

# Möglichkeiten einer festigkeitsgerechten Bewertung von Belastungsaufzeichnungen

Institut für Landmaschinenforschung, Braunschweig-Völkenrode \*)

Bei der Auslegung von Bauteilen, die bestimmten Einsatzverhältnissen gerecht werden sollen, ist eine Vielzahl von Einflußgrößen zu berücksichtigen, welche sich auf die Festigkeitseigenschaften von technischen Werkstoffen auswirken. Bauteile, die beliebig hohen Lastspielzahlen standhalten sollen, werden auf Dauerfestigkeit bemessen. Motoren, Maschinen und Fahrzeuge aller Art müssen aber häufig Betriebszustände von kürzerer oder längerer Dauer — wie zum Beispiel Anfahren, Beschleunigen, Durchfahren von Resonanzgebieten, Überlastbetrieb, Bremsen — durchstehen, bei denen an mehreren Bauteilen Spitzenbeanspruchungen auftreten. Diese erreichen oft ein Vielfaches der unter Nennlast auftretenden Spannungen und können die Dauerfestigkeit der Werkstoffe weit überschreiten. Für solche Belastungsfälle bilden sich andere Wege der Bemessung heraus, die Art, Größe und Häufigkeit der Beanspruchungen berücksichtigen, um zu Konstruktionen zu kommen, die einer vorgesehenen Nutzungsdauer genügen.

## 1. Grundlagen für die Auslegung dynamisch beanspruchter Bauteile

### 1.1. Festigkeitsverhalten der Werkstoffe

Grundlagen für eine Auslegung von Bauteilen bilden zunächst die durch Dauerfestigkeitsprüfungen an Probekörpern ermittelten Werkstoff-Kennlinien. Das Bruchverhalten von Eisen und Stahl klärte WÖHLER an Proben, die verschiedenen hohen, während des Versuchs aber gleichbleibenden, sinusförmigen Beanspruchungen ausgesetzt wurden (Einstufenversuch) und zu dem allgemein bekannten WÖHLER-Schaubild führten. Um eine zeitlich begrenzte Überbeanspruchung bewerten zu können, ermittelte FRENCH [1], welche Lastspielzahlen einer über der Dauerfestigkeit liegenden Belastung ein Probekörper ohne Beeinträchtigung seiner Dauerfestigkeit ertragen kann (Zweistufenversuch). Die Untersuchungen von FRENCH erlaubten es, eine Schadenslinie (Bild 1) festzulegen, oberhalb welcher eine Schädigung des Werkstoffes durch Makrorisse und Dauerbrüchanrisse eintritt. HEMPEL [2] erachtet es als notwendig, zusätzlich die Grenzlinie der Verformungsspuren zu bestimmen. Das bisher vorliegende Beobachtungsmaterial über die „Gefügeänderungen und Vorgänge beim Dauerbruch metallischer Werkstoffe“ stellte er in einem erweiterten WÖHLER-Schaubild zusammen (Bild 1).

### 1.2. Erfassung der dynamischen Betriebsbeanspruchungen

Für eine Festigkeitsbeurteilung sind dynamische Dehnungsmessungen [3] zur Ermittlung der auftretenden Beanspruchungen nach Größe und zeitlichem Verlauf an den gefährdeten Stellen eines Bauteils selbst oder, wenn dies nicht möglich ist, an ähnlich beanspruchten Teilen über eine längere Zeitdauer und unter allen Betriebsbedingungen erforderlich. Gemessen werden in der Regel die Spannungen an

der Oberfläche eines Bauteils, denen eine besondere Bedeutung zukommt, da Dauerbrüche im allgemeinen von der Oberfläche ausgehen [4]. Es handelt sich jedoch meistens um dreiaxige Spannungszustände, deren dritte Hauptspannung meßtechnisch nicht zu erfassen ist und die deshalb in ihrer Wirkung nur abgeschätzt werden kann.

Die Meßaufzeichnungen (Meßschriebe aller Art, Magnetbandaufzeichnungen u. a.) geben den Belastungsverlauf wieder, vermitteln aber kein zusammenfassendes Bild der Materialbeanspruchungen. Zwecks besserer Übersichtlichkeit werden deshalb die gemessenen Belastungskurven nach statistischen Verfahren, auf die später noch eingegangen wird, ausgewertet und an Hand dieser Ergebnisse Häufigkeitsverteilungen der Belastung — auch Lastkollektive genannt — aufgestellt [5]. Es ist dabei nicht zu vermeiden, daß bei einer statistischen Aufbereitung ein Teil des Informationsinhalts einer Belastungsfunktion verloren geht.

## 2. Bemessung von dynamisch beanspruchten Bauteilen

### 2.1. Bemessung nach Schadenshypothese

Zur Abschätzung der Lebensdauer von Bauteilen wird häufig die lineare Schadenstheorie von PALMGREN [6] und MINER [7] („MINERSche Regel“) angewandt. Danach werden die Verhältnisse von ertragener Lastspielzahl  $n_i$  zu Bruchlastspielzahl  $N_i$  gebildet, die aufaddiert den kumulativen Lastwechselquotienten ergeben, für den der Wert 1 haben soll:

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1.$$

Bei einer Ermittlung der Lebensdauer von Bauteilen sind hier nur die Lastamplituden zu berücksichtigen, die oberhalb der Dauerfestigkeit liegen, also einen „schädigenden“ Anteil an einem Dauerbruch haben.

Nach neueren Untersuchungen konnte die lineare Schadenstheorie nicht bestätigt werden [8; 9], da sich je nach Häufigkeitsverteilung der Belastung und Art des Werkstoffes andere kumulative Lastwechselquotienten einstellen. Berichtigte Summenwerte stellte GASSNER [10] für Lastkollektive mit GAUSSscher Normalverteilung [11] von stationären Lastfolgen in naher Zukunft in Aussicht. Sie werden jedoch je nach Beanspruchungsart (Zug, Zug-Druck, Biegung, Torsion und Kombinationen dieser Beanspruchungen), Werkstoff und Spannungskonzentration verschiedene Beträge annehmen.

### 2.2. Bemessung auf der Grundlage des Lastkollektivs

Das Lastkollektiv bildet die Grundlage für Betriebsfestigkeitsversuche zur betriebsnahen Erprobung neu entwickelter Bauteile. Unter bestimmten Voraussetzungen kann auch eine Abschätzung der Lebensdauer an Hand der WÖHLER-Kurven vorgenommen werden.

Für eine Ermittlung der Betriebsfestigkeit von Bauteilen sind Prüfmaschinen entwickelt worden, die es erlauben, mit Hilfe einer elektronischen Steuereinrichtung einen registrierten Belastungsverlauf (z. B. mit einem Magnetbandgerät) sehr genau nachzufahren [12; 13; 14]. Jedoch zieht man es häufig vor, die Belastungsfunktion zu klassieren, um eine Vergleichsmöglichkeit mit anderen Versuchsergebnissen von vornherein nicht auszuschließen. Das ermittelte Lastkollektiv wird im allgemeinen nicht kontinuierlich mit einer solchen Prüfmaschine nachgefahren, sondern der Kurvenzug des Kollektivs (N) wird möglichst gut durch eine Treppenkurve (V) angenähert (Bild 2) [15]. Es entsteht so

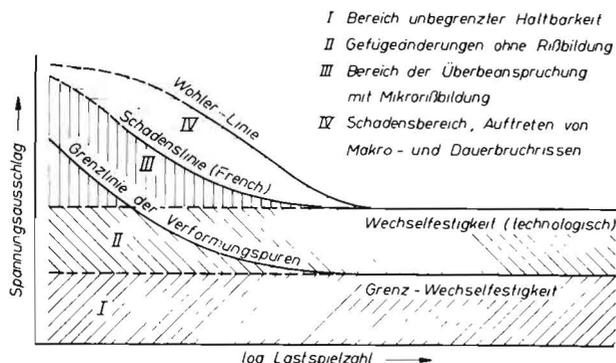


Bild 1: Erweitertes WÖHLER-Schaubild nach HEMPEL [2]

\*) Diese Arbeit entstand unter der Leitung des seinerzeitigen Institutsdirektors Prof. Dr.-Ing. FRANZ WIENEKE

eine Anzahl Stufen mit jeweils konstanten Lastamplituden. Um eine betriebsähnliche Belastungsfolge auch beim Versuch zu erhalten, werden die verschiedenen hohen Laststufen der Gesamtfolge durchmischt und zu mehreren gleichen Teilfolgen zusammengestellt (Bild 3). Diese Teilfolgen werden nacheinander meist durch Angabe der unteren und oberen Lastwerte sowie der Lastwechselzahlen als digitale Informationen der Leseeinrichtung einer Prüfmaschine fortlaufend zugeführt (Mehrstufenversuch). Die Reihenfolge der Laststufen beeinflusst vor allem bei kleiner Teilfolgezahl das Ergebnis des Betriebsfestigkeitsversuchs. Mit zunehmender Zahl der Teilfolgen werden diese Unterschiede geringer. Auf ihre Betriebsfestigkeit werden Konstruktionsteile, Baugruppen und ganze Erzeugnisse untersucht. Nur bei zu hohen Kosten für die Herstellung der Prüflinge und für die Prüfanlage (z. B. bei Flugzeugen, Kranen etc.) begnügt man sich mit der Untersuchung von gekerbten Proben oder Modellkörpern.

Die Grundlage für die Abschätzung der Lebensdauer ist das WÖHLER-Schaubild des für die Konstruktion vorgesehenen Werkstoffs. GASSNER [16] zeigt an einigen Beispielen, bei welchen Typen von Lastkollektiven und unter welchen Voraussetzungen eine Bemessung von Bauteilen möglich ist. Hinderlich ist hierbei, daß für viele Materialien die WÖHLER-Linien nur im Bereich zwischen  $10^6$  und  $10^8$  Lastwechseln ermittelt wurden. Für eine Abschätzung von Bauteilen auf Zeitfestigkeit wären vollständigere WÖHLER-Linien ab einer Lastspielzahl von  $10^3$  erforderlich [16].

Von den in den letzten zwei Jahrzehnten in großem Umfang durchgeführten dynamischen Messungen an Bauteilen seien die an Flugzeugen [8; 17...20], Kraftfahrzeugen [15; 21...24], Ackerschleppern [25], Pflügen [26], Kranen [27; 28] und einer Blockstraße [29] genannt. Die Meßwerte wurden zu Lastkollektiven zusammengestellt.

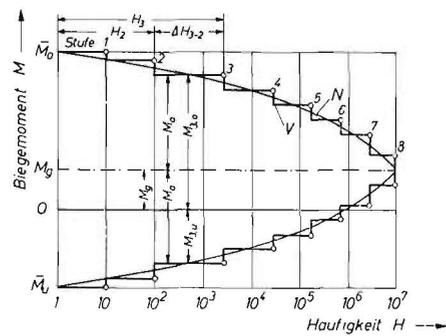
Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß trotz eingehender Untersuchungen der Materialeigenschaften [2] und der Ausbildung von Dehnungs- beziehungsweise Spannungsfeldern [4; 30] eine sichere rechnerische Ermittlung der Festigkeit dynamisch beanspruchter Bauteile, abgesehen von der Lösung einiger Teilprobleme unter einschränkenden Voraussetzungen [16], noch nicht möglich ist. Einen weiteren Fortschritt könnte hier eine bessere, auf eine Festigkeitsbeurteilung abgestimmte Beschreibung des Belastungsverlaufs an Bauteilen bringen, die als Grundlage für eine Schadhypothese und für den Betriebsfestigkeitsversuch dienen kann.

### 3. Anforderungen an eine festigkeitgerechte Auswertung von Belastungsaufzeichnungen

Die im Betrieb auftretenden Beanspruchungsfolgen an Bauteilen sollten durch ein Auswerteverfahren soweit erfaßt werden können, daß alle für eine Festigkeitsbeurteilung erforderlichen Daten bereit stehen. Eine solche Auswertung sollte sowohl die für eine Festigkeitsauslegung maßgeblichen Amplituden als auch deren Lage fixieren und darüber hinaus noch Angaben über Zeitdauer eines Belastungsspiels und die Reihenfolge der Amplituden enthalten.

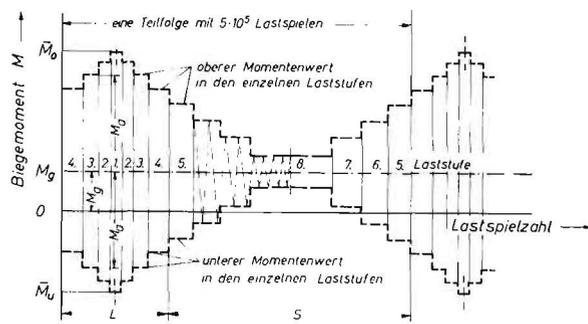
#### 3.1. Erfassung der Lastamplituden

Bei einer Auswertung von Belastungsaufzeichnungen für eine weitergehende, festigkeitgerechte Bauteilbemessung ist der Erfassung der Lastamplituden mit statistischen Verfahren — meist sind es Klassierverfahren — der Vorrang einzuräumen. Welchem der Kurvenäste, dem ansteigenden oder dem abfallenden, das größere Gewicht beigemessen wird oder ob beide Äste durch die Auswertung erfaßt werden sollen, muß an Hand des Lastverlaufs entschieden werden. TEICHMANN [31] empfiehlt bei vorwiegend Zugbeanspruchung den ansteigenden und bei Druck den abfallenden Teil eines Lastspiels zu wählen. Für den Fall, daß durch das Auswerteverfahren die Reihenfolge der Lastamplituden in irgendeiner Form hinreichend genau erfaßt wird, dürfte es genügen, nur einen der beiden Kurvenäste bei der Auswertung zu berücksichtigen. Für eine eindeutige Beschreibung eines Kurvenanteils sind zwei Angaben erforderlich. Es ist dabei nicht von Be-



- $N$  Summenkurve der Betriebslasten (Normalverteilung)
- $V$  Summenkurve der Versuchslasten
- $M_g$  Moment der Grundlast
- $M_0$  Amplitude des Momentes  $M$
- $M_0$  Oberwert des Momentes  $M$
- $M_u$  Unterwert des Momentes  $M$
- $H_2$  Überschreitungshäufigkeit für  $M_{2,0}$  bzw.  $M_{2,u}$
- $H_3$  Überschreitungshäufigkeit für  $M_{3,0}$  bzw.  $M_{3,u}$
- $\Delta H_{2-2}$  Häufigkeit der Versuchslasten  $M_{3,0}$  bzw.  $M_{3,u}$

Bild 2: Ersatz einer stetigen Summenhäufigkeitskurve der Betriebslasten durch eine treppenförmige Kurve der Versuchslasten nach GASSNER [15]



Arbeitsbereiche der Prüfmaschine  
L = Langsamantrieb S = Schnellantrieb

Bild 3: Ablauf der Belastungen im Betriebsfestigkeits-Versuch nach GASSNER [15]

(zugehöriges Belastungs-Kollektiv siehe Bild 2)

deutung, welche der möglichen Kombinationen aus den beiden Extremwerten, dem Mittelwert und der Amplitude gewählt wird.

Für eine Festigkeitsbetrachtung erscheint es unwesentlich, durch die Auswertung auch die Lastwechsel kleinster Amplituden mitzuerfassen, die weit unterhalb der Dauerwechselfestigkeitsgrenze liegen. Lastschwankungen, bei denen der Unterschied zwischen dem Spitzenwert und seinen benachbarten Umkehrwerten weniger als 5% des höchsten Lastspitzenbetrages während eines Beobachtungszeitraumes beträgt, wurden von KAUL [31] bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Über die Möglichkeit, in elektronischen Auswertegeräten Lastwechsel kleiner Amplituden zu eliminieren, berichtet SCHIEF [32].

Bauteile sind mehr oder weniger schwingungsfähige Systeme, die durch Betriebskräfte und -momente oder auch durch äußere Einwirkungen zu Schwingungen angeregt werden. GASSNER und SVENSON [33] untersuchten den Einfluß, den solche, eine niederfrequente Grundlast überlagernde Störschwingungen auf die Lebensdauer eines Bauteils haben. Die aus Grundlast und Störschwingungen zusammengesetzte Gesamtbeanspruchung von Bauteilen wird nach diesen Untersuchungen durch folgende Bestimmungsgrößen gekennzeichnet:

Lastkollektiv der Grundbeanspruchung;

Lastkollektiv der Störschwingungen mit der Mittelspannung als Parameter;

Amplitudenverhältnis ( $\sigma_{a,1}/\sigma_{a,g}$  in Bild 4) und Frequenzverhältnis zwischen Störschwingung und Grundbeanspruchung;

Spannungsverhältnis zwischen Kleinst- ( $\sigma_{\min}$ ) und Größtwert ( $\sigma_{\max}$ ) der Betriebsbeanspruchung.

Wegen der Vielzahl der möglichen Versuchseinstellungen beschränkten GASSNER und SVENSON die Untersuchungen auf einen als festigkeitsmäßig ungünstig anzusehenden Belastungsfall. Dabei wurden die Frequenzen der Prüflasten so gewählt, daß sie sich nicht auf die Werkstofffestigkeit auswirkten. Die Versuchsbedingungen waren:

Die Grundbeanspruchung war sinusförmig mit konstanter Amplitude (einstufige Belastung);

Den Amplituden der Störschwingungen wurde eine GAUSSSCHE Normalverteilung zugrunde gelegt und die Summenkurve dieses Lastkollektivs durch vier Laststufen angenähert;

Das Frequenzverhältnis betrug 30:1;

Das Spannungsverhältnis war angenähert Null.

Die Versuche zeigten, daß nicht die Summe aus Grundlast und überlagerter Störschwingung für eine Festigkeitsbetrachtung maßgeblich ist, da sich die Amplituden der Störschwingung nur in reduziertem Umfange festigkeitsmindernd auswirken. Diese reduzierte Amplitude wurde als „schädigender Anteil der Störschwingung“ bezeichnet (Bild 4). Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Bild 5 zusammengestellt. Die Höhe des schädigenden Anteils liegt zwischen 45 und 77% je nach Amplitudenverhältnis. Ob diese Erkenntnisse bei einer Auswertung von Belastungsschrieben gerätetechnisch verwirklicht werden können, läßt sich noch nicht übersehen.

Das Leistungsspektrum kann bis auf weiteres nicht als ausreichende Ausgangsgröße für eine Festigkeitsbeurteilung angesehen werden, da seine Überführung in eine für den genannten Zweck geeignete Spannungs-Häufigkeitsverteilung besonders im Bereich kleiner und sehr hoher Frequenzen mit großen Unsicherheiten verbunden ist [34].

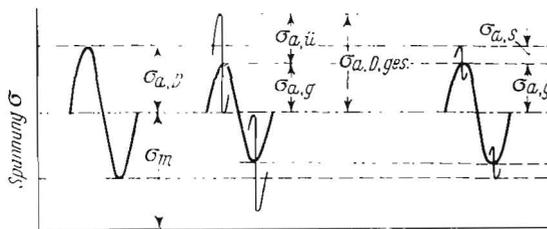


Bild 4: Erläuterung des Begriffes „schädigender Anteil“ einer überlagerten Schwingung nach GASSNER und SVENSON [33]

- $\sigma_{a,g}$  = Amplitude der Grundspannung
- $\sigma_{a,i}$  = Amplitude der überlagerten Störspannung
- $\sigma_{a,D}$  = dauerhaft ertragbare Amplitude der Grundschwingung allein
- $\sigma_m$  = zugehörige Mittelspannung
- $\sigma_{a,D,ges}$  =  $\sigma_{a,g} + \sigma_{a,i}$  = dauerhaft ertragbare Gesamtschwingung
- $\sigma_{a,S}$  =  $\sigma_{a,D} - \sigma_{a,g}$  = als schädigend angenommener Anteil von  $\sigma_{a,i}$
- $\frac{\sigma_{a,S}}{\sigma_{a,i}} \cdot 100$  = „schädigender Anteil“ in Prozenten von  $\sigma_{a,i}$

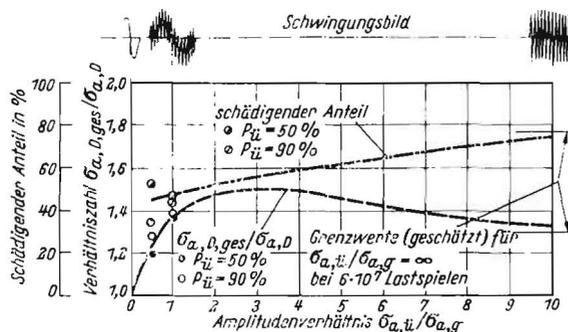


Bild 5: „Schädigender Anteil der Störschwingung“ und Verhältniszahl  $\sigma_{a,D,ges}/\sigma_{a,D}$  in Abhängigkeit vom Amplitudenverhältnis nach GASSNER und SVENSON [33]

$$\text{Überlebenswahrscheinlichkeit } P_n = 100 \cdot \frac{m}{n+1} [\%]$$

$n$  = Anzahl der Proben,  $m$  = Ordnungszahl

### 3.2. Belastungsfrequenz

Eine weitere, die Belastungsfunktionen kennzeichnende Größe, ist die Zeit für einen Belastungsvorgang oder die Lastanstieggeschwindigkeit. Diese Größe wird in Anlehnung an die bei Materialprüfungen üblichen Bezeichnungen als Frequenz (Anzahl der Lastspiele in der Zeiteinheit) angegeben.

Materialuntersuchungen ergaben, daß bei Stahl die Belastungsfrequenz im Bereich von 4 bis 250 Hz ohne merklichen Einfluß auf die Dauerfestigkeit ist. Bei höheren Frequenzen weist Stahl eine im Mittel um 15% größere Wechselfestigkeit auf, die mit einer weiteren Frequenzerhöhung wieder abnimmt [35; 36]. Im Bereich der Zeitfestigkeit bei Frequenzen von etwa 0,02 bis 1 Hz weisen belastete Stahlproben dagegen niedrigere Bruchlastzahlen auf [36]. Für Stahl wird in vielen Fällen die Angabe eines Frequenzbereiches zur Charakterisierung des Belastungsverlaufs genügen. Die Dauerschwingfestigkeit von Aluminiumlegierungen (Al-Cu-Mg, Al-Cu-Ni-Mg) hängt nach Angaben einiger Autoren [35; 37] maßgeblich von der Belastungsfrequenz ab. Andere Untersuchungen [8] an Proben aus Al-Cu-Mg zeigten einen wesentlich geringeren Frequenzeinfluß auf die Festigkeit.

Es kann gesagt werden, daß metallische Werkstoffe bei niedrigen Lastfrequenzen eine geringere Festigkeit aufweisen als bei höheren. Dem kommt besondere Bedeutung zu, da eine große Anzahl von Bauteilen an Fahrzeugen und Maschinen im Zeitfestigkeitsbereich den für einen Dauerbruch maßgeblichen, niederfrequenten Betriebsbeanspruchungen ausgesetzt sind. Für eine Bemessung dieser Teile müssen daher die kleineren Festigkeitswerte zugrunde gelegt werden [4]. Innerhalb welcher Grenzen für die verschiedenen Werkstoffe bei einer Auswertung die Lastfrequenz erfaßt werden muß, ist noch durch weitere Untersuchungen zu klären.

### 3.3. Reihenfolge der Lastamplituden

Der Einfluß, den die Reihenfolge der Lastamplituden auf eine Lebenserwartung von Bauteilen hat, läßt sich an den Versuchsserien abschätzen, die zur Überprüfung der Gültigkeit der „MINERSCHEN Regel“ durchgeführt worden sind. THOMSON nennt folgende Ergebnisse als die wichtigsten Erkenntnisse der umfangreichen Untersuchungen [38]:

1. Die Mehrheit der Untersuchungen ergab kumulative Lastwechselquotienten zwischen 0,5 und 2,0 (nach anderen Angaben [10] lagen sie zwischen 0,2 und  $\infty$ ).
2. Die kumulativen Lastwechselquotienten hingen von der Reihenfolge der Wechsellastintensität ab. Der Quotient wurde kleiner als 1, wenn die Probe zuerst einer hohen Belastung und dann kleineren Belastungen ausgesetzt wurde (abnehmende Spannungsfolge) und größer als 1 bei zunehmender Spannungsfolge.
3. Eine stochastisch verteilte Spannungsfolge ergab die größte Lebensdauer (näherungsweise dreimal so hoch wie bei abnehmender Spannungsfolge).

