

Zählverfahren in der Betriebsfestigkeit

M. Köhler
S. Jenne
K. Pötter
H. Zenner

課と水といる。同図2-DEFGKA はABC
と同じ形とあり。小ループの底力振幅が与
えられれば、二本に底力振幅と繰返し
応力曲線より寿命を推定すれば、
安全側の推定となるから簡便なため、こ
れより取扱いを詳述する。

1) 塑性歪と寿命の法則: F 式(2)式と与
えらる $MANSON, COFFIN$ の関係がき裂の発
生繰返し数と、繰返し塑性歪 $\Delta\epsilon_p$ の間に成立
する材料と対象と有る。工業的使用材料は
広くこの法則に $(n=10^7)$ とおき課され
てい。

$$(N)^0 = \frac{24}{\Delta\epsilon_p} \quad (3)$$

に $F=1$ 、 A, B は材料の常数。

2) 疲労被害の法則: き裂発生までの損
傷 D は、塑性歪り累積返し数 N と同一塑性
歪りのもとでのき裂発生までのループ数
返し数 N との比と有ると有る。

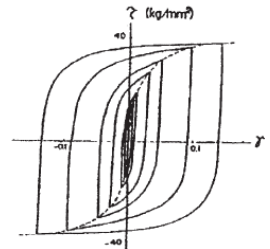


図4. 履歴曲線型に繰返し応力歪曲線
(S.S.C. 実験)

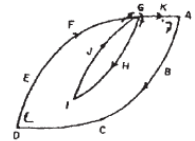


図5. 負荷方向変化等による履歴曲線の形状
変化、履歴曲線による材料の劣化効果

Zählverfahren in der Betriebsfestigkeit

Cycle Counting in Fatigue Analysis

M. Köhler, S. Jenne, K. Pötter, H. Zenner

Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V.

Zählverfahren in der Betriebsfestigkeit

Cycle Counting in Fatigue Analysis

M. Köhler, S. Jenne, K. Pötter, H. Zenner

Titelbild aus:

Endo, T.; Mitsunaga K.; Nakagawa, H.

Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress - Prediction of Fatigue Lives

Preliminary Proceedings of the Chugoku-Shikoku District Meeting

The Japan Society of Mechanical Engineers, November 1967

1. Auflage

Berlin : DVM 2010

ISSN 1863-0545

Alle Rechte vorbehalten

© DVM, Berlin 2010

Druck und Bindearbeit: Copy King, Berlin

Autoren:

Dipl.-Ing. Michael Köhler

Studium des Allgemeinen Maschinenbaus an der TU Clausthal, seit 2005 tätig bei Mercedes AMG in Affalterbach, verantwortlich für Betriebsfestigkeit Chassis/Triebstrang

Dr.-Ing. Sven Jenne

Studium des Allgemeinen Maschinenbaus an der TU Clausthal, Promotion 2004, seit 2003 tätig bei der DB AG in Minden

Dr.-Ing. Kurt Pötter

Studium des Allgemeinen Maschinenbaus an der TU Clausthal, Promotion 2000, seit 2000 tätig bei der BMW AG in München, Leiter Kundenkollektive und Lastanalysen

Prof. Dr.-Ing. Harald Zenner

Von 1985 bis 2003 Direktor des Institutes für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit der TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld

Abstrakt

Beanspruchungsmessungen an Bauteilen im Betrieb ergeben in der Regel zeitlich veränderliche Signale, das heißt das Bauteil wird schwingend beansprucht. Der Festigkeitsnachweis muss dann statisch für die maximal auftretende Beanspruchung und dynamisch für die auftretende Schwingbeanspruchung geführt werden. Der Festigkeitsnachweis ist immer ein Vergleich zwischen Beanspruchbarkeit und Beanspruchung. Bei statischer Beanspruchung muss die Beanspruchbarkeit mit einem Sicherheitsabstand über der maximalen Beanspruchung liegen, bei schwingender Beanspruchung muss die geforderte Lebensdauer mit einem Sicherheitsabstand größer sein als die vorgegebene Nutzungsdauer (Betriebsfestigkeitsnachweis). Dieser Sicherheitsabstand richtet sich nach den Folgen im Fall eines Bauteilversagens und den Möglichkeiten einer regelmäßigen Inspektion.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der messtechnischen Ermittlung und Verarbeitung der Beanspruchungszeitsignale. Die Kenntnis der Bauteilbeanspruchung ist die Voraussetzung für eine sichere Lastannahme beim Festigkeitsnachweis. Die Messung der Bauteilbeanspruchung unter realistischen Betriebsbedingungen ist der beste, allerdings nicht immer mögliche Weg, um zu einer zuverlässigen Kenntnis der Bauteilbeanspruchung zu kommen. Das Ergebnis einer Messung sind Beanspruchungszeitfunktionen BZFn. Theoretisch wäre es möglich, mit diesen gemessenen BZFn direkt einen Festigkeitsnachweis zu führen, rechnerisch mit dem Örtlichen Konzept (Folge von Umkehrpunkten) oder experimentell durch Nachfahren der gemessenen Signale in einem Prüfstand. Dies aber sind Ausnahmefälle.

