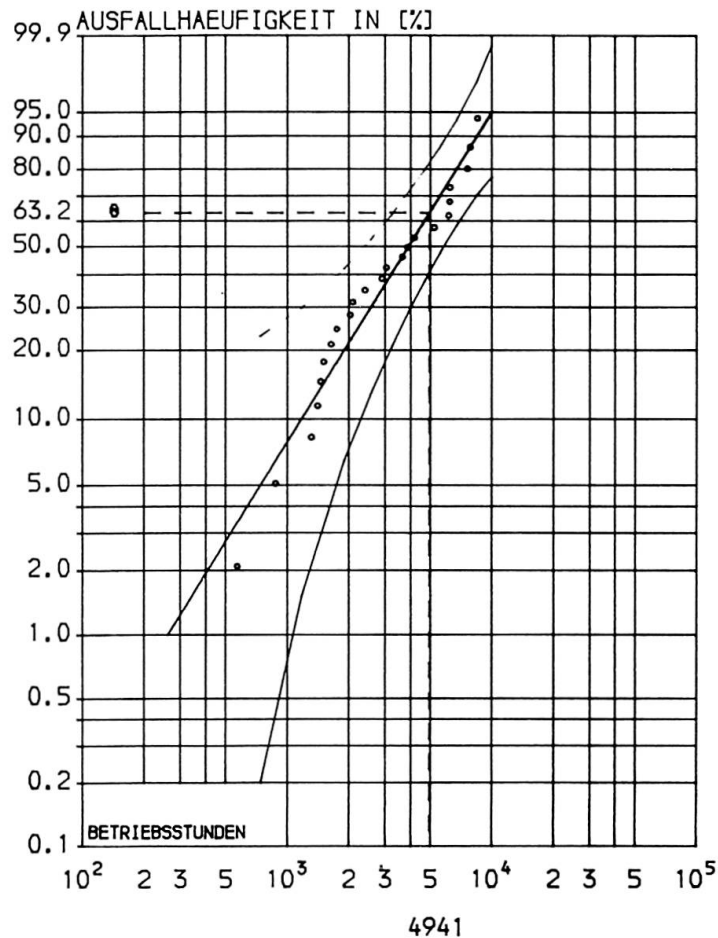


Bild 4 Ausfallhäufigkeitsfunktion für den Lenkachs-bolzen

DOPPELT LOGARITHMISCHES NETZ

AUSFALLRATE: $Q(T) = 0.000316 (T/4941)^{0.563}$

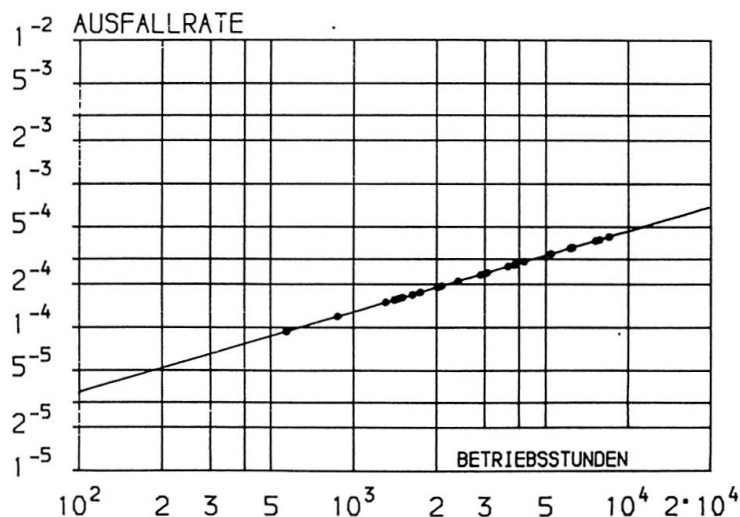


Bild 5 Ausfallrate für den Lenkachs-bolzen



lfd. Nr.	Benennung des Bauteiles	Anzahl der		Form- para- meter b	Charakt. Lebens- dauer θ (h)	Arithm. Mittel- wert \bar{t} (h)	Stan- dardab- weichung s (h)
		ausge- fallenen Bauteile n	unter- suchten Bauteile N				
1	Schmalkeilriemen der Was- serpumpe	28	41	1.73	3.491	3.111	1.851
2	Hochdruckschlauch	6	20	3.07	8.909	7.964	2.836
3	Pumpe der Hydraulikanlage	6	19	2.58	8.696	7.722	3.212
4	Druck-Begrenzungsventil/ Hydraulikanlage	15	24	1.23	6.366	5.955	4.882
5	Glühanlaßschalter/Elek- trische Anlage	14	27	1.23	8.841	8.264	6.753
6	Lenkachsaufhängung	6	19	1.39	11.782	10.747	7.816
7	Lenkachsbolzen	23	33	1.56	4.941	4.441	2.904
8	Zylinder/Hubzylinder	10	25	1.78	7.546	6.714	3.897
9	Innenring/Hubzylinder	22	34	1.98	4.528	4.013	2.114
10	Bolzen der Schubstange	43	51	2.54	2.401	2.131	900
11	Schaufelbolzen	44	52	1.96	2.538	2.250	1.198
12	Messer der Normalschaufel	21	34	1.47	5.435	4.917	3.394

Tabelle 1 Ergebnisse der Lebensdaueruntersuchungen

3.3. Folgerungen aus den Untersuchungsergebnissen

Die Ergebnisse der Lebensdaueruntersuchungen erlauben folgende Aussagen:

1. Eine wirkungsvolle Analyse eines Baumaschinenschadens setzt systematisch erfaßte Schadendaten voraus. Anhand dieser Informationen kann unter Benutzung mathematisch-statistischer Methoden das Ausfallverhalten von Bauteilen berechnet werden.
2. Die Annahme, daß das Ausfallverhalten der untersuchten Bauteile durch eine Weibull-Verteilung mit den Parametern b und θ angenähert werden kann, mußte aufgrund der Ergebnisse aus der Stichprobe mit 95 % Aussagesicherheit in keinem Fall verworfen werden.

Dies schließt jedoch nicht aus, daß das Ausfallverhalten der Stichprobe bei gleicher Aussagesicherheit zu einer anderen Verteilung ebenfalls nicht im Widerspruch steht.

3. Bei einigen Bauteilen lag nur ein sehr kleiner Stichprobenumfang vor.

Da bei kleinen Stichproben auch große Abweichungen von der Hypothese (Weibull-Verteilung) nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit erkannt werden, sind die aus der Untersuchung gewonnenen Zahlenergebnisse durch zusätzliche Lebensdauerdaten zu ergänzen und zu überprüfen.

4. Bei allen Bauteilen erscheint es aufgrund der großen Streuung problematisch, Zeitpunkte und Laufzeiten für einen vorbeugenden Ersatz allein auf der Grundlage einer technischen Lebensdaueruntersuchung ohne die Analyse aller mit der Instandsetzungsmaßnahme verbundenen Kosten festzulegen.

4. INSTANDSETZUNGSPOLITIK AUF DER GRUNDLAGE VON LEBENSDAUERUNTERSUCHUNGEN

4.1 Instandsetzungsmethoden im Baubetrieb

Vorbeugend wird instandgesetzt, wenn der Abnutzungszustand von Bauteilen durch Sichtkontrolle oder Verschleißmessungen einfach festgestellt werden kann. Dies ist z.B. bei den Arbeitsausrüstungen von Baumaschinen und den Laufwerksteilen eines Raupenfahrwerks möglich.

Der überwiegende Anteil aller anfallenden Instandsetzungsarbeiten wird nach der sogenannten Feuerwehrstrategie durchgeführt, d.h. nach einem schadenbedingten Ausfall der Baumaschine. Instandsetzungspersonal, Ersatzteile und Werkzeug lassen sich für die Ausfallinstandsetzung nicht planmäßig bereitstellen.

Die Folgen einer improvisierten Instandsetzung sind u.a. erhöhte Stillstandszeiten der Baumaschine, vermehrte Folgekosten auf der Baustelle und das Erfordernis, Instandsetzungskapazitäten ohne gleichmäßige Auslastung vorzuhalten.

Trotz dieser offensichtlichen Nachteile wird die Ausfallinstandsetzung gegenüber der planmäßig vorbeugenden Instandsetzung vorgezogen. Die Gründe hierfür sind:

- Der häufig wechselnde Einsatzort einer Baumaschine läßt es nicht sinnvoll erscheinen, starre Austauschzyklen z.B. durch die Angabe von minimaler und maximaler Laufzeit, zu der ein Bauteil zu ersetzen ist, festzulegen.
- Die Folgekosten eines Schadens lassen sich durch kurzfristiges Umdisponieren in Grenzen halten.
- Bei vorbeugender Instandsetzung ist die zu erwartende Anzahl der Instandsetzungsaktionen (vorbeugende und Ausfallinstandsetzung zusammen) immer größer als bei ausschließlicher Ausfallinstandsetzung, da die Laufzeiten der vorbeugend ersetzten Teile nicht voll ausgenutzt werden.
- Die Lebensdauer der Bauteile kann nur aufgrund der Erfahrung des Instandsetzungspersonals geschätzt werden. Diese Angaben sind für eine planmäßig vorbeugende Instandsetzung unzureichend.



- Die Lebensdauer identischer Bauteile kann auch bei gleichartiger Belastung stark streuen. Die Frage, ob der planmäßig vorbeugende Austausch solcher Bauteile wirtschaftlich ist, kann nur durch eine detaillierte Kostenbetrachtung beantwortet werden. Dies ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt mangels vollständiger Kostendaten nicht möglich.
- Ohne statistisch repräsentative Lebensdauerdaten für die Bauteile aller häufig eingesetzten Baumaschinen und vollständige Informationen über die durch die Instandsetzung verursachten Kosten kann nicht beurteilt werden, ob vorbeugende Instandsetzungsmaßnahmen wirtschaftlich sind oder nicht.

Die Untersuchung hat gezeigt, daß die Lebensdauer der Bauteile von Baumaschinen mit mathematisch-statistischen Methoden berechnet werden kann. Die Verwertung der Ergebnisse aus den Lebensdaueruntersuchungen für die Planung der Instandsetzung im Baubetrieb wird im folgenden Abschnitt aufgezeigt.

4.2 Modell der Ersatzpolitik

Ziel einer Ersatzpolitik von Bauteilen an Baumaschinen ist die Minimierung der Ersatzkosten je Betriebsstunde. Aktionsparameter sind die wirtschaftlich bedingten Ersatzzeitpunkte, die entsprechend der Ausfallverteilung und jeweiligen Kostensituation optimal bestimmt werden sollen. Voraussetzung dafür, daß vorbeugender Ersatz wirtschaftlich ist, ist zum einen eine mit der Betriebszeit steigende Ausfallrate des Bauteiles, zum anderen die Bedingung, daß bei einem ausfallbedingten Ersatz höhere Kosten anfallen als bei einer planmäßig vorbeugenden Maßnahme.

Für die Formulierung des Modells der Ersatzpolitik wurden folgende vereinfachende Annahmen getroffen:

1. Das Ausfallverhalten eines Bauteiles wird nur von dem eigenen technischen Zustand bestimmt und fällt unabhängig vom Zustand anderer Bauteile aus.
2. Jedes Bauteil kann die Zustände "funktionsfähig" und "funktionsunfähig" annehmen, verschiedene Grade der Funktionsfähigkeit werden nicht unterschieden.
3. Bei einem vorbeugenden oder ausfallbedingten Ersatz wird das technische System Baumaschine wieder in den definierten Ausgangszustand versetzt.
4. Die Betriebskosten fallen unabhängig vom Alter der Baumaschine in konstanter Höhe an. Weder Erlös- noch Kostennachteile treten mit zunehmendem Gerätealter auf, dies bedeutet, daß die Betriebskosten in einem Ersatzmodell nicht gesondert zu erfassen sind.
5. Dem Ersatz eines Bauteiles können eindeutig bestimmte Ersatzkosten (bzw. Verteilung der Ersatzkosten) zugerechnet werden.
6. Instandsetzungspersonal und zu ersetzende Bauteile sind sofort verfügbar.

Mit diesen Annahmen ergibt sich für das Ersatzkriterium die von Scheer [5, S. 72] abgeleitete Zielfunktion:

$$E\left(\frac{K}{T}(t_p)\right) = \frac{B(t_p) KV + F(t_p) KA}{E(T(t_p))} \stackrel{!}{=} \text{Min.}$$

Dabei und im folgenden bedeuten:

$E\left(\frac{K}{T}(t_p)\right)$ = Erwartungswert der Ersatzkosten je Betriebsstunde während eines Ersatzzyklus $[0, t_p]$

t = Betriebszeit eines Bauteiles

t_p = vorbeugender Ersatzzeitpunkt

t_p^* = optimaler, d.h. kostenminimaler Ersatzzeitpunkt

$B(t_p)$ = Überlebenswahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt t_p

$F(t_p)$ = Ausfallwahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt t_p

KV = (durchschnittliche) Kosten bei vorbeugendem Ersatz

KA = (durchschnittliche) Kosten bei Ausfallersatz

$E(T(t_p))$ = Erwartete Betriebszeit eines Zyklus

Die Betriebszeit eines Bauteiles wird entweder durch den Ausfall vor dem Zeitpunkt t_p oder durch den vorbeugenden Ersatz in t_p beendet. Der Erwartungswert der Betriebszeit ist nach [5, S. 71] gleich:

$$E(T(t_p)) = \int_0^{t_p} (1 - F(t)) dt = \int_0^{t_p} B(t) dt$$

Der optimale, d.h. je Betriebsstunde kostenminimale Ersatzzeitpunkt wird durch Variation des vorbeugenden Ersatzzeitpunktes t_p in der Zielfunktion bestimmt.

Im folgenden wird für den Lenkachsbolzen eines Radladers der wirtschaftlich bedingte Ersatzzeitpunkt berechnet.

4.3 Ermittlung des vorbeugenden Ersatzzeitpunktes, dargestellt am Beispiel des Lenkachsbolzens eines Radladers

Das Ausfallverhalten des Lenkachsbolzens kann näherungsweise durch eine Weibull-Verteilung mit den Parametern $b = 1,56$ und $\theta = 4.941$ h beschrieben werden (Tab. 1, S. 12).

Der Erwartungswert der Betriebszeit (technischen Lebensdauer) beträgt 4.441 h (Tab. 1, S. 12).

Der planmäßig vorbeugende Ersatz kostet:



Materialkosten:	1 Bolzen	á DM 75,--	=	DM	75,--
	2 Buchsen	á DM 25,--	=	DM	50,--
Lohnkosten:	Montage 5 Std.	á DM 45,--	=	DM	225,--
			KV	DM	350,--
				=====	

Schlechte Bolzenpassung führt zum Ausfall des Bauteiles und zum Ausschlagen der Lagerstellen von Lenkachsträger und Lenkachsaufhängung (Folgekosten am Gerät).

Die Ausfallinstandsetzung erfordert Auftragsschweißung und erneutes Ausbohren der Lager. Die Kosten bei ausfallbedingtem Ersatz betragen:

Materialkosten:	1 Bolzen	á DM 75,--	=	DM	75,--
	2 Buchsen	á DM 25,--	=	DM	50,--
	Schweiß- u. Kleinmaterial		=	DM	45,--
Lohnkosten:	Montage 5 Std.	á DM 45,--	=	DM	225,--
	Schweißarbeiten				
	16 Std.	á DM 45,--	=	DM	720,--
			KA	DM	1.115,--
				=====	

In Bild 6 ist der aus Ausfallverteilung und Kostensituation berechnete Verlauf der Durchschnittskosten, der ausfallbedingten und der vorbeugenden Ersatzkosten je Betriebsstunde in Abhängigkeit des vorbeugenden Ersatzzeitpunktes dargestellt.

Der kostenminimale Ersatzzeitpunkt ergibt sich für den Lenkachbolzen entsprechend der Ausfallverteilung und dem Kostenverhältnis KV/KA nach $t_p^* = 0,54 \bar{t} = 0,54 \cdot 4.441 \text{ h} = 2.400 \text{ Betriebsstunden}$.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t_p^*)$ beträgt zum wirtschaftlich bedingten Ersatzzeitpunkt = 28 %.

Die durchschnittlichen Ersatzkosten zum Zeitpunkt t_p^* betragen für einen Ersatzzyklus $0,32 \text{ DM/h} \cdot 2.400 \text{ h} = 768,-- \text{ DM}$.

=====

Die durch den Ausfall der Baumaschine auf der Baustelle verursachten Folgekosten wie z.B. entgangener Gewinn, Stillstands-

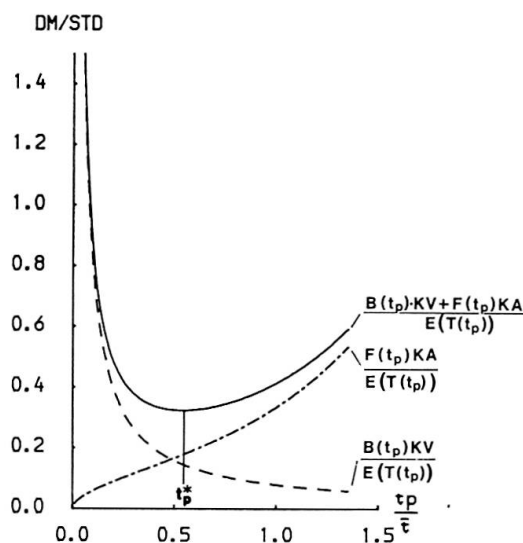


Bild 6 Kostenfunktionen zur Bestimmung des wirtschaftlichen Ersatzzeitpunktes des Lenkachbolzens

zeiten verketteter Baugeräte etc. bleiben mangels aussagekräftiger Informationen unberücksichtigt.

Die Untersuchung hat gezeigt, daß anhand der Ausfallverteilung eines Bauteiles und Informationen über die Kosten eines vorbeugenden bzw. ausfallbedingten Ersatzes der optimale, d.h. kostenminimale Ersatzzyklus für das betreffende Bauteil berechnet werden kann. Voraussetzung für ein Minimum der Ersatzkosten ist eine mit der Betriebszeit steigende Ausfallrate und ein Verhältnis der ausfallbedingten zu den planmäßig vorbeugenden Ersatzkosten $KA/KV > 1$.

Die Ergebnisse der Untersuchung helfen, das einsatzalterabhängige Ausfallverhalten von Bauteilen zu erkennen und erlauben die Vorhersage des wirtschaftlichen Ersatzzeitpunktes. Sie gestatten, durch planerische Maßnahmen die Instandsetzung von Baumaschinen zu rationalisieren und ergänzen die derzeit in Instandhaltungsbetrieben zur Feststellung des technischen Zustandes und Schätzung der Restnutzungsdauer üblichen Inspektionsmaßnahmen.

5. SCHLUSSBEMERKUNGEN

Das Gebiet der Ausfallforschung an Baumaschinen steht in Deutschland noch am Anfang. Wichtigste Aufgabe ist zunächst, in den Instandhaltungsbetrieben der Bauunternehmen ein einheitliches EDV-gerechtes Belegwesen einzuführen. In dieser Sache bedarf es der Zusammenarbeit der Bauunternehmen und der gemeinschaftlichen Unterstützung aller maßgeblichen Verbände aus Baumaschinenindustrie und Bauwirtschaft.

In einem weiteren Schritt sind für alle im Baubetrieb eingesetzten Großgeräte Schadendaten aus dem täglichen Einsatz systematisch zu erfassen. - Liegen ausreichende empirische Daten vor, so können mit Hilfe der elektronischen Datenverarbeitung Kennwerte erarbeitet werden, die das Ausfallverhalten beschreiben und die Erstellung eines Instandsetzungsprogramms ermöglichen.

Aus den Lebensdauerwerten der Bauteile wird man für die Konstruktion neuer Baumaschinen aussagefähige Unterlagen und Anregungen erhalten, so daß technische Entwicklungen von Baumaschinen dazu führen werden, die Instandsetzung im Baubetrieb planbarer zu gestalten. Die ausfallbedingte Instandsetzung sowie die damit verbundenen Folgekosten werden dann nicht mehr die Regel, sondern eine Ausnahme sein.



Literatur

- [1] Swoboda, H.W.: Untersuchung des Ausfallverhaltens von Baumaschinen
Dissertation Technische Universität Braunschweig
Lehrstuhl für Bauwirtschaft und Baubetrieb, 1978
- [2] Steinecke, V.: Das Lebensdauernetz, Erläuterungen und Handhabungen, Beuth Verlag GmbH, 1975
- [3] Hennig, H.-J. u. Wartmann, R.: Statistische Auswertung im Wahrscheinlichkeitsnetz: Kleiner Stichprobenumfang und Zufallsstrebereich. Zeitschrift für die gesamte Textilindustrie 60 (1958), H. 1, S. 19-24
- [4] Lipson, C. u. Sheth, N.J.: Statistical Design and Analysis of Engineering Experiments. Mc Graw-Hill Book Comp. 1973
- [5] Scheer, A.-W.: Instandhaltungspolitik. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler, Wiesbaden, 1974