Durch Aufteilung eines Lastkollektivs in möglichst viele Laststufen, die nach guter Durchmischung zu einer größeren Anzahl von gleichen Teilfolgen zusammenzustellen sind, können bestimmte Lastfunktionen, vor allem stationäre Lastfolgen mit GAUSSSCHE Normalverteilung, in ihrer Wirkung hinsichtlich des Festigkeitsverhaltens metallischer Werkstoffe den auftretenden Betriebsbeanspruchungen gut angenähert werden. Schwierigkeiten ergeben sich besonders bei der Bewertung von instationären Belastungsabläufen mit nicht einfach zu analysierenden Lastkollektiven, die häufig auch noch ständig wechselnde Mittelspannungen der aufeinanderfolgenden Lastamplituden aufweisen. Bei der Mannigfaltigkeit der Einflüsse im Mehrstufenversuch sind noch umfangreiche Untersuchungen erforderlich, um die Auswirkung verschiedener Lastfolgen auf die Werkstoffveränderungen, wie Verfestigung, Schädigung, Trainierung und anderes, grundsätzlich zu klären und daraus Schlüsse auf das Betriebsverhalten von Bauteilen ziehen zu können [39].

#### 4. Klassierverfahren und -geräte

Bei der Vielzahl der Einflußgrößen, die sich auf die Festigkeit metallischer Werkstoffe auswirken, wie Größe und Häufigkeit der verschiedenen Lastamplituden und Lage ihres Mittelwertes, schädigender Anteil von Störschwingungen, Belastungsfrequenz und Reihenfolge der Lastamplituden, sind für eine Auswertung die zur Beschreibung eines Lastverlaufs maßgeblichen auszuwählen. Wie bereits oben erwähnt, ist der Erfassung der Lastamplituden in den meisten Fällen der Vorrang einzuräumen. Ob diese Angaben ausreichen oder noch weitere Größen zur Beschreibung eines Lastverlaufes erforderlich sind, kann nicht immer von vornherein gesagt werden.

##### 4.1. Einparametrisches Klassieren

Die in den letzten Jahren für Festigkeitsuntersuchungen angewandten Verfahren beschreiben den Belastungsverlauf zumeist durch Klassieren einer kennzeichnenden Größe; sie werden als einparametrische Klassierverfahren bezeichnet.

##### 4.1.1. Klassierverfahren

Aus der Vielfalt [40; 41; 42] heben sich drei Klassierverfahren als die aussagekräftigsten heraus:

1. **Überschreitungshäufigkeit** (Bild 6): Das Zählen der überschrittenen Klassen aller ansteigenden beziehungsweise abfallenden Kurvenabschnitte eines Belastungsverlaufs ist wohl das am meisten eingesetzte Auswerteverfahren. Gerätetechnisch geht man bei diesem Verfahren so vor, daß von einem festgelegten Mittelwert aus aufwärts die Klassen aller ansteigenden Kurvenäste und abwärts die aller abfallenden Kurventeile gezählt werden [41]. Um bei der Auswertung Lastwechsel mit kleinen Amplituden, die hauptsächlich von Störschwingungen herrühren und für eine Festigkeitsbemessung unerheblich sind, nicht mit zu erfassen, muß erst eine Rückstellschwelle zum Mittelwert hin unterschritten werden, bevor die Klasse wieder zählbereit wird. Die Breite der Rückstellschwelle ist im allgemeinen verstellbar und kann je nach Belastungsverlauf bis zu einer Klassenbreite gewählt werden. Die Häufigkeitsverteilung, die man nach diesen Klassierverfahren erhält, weist mehr Lastwechsel großer Amplituden auf als der ausgewertete Belastungsverlauf. Sie entstehen durch Aufsummieren kleinerer Kurvenabschnitte. Diese Tatsache wirkt sich, wie bisherige Betriebsfestigkeitsversuche zeigen, bei vielen Lastfolgen nicht nachteilig aus.

2. **Spitzenwert-Häufigkeit**: Die Amplituden eines Belastungsverlaufs können auch durch Auszählen der relativen Minima und Maxima (Bild 7) beschrieben werden. Eine Auswertung nach diesem Verfahren erfordert zwei Zählregister, je eins für die Minima und die Maxima. Nach diesem Klassierverfahren arbeitet zum Beispiel ein mechanisch-elektrisches Gerät [43], bei dem der Belastungsverlauf auf einem Meßschieb von Hand nachgefahren werden muß. Andere Geräte verwirklichen die Spitzenwertauszählung nach abgewandelten Verfahren [40; 41; 42], die den Belastungsverlauf durch Registrierung nur bestimmter negativer und positiver Spitzenbeanspruchungen erfassen. Eines von diesen, das häufig zur Auswertung von Belastungsfolgen herangezogen wird, zählt die relativen Maxima oberhalb und die relativen Minima unterhalb eines fest eingestellten Mittelwertes. Für eine solche Auszählung ist nur ein Zählregister erforderlich.

3. **Amplituden-Häufigkeit**: Von den Klassierverfahren, die sich auf die Amplitude als kennzeichnende Größe zur Beschreibung eines Belastungsablaufs stützen, gewinnt ein Verfahren an Bedeutung, bei dem einem ansteigenden Kurventeil ein gleich großer abfallender zugeordnet wird, die zusammen als ein Amplitudenpaar gezählt werden. Dieses Verfahren, das in der angloamerikanischen Literatur treffend mit RANGE-PAIR-COUNTING bezeichnet wird, ist wohl mit „Zählung paarweise zugeordneter Amplituden“ gut umschrieben. Beim Klassieren nach dieser Methode muß ein

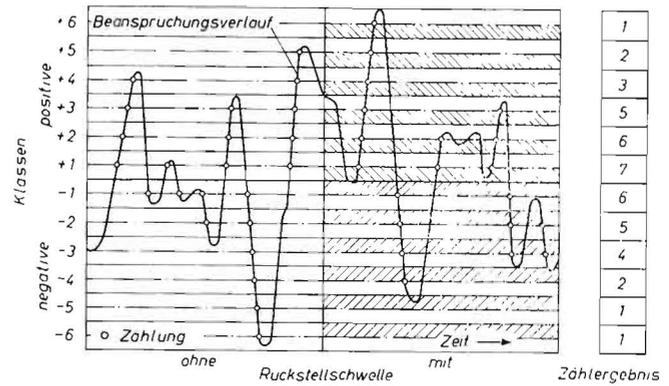


Bild 6: Zählen der Klassenüberschreitungen

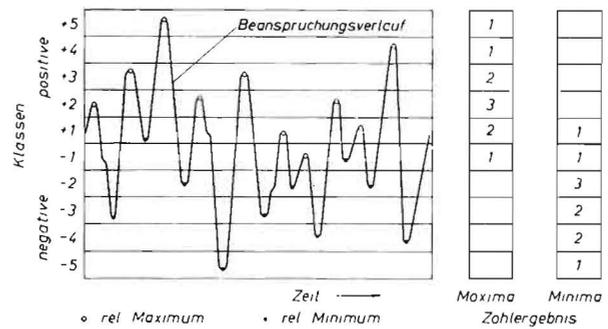


Bild 7: Zählen der relativen Extremwerte

Klassiergerät die Amplituden in ihrer Größe erfassen — einfach läßt sich dies durch die Anzahl der überschrittenen Klassen feststellen — und zwischen ansteigenden und abfallenden Belastungsvorgängen unterscheiden. Die von ausgeführten Geräten verwirklichte Zählweise wird mit Hilfe von Bild 8 erklärt: Von einem Minimum eines Belastungsverlaufs aus werden die überschrittenen Klassen von der niedrigsten Klasse ausgehend in einem Speicherregister fortlaufend vorgemerkt. Nach Erreichen des maximalen Lastwertes wird mit der Auslösung einer Zählung in dem der niedrigsten Klasse zugeordneten Zählwerk begonnen. Die Klassenüberschreitungen des abfallenden Kurventeils veranlassen entsprechend den Vormerkungen das Auslösen der weiteren Zählwerke. Mit der Auslösung eines Zählvorganges erfolgt gleichzeitig das Löschen der betreffenden Speicherstelle. In den vorgemerkten, aber nicht gezählten Klassen bleibt der Speicherinhalt erhalten. Bei erneutem Lastanstieg wird mit dem Vormerken wieder in der niedrigsten Klasse begonnen, wobei bereits besetzte Speicherstellen im Register übersprungen werden. Durch dieses Auswerteverfahren werden die Differenzen zwischen Maximum und Minimum gezählt und damit die Verschiebung der mittleren Belastung als ein Lastwechsel festgehalten. Dabei geht aber die Zuordnung des Klassierergebnisses zu einem bestimmten Lastniveau verloren [23; 41].

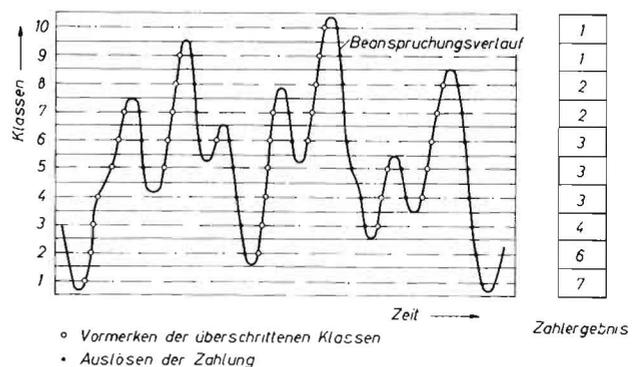


Bild 8: Zählen paarweise zugeordneter Amplituden

4. Stichprobenverfahren: Ein weiteres häufig angewandtes Auswerteverfahren, bei dem eine Belastungsfunktion mit äquidistanter Schrittfolge — in konstantem Zeit- oder Wegintervall — abgefragt wird (Bild 9) und die Momentanwerte klassiert werden, dient hauptsächlich zur statistischen Ermittlung des Energiebedarfs von Arbeitsmaschinen und Geräten. Dieses Verfahren, das unter dem Begriff Stichprobenverfahren bekannt geworden ist und ein wesentliches Anwendungsgebiet in der statistischen Qualitätskontrolle bei der Serienfabrikation [44] fand, ist für eine Beurteilung von Belastungsfolgen von untergeordneter Bedeutung, da weder die Spannungsspitzen noch die Amplituden bewertet werden, die für eine Bemessung von Bauteilen ausschlaggebend sind, sondern nur der zum Zeitpunkt der Stichprobe herrschende Spannungszustand klassiert wird. Durch hohe Stichprobenfrequenzen lassen sich zwar vergleichbare Ergebnisse erzielen, doch sollte man für eine festigkeitsgerechte Auswertung eines der obengenannten Verfahren bevorzugen [41].

#### 4.1.2. Klassiergeräte

Zum einparametrischen Klassieren von Belastungsfolgen nach den verschiedenen Verfahren sind mehrere Geräte und Gerätekombinationen entwickelt worden, die zum Teil auch im Handel erhältlich sind [40; 41]. Die Auswertegeschwindigkeit beziehungsweise Arbeitsfrequenz und Ausstattung dieser Klassiergeräte oder -anlagen richtet sich danach, ob die Belastungsfunktionen auf einem Oszillographenschrieb oder auf einem Magnetband registriert vorliegen oder ob die Geräte für den Anschluß an Meßwertaufnehmer vorgesehen sind. Mit einigen Geräten ist es sogar möglich, eine Belastungsfolge nach mehreren einparametrischen Klassierverfahren auszuwerten [32; 45].

#### 4.1.3. Informationsgehalt einparametrischer Klassierergebnisse und ihre Bewertung

Das Klassierergebnis eines einparametrischen Auswerteverfahrens gibt die Häufigkeitsverteilung nur einer den Belastungsverlauf kennzeichnenden Größe wieder, das heißt, es beschreibt die Belastungsfunktion unvollkommen. Zwischen den registrierten Informationen besteht kein eindeutiger Zusammenhang. Beispielsweise geht aus den Klassierergebnissen nach dem Überschreitungshäufigkeits- und Spitzenwert-Häufigkeits-Verfahren die Reihenfolge der überschrittenen Klassen oder der Extremwerte nicht hervor. Man wird leicht zu der Annahme verleitet, daß auf ein Lastmaximum stets ein ebenso großes Minimum beziehungsweise eine Entlastung des Bauteils folgt. Dies trifft zum Beispiel zu für stationäre stochastische Prozesse wie die Beanspruchung von Fahrzeugteilen bei Geradeausfahrt [15; 23] und von böenbelasteten Flugzeugteilen [8; 46]. Für eine Beschreibung solcher Belastungsfolgen scheint eine Auswertung nach Überschreitungshäufigkeit und Spitzenwert-Häufigkeit hinreichend genau zu sein. Dies wiesen LEYBOLD und NAUMANN [47] an Hand von Betriebsfestigkeitsversuchen an Duralmin-Proben nach. Dazu wurden die nach fünf verschiedenen einparametrischen Verfahren ermittelten Lastkollektive in aus acht Laststufen bestehende Teilfolgen überführt. Die beste Übereinstimmung mit der ursprünglichen, statistischen Be-

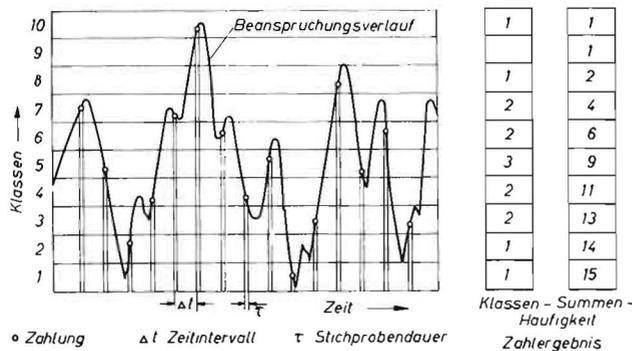


Bild 9: Klassieren in konstanten Zeitintervallen (Stichprobenverfahren)

anspruchungsfolge zeigten die Ergebnisse der Mehrstufenversuche nach den beiden obengenannten Auswerteverfahren.

Eine Bewertung der verschiedenen Lastkollektivformen stationärer Prozesse nahmen GASSNER, GRIESE und HAIBACH [48] vor. Für Auswertergebnisse nach der Überschreitungshäufigkeit, dem Verfahren, über das die meisten Erfahrungen vorliegen, führten sie einen Kollektivbeiwert „p“ ein, der Lastfolgen zwischen der einstufigen Belastung ( $p = 1$ ) und einer Normalverteilung aller Lastwechsel ( $p = 0$ ) charakterisiert. Den Einfluß dieses Beiwertes auf den Zusammenhang zwischen der Beanspruchungshöhe und der Bruchlastspielzahl stellten die Verfasser an geschweißten Stahlprobekörpern heraus. Die Fortführung dieser Untersuchungen könnte zur Klärung beitragen, welche Vergleichsmöglichkeiten zwischen den Versuchsergebnissen nach dem Einstufenversuch und den Mehrstufenversuchen bestehen.

Neben diesen durch einparametrische Auswerteverfahren ausreichend zu beschreibenden Lastfolgen, müssen viele technische Bauteile auf Beanspruchungen ausgelegt werden, die von mehreren Faktoren je nach Betriebsbedingungen maßgeblich beeinflusst werden. An Kraftmaschinen zum Beispiel treten infolge ungleichmäßiger Leistungsabnahme derartige Lastfolgen auf. Ebenso wechselt bei vielen Arbeitsmaschinen die Auslastung, etwa durch eine stoßweise Beschickung oder unterschiedliche Materialeigenschaften des zu verarbeitenden Gutes. Dadurch stellen sich beispielsweise Belastungsfolgen ein, welche aus einer periodischen, oftmals drehzahlabhängigen Grundlast und einer sie überlagernden Zufallsbelastung bestehen. Bereits 1936 wiesen KLOTH und STROPPEL [49] in dem Abschnitt „Untersuchungen des Verlaufs sich wiederholender Vorgänge“ auf diese Schwierigkeiten hin. Sie zeigten am Beispiel des Drehmomentenverlaufs an der Packerwelle eines Bindemähers, daß eine einparametrische Auswertung dieser Beanspruchungen keine Rückschlüsse auf den Belastungsverlauf mehr zuläßt, es sei denn, man wertet die drei Arbeitsgänge Packen, Binden und Auswerfen getrennt aus.

## 4.2. Mehrparametrisches Klassieren

### 4.2.1. Klassierverfahren

TEICHMANN [31] wies 1939 darauf hin, daß es bei einer „verfeinerten Betrachtungsweise“ nicht genügt, lediglich die Spitzen eines Belastungsverlaufs auszuzählen, sondern die Auswertung nach Belastungsspitzen und vorangehendem oder nachfolgendem Umkehrwert, oder was gleichbedeutend ist, nach Belastungsspanne (Belastungsamplitude) und Belastungsmittelwert vorgenommen werden muß. Nach diesem Verfahren erhält man zwei verschiedene Häufigkeitsverteilungen, je nachdem ob man die ansteigenden oder die abfallenden Kurvenäste einer Belastungsfunktion auswertet. Nach den bereits vorher angeführten Überlegungen scheint es ausreichend zu sein, entweder den ansteigenden oder den abfallenden Kurvenast durch eine zweiparametrische Klassierung zu erfassen. Als weiteren sinnvollen Parameter für eine Klassierung erwähnt TEICHMANN die Belastungsgeschwindigkeit.

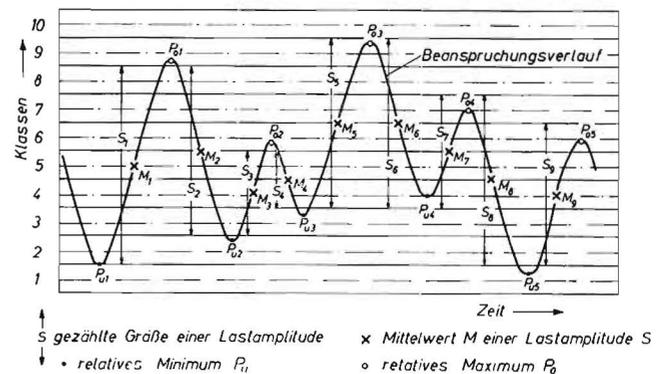


Bild 10: Größen für eine zweiparametrische Bewertung von Lastamplituden

Die Möglichkeiten, einen Belastungsvorgang zweiparametrig zu beschreiben, sind in Bild 10 zusammengestellt. Wie oben bereits angeführt, wird der ansteigende oder abfallende Teil einer Lastamplitude durch zwei Angaben eindeutig festgelegt. Als kennzeichnende Datenkombination wurden bisher die beiden Extremwerte oder die Größe der Amplitude und Lage ihres Mittelwertes gewählt.

Ein zweiparametriges Klassierverfahren, das sich bei der Bewertung eines Belastungsverlaufs auf die Angabe von Amplitude und Frequenz stützt, beschreiben BOBBERT und WINKELHOLZ [42; 50]. Nach diesem Verfahren, das sich noch im Experimentierstadium befindet, wird eine Lastfolge zweiparametrig nach Lastamplitude und -frequenz klassiert.

#### 4.2.2. Klassiergeräte

Über ein Gerät zur zweiparametrigten Auswertung von Oszillographenschrieben durch Nachfahren eines Belastungsverlaufs von Hand, das bereits 1949 gebaut wurde, berichtet BECKER [51]. Das Gerät erfaßt die Lage des Minimums einer Spannungsamplitude bei einsetzender Aufwärtsbewegung durch Angabe der Klasse und registriert die Größe des ansteigenden Kurvenastes durch die Zahl der überschrittenen Klassengrenzen, das heißt, es wird die Summenhäufigkeit der ansteigenden Kurvenäste eines Meßschriebes je nach der Klassenlage der relativen Minima durch Zählwerke festgehalten. Beim Abfahren der abfallenden Kurvenäste findet keine Zählung statt. Der mit diesem Gerät erfassbare Lastbereich ist konstant und in acht Klassen aufgeteilt, denen 28 Zählwerke zugeordnet sind. Die Richtungsumkehr beim Nachfahren eines Belastungsverlaufs wird mit Hilfe einer mechanischen Kontaktvorrichtung festgestellt, die durch ihren Schaltungsweg gleichzeitig bewirkt, daß Schwingungsauslässe kleiner Amplituden nicht mit erfaßt werden. Die Auswertegeschwindigkeit wird durch die für den Schaltvorgang benötigte Zeit von 0,2 s begrenzt.

Einen Spezial-Spannungs-Analysator stellten VERHAGEN und DE DOES [52] vor. Diese Anlage wurde für Spannungsmessungen an Schiffen gebaut. Mit ihr ist es auch möglich, Schlinger- und Stampfwinkel sowie Beschleunigungen zu messen. Als Aufnehmer für die Spannungsmessungen dienen Dehnungsmeßstreifen in WHEATSTONE-Brückenschaltung. Durch Verstimmung der Brücke, hervorgerufen durch Deformation der Bauteile, wird ein Spiegelgalvanometer (Eigenfrequenz 120 Hz) ausgelenkt. Die Digitalisierung der (der Materialspannung analogen) Auslenkung der Lichtmarke des Galvanometers wird mit Hilfe von neun photoelektrischen Zellen vorgenommen, die den Anzeigebereich in neun Klassen unterteilen, welche nicht unbedingt gleich groß sein müssen. Das Gerät erfaßt sowohl die ansteigenden als auch die abfallenden Kurvenäste eines Belastungsverlaufs nach ihrer Größe und der Lage ihres Mittelwertes in 45 Zählwerken. Jeder Be- und Entlastungsvorgang wird durch die Auslösung nur eines Zählwerkes registriert. Es können mit diesem Spannungsanalysator Amplituden von einer Klassenbreite bis zu einer Frequenz von 10 Hz und 9 Klassenbreiten (Vollausschlag) bis zu 1,1 Hz klassiert werden.

Ein in der Tschechoslowakei entwickeltes zweiparametriges Klassiergerät beschreibt TITLBACH [53]. Dieses Gerät klassiert eine Beanspruchungsfunktion auf die gleiche Weise wie das BECKERSche Gerät. Auch hier muß der Belastungsverlauf von Hand nachgefahren werden. Die Anlage erlaubt es, verschieden breite Filme nach Austausch der Filmspulen auszuwerten. Der Maßstab für die 10 Klassen, denen 45 Zählwerke zugeordnet sind, kann durch Austausch einer Kontaktleiste verändert werden. Die Bewegungsumkehr bei der Auswertung wird durch einen mechanischen Schalter festgestellt. Die elektrische Schaltung, die ausschließlich aus Relais und Widerständen besteht, soll eine Arbeitsfrequenz von 6 Hz zulassen.

In den letzten Jahren wurde das zweiparametriges Klassieren von Belastungsaufzeichnungen mehrfach angewandt. Da Klassiergeräte zum zweiparametrigten Auswerten nicht im Handel erhältlich sind, wurden die Meßschriebe von Hand

ausgezählt und das Ergebnis in speziellen Tabellen aufgeschrieben. Darüber berichten zum Beispiel GRAHAM und andere [54; 55]. Sie beschreiben das Auszählen von Lastamplituden nach Maximum-Minimum-Kombinationen. Diese Kombinationen werden in einem abgeänderten „GOODMAN“-Diagramm, das für eine rechnerische Lebensdauer vorhersage auf der Grundlage der „MINERSchen Regel“ benutzt wird, nach den kleinsten Spannungswerten einer Lastamplitude über der Spitzenspannung in tabellarischer Form aufgetragen. Ähnlich sind DMITRICHENKO und andere [56] bei der Auswertung von Belastungsschrieben vorgegangen. Sie erfaßten die ansteigenden und abfallenden Kurvenäste durch Extremwertkombinationen in einer Tabelle.