Im Allgemeinen ist die Messdauer verglichen mit der Nutzungsdauer gering, so dass sich die Frage der Extrapolation stellt. In der Regel liegen verschiedene Betriebszustände vor, bei einer Radsatzwelle der Eisenbahn zum Beispiel Geradeausfahrt, Bogenfahrt, Weichenüberfahrt und Bremsen, sowie unterschiedliche Beladungszustände, die realistisch in ihrer Häufigkeit zu gewichten sind. Bei Fahrzeugen und Maschinenanlagen treten Sonderereignisse auf, die zu Überlasten führen können und sich einer Messung oft entziehen (z.B. Blockiervorgang bei einem Walzwerk).

Da die Lebensdauer bei schwingender Beanspruchung in erster Linie von der Höhe und Häufigkeit der Amplituden abhängt, geht es bei der Kennzeichnung der Beanspruchung darum, die BZF in eine Häufigkeitsverteilung zu transformieren. Das Werkzeug hierfür liefern die Zähl- oder Klassierverfahren, die in dieser Arbeit beschrieben und bewertet werden.

Das Ergebnis der Klassierung ist bei einparametrischen Zählverfahren das Beanspruchungskollektiv und bei zweiparametrischen Zählverfahren die Beanspruchungsmatrix. Bei der zweiparametrischen Zählung kann entweder die Amplitude und die Mittelspannung einer BZF gezählt (z.B. Rainflow-Zählung) oder zwei unabhängige Größen gemeinsam klassiert werden (z.B. zweiparametrische Momentanzählung). Das Kollektiv und die Matrix werden verwendet

- zur Lebensdauerberechnung von Bauteilen (Schadensakkumulation)
- zur rechnerischen Beurteilung der Härte einer BZF (Kollektivvergleich z.B. für

unterschiedliche Strecken oder Fahrer)
- zur Rekonstruktion von BZFn für Betriebsfestigkeitsversuche.
Für eine visuelle Betrachtung ist ein Kollektiv anschaulicher als eine Matrix.

Die Transformation von der BZF zum Kollektiv/Matrix bringt einen Informationsverlust. Verloren gehen bei der Klassierung die Frequenz der Beanspruchung, die Reihenfolge und die Schwingungsform. Dies bedeutet, dass die Ergebnisse der Lebensdauerberechnung fehlerbehaftet sind, wenn die Frequenz, die Reihenfolge oder die Schwingungsform einen Einfluss auf die Lebensdauer haben.

Die Zählverfahren haben sich historisch entwickelt, wobei die Entwicklung der Messtechnik und der Datenverarbeitung einen Einfluss ausgeübt haben. Seit Jahren ist, auch international, ein recht einheitlicher Stand erreicht: Für graphische Darstellungen werden bevorzugt Kollektive der Bereichspaarzählung BPZ und der Klassengrenzenüberschreitungszählung KGÜZ verwendet, für die Lebensdauerberechnung die Rainflowzählung RFZ oder die BPZ (ohne und mit Amplitudentransformation). Einparametrische Zählergebnisse, z.B. für die KGÜZ und die BPZ, können aus der RFZ abgeleitet werden. Die Rainflowzählung hat sich deshalb als Standard für die Auswertung von Messungen durchgesetzt. Die Vor- und Nachteile der Zählverfahren sind in der vorliegenden Arbeit erläutert.

Die RFZ ist das einzige Zählverfahren mit einem physikalischen Hintergrund. Gezählt werden nicht zeitlich aufeinanderfolgende Schwingspiele bzw. Umkehrpunkte sondern geschlossene Hysteresen. Die geschlossene Hysterese (oder: Das Zählereignis) repräsentiert die Schwingbreite und die Lage der Spannungs-Dehnungs-Hysterese für ein Volumenelement an der kritischen Stelle. Der Flächeninhalt einer Hysterese kann als Energieeinbringung in das Volumenelement interpretiert werden. Diese Vorgehensweise geht konform mit dem Örtlichen Konzept. Für die Rainflowzählung sprechen zwei Tatsachen:

Vergleicht man die Lebensdauer im Versuch mit der in der Berechnung, so ist bekanntlich die Streuung groß. Vergleicht man dabei den Einfluss der Zählverfahren, so ist die Streuung bei der RