

# Zur Experimentellen Lebensdauer - Ermittlung von Konstruktionselementen mit zufallsartigen Beanspruchungen

E. Gassner, Darmstadt

## Inhaltsangabe

Für die Beurteilung des Schwingfestigkeits-Verhaltens von Konstruktions-Werkstoffen und für die Lebensdauer-Ermittlung von Konstruktionen mit zufallsartigen Beanspruchungen gibt es heute eine Vielzahl experimenteller Methoden, angefangen von Versuchen mit konstanten Beanspruchungs-Amplituden bis zu Versuchen mit frequenz- und amplituden-getreuer Wiedergabe der Betriebs-Beanspruchungen. Mit der Entscheidung, ob die eine oder die andere oder eine dazwischenliegende Versuchsmethode die Betriebs-Beanspruchungen zutreffend simuliert oder zulässig vereinfacht, sind Probleme verknüpft, die - selbst bei technischer Perfektion der Versuchsanlagen - meist nur über Kompromisse zwischen Versuchs-Zeit und -Kosten und siren-ger Vergleichbarkeit unterschiedlich gelagerter Fälle lösbar sind.

Gestützt auf umfangreiche Erfahrungen und einschlägige Veröffentlichungen, wird ein Konzept vorgelegt, das geeignet erscheint, die zukünftige Vorgehensweise so zu vereinheitlichen, daß nahezu alle anwendungsbezogenen Aktivitäten auf dem Gebiet der Lebensdauer-Bestimmung zur Anhebung des Erkenntnisstandes beitragen, statt, wie in der Vergangenheit, durch die Vielfalt "zufallsartiger" Einzelergebnisse zu verwirren und die Verständigungsmöglichkeit zwischen verschiedenen Forschungsstellen zu erschweren, wenn nicht gar auszuschließen.

## Fatigue Life of Structural Components under Random Loading

There are many experimental methods available in order to evaluate the fatigue strength of engineering materials and to define the fatigue life of structures subjected to random loading. The scale extends from constant amplitude tests to tests, in which both amplitudes and frequencies are duplicated like under actual operational

---

Professor Dr.-Ing. E. Gassner, Laboratorium für Betriebsfestigkeit, Darmstadt,  
Gemeinnütziges Forschungsinstitut der Fraunhofer-Gesellschaft e. V.

conditions. The decision, by which of those or by which other testing method the operational loads will be reproduced properly or will be simplified within allowable limits, usually leads to problems, which can be solved - even if the most sophisticated testing equipment is being available - only by compromises between time and costs for the test and strong comparability of test results.

The aim of the present paper is to develop a "Standard" procedure based on experience and on relevant literature which seems to be suitable to improve the state of knowledge in nearly all activities in the field of fatigue life prediction. In the past the variety of individual results of a more or less "random" character had confused such that the understanding between research workers were rendered more difficult and even sometimes completely impossible.

### 1. Einleitung

Die zunehmend betonte Forderung nach Wirtschaftlichkeit und Sicherheit im Betrieb zufallsartig beanspruchter, hoch ausgenutzter Konstruktionen zwingt dazu, bei dem Entwurf solcher Konstruktionen davon auszugehen, daß sie nur eine begrenzte, die jeweilige Nutzungszeit knapp überschreitende Lebensdauer bis zum Ausfall durch Anriß oder Bruch aufzuweisen brauchen. Dies setzt sehr zuverlässige rechnerische oder experimentelle Verfahren zur Lebensdauer-Vorhersage bzw. für einen Lebensdauer-Nachweis voraus; den auf der Basis von Schadensakkumulations-Hypothesen beruhenden rechnerischen Verfahren haften z. Z. noch so große Unsicherheiten an, daß ihre vorbehaltlose Anwendung noch nicht empfohlen werden kann [1]. Demgegenüber gewinnt mit fortschreitender Vervollkommnung der vorwiegend servo-hydraulisch betriebenen, z. T. rechner-gestützten Versuchsanlagen der experimentelle Lebensdauer-Nachweis ein befriedigendes Maß an Zuverlässigkeit; dabei muß allerdings vorausgesetzt werden, daß bei der Simulation keine Abweichungen vom zeitlichen Verlauf der Betriebs-Bbeanspruchungen und von den Umweltbedingungen zugelassen werden, die in ihrer Auswirkung auf die Lebensdauer nicht völlig klar übersehbar sind. Meist steht jedoch diese Bedingung im Widerspruch zu der für einen Lebensdauer-Nachweis verfügbaren Zeit. Das hat größtenteils zur Folge, daß mehr oder weniger willkürliche Vereinfachungen vorgenommen werden, die die Zuverlässigkeit des Ergebnisses in Frage stellen. Selbst wenn durch verbesserte Kenntnis über die Auswirkung einzelner Simulations-Parameter

im Laufe der Zeit in Einzelfällen Vereinfachungen vertretbar werden, bestehen weiterhin eine Reihe grundsätzlicher Bedenken. So bleibt z. B. auch ein durch Schätzwerte für Mittelwert und Streuung gut beschriebenes Ergebnis zumeist auf den untersuchten Einzelfall beschränkt, denn für eine Übertragung auf Bauteile mit gleicher Funktion, aber mit unterschiedlichen Konstruktions-Merkmalen, gibt es z. Z. noch kein theoretisch oder experimentell abgesichertes Kriterium. Hierzu ist eine Arbeitshypothese zu entwickeln, die Werkstoffverhalten, Gestaltung und Fertigung sowie die jeweilige, in einem repräsentativen Einsatz der Konstruktion erwartete Beanspruchungs-Zeit-Funktion als maßgebende Anstrengungs-Parameter getrennt und in ihrer wechselseitigen Beeinflussung berücksichtigt. Dieses Ziel kann effizient nur von einer Gemeinschaft und mit einem gemeinsam erarbeiteten und gut koordinierten Programm in absehbarer Zeit erreicht werden.

Der vorliegende Beitrag will als ein erster Schritt in dieser Richtung verstanden werden; er stellt ein Konzept für eine mögliche Vorgehensweise zur Lösung anstehender Probleme zur Diskussion. Dem vorwiegend programmatischen Charakter des Konzeptes entsprechend, wird bewußt auf die Heranziehung von Einzelergebnissen aus dem Schrifttum oder aus laufenden Forschungsvorhaben verzichtet, zumal nur in Ausnahmefällen die Ergebnisse so vollständig beschrieben sind, daß sie widerspruchsfrei interpretiert werden können und damit als Argumente für oder gegen das vorgeschlagene Konzept brauchbar sind.

### 2. Grundsätzliche Überlegungen

Wird Lebensdauer als die integrierte Antwort eines in eine fertige Konstruktion "eingebundenen" und seiner Bestimmung entsprechend vorbehandelten Werkstoffs unter einer determinierten und/oder zufallsartigen Folge von Beanspruchungs-Zuständen unterschiedlicher Kompliziertheit mit oder ohne Einwirkung der umgebenden Medien verstanden, so ist für ihre zuverlässige Vorhersage eine Vielzahl von Grundinformationen erforderlich; sie stehen in befriedigendem Maße nur für stark idealisierte, häufig wenig anwendungsbezogene Bedingungen zur Verfügung. Für zukünftige Untersuchungen müssen deshalb die als maßgeblich erachteten Parameter durch grundsätzliche Überlegungen gewichtet und zu wenigen, im Schwerpunkt möglicher Anwendungsbereiche liegenden Parameter-Kombinationen zusammengefaßt werden. Diese, von der sonst in der Forschung üblichen und notwendigen

systematischen Variation einzelner streng isolierter Parameter abweichende Vorgehensweise ist gerechtfertigt; nach den bisher vorliegenden Erfahrungen erscheint sie sogar zwingend, soll nicht vor der Vielzahl der Parameter und ihrer in das freie Ermessen des einzelnen Forschers gestellten Veränderungsbreite kapituliert werden. Hinzu kommt die mit dem Begriff der Lebensdauer verknüpfte natürliche Streuung, in die möglichst viele "betriebsähnlich" gewählte Parameter eingehen sollen; nur dann kann aus einer zumeist kleinen Stichprobe und deren Streuung zuverlässig auf die Streuung großer Serien geschlossen werden.

Eine Vorstellung über die mit dem Übergang von Schwingfestigkeits-Versuchen mit konstanter auf solche mit veränderlicher Amplitude wachsende Zahl von Parametern geben die Bilder 1 und 2. Die in Bild 1 angegebenen Simulations-Methoden werden Bestandteil bestimmter Parameter-Kombinationen, in denen jeder Einzelparameter mit der ihm eigenen betriebsähnlichen Schwankungsbreite eingeht; diese Parameter sind

- der Werkstoff und seine Kennwerte,
- die Probenform (gekerbt) und ihre Abmessungen,
- der fertigungsbedingte Oberflächenzustand,
- die Belastungsart und Umgebungsbedingungen.

Den vorstehenden Überlegungen zufolge sind solche Parameter-Kombinationen zu bilden, die einerseits zu in sich abgeschlossenen Ergebnissen führen, die aber andererseits so aufeinander abgestimmt sind, daß sie sich als Basis-Elemente für eine zuverlässige Lebensdauer-Vorhersage leicht handhaben lassen, sie betreffen

- den Werkstoff, gebunden an ein weit verbreitetes Konstruktionselement und an eine eindeutig beschreibbare und leicht realisierbare Beanspruchungs-Zeit-Funktion (siehe Abschnitt 3)
- häufig vorkommende Bauteile und Verbindungselemente, gebunden an typische Konstruktions-Werkstoffe und an die gleiche Beanspruchungs-Zeit-Funktion wie vorher (siehe Abschnitt 4)
- als besonders typisch erkannte, eindeutig beschreibbare Beanspruchungs-Zeit-Funktionen, gebunden an ein weitverbreitetes Konstruktionselement aus charakteristischen Konstruktions-Werkstoffen (siehe Abschnitt 5 und Bild 6, 1 bis 3).

Bleibt es nicht bei der Lebensdauer-Vorhersage mit Hilfe der vorgenannten Para-

meter-Kombinationen, sondern soll deren Treffsicherheit auch in einem Lebensdauer-Nachweis bestätigt werden, so sind eine Reihe weiterer Gesichtspunkte zu beachten, die einer fallweisen Erörterung bedürfen (siehe Abschnitt 6). Einige wichtige Überlegungen zur Simulations- und Versuchs-Technik werden im Anhang (Abschnitt 8) behandelt.

### 3. Werkstoff

3.1. Zur Kennzeichnung der Eignung eines Werkstoffes für Konstruktionen unter zufallsartigen Belastungen sind, neben den üblichen Festigkeits- und technologischen Werten, Angaben über das diesbezügliche Schwingfestigkeits-Verhalten erforderlich; dazu gehören selbstverständlich auch Rißentstehung, Rißausbreitung und Restfestigkeit als Ausdruck der Bruchfähigkeit. Wöhlerlinien als Sonderfall einer Beanspruchungs-Zeit-Funktion mit konstanter Spannungs-Amplitude scheiden hierfür aus, insbesondere wenn sich für ein und dasselbe Konstruktions-Element unter sonst gleichen Bedingungen für unterschiedliche Werkstoffe unterschiedliche Neigungen  $k$  ergeben (siehe Bild 3). Bislang ist nicht zuverlässig bekannt, ob dem Werkstoff mit der höheren Zeitfestigkeit oder dem mit der höheren Dauerfestigkeit der Vorzug zu geben ist. Auch versagen meist die üblichen Schadensakkumulations-Hypothesen, die normalerweise den bei vielen Werkstoffen schon sehr frühzeitig einsetzenden stetigen Abfall der Dauerfestigkeit nicht beachten<sup>[2]</sup>. Hier kann einzig und allein die integrierte Antwort unter einer zutreffend simulierten oder echten Zufallsfolge als Bewertungsgrundlage dienen.

3.2. Bei den in einen systematischen Vergleich der geschilderten Art einzubeziehenden Konstruktions-Werkstoffen sollte es sich um häufig für schwingbeanspruchte Konstruktionen verwandte typische Vertreter aus den verschiedenen Anwendungsbereichen (Maschinenbau, Fahrzeug- und Flugzeugbau, Ingenieurbau, Apparatebau) mit den dort typischen statischen Festigkeits-Werten handeln. Vorteilhaft wäre auch, wenn z.B. in einer Werkstoffgruppe (z.B. der Vergütungsstähle) mit mehreren Typen solche in Grenzbereichen des zyklischen Verformungsverhaltens liegende in die erste Dringlichkeitsstufe genommen würden<sup>[3,4]</sup>.

3.3. Die für vergleichende Untersuchungen am besten geeignete Probenform leitet

sich aus folgender Überlegung ab. Das Schwingfestigkeits-Verhalten und seine Komponenten wird maßgeblich bestimmt durch die Wechselwirkung elastischer, plastischer und elastisch-plastischer zyklischer Verformungen, wie sie an Konstruktions-Elementen mit unterschiedlichen Dehnungszuständen, Dehnungskonzentrationen, Dehnungsgradienten usw. und deren zeitlichen Veränderungen auftreten, eingeschlossen Dehnungsumlagerungen als Folge örtlichen Fließens. Nur bei Verwendung einer konstruktionsähnlich gekerbten Probe ist die genannte Wechselwirkung einbezogen, so daß ungekerbte Proben für eine zutreffende, anwendungsbezogene Werkstoff-Beurteilung ausscheiden. Es wird empfohlen, hierfür zwei typische Konstruktions-Elemente mit breitem Anwendungsbereich und hinreichend weit auseinanderliegenden, praxisnahen Dehnungsformzahlen zu wählen; das Element mit der höheren Formzahl sollte unter der Schwingbelastung einen mehrachsigen Dehnungszustand (phasengleiche Hauptdehnungen) aufweisen. Für eine spätere Interpretation der Versuchs-Ergebnisse zum Zwecke der Erarbeitung verallgemeinerungsfähiger Grundlagen ist es von besonderer Wichtigkeit, daß bei jeder Probe die im Kerbgrund auftretenden Dehnungsspitzen und ihre zeitliche Veränderung bis zum Eintritt einer Stabilisierung gemessen, registriert und nach Mittelwert und Streuung ausgewertet werden [5]. Es gibt Anhaltspunkte dafür, daß in einfach gelagerten Fällen die örtlichen Dehnungen als Anstrengungsmaß der Nenn-Dehnung  $\xi_n$  überlegen ist [6], insbesondere wenn Dehnungsgradient und angestregtes Volumen als weitere Parameter hinzugenommen werden; damit ergibt sich neben dem Vorteil einer besseren Erkennbarkeit werkstoff- und anstrengungsmechanischer Zusammenhänge eine erhebliche Datenreduktion.

Eine im Laboratorium für Betriebsfestigkeit auf der Basis örtlicher (hier noch elastischer) Dehnungen vorgenommene Auswertung [7] von 94 Programm-Versuchen (Betriebsfestigkeits-Versuche nach [8, 9, 10]) an Fahrzeug-Achsschenkeln aus neun verschiedenen Vergütungsstählen mit Nenn-Bruchfestigkeiten zwischen 700 und 1 300 N/mm<sup>2</sup>, Dehnungsformzahlen zwischen 1,2 und 1,8, sowie praktisch gleicher Mittelspannungs-Empfindlichkeit [1] ergab ein sehr schmales Streuband der 50% bzw. 90%-Werte der Überlebenswahrscheinlichkeit aus den neun Einzel-Versuchsreihen. Die ungewöhnlich geringe Streubreite von nur rd. ± 5% kommt zustande, wenn aufgrund bekannter Zusammenhänge [12] die

Ergebnisse auf eine Nenn-Bruchfestigkeit von 850 N/mm<sup>2</sup> normiert und auf ein einheitliches (einachsiges) Anstrengungsmaß  $\bar{\xi}_{a,f}$  transformiert werden; die Transformation stützt sich auf eine empirisch ermittelte Beziehung zwischen der elastischen Dehnungsformzahl  $\alpha_{\xi,el}$  und einem fiktiven Kerbfaktor  $\bar{\beta}_\xi$  der das an den jeweiligen Dehnungsgradienten gebundene zyklische Wechselverformungsverhalten bis zum Höchstwert einer gegebenen Dehnungs-Zeitfunktion berücksichtigt,

$$\bar{\xi}_{a,f} = \bar{\beta}_\xi \cdot \xi_n$$

Sollte sich aus gezielten Untersuchungen mit Bauelementen bekannter, aber unterschiedlich hoher Dehnungsformzahl  $\alpha_{\xi,el}$  eine Beziehung zwischen dem nach der Stabilisierung örtlich gemessenen Maximalwert  $\bar{\xi}_a$  und einem unter gleichen Bedingungen (möglichst gleicher Dehnungsgradient und gleich großes Anstrengungsvolumen) als ertragbar ermittelten Wert  $\bar{\xi}_{a,etr}$  einstellen, dann würde damit die Lebensdauer-Vorhersage wesentlich vereinfacht. Hierbei wird als Versagenskriterium "technischer Anriß", d.h. ein ohne optische Mittel erkennbarer Anriß vorausgesetzt. Dieses Versagenskriterium ist besonders bei nicht ausfallsicheren Konstruktionen anzuwenden, und, unabhängig vom Anwendungsfall, zur Werkstoffbeurteilung durch Angaben über Rißausbreitung und Restbruch zu erweitern. Im Gegensatz zu Untersuchungen mit konstanter Amplitude liegen zuverlässige Unterlagen über die "kritische Rißlänge" bei Zufallsbelastung noch nicht vor.

3.4 Zur Vervollständigung der Parameter-Kombination mit dem Schwerpunkt Werkstoff steht noch die Entscheidung über eine Zufallsfolge von Lasten aus, die für einen auf der Basis von Lebensdauer-Versuchen durchzuführenden Werkstoffvergleich anzusetzen ist. Dabei muß bedacht werden, daß zufallsartige Beanspruchungen nicht nur als Schwingungsvorgänge auftreten, sondern auch als eine Aufeinanderfolge von Einzelereignissen, wie sie z.B. aus funktionsbedingten Arbeitsspielen von Maschinen bei unterschiedlichen Belastungshöhen entstehen [13]; beide Beanspruchungsarten können mit Hilfe der Überschreitungshäufigkeit von Beanspruchungsgrenzen beschrieben werden [9]. Unter bestimmten Voraussetzungen ("stationäre" Bedingungen) ergibt sich eine Verteilungsfunktion [4, 10], auf die andere, in der Praxis häufig vorkommende Verteilungen mit Hilfe theoretischer Überlegungen zurückgeführt werden können. Aus versuchstechnischen Gründen, auf die später in Abschnitt 8

eingegangen wird, sollte für den empfohlenen konstruktionsgebundenen Werkstoff-Vergleich ein einfach zu generierender stationärer Gauß-Prozeß mit eingipfligem Leistungsspektrum und geringer Frequenz-Bandbreite [3] gewählt werden, dessen Intensität (Effektivwert) und Unregelmäßigkeits-Faktor ( $H_0/H_p$ ) während des Versuchs konstant bleiben. Bei der Erzeugung dieses Prozesses dürfen keinerlei mechanische oder elektrische Begrenzungen der Extrem-Werte vorgenommen werden, zumindest nicht unterhalb des rund 5,5-fachen Effektiv-Wertes, siehe Abschnitt 8. Mit dieser Empfehlung wird bewußt mit einer in der Vergangenheit weit verbreiteten Vorgehensweise gebrochen, die es dem Ermessen des einzelnen Forschers und den bei ihm verfügbaren Einrichtungen überließ, Folgen von Zufallslasten vereinfachend zu simulieren, ohne daß die Auswirkungen solcher Vereinfachungen klar übersehbar waren; sie sind es auch heute noch nicht. Die vorgenannte oder ähnliche Festlegung hätte gegenüber quasistationären Prozessen mit mehrgipfligem Leistungsspektrum und großer Frequenz-Bandbreite, wie sie wegen ihrer größeren Anwendungsnähe häufig vorgeschlagen werden, den beachtlichen Vorteil, daß die Versuchszeit auf rund 1/10 reduziert wird. Die gegenteilige Feststellung in [14, Bild 10] beruht darauf, daß für die Beurteilung der Lebensdauer aus unterschiedlichen Zufallsprozessen der Effektivwert gewählt wurde und nicht das richtigere Kriterium, nämlich die Maximalspannung.

#### 4. Konstruktionsform, Fertigung und Umgebungsbedingungen

4.1. Bei der Vielzahl der Konstruktionsformen und ihrer Herstellung bleibt im Einzelfall die Lebensdauer-Ermittlung in ihrer Treffsicherheit so lange unbefriedigend, so lange nicht ein Anstrengungskriterium, etwa im Sinne der Darlegungen aus Abschnitt 3.3. gefunden ist, von dem eine gewisse Allgemeingültigkeit erwartet werden kann (vergl. die Untersuchungen [15, 16] und deren Bedeutung für die Vorhersage der Lebensdauer gekerbter Proben unter Schwinglasten mit konstanter Amplitude). Um hier Fortschritte zu erzielen, sind, ausgehend von den Grundformen in Abschnitt 3.3., weitverbreitete und anwendungsbezogene hergestellte Konstruktionsformen mit definierten Anstrengungszuständen sehr unterschiedlicher Art auszuwählen und systematisch zu untersuchen. Zeichnet sich danach ein verlässliches Anstrengungskriterium für gleichartig reagierende Werkstoff-Gruppen ab, kann jede aus konkretem Anlaß anfallende Konstruktion, auch

solche großer Abmessungen, stichprobenartig einer experimentellen Lebensdauer-Bestimmung unterworfen werden, um damit den Gültigkeitsbereich von relevanten Kriterien abzugrenzen.

Die Abmessungen der Bauelementtypen systematisch zu variieren, um damit auch den Größeneinfluß zu erfassen, erscheint - abgesehen von den nicht einfach abtrennbaren technologischen Einflüssen - wenig sinnvoll, da zufallsartig beanspruchte Konstruktionen meist hoch ausgenutzt sind und demzufolge unter Extrem-Werten der Beanspruchungs-Zeitfunktion meist örtlich stark fließen; damit verliert der Größeneinfluß im Gegensatz zu elastisch beanspruchten Konstruktionen an Bedeutung. Dagegen müßte der Größe des angestregten Volumens und seiner Auswirkung auf die Lebensdauer und deren Streuung Rechnung getragen werden. Letztlich müßte es dem im Hinblick auf Dehnungszustand, Dehnungskonzentration und -Gradient betriebsähnlich angestregten Volumenelement bis zum Rißbeginn gleichgültig sein, ob es in einem kleinen oder großen Bauteil sitzt, wenn nur technologisch und gefügemäßig gleiche Verhältnisse vorliegen. Diese Überlegung kann die Entnahmestelle für die verschiedenen Konstruktions-Grundformen bestimmen, wie sie den vorgenannten Gesichtspunkten Rechnung tragend ausgewählt werden.

4.2. Für zusammengesetzte, kraftübertragende Konstruktionselemente mit rechnerisch oder durch Messung nicht erfaßbaren und zumeist nicht allein für die Lebensdauer ausschlaggebenden Dehnungszuständen (weil abhängig von der Kraftübertragungsart, vom Reibschluß und der damit zwangsläufig verbundenen Reiboxydation usw.) wird eine Lebensdauer-Vorhersage nur aufgrund vorangegangener experimenteller Untersuchungen für nahezu gleichartig aufgebaute Elemente möglich sein. In der Regel sollten zusammengefügte Elemente durch Grundsatz-Versuche so optimiert werden [17], daß sie unverändert eingebaut werden können; damit ist meist eine hohe Wahrscheinlichkeit gegeben, daß sie den für die Gesamtkonstruktion zu führenden experimentellen Lebensdauer-Nachweis ohne vorzeitigen Ausfall überstehen. Schweißverbindungen wären unter 4.1. einzuordnen.

4.3. Im Sinne der Überlegungen in Abschnitt 2 sollten die möglichen Herstellungsarten (vom Halbzeug oder Rohteil über die Wärmebehandlung bis zur Fertigbearbeitung) für die ausgewählten Konstruktionselemente typisch sein, damit auf diese

Weise alle, sich möglicherweise auf die Lebensdauerstreuung auswirkenden Einflüsse einbezogen sind. Schwankungen in den Abmessungen eliminieren sich automatisch durch die für jedes Einzelteil vorzunehmende örtliche Dehnungs-Messung (besonders wichtig bei unbearbeitet gebliebenen Gußteilen), s. Abschnitt 3.3.

Bezüglich der Auswirkung von Sonderverfahren bei der Herstellung von einfachen und zusammengesetzten Bauelementen (z.B. Oberflächendrücken, Interferenzbuchsen oder Bolzen) gilt grundsätzlich das gleiche wie unter 4.2.

4.4. Zuverlässige Rückschlüsse auf die Auswirkung von Umgebungsbedingungen (Temperatur, korrosive Medien u. a.) auf die Lebensdauer sind nur in der zeitlich richtigen Zuordnung zu dem im Einzelfall gültigen Beanspruchungs-Zeitablauf möglich und nicht mit den hier für Grundsatz-Untersuchungen vorgeschlagenen "Einheitstypen" von Zufallsprozessen. Nur das Ergebnis eines Lebensdauer-Nachweises im sogenannten "Nachfahr-Versuch" an der Original-Konstruktion kann zeigen, ob der gewählte Werkstoff und die Oberflächenbehandlung die Erwartungen an Temperatur- und Korrosionsbeständigkeit erfüllen. Für die Erarbeitung diesbezüglicher qualitativer Hinweise eignet sich die Parameter-Kombination mit dem Schwerpunkt "Werkstoff". Es ist zu erwarten, daß sich die Korrosion, ähnlich wie die "Reiboxydation", unter zufallsartigen Beanspruchungen bei weitem nicht so festigkeitsmindernd auswirkt wie unter konstanten Beanspruchungs-Amplituden im Bereich der Dauerfestigkeit [22].

4.5. In die vorliegende Parameter-Kombination sollten vornehmlich weitverbreitete, mit nach 3.2. in ihrem zyklischen Verformungsverhalten als typisch erkannte: Konstruktions-Werkstoffe einbezogen werden.

4.6. Für die Wahl einer geeigneten Zufallslastenfolge gelten die gleichen Überlegungen wie unter 3.4.; erst recht wenn mit zunehmender Probengröße die Verformungen und damit auch die Versuchszeiten länger werden. Damit bleibt auch der Anschluß an die erste Parameter-Kombination mit dem Schwerpunkt Werkstoffe erhalten.

## 5. Beanspruchungs-Zeitfunktionen

5.1. Experimentelle Verfahren zur Lebensdauer-Ermittlung haben dem Umstand Rechnung zu tragen, daß im Prinzip zwischen zwei, nach ihrer Entstehungsart zu kennzeichnenden Beanspruchungs-Zeitfunktionen zu unterscheiden ist. Wie in Abschnitt 3.4. bereits erwähnt, gibt es neben der mehr und mehr in den Vordergrund des Interesses gerückten Antwort eines schwingungsfähigen Systems auf eine meist breitbandige Anregung mit Zufallscharakter noch die zum Arbeitsprogramm einer Maschine gehörigen, in der Regel als eine Zufallsfolge von Einzelereignissen zu beschreibenden Beanspruchungsvorgänge [13]. Während die Erstere mit den aus der Systemanalyse bekannten statistischen Kenngrößen eindeutig beschreibbar ist, finden sich für die an zweiter Stelle genannte Art nur Ansätze in dieser Richtung. In den zurückliegenden drei Jahrzehnten mit mannigfaltigen Bemühungen um die Lebensdauer-Ermittlung unter betriebsähnlichen Beanspruchungen wurde für die Analyse von Beanspruchungs-Zeitfunktionen zu meist die Methode benutzt, die sich mit der Zählung der Überschreitungshäufigkeit vorgegebener Beanspruchungsgrenzen begnügt [26]. Diese Methode hat den großen Nachteil, daß die zugehörigen Häufigkeits-Verteilungen für sich allein keine Rückschlüsse mehr auf den zeitlichen Beanspruchungsablauf ermöglichen. Eine Simulation des Betriebsgeschehens war daher lange Zeit nur nach einer, durch die bequemere Versuchstechnik begründete Umformung eines Kollektivs von Überschreitungs-Häufigkeiten in ein sogenanntes Amplituden-Kollektiv zu vertreten [3, 20]; damit wurde zugleich die Schwierigkeit umgangen, bei Beanspruchungs-Zeitfunktionen mit sehr hohem Unregelmäßigkeitsgrad festzulegen, was für eine Lebensdauer-Vorhersage mit Hilfe einer der üblichen Schadensakkumulations-Hypothesen als Last- bzw. Schwingspiel anzusehen ist. Mit der Einführung der Aufzeichnung von Betriebs-Beanspruchungen auf Magnetband und deren Analyse mit Hilfe von Rechnern sind alle Möglichkeiten für eine Simulation beliebiger Beanspruchungs-Zeitfunktionen gegeben; aber für ihre Beschreibung spielt die Summenkurve der Überschreitungshäufigkeiten, ergänzt durch die Angabe bestimmter statistischer Kenngrößen sicher nach wie vor eine wichtige Rolle, ebenso wie für die experimentelle und für die rechnerische Lebensdauer-Ermittlung.

Besondere Zusatzeinrichtungen zu servohydraulischen Prüfmaschinen ermöglichen

die Eingabe aller Kenndaten eines schwingungsfähigen Systems, so daß das betrachtete Bauelement (unter Beachtung der Übertragungsfunktion der Prüfmaschine) praktisch die gleiche Beanspruchungs-Zeitfunktion erfährt wie im Betrieb; sollen hierbei selbst geringfügige Abweichungen ausgeschaltet werden, dann kann auch das auf Magnetband gespeicherte Signal unmittelbar zur Sollwert-Vorgabe für die Regelung der Prüfmaschine benutzt werden (Nachfahr-Versuch). Die letztere Vorgehensweise hat den Vorteil, daß für eine notwendig werdende fraktographische Untersuchung zu jedem Zeitpunkt des Versuchs eine Zuordnung zur wirksam gewesenen Versuchslast möglich ist.

Es hat sich gezeigt, daß die neuzzeitlichen Einrichtungen zur Simulation beliebiger Zufallsprozesse [19] dazu verleitet hat, den Zufallscharakter besonders zu betonen, und bei der Simulation andere, die Lebensdauer entscheidend beeinflussende Parameter nicht zu beachten bzw. nicht zahlenmäßig anzugeben und in ihrer Konstanz nicht zu überwachen. Damit ist in der Regel die Vergleichbarkeit von Ergebnissen aus verschiedenen Forschungsinstituten mit unterschiedlichen und unterschiedlich simulierten Zufallsprozessen sehr erschwert. Die einleitend gebrachte Übersichtsdarstellung (s. Bild 2) zeigt hierzu sehr anschaulich, wieviel Parameter bei der Erzeugung bzw. Simulation eines Zufallsprozesses frei wählbar sind. Bis zur Stunde sind so zuverlässige Informationen über das Gewicht der einzelnen Parameter nicht verfügbar, als daß die Überführung eines Ergebnisses mit einer bestimmten Parameter-Kombination in ein Ergebnis mit einer anderen Kombination möglich wäre.

Nach diesen Überlegungen bietet sich für die experimentelle Lebensdauer-Ermittlung eine Vorgehensweise an, die sich in Anlehnung an die in der Praxis vorkommenden Zufallsprozesse und an deren Zustandekommen auf wenige, leicht und zuverlässig zu simulierende "Grundtypen" festlegt.

5.2. Als Grundtyp eines Zufallsprozesses, der sich wegen der von Willkürlichkeiten weitgehend freien Festlegung seiner Eigenschaften als echtes Analogon zur determinierten Beanspruchungs-Zeitfunktion mit konstanter Amplitude (CA, Bild 1) erweist, wird der stationäre Gauß-Prozeß mit eingipfligem Leistungsspektrum (SGR/1) und relativ kleiner Bandbreite vorgeschlagen, der gleiche wie in Abschnitt 3 und 4 für die Parameter-Kombinationen "Werkstoff" und "Kon-

struktionsform . . . .". Dieser Typ besitzt den großen Vorteil, daß sich die mit ihm durchgeführten Lebensdauer-Ermittlungen in ihren Ergebnissen praktisch nicht von denen unterscheiden, die sich mit einer Gaußschen Normalverteilung als Summen-Häufigkeitsverteilung für zufallsartige Einzelereignisse einstellen [10]. Abwandlungen, die beide Typen durch funktionsbedingte oder andersartige Begrenzungen der Extremwerte erfahren, sind in ihrer Auswirkung gut abschätzbar [20, 21, 27].

In folgerichtiger Annäherung an Zufallsprozesse im Schwerpunkt praktischer Anwendung folgt der stationäre Gauß-Prozeß mit zweigipfligem Leistungsspektrum (SGR/2, Bild 1) und entsprechend vergrößerter Bandbreite.

Der Typ mit größter Anwendungsbreite, der quasistationäre Zufallsprozeß mit zweigipfligem Leistungsspektrum (QSR, Bild 1) und gleicher Bandbreite wie bei dem Typ SGR/2, vervollständigt die Reihe der Beanspruchungs-Zeitfunktionen in der dritten, für eine Lebensdauer-Ermittlung notwendigen Parameter-Kombination. Dieser Typ kann als Summe aus stationären Gauß-Prozessen SGR/2 mit gleicher Verteilung der spektralen Leistungsdichte, aber mit Effektiv-Werten unterschiedlicher Größe und Wirkungszeit gedacht werden [4, 23, 27].

Der quasistationäre Zufallsprozeß hat gegenüber den beiden anderen Grundtypen den Nachteil, daß er bei gleichem Maximalwert der Summen-Häufigkeitsverteilung (z. B.  $\bar{\xi}_a$ ) zu etwa 10-fach längeren Versuchszeiten führt. Umso notwendiger erscheint eine rechnerische Lebensdauer-Vorhersage gerade für diesen und ähnliche Zufallsprozesse.

Im Hinblick auf eine strenge Vergleichbarkeit von Ergebnissen aus Versuchen zur Lebensdauer-Ermittlung sind für die drei vorgeschlagenen Grundtypen folgende Kenngrößen als besonders wichtig anzugeben:

zum stationären Gaußprozeß SGR/1

die Verteilung der spektralen Leistungsdichte, eingipflig; durch sie sind der Effektiv-Wert der Zufallsgröße, (z. B.  $\xi_{rms}$ ), die Mittenfrequenz  $f_c$ , die Bandbreite  $\Delta f$  und der Unregelmäßigkeitsfaktor  $I = H_0 / H_p$  bestimmt.

Durch Messung während des Versuchs ist darüberhinaus der sogenannte Scheitelfaktor  $C$ , als das Verhältnis zwischen dem Höchstwert der Häufigkeits-Verteilung und dem Effektivwert, z. B.  $C = \bar{\xi}_a / \xi_{rms}$

nachzuweisen,

zum stationären Gauß-Prozeß SGR/2

die Verteilung der spektralen Leistungsdichte, zweigipflig, Effektivwert, die beiden Mittenfrequenzen, die Bandbreite, der Unregelmäßigkeits-Faktor und der Scheitel-Faktor,

zum quasistationären Zufalls-Prozeß QSR

die Verteilung der spektralen Leistungsdichte, zweigipflig, gleiche Form wie bei SGR/2, jedoch mit zufällig veränderlichem Effektivwert. Die daraus über die gesamte Versuchszeit resultierende Verteilung der spektralen Leistungsdichte und der zugehörige mittlere Effektivwert, der mittlere Unregelmäßigkeits-Faktor und der Scheitel-Faktor sind zu ermitteln und anzugeben.

Bei der Festlegung der drei Grundtypen ist in Anlehnung an ähnliche Betrachtungen in [20] angestrebt worden, daß beim Übergang vom einen zum andern Prozeß jeweils nur ein für die Lebensdauer als maßgeblich erachteter Parameter geändert wurde, nämlich die Form der Leistungsdichte-Verteilung. Damit sind zugleich Grundvoraussetzungen für die Nachprüfung einer "erweiterten" Schadensakkumulations-Hypothese [24, 25] geschaffen; dies ermöglicht, die Lebensdauer des Typs QSR nach seiner Zerlegung in stationäre Teilprozesse des Typs SGR aufgrund zu diesem Typ gehöriger Lebensdauerlinien (siehe z.B. Bild 5) zuverlässig abzuschätzen.

Empfehlungen für Beträge, die in den drei Grundtypen für einzelne Parameter angestrebt werden sollten, gibt Abschnitt 8.

5.3. Für die hier behandelte Parameter-Kombination mit dem Schwerpunkt "Beanspruchungs-Zeitfunktion" sollten - ähnlich wie bei der Parameter-Kombination "Konstruktionsform ..." - vornehmlich weitverbreitete, für ihr zyklisches Verformungsverhalten typische Werkstoffe und Proben im Sinne von 3.3 gewählt werden.

6. Lebensdauer-Nachweis

6.1. Für den Nachweis, ob eine mit Ergebnissen aus den drei Parameter-Kombinationen vorgenommene Lebensdauer-Ermittlung zutreffend war oder

nicht, gelten eigens darauf abgestimmte Überlegungen. Da im allgemeinen weder Werkstoff, noch Form, Fertigung und Beanspruchungs-Zeitfunktion für die nachzuweisende Konstruktion in einer Kombination vorliegen, die mit einer Kombination aus den Grundsatz-Untersuchungen identisch sein dürfte, ist immer und zumindest stichprobenartig ein Nachweis-Versuch erforderlich; dabei ist von der Original-Konstruktion auszugehen, z.B. einem Prototyp, und es sind die im Betrieb erwarteten bzw. bereits gemessenen, als repräsentativ anzusehenden Beanspruchungs-Zeitfunktionen ohne Vereinfachungen nachzufahren.

6.2. Bei lebenswichtigen Konstruktionen mit nur einem schwingbruchgefährdeten Systempunkt, dessen Beanspruchung nur von einer äußeren Last mit unveränderter Wirkungsrichtung entscheidend bestimmt wird, sollte unter keinen Umständen vom "Nachfahr-Versuch" [3] abgewichen werden; denn hier können auch die Umgebungsbedingungen am zutreffendsten simuliert werden. Im übrigen gilt das in Abschnitt 3.3. bezüglich der örtlichen Dehnungsmessungen Gesagte; nur so ist sichergestellt, daß auch Ergebnisse aus Nachweis-Versuchen zur Beurteilung der Brauchbarkeit des vorgelegten Konzepts beitragen. Liegen Lebensdauer-Schätzung und Ergebnis des Nachweis-Versuchs sehr weit auseinander (mehr als im Verhältnis 1:3) und wird vermutet, daß die Abweichungen auf Besonderheiten der Beanspruchungs-Zeitfunktion zurückzuführen sind, dann ist zu empfehlen, vergleichsweise die Lebensdauer des betreffenden Bauteils in einer besonderen Versuchsreihe unter einem Zufallsprozeß des Typs SGR/1 zu ermitteln. Liegen dagegen Besonderheiten in der Konstruktionsform vor, ist ein Nachfahr-Versuch mit einem in seiner Anstrengung vergleichbaren Element aus der Parameter-Kombination "Konstruktionsform ..." sinnvoll.

6.3. Wesentlich schwieriger (wenn nicht gar unmöglich) und meist unwirtschaftlich wird der Lebensdauer-Nachweis mit Hilfe eines repräsentativen Nachfahr-Versuchs, wenn es sich um eine größere Baugruppe oder um eine Gesamtkonstruktion mit zahlreichen, meist im voraus nicht übersehbaren schwingbruchgefährdeten Systempunkten bzw. Bereichen handelt. In der Regel werden die an diesen Punkten wirkenden Beanspruchungen und ihre zeitliche Veränderung auf mehrere äußere, gleichzeitig oder intermittierend wirkende Kräfte unterschiedlicher Ursache (Schwingungsvorgänge



oder Einzelereignisse) und Richtung zurückzuführen sein; diese Kräfte so zu variieren und zeitlich zu korrelieren, daß es zu einem echten Nachfahr-Versuch kommt, scheidet bislang noch an den hierfür fehlenden Informationen [28]. Deswegen werden häufig mehr oder weniger stark vereinfachte Nachfahr-Versuche "konstruiert", auf die zwar der eine oder andere Systempunkt noch mit betriebsnahen Beanspruchungen antwortet, andere Punkte jedoch überhaupt nicht oder falsch, so daß der Wert eines solchen Versuchs fraglich wird. Bei der Planung komplizierter Nachfahr-Versuche ist auch zu beachten, daß es selten gelingt, die dynamische Antwort größerer Strukturbereiche durch quasistatische Einzelkräfte zu simulieren (häufig die einzige Möglichkeit). Ob und inwieweit das Ausweichen auf sogenannte Ausschnitt-Versuche mit der Möglichkeit, aufgrund an der Gesamtkonstruktion vorgenommener statischer und dynamischer Dehnungsanalysen die örtlichen Beanspruchungs-Zustände besser simulieren und mehrere gleichartige Ausschnitte zur Erfassung der Streuung untersuchen zu können, eine Lösung darstellt, bleibt einer späteren Erweiterung dieser Ausführung vorbehalten.

#### 7. Schlußbemerkung

Der 1938/43 vom Verfasser für die Belange des Flugzeugbaus entwickelte [8] und 1948 in den Fahrzeugbau eingeführte "Programm-Versuch" ([9, 10] 8-stufiges Amplituden-Programm) hat sich in seiner konsequenten Anwendung für die Ermittlung zulässiger Beanspruchungen ebenso wie für den Lebensdauer-Nachweis von Konstruktionen mit veränderlichen Lasten gut bewährt. Trotz des Mangels, der diesem Verfahren anhaftet, statt einer Zufallslasten-Folge eine "betriebsähnliche" programmierte Folge von konstanten Lastamplituden zu verwenden, konnten die mit dem Programm-Versuch erzielten Ergebnisse über zwei Jahrzehnte dem Entwurf und Lebensdauer-Nachweis neuer Flugzeug- und Fahrzeug-Typen und neuer Maschinen zugrunde gelegt werden, ohne daß Rückschläge bekannt wurden. Deswegen wird sich mit dem hier vorgelegten und auf Erfahrungen aus hunderten von Programm-Versuchen gestützten Konzept durch den Übergang auf Betriebsfestigkeits-Versuche mit Zufallslasten und mit der Schaffung eines verbesserten Anstrengungskriteriums eine Steigerung der Aussagefähigkeit ergeben; damit dürfte der für eine Serien-Freigabe oder für eine behördliche Zulassung der Konstruktion erforderliche Lebensdauer-Nachweis in der Regel nur

zur Bestätigung für die Richtigkeit der vorgenommenen Dimensionierung dienen, so daß nachträgliche größere Konstruktionsänderungen nicht mehr erforderlich sind.

Die empfohlenen, vorrangig auf die Anwendung bezogenen Parameter-Kombinationen eignen sich möglicherweise auch als "Gerüst" für die Planung nicht zweckgebundener Forschungsaufgaben; dabei könnten alle zur Abrundung des Konzeptes noch ausstehenden Fragen behandelt werden, die jetzt gezwungenermaßen zurückgestellt werden mußten.

#### 8. Simulations- und Versuchstechnik (Anhang)

8.1 Um die Vergleichbarkeit von Ergebnissen aus Versuchen mit zufallsartiger Belastung sicherzustellen, sollte darauf geachtet werden, daß die vorgeschlagenen Schwingungsvorgänge simulierenden Prozeßtypen am Bauteil mit statistischen Kenngrößen antworten, für die nachfolgende Richtwerte empfohlen werden.

##### Der eingipflige stationäre Gauß-Prozeß SGR/1

Der anscheinend geringe Einfluß der Mittenfrequenz [29] und das Streben nach kurzen Versuchszeiten könnten für die Wahl einer möglichst hohen Mittenfrequenz  $f_c$  sprechen. Dagegen spricht, daß das zyklische Verformungsverhalten der Werkstoffe im plastischen Bereich von der Frequenz abhängig ist; nennenswerte Überschreitungen einer Mittenfrequenz, die im Schwerpunkt praktischer Anwendungsfälle liegt, sollte daher tunlichst vermieden werden. Bis zum Vorliegen gesicherter Ergebnisse wird daher empfohlen, für den Grundtyp SGR/1 eine Mittenfrequenz im Bereich zwischen 10 und 30 Hz einzuhalten.

Der Unregelmäßigkeitsfaktor  $I = H_0 / H_p$ , bestimmt durch die Form der spektralen Leistungsdichte und die Bandbreite  $\Delta f$ , scheint nach ersten, untereinander absolut vergleichbaren Versuchsreihen mit einem Werkstoff (Al Cu Mg) [30] nur einen untergeordneten Einfluß auf die Lebensdauer zu haben [20, 31]. Die Einhaltung eines Unregelmäßigkeitsfaktors etwa in der Mitte zwischen einem in der Praxis beobachteten Wert  $I = 0,3$  [32] und den in der Praxis selten vorkommenden Werten nahe 1, dürfte mit  $I \approx 0,7$  sinnvoll gewählt sein; dieser Wert läßt sich nach [35] auch aus der Sicht der Kombination servohydraulische Prüfmaschine, Zufallsgenerator und Filtercharakteristik vertreten.

Die Höhe des Effektivwertes (rms-Wert) der Zufallsgröße bestimmt die Lebensdauer eines gegebenen Bauteils unter einer durch die Verteilung ihrer spektralen Leistungsdichte gegebenen Zufallslastenfolge [29, 30, 34 u.a.m.]. Zur Ermittlung einer Lebensdauerlinie (s. Bild 5) sollten im Sinne der Vorschläge von [10] mehrere Versuchsreihen mit mindestens sechs bis acht Proben angesetzt werden, wobei der Effektivwert innerhalb der Einzelreihe konstant bleibt, aber von Reihe zu Reihe sinnvoll abzustufen ist; dabei sollte in der Versuchsreihe mit dem höchsten Effektivwert bis zum Bruch der Probe im Mittel mindestens  $2 \cdot 10^6$  Mittelwertdurchgänge ertragen werden; dies ist eine sehr kurze, im Betrieb einer "gesunden" Konstruktion kaum interessierende Lebensdauer, übliche Lebensdauerforderungen führen zu Werten für  $\bar{N}_0$  zwischen  $10^7$  und  $10^9$ .

- Bei der Planung von Betriebsfestigkeits-Versuchen mit zufallsartigen Lasten zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Anstrengung und Lebensdauer ist noch auf folgendes zu achten:

Werden Versuchsreihen mit einem von Null verschiedenen Mittelwert angesetzt, so muß bei den einzelnen zur Aufnahme einer Lebensdauerlinie notwendigen Versuchsreihen das Verhältnis  $\bar{R}$  zwischen unterem und oberem Extremwert konstant bleiben (Extremwert = C · Effektivwert). Bei konstant gehaltenem Mittelwert geht die systematische Beschreibung von Lebensdauerlinien durch Angabe des Exponenten  $\bar{k}$  verloren, ganz abgesehen davon, daß eine solche Darstellung der Versuchsergebnisse der Bemessungspraxis widersprüche [25].