#### 4.2.3. Informationsgehalt zweiparametrigter Klassierergebnisse

Das Klassierergebnis einer zweiparametrigten Auswertung enthält die Häufigkeitsverteilungen zweier den Belastungsverlauf kennzeichnenden Größen. Bisher wurde nur die zweiparametrigte Beschreibung von Lastamplituden nach ihrer Größe und Lage praktisch durchgeführt. In dem Klassierergebnis nach dieser Auswertemethode sind auch die Ergebnisse enthalten, die sich nach den beschriebenen einparametrigten Verfahren, Klassenüberschreitungshäufigkeit und Spitzenwerthäufigkeit, ergeben. Dies läßt sich leicht durch entsprechendes Aufsummieren des Ergebnisses der zweiparametrigten Auswertung nachprüfen.

Für den Betriebsfestigkeitsversuch wird von verschiedenen Autoren die Lage des Amplitudenmittelwertes recht unterschiedlich bewertet. Diese voneinander abweichenden Ansichten können darauf zurückgeführt werden, daß je nach Art des Belastungsverlaufes der Mittelastverlagerung ein größeres oder geringeres Gewicht zukommt. Die bisher vorliegenden Ergebnisse aus Betriebsfestigkeitsversuchen reichen noch nicht aus, um daraus allgemeingültige Schlüsse ziehen zu können.

### Zusammenfassung

Der im vorliegenden Beitrag dargelegte Stand des Wissens über die Materialeigenschaften und die Ausbildung von Dehnungs- und Spannungsfeldern läßt eine rechnerische Voraussage der Lebensdauer technischer Bauteile, abgesehen von einigen bestimmten Sonderfällen, noch nicht zu. Die Bemessung von zeitlich überbeanspruchten Maschinen- und Fahrzeugteilen erfolgt heute im wesentlichen nach dem Betriebsfestigkeitsversuch. Für die Entwicklung einer Schadenshypothese und den Ausbau von Betriebsfestigkeitsuntersuchungen ist eine festigkeitgerechtere Beschreibung der Belastungsvorgänge notwendig, die mehrere Einflußgrößen berücksichtigen muß. Die Bedeutung der verschiedenen Einflußgrößen auf das Festigkeitsverhalten von Werkstoffen und die schon beschrittenen Wege des Klassierens wurden dargestellt.

### Schrifttum

- [1] FRENCH, H. J.: Fatigue and the Hardening of Steels. Transactions of the American Society for Steel Treating 21 (1933), S. 899—946
- [2] HEMPEL, M.: Gefügeänderungen und Vorgänge beim Dauerbruch metallischer Werkstoffe. Materialprüfung 3 (1961), S. 365—376
- [3] FINK, K. und CHR. ROHRBACH: Handbuch der Spannungs- und Dehnungsmessung. VDI-Verlag, 2. Aufl., Düsseldorf 1965
- [4] KLOTH, W.: Zur Vorausbemessung der Festigkeit technischer Bauteile. VDI-Z. 107 (1965), S. 813—820
- [5] KAHRS, M.: Die Auslegung von Landmaschinenbauteilen nach Lastkollektiven. Landtechnische Forschung 13 (1963), S. 171—179
- [6] PALMGREN, A.: Die Lebensdauer von Kugellagern. Z.-VDI 68 (1924), S. 339—341
- [7] MINER, M. A.: Cumulative Damage in Fatigue. Journal of Applied Mechanics 12 (1945), S. A 159 bis A 164
- [8] GASSNER, E. und K. F. HORSTMANN: Einfluß des Start-Lande-Lastwechsels auf die Lebensdauer der böenbeanspruchten Flügel von Verkehrsflugzeugen. Advances in Aeronautical Sciences 3—4 (1962), S. 763—780
- [9] HEMPEL, M.: Gegenwärtiger Stand der Kenntnisse über die Betriebsfestigkeit von Stählen. Stahl und Eisen 84 (1964), S. 485—491
- [10] GASSNER, E.: Zweites Korreferat zum Vortrag von Prof. THOMSEN über das Ermüdungsproblem. In: VDI-Berichte Nr. 66, Düsseldorf 1962, S. 23
- [11] DAEVES, K. und A. BECKEL: Großzahl-Methodik und Häufigkeits-Analyse. Verlag Chemie GmbH, 2. Aufl., Weinheim/Bergstraße, 1958