Bezüglich der Bedeutung des Effektivwertes als Anstrengungsmaß sind Vorbehalte angebracht; einmal ist er nicht auf Beanspruchungsvorgänge unterschiedlicher Entstehungsart (s. Abschnitt 5.1) im gleichen Sinn (als Ausdruck für den quadratischen Zeitmittelwert) anwendbar, zum anderen reagiert er nicht empfindlich genug auf extrem hohe Zufallslasten, und diese können die Lebensdauer entscheidend beeinflussen. - Auch weil die Lebensdauerlinien als Bemessungsunterlage, dh. zur Ermittlung zulässiger Anstrengungen für eine geforderte Lebensdauer dienen, sollte der Effektivwert durch ein für den Konstrukteur besseres und anschaulicheres Maß ersetzt oder entsprechend ergänzt werden. So z.B. durch einen Extremwert, der im Mittel einmal je  $10^6$  Mittelwertdurchgänge auftritt [10]. Die Angabe eines definierten Extremwertes erleichtert zugleich den

Nachweis eines genügend großen Abstandes gegenüber einer funktionsbedingten Verformungsgrenze, die nicht überschritten werden darf. Ohne Kenntnis des wahrscheinlichen Extremwertes zu hoch angesetzte Effektivwerte können zu einer Überschreitung der Werkstoff-0,2-Grenze führen und damit die Ergebnisse aus Zufallslasten-Versuchen in ihrer Aussagefähigkeit einschränken [31]. Es wird daher empfohlen, bei der Simulation von Zufallsprozessen die Bauteilantwort zu registrieren, zumindest die Überschreitungshäufigkeit bestimmter Beanspruchungsgrenzen zu zählen, und das Versuchsergebnis durch Angabe der Häufigkeitsverteilung und des erreichten Scheitelfaktors  $C = \text{Extremwert} / \text{Effektivwert}$  anzugeben, wie z.B. in [31]. Bewährt hat sich in Programmversuchen [10, 30] ein Wert von  $C \approx 5,25$ .

#### Der zweigipflige stationäre Gauß-Prozeß SGR/2

Die wenigen, bekannt gewordenen Verteilungen der spektralen Leistungsdichte deuten darauf hin, daß die Wahl eines Verhältnisses der Mittenfrequenz  $f_{c1} / f_{c2} \approx 0,01$  bis  $0,05$  sinnvoll ist, wobei sich  $f_{c1}$  zwischen  $0,5$  und  $2,5$  Hz bewegen sollte. Nach Bussa [31] ist auch bezüglich dieses Verhältnisses kein entscheidender Einfluß auf die Lebensdauer zu erwarten.

Die Verteilungsform der spektralen Leistungsdichte und die Bandbreite werden zweckmäßig so gewählt, daß ein Unregelmäßigkeitsfaktor  $I \approx 0,5$  zustande kommt. Bezüglich des Effektivwertes gilt das gleiche wie für den eingipfligen Prozeß SGR/1.

#### Der quasistationäre zweigipflige Zufallsprozeß QSR

Die Verteilungsform, die Mittenfrequenz und die Bandbreite sind die gleichen wie beim zweigipfligen stationären Gauß-Prozeß; damit bleibt auch der Unregelmäßigkeitsfaktor gleich. Die Änderung gegenüber dem vorangehenden Grundtyp besteht lediglich darin, daß bei einem Versuch mit zufallsartiger Beanspruchung der Effektivwert nicht konstant bleibt, sondern nach einer Dichtefunktion verändert wird, wie sie rechnerisch von Jaekel und Swanson [14] und nach der Auswertung einer repräsentativen Beobachtungszeit von Buxbaum [32] angegeben wird. Für die Simulation der Dichtefunktion der Effektivwerte im Versuch wird diese zweckmäßigerweise getreptet und mit den dazugehörigen Zeitspannen (proportional der Häufigkeitsdichte) als Zufallsfolge der zuge-

hörigen Effektivwertstufen angesetzt. Wahrscheinlich spielt es keine Rolle, ob die Effektivwerte zufallsartig oder in irgend einer anderen Weise aufeinander folgen, da sich am Zufallscharakter der Beanspruchungen nichts ändert, sondern nur deren Intensität.

Auch für diesen Zufallsprozeß wird dringend empfohlen, die Bauteilantwort fortlaufend zu registrieren, nach Unregelmäßigkeitsfaktor, durchschnittlichem Effektivwert und Scheitelfaktor auszuwerten und als Bestandteil des Versuchsprotokolls anzugeben.

8.2 Die bei der Simulation von Zufallsprozessen anzuwendende Versuchstechnik hat noch keinen Stand erreicht, der zu allgemeingültigen Empfehlungen berechtigt, die über das in Abschnitt 8.1 Gesagte wesentlich hinausgehen. Die Verwendung von Zufallsgeneratoren in Verbindung mit geeigneten Filtern zur Sollwertvorgabe bei der Regelung servo-hydraulischer Prüfmaschinen muß von folgenden Voraussetzungen abhängig gemacht werden:

- der Zufallsgenerator muß Extremwerte vom mindestens 5,5-fachen des Effektivwertes erzeugen können,
- er muß eine dem Gauß-Prozeß genau entsprechende Häufigkeitsverteilung liefern,
- diese Häufigkeitsverteilung muß um den linearen Mittelwert der Zufallsgröße symmetrisch verlaufen.

Selbst wenn die genannten Voraussetzungen zutreffen, verbleiben bei dieser Art der Generierung gewisse Nachteile; wie die Erfahrung zeigt, fallen die Häufigkeitsverteilungen je nach Anzahl der bis Bruch ertragenen Mittelwertdurchgänge sehr unterschiedlich aus, speziell im Bereich ihrer Extremwerte; ein Umstand, der sich vergrößernd auf die Streuung der Versuchsergebnisse auswirkt und deshalb nicht repräsentativ ist, weil sich bei den sich im Betrieb einstellenden langen Lebenszeiten die Streuung nachweislich verkleinert. Auch im Hinblick auf eine hohe Aussagefähigkeit vergleichender Versuchsreihen sind große Streuungen unerwünscht.

Diese Nachteile werden umgangen, wenn der gewünschte Prozeß von einem Rechner generiert und nach abgeschlossener Generierung sozusagen als determinierte Folge von Belastungen zur Sollwertvorgabe verwendet wird oder wenn die Antwort eines Schwingungssystems mit gegebenem Frequenzgang auf Magnetband gespeichert wird

und dieses dann zur Sollwertvorgabe dient [3].

Diese Vorgehensweise hat, wie bereits in Abschnitt 5.1 erwähnt, im Hinblick auf die Verfolgung von Rißentstehung und Rißausbreitung den Vorteil, daß zu jedem Zeitpunkt des Versuchs die wirksam gewesene Last bekannt ist. Bei Signalen, die sowohl dem Rechner als auch dem Band entnommen werden, besteht grundsätzlich die Möglichkeit, an bestimmten Stellen zum Kollektiv gehörige, relativ hohe Lasten einzustreuen, die sich dann im Bruchbild wiederfinden (Marker Loads) und die dann die Aufstellung von Rißausbreitungslinien sehr erleichtern.

Mit beiden Generierungsarten besteht darüber hinaus die Möglichkeit, die Generierungszeiten so weit auszudehnen, daß mit Sicherheit Extremwerte enthalten sind, die den vorgeschlagenen Scheitelfaktor  $C \geq 5,5$  enthalten und die bis zu diesem Wert eine sehr gute Annäherung an die Häufigkeitsverteilung eines Gauß-Prozesses liefern. Der gesamten Generierungszeit wird dann ein repräsentativer Abschnitt mit etwa  $2,5 \cdot 10^5$  bis  $5 \cdot 10^5$  Mittelwertdurchgängen entnommen und als eine Art Teilfolge [10] ständig wiederholt bis Anriß oder Bruch der Probe auftritt [3]. Auf diese Weise ist die beste Gewähr für kleine Streuungen der Versuchsergebnisse gegeben [38].

Schrifttum

- [1] Hardrath, H.F.:  
Review of Cumulative Damage  
Vortrag auf dem AGARD Meeting München (1965). NASA TM X-56749
- [2] Haibach, E.:  
Modifizierte lineare Schadensakkumulations-Hypothese zur Berücksichtigung  
des Dauerfestigkeitsabfalls mit fortschreitender Schädigung  
Laboratorium für Betriebsfestigkeit, Darmstadt, TM Nr. 50/70
- [3] Gassner, E.:  
Betriebsfestigkeit gekerbter Stahl- und Aluminiumstäbe unter betriebs-  
ähnlichen und betriebsgleichen Belastungsfolgen  
Materialprüfung 11 (1969) Nr. 11, S. 373-378
- [4] Gassner, E.:  
Ziele einer praxisorientierten Schwingfestigkeitsforschung  
Schriftenreihe der Fraunhofer-Gesellschaft, München, Heft 5 (1968)
- [5] Schütz, D.:  
Durch veränderliche Betriebslasten in Kerben erzeugte Eigenspannungen und  
ihre Bedeutung für die Anwendbarkeit der linearen Schadensakkumulations-  
Hypothese  
Laboratorium für Betriebsfestigkeit, Darmstadt, Bericht Nr. FB-100 (1972)
- [6] Gassner, E.; Haibach, E.:  
Die Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen aus der Sicht einer örtlichen  
Beanspruchungsmessung  
In: Tragfähigkeitsermittlung bei Schweißverbindungen. Fachbuchreihe  
Schweißtechnik Bd. 53/1 (1967), S. 47-73
- [7] Seitz, E.:  
Über den Einfluß der Gestaltung auf die Lebensdauer von Achsschenkeln  
Unveröffentlichter LBF-Bericht, Diplomarbeit TH München (1969)
- [8] Gassner, E.:  
Festigkeitsversuche mit wiederholter Beanspruchung im Flugzeugbau  
Luftwissen 6 (1939) Nr. 2, S. 61-64. Eine englische Übersetzung er-  
schien unter dem Titel "Strength Investigation in Aircraft Construction  
under Repeated Application of the Load", NACA TM 1087 (1946)
- [9] Gassner, E.:  
Betriebsfestigkeit, eine Bemessungsgrundlage für Konstruktionsteile mit  
statistisch wechselnden Betriebsbeanspruchungen  
Konstruktion 6 (1954) Nr. 3, S. 97-104

- [10] Haibach, E.; Lipp, W.:  
Verwendung eines Einheitskollektivs bei Betriebsfestigkeits-Versuchen  
Laboratorium für Betriebsfestigkeit, Darmstadt, TM Nr. 15/65
- [11] Schütz, W.:  
Über eine Beziehung zwischen der Lebensdauer bei konstanter und bei ver-  
änderlicher Beanspruchungsamplitude und ihre Anwendbarkeit auf die Be-  
messung von Flugzeugauteilen  
Zeitschrift für Flugwissenschaften 15 (1967) Nr. 11, S. 407-419
- [12] Gassner, E.:  
Einfluß der Werkstoff-Bruchfestigkeit auf die Lebensdauer von Achsschenkeln  
ATZ 59 (1957) Nr. 9, S. 283-284
- [13] Buxbaum, O.; Svenson, O.:  
Zur Beschreibung von Betriebsbeanspruchungen mit Hilfe statistischer  
Kenngrößen  
ATZ 75 (1973), erscheint im März/April
- [14] Jaeckel, H.R.; Swanson, S.R.:  
Random Load Spectrum Test to Determine Durability of Structural  
Components of Automotive Vehicles  
In: Proceedings of the 12th International Automobile Technical Congress,  
FISITA, Barcelona (1968)
- [15] Topper, T.H.; Wetzel, R.M.; Morrow, J.D.:  
Neuber's Rule Applied to Fatigue of Notched Specimens  
Journal of Materials 4 (1969) Nr. 1, S. 200-209
- [16] Wellinger, K.; Gaßmann, H.; Luithle, J.:  
Plastische Wechselverformung und Dehnungsformzahl  
In: VDI-Berichte Nr. 129 (1968). Eine englische Übersetzung erschien unter  
dem Titel "Cyclic Plastic Deformation and the Strain Concentration Factor",  
LBF-Bericht Nr. TÜ-84 (1970)
- [17] Schütz, D.; Gökgöl, O.:  
Optimierung der verschraubten Fügung zwischen Flügelunterdecke und An-  
schlußbeschlag eines Militärflugzeuges  
Laboratorium für Betriebsfestigkeit, Darmstadt, Bericht Nr. TB-95 (1971)
- [18] Gassner, E.:  
Effect of Variable Load and Cumulative Damage of Fatigue in Vehicle and  
Airplane Structures  
In: Proceedings of the International Conference on Fatigue of Metals, London-  
New York 1956. Institution of Mechanical Engineers, London (1956),  
S. 304-309

- [19] Jacoby, G.:  
Das Problem der Schwingfestigkeit im Kraftfahrzeugbau  
Sonderdruck C. Schenck Maschinenfabrik, Darmstadt (1972)
- [20] Gassner, E.; Haibach, E.:  
Testing Procedures for the Design and Life Estimation of Fatigue-Sensitive Structures  
In: Structural Safety and Reliability. Ed. by Freudenthal, A., Pergamon Press Oxford, New York (1972), S. 299-321
- [21] Ostermann, H.:  
Einfluß der Kollektivform auf die Schwingfestigkeit der Aluminium-Legierung 3.1354.5 (Al Cu Mg 2)  
Laboratorium für Betriebsfestigkeit, Darmstadt, TM Nr. 36/68
- [22] Gassner, E.:  
On the Influence of Fretting Corrosion on the Fatigue Life of Notched Specimens of an Al Cu Mg 2 Alloy  
In: Proceedings of the Ninth ICAF-AGARD-Symposium, Paris 1961. Ed. by Barrois, W. u. Ripley, E.L., Pergamon Press London, Oxford, New York, Paris (1963), S. 87-95. Eine deutsche Übersetzung erschien unter dem Titel "Über den Einfluß der Reiboxydation auf die Lebensdauer gekerbter Proben aus einer Al Cu Mg 2-Legierung", Aluminium 39 (1963) Nr. 9, S. 582-584
- [23] Kowalewski, J.:  
Beschreibung regelloser Vorgänge  
Fortschritt.-Ber. VDI-Z. Reihe 5, Nr. 7. VDI-Verlag Düsseldorf (1969)
- [24] Gassner, E.; Schütz, W.:  
Assessment of the Allowable Design Stresses and the Corresponding Fatigue Life  
In: Fatigue Design Procedures, Proceedings of the 4th ICAF Symposium, München 1965. Ed. by Gassner, E. u. Schütz, W., Pergamon Press Oxford, New York (1969), S. 291-307
- [25] Gassner, E.:  
Performance Fatigue Testing with Respect to Aircraft Design  
In: Fatigue in Aircraft Structures. Ed. by Freudenthal, A.M., Academic Press Inc. New York (1956), S. 178-206
- [26] Gassner, E.:  
Ergebnisse aus Betriebsfestigkeits-Versuchen mit Stahl- und Leichtmetallbauteilen  
In: Bericht 152 der Lilienthal-Gesellschaft für Luftfahrtforschung (1942), S. 13-23

- [27] Bussa, S.L.; Sheth, N.J.; Swanson, S.R.:  
Development of a Random Load Life Prediction Model  
Ford Component Test and Development Activity Report 70-2204 (1970)
- [28] Jaeckel, H.R.:  
Simulation, Duplication, and Synthesis of Fatigue Load Histories  
Society of Automotive Engineers, New York, Paper 700032 (1970)
- [29] Sherratt, F.; Fisher, B.C.:  
Extracting Fatigue Testing and Design Data from Service Loading Records  
In: Conference on The Recording and Interpretation of Engineering Measurements, Joint British Committee for Stress Analysis. Ed. by The Institution of Marine Engineers, London (1972) Heft 2, S. 27-33
- [30] Kowalewski, J.:  
Über die Beziehungen zwischen der Lebensdauer von Bauteilen bei unregelmäßig schwankenden und bei geordneten Belastungsfolgen  
Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt, Mülheim, Bericht Nr. 249 (1963)
- [31] Bussa, S.L.:  
Fatigue Life of a Low Carbon Steel Notched Specimen under Stochastic Conditions  
Ford Motor Company, M. Sc. Thesis, Wayne State University, Detroit (1967)
- [32] Buxbaum, O.:  
Beschreibung einer im Fahrbetrieb gemessenen Beanspruchungs-Zeit-Funktion mit Hilfe der spektralen Leistungsdichte  
Laboratorium für Betriebsfestigkeit, Darmstadt, Bericht Nr. TB-102 (1972)
- [33] Talreja, R.:  
On Fatigue Life under Stationary Gaussian Random Loads  
Department of Solid Mechanics, The Technical University of Denmark (1972)
- [34] Slevenson, S.A.; Steiner, R.:  
Fatigue Life under Random Loading for Several Power Spectral Shapes  
NASA TR R-266 (1967)
- [35] Haibach, E.; Köbler, H.G.:  
Berechnung des Unregelmäßigkeitsfaktors  $N_0/N_1$  für einen stationären Gauß-Prozeß mit eingipfligem Spektrum der Leistungsdichte  
Laboratorium für Betriebsfestigkeit, Darmstadt, Bericht Nr. TB-97 (1972)
- [36] Conover, J.C.; Jaeckel, H.R.; Kippola, W.J.:  
Simulation of Field Loading in Fatigue Testing  
Society of Automotive Engineers, New York, Paper 660102 (1966)

- [37] White, D.J.; Lewszuk, J.:  
Cumulative Damage in Push-Pull Fatigue of Fillet-Welded Mild Steel Plate  
Subject to Narrow Band Random Loading  
In: Proceedings 1970-71 der Institution of Mechanical Engineers, London,  
S. 339-351
- [38] Lipp, W.:  
Simulation von Betriebsbeanspruchungen im Nachfahrversuch  
Laboratorium für Betriebsfestigkeit, Darmstadt, TM Nr. 59/71

PL V-221

Erläuterung der in den Abbildungen verwendeten Symbole

|                        |   |
|------------------------|---|
| STH                    | Beanspruchungs-Zeit-Funktion  |
| PSD                    | Verteilung der spektralen Leistungsdichte   |
| PSDS                   | Funktion (Form) der spektralen Leistungsdichte-Verteilung   |
| $f_c$                  | geometrische Mittenfrequenz   |
| $\Delta f$             | Verhältnis der Grenzfrequenzen (Breite des Spektrums)   |
| $\phi(f)$              | spektrale Leistungsdichte   |
| CFD                    | Summenhäufigkeits-Verteilung, Kollektiv   |
| cCFD                   | stetiges Kollektiv  |
| sCFD                   | getreptes Kollektiv   |
| H                      | Überschreitungshäufigkeit   |
| $H_0$                  | Gesamthäufigkeit aller Mittelwertdurchgänge in positiver Richtung   |
| CA                     | konstante Amplitude   |
| PCA                    | Programm konstanter Amplituden  |
| SGR/1                  | stationärer Gauß-Prozeß mit eingipfligem Spektrum der Leistungsdichte                                     |
| SGR/2                  | stationärer Gauß-Prozeß mit zweigipfligem Spektrum der Leistungsdichte                                    |
| QSR                    | quasistationärer Zufallsprozeß mit zweigipfligem Spektrum der Leistungsdichte und veränderlichem RMS-Wert |
| SD                     | betriebsgleiche Lastenfolge   |
| $\epsilon_m$           | Mitteldehnung   |
| $\epsilon_a$           | Dehnungsamplitude   |
| $\bar{\epsilon}_a$     | maximale Dehnungsamplitude eines Kollektivs   |
| $\bar{\epsilon}_{a,f}$ | fiktive maximale Dehnungsamplitude  |
| $\epsilon_{RMS}$       | positive Quadratwurzel aus dem quadratischen Zeitmittelwert der Dehnung, Effektivwert                     |
| RMSD                   | spektrale Leistungsdichte-Verteilung des RMS-Wertes   |
| $S_E$                  | dauerfest ertragbare Dehnung bzw. Spannung  |
| $N_E$                  | Lastspielzahl am "Abknickpunkt" der Wöhlerlinie zur Dauerfestigkeit                                       |
| $\bar{N}_0$            | Anzahl der bis Bruch ertragenen Mittelwertdurchgänge der Dehnung  |
| k                      | Exponent der Wöhlerlinie  |

PL V-221

| Test-Method | STH | PSD | CFD | Main Parameters  |
|-------------|-----|-----|-----|--|
| CA          |     |     |     | Description: $\epsilon_m ; \epsilon_a ; f$<br>Simulation: $\epsilon_m ; \epsilon_a ; f$  |
| PCA         |     |     |     | Description: $\epsilon_{m1} = \epsilon_{m2} = \dots = \epsilon_{mn}$<br>$f_1 = f_2 = \dots = f_n$<br>cCFD<br>Simulation: $\epsilon_m ; \epsilon_{a1} ; f$<br>$\epsilon_{a2}/\epsilon_{a1} ; \dots ; \epsilon_{an}/\epsilon_{a1}$<br>sCFD ; SEQ |
| SGR/1       |     |     |     | Description: PSDS<br>Simulation: $\epsilon_m ; \epsilon_{RMS}$<br>$C = \bar{\epsilon}_a / \epsilon_{RMS}$<br>$f_{c1} ; (f_{c2}) ; \Delta f$<br>CFD   |
| SGR/2       |     |     |     | Description: PSDS<br>Simulation: $\epsilon_m ; \epsilon_{RMS}$<br>$f_{c1} ; f_{c2} ; \Delta f$<br>CFD ; RMSD   |
| QSR         |     |     |     | Description: PSDS<br>Simulation: $\epsilon_m ; \epsilon_{RMS}$<br>RMSD   |
| SD          |     |     |     | Description: PSDS<br>Simulation: $\epsilon_m$<br>$\epsilon_{RMS}$  |

Bild 1 Beanspruchungs-Zeit-Funktion, Parameter zu ihrer Beschreibung und Simulation

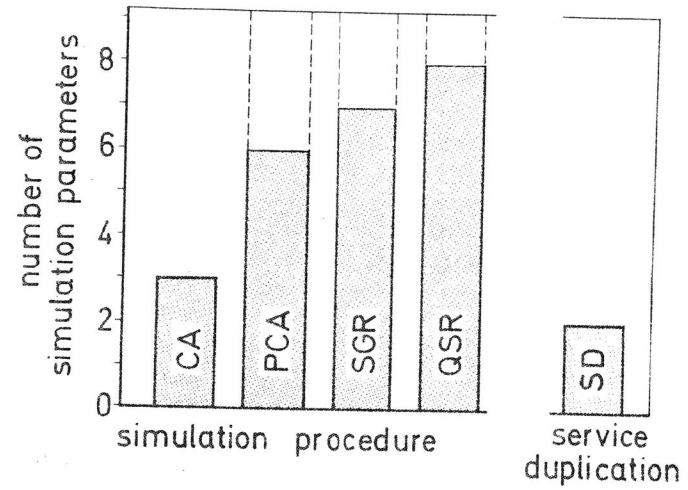


Bild 2 Zahl der Simulationsparameter für unterschiedlich betriebsnahe Wieder-gabe von Beanspruchungs-Zeit-Funktionen

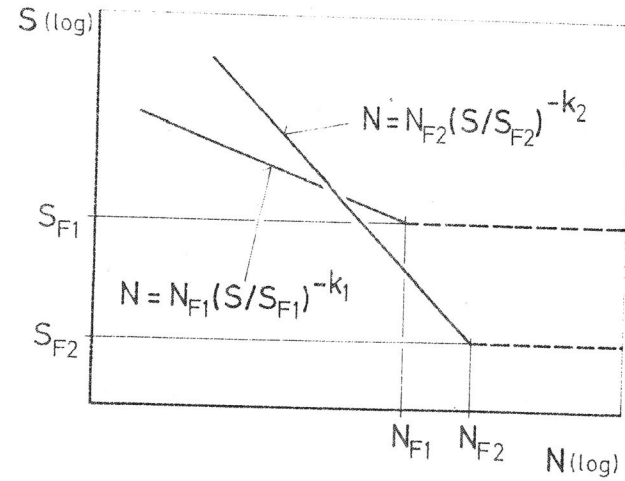


Bild 3 Wöhlerlinien mit verschiedener Neigung k

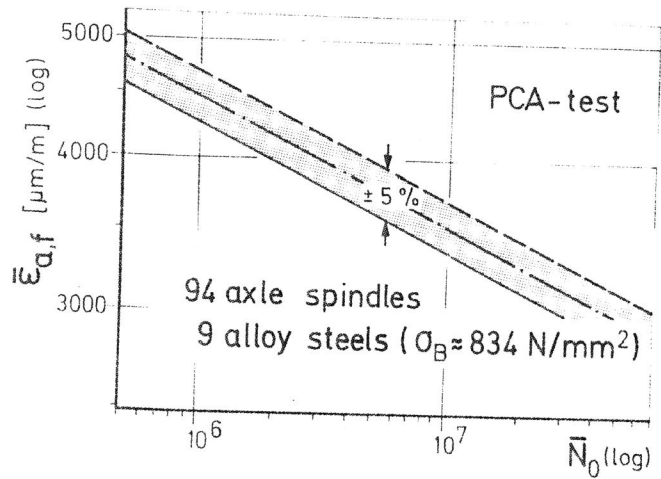


Bild 4 Fiktives Anstrengungsmaß  $\bar{\epsilon}_{a,f}$  in Abhängigkeit von der Lebensdauer

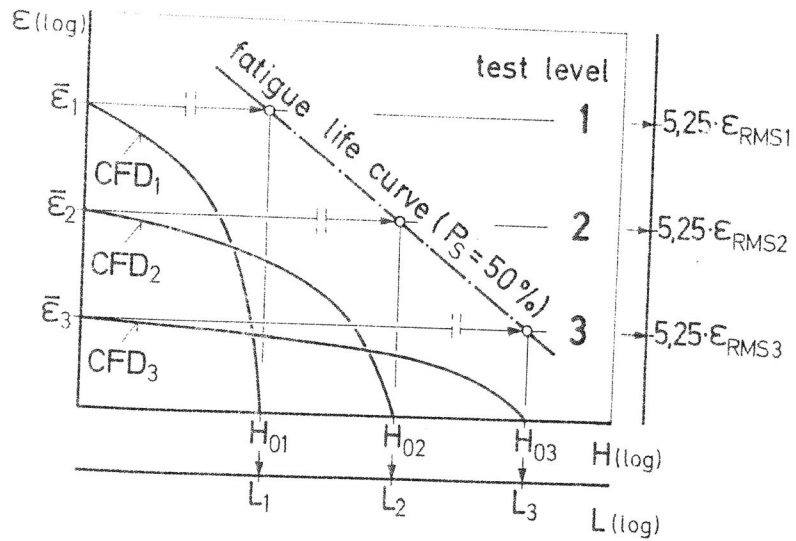


Bild 5 Darstellung der Ergebnisse aus Betriebsfestigkeits-Versuchen mit zufallsartigen Beanspruchungen in Form von Lebensdauerlinien

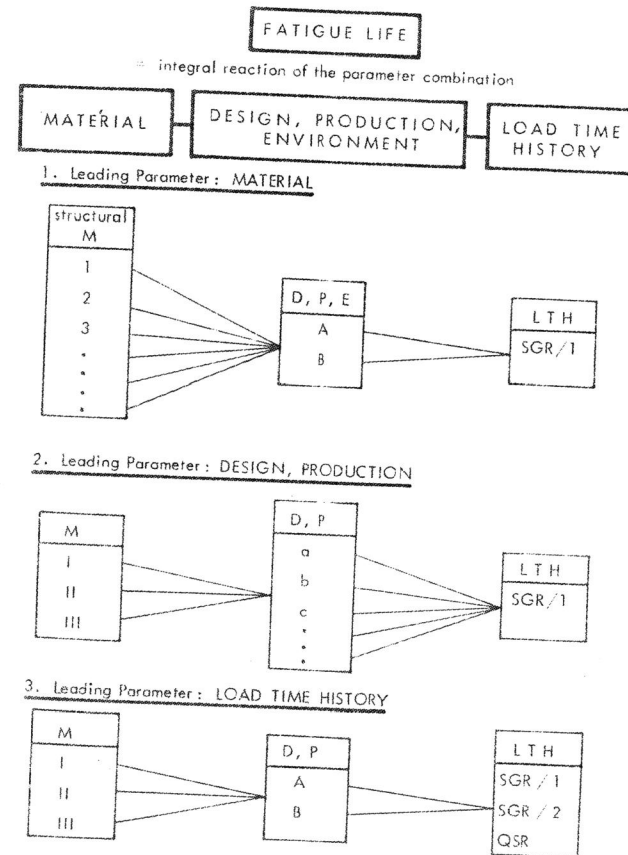


Bild 6 Planungskonzept für Grundsatzversuche zur Lebensdauerermittlung