- [12] KREISKORTE, H.: Die Bedeutung des Dauerschwingversuchs für die Dimensionierung von Blechkonstruktionen. *Blech* (1962), S. 533—538
- [13] KREISKORTE, H.: Simulierung regelloser Weg- und Belastungsabläufe durch servo-hydraulische Schwingungserreger. In: *VDI-Berichte* 88, Düsseldorf 1965, S. 77—82
- [14] HAAS, T. und H. KREISKORTE: Critical Comparison of Modern Fatigue Testing Machines with Regard to Requirements and Design. Part 2: Design Trends and Performance Criteria. Symposium Manchester 1965, Paper 18
- [15] GASSNER, E.: Betriebsfestigkeit, eine Bemessungsgrundlage für Konstruktionsteile mit statistisch wechselnden Betriebsbeanspruchungen. *Konstruktion* 6. (1954), S. 97—104
- [16] GASSNER, E.: Aussagefähigkeit von Ein- und Mehrstufen-Schwingversuchen (Teil I). *Materialprüfung* 2 (1960), S. 121—128
- [17] KAUL, H.W. und B. FITZEK: Meßergebnisse über Betriebsbeanspruchungen von Flugzeugflügeln. *Luftwissen* 8 (1941), S. 20—24
- [18] GASSNER, E.: Effect of variable load and cumulative damage on fatigue in vehicle and airplane structures. International Conference on Fatigue of Metals Session 3 (Stress Distribution), Paper 10
- [19] GASSNER, E. und W. SCHÜTZ: The significance of constant load amplitude test for the fatigue evaluation of aircraft structures. In: Full Scale Fatigue Testing of Aircraft Structures. Pergamon Press, Oxford / London / New York / Paris 1960, S. 14—40
- [20] GASSNER, E. und G. JACOBY: Betriebsfestigkeits-Versuche zur Ermittlung zulässiger Entwurfsspannungen für die Flugunterseite eines Transportflugzeuges. *Luftfahrttechnik - Raumfahrttechnik* 10 (1964), S. 6—20
- [21] SCHILLING, R.: Operational Stresses in Automotive Parts. *SAE Quarterly Transactions* 5 (1951), S. 292—308
- [22] GASSNER, E. und W. SCHÜTZ: Beurteilung lebenswichtiger Fahrzeugbauteile durch Betriebsfestigkeits-Versuche. In: FISITA, Proceedings of the Ninth International Automobile Technical Congress, London 1962, Hrg.: G. Eley, The Institution of Mechanical Engineers, London
- [23] SVENSON, O.: Beanspruchung und Lastkollektiv am Fahrwerk von Kraftfahrzeugen. *ATZ* 65 (1963), S. 334—337
- [24] GASSNER, E. und W. LIPP: Wirklichkeitsgetreue Lebensdauerfunktion für Fahrzeugbauteile. In: *Jahrbuch der Fraunhofer-Gesellschaft* 1963, S. 63—69
- [25] COENENBERG, H.H.: Dynamische Beanspruchung bei Ackerschleppern. Teil II: Stationäre und dynamische Beanspruchungen bei Ackerschleppern. *Landtechnische Forschung* 12 (1962), S. 33—39
- [26] SOUČEK, Z.: Unterlagen für die Festigkeitsberechnung von Scharpfügen. *Zemedska Technika* 11 (1965), S. 13—42
- [27] SVENSON, O. und W. SCHWEER: Ermittlung der Betriebsbedingungen für Hüttenkrane und Überprüfung der Bemessungsgrundlage. *Stahl und Eisen* 80 (1960), S. 79—90
- [28] SCHWEER, W.: Beanspruchungskollektive als Bemessungsgrundlage für Hüttenwerkslaufkrane. Dissertation. Hannover 1963
- [29] GRIESE, F.W., W. SCHWEER und B. v. KORTZFLEISCH: Untersuchung über die statistischen Gesetzmäßigkeiten der Spindeldrehmomente und Ständerkräfte an einer Blockstraße. *Stahl und Eisen* 83 (1963), S. 715—723
- [30] KLOTH, W.: Atlas der Spannungsfelder in technischen Bauteilen. Stahl-Eisen-Verlag, Düsseldorf 1961
- [31] TEICHMANN, A.: Grundsätzliches zum Betriebsfestigkeitsversuch. In: *Jahrbuch 1941 der deutschen Luftfahrtforschung*, S. 1 467—1 471
- [32] SCHIEF, A.: Automatische Verfahren zur statistischen Analyse. In: *VDI-Berichte* Nr. 66, Düsseldorf 1962, S. 39—44
- [33] GASSNER, E. und O. SVENSON: Einfluß von Störschwingungen auf die Ermüdungsfestigkeit. *Stahl und Eisen* 82 (1962), S. 276—282
- [34] GASSNER, E.: Bemessung schwingend beanspruchter Bauteile. In: *VDI-Berichte* 66, Düsseldorf 1962, S. 31
- [35] HEMPEL, M.: Das Dauerschwingverhalten der Werkstoffe. *VDI-Z.* 104 (1962), S. 1362—1377
- [36] HEMPEL, M.: Dauerfestigkeits-Schaubilder, VDI-Richtlinien, Entwurf Sept. 1964
- [37] HARRIS, W.J.: Cycling stressing frequency effect on fatigue strength. *Aircraft Engineering* 31 (1959), S. 352—357
- [38] THOMSON, W.T.: Anwendung statistischer Methoden auf mechanische Schwingungen. In: *VDI-Berichte* 66, Düsseldorf 1962, S. 7—20
- [39] HEMPEL, M.: Dauerfestigkeitsprüfungen und Werkstoffverhalten bei der Schwingungsbeanspruchung. *Z-VDI* 94 (1952), S. 809—818 und S. 882—887
- [40] HAAS, T.: Loading Statistics as a Basis of Structural and Mechanical Design. *Engineer's Digest*, March, April and May 1962
- [41] HORSTMANN, K.: Klassiermethoden zur statistischen Auswertung von dynamischen Beanspruchungsvorgängen. Technische Akademie Eßlingen, Kursus 1840/II W, Oktober 1963
- [42] BOBBERT, G. und E.A. WINKELHOLZ: Kennzeichnung regelloser Schwingungen. In: *Fortschritt-Berichte VDI-Z.*, Reihe 11, Nr. 1, Düsseldorf 1965, S. 23—35
- [43] VYSOCKIJ, A.A. und G.T. KLEJNMANN: Auswertung von Diagrammen durch Auszählen der Maxima und Minima. *Traktory i selchozmasiny* 34 (1964), H. 5, S. 34—35
- [44] VOGT, H.J. und E. ZIMMER: Automatische Klassifikation und Speicherung von Meßergebnissen. *Elektronik* 6 (1957), S. 191—197
- [45] — Peak Distribution Analyser. Drukschrift der Firma Hughes Aircraft Company, Culver City, California/USA 1961
- [46] KOWALEWSKI, J.: Über die Beziehungen zwischen der Lebensdauer von Bauteilen bei unregelmäßig schwankenden und bei geordneten Belastungsfolgen. *DVL-Bericht* Nr. 249, Porz-Wahn (Rhld.) 1963
- [47] LEYBOLD, H.A. und E.C. NAUMANN: A study of fatigue life under random loading. NASA Langley Research Center. L 3407 Hampton, Va. 1963
- [48] GASSNER, E., F.W. GRIESE und E. HAIBACH: Ertragbare Spannungen und Lebensdauer einer Schweißverbindung aus Stahl St 37 bei verschiedenen Formen des Beanspruchungskollektivs. *Archiv für das Eisenhüttenwesen* 35 (1964), S. 255—267
- [49] KLOTH, W. und Th. STROFFEL: Kräfte, Beanspruchungen und Sicherheiten in den Landmaschinen. *Z-VDI* 80 (1936), S. 85—92
- [50] BOBBERT, G. und E.-A. WINKELHOLZ: Statistische Auswertung von Fahrzeugschwingungen zur Gewinnung von Konstruktionsunterlagen. In: *VDI-Berichte* Nr. 69, Düsseldorf 1963, S. 29—32
- [51] BECKER, A.: Elektro-mechanisches Auswertegerät zur zweiparametrischen Auszählung. *Feinwerktechnik* 56 (1952), S. 259—263
- [52] VERHAGEN, C.J.D.M. und J.C. DE DOES: A Special Stress Analyser for Use on Board Ship. *International Shipbuilding Progress* 3 (1956), S. 285—289
- [53] TITLBACH, Z.: Statistischer Analysator für den Verlauf der veränderlichen Beanspruchungen von Maschinenteilen. *Feingerätetechnik* 12 (1963), S. 64—71
- [54] GRAHAM, J.A.: Use of Cumulative Damage in Designing to Resist Fatigue. *SAE-Paper* Nr. 572 F, Milwaukee, Wisc. 1962
- [55] GRAHAM, J.A. und R.A. KUEHL: Methods of Correlating Accelerated Tests to Field Services. *Agricultural Engineering* 44 (1963), S. 604—607 und 613
- [56] DMITRIČENKO, S.S., R.V. KUGEL', E.J. FILAYOV, V.G. NEJČENKO und V. M. SYARIKOV: Neue Methoden zur Analyse der Beanspruchung von Schlepperkonstruktionen bei höheren Fahrgeschwindigkeiten. *Traktory i selchozmasina* 34 (1964), H. 3, S. 9—12

## Résumé

*Manfred Eimer: "Possibilities of Evaluating Load Recordings with Regard to Strength."*

*The state of knowledge on the material properties and the formation of strain and stress fields, as described in the present paper, does not allow yet to predict mathematically the operational life of technical construction units, except for some special cases. At present temporally overstressed machine and vehicle parts are mainly determined by operational strength tests. In order to establish a damage hypothesis and to improve the examinations of the operational strength, a description of the load processes is required placing more emphasis on the strength and several factors of influence. The importance of the various factors of influence for the strength behaviour of materials and the attempts of classifying them were reported.*

*Manfred Eimer: „Possibilités d'interprétation de diagrammes de charges du point de vue de la résistance de matériaux."*

*L'état de connaissances sur les propriétés des matériaux et la création de champs d'allongement et de tension exposé dans l'étude présente ne permet pas encore de calculer à l'avance la durée de vie d'éléments de construction mécaniques, exception faite de quelques cas spéciaux. Le calcul de pièces de machines et de véhicules qui sont temporairement soumises à des surcharges se fait aujourd'hui principalement sur la base d'essais de résistance pratiques. Pour pouvoir formuler des hypothèses sur les dommages possibles et établir des conditions d'essai de résistance pratique, il est nécessaire de décrire les phénomènes de contrainte en tenant compte de certaines grandeurs d'influence et en prenant plus que jusqu'ici en considération la résistance des matériaux. L'auteur expose enfin la signification des différents facteurs d'influence pour la résistance des matériaux et les méthodes de classification déjà appliquées.*

*Manfred Eimer: "Posibilidades de la evaluación de la resistencia específica a cargas, con vistas a la fabricación."*

*Nuestros conocimientos actuales no permiten todavía calcular de antemano las condiciones de los materiales y de sus márgenes de dilatación, así como de su resistencia a tensiones, para poder predecir la duración de elementos de lijándose construcción, excepción hecha de algunos casos especiales, fijándose las dimensiones de piezas de máquinas y de vehículos, recargados durante cierto tiempo, generalmente después de los ensayos de resistencia en servicio. Para poder desarrollar una hipótesis, relativa a averías y a la mejora de los procedimientos de investigación de la resistencia en servicio, hace falta una descripción de las cargas que considere mejor los valores de las diferentes influencias. Se citan los diferentes valores que ejercen influencia sobre las condiciones de resistencia de los materiales y los procedimientos de clasificación que hoy día se están empleando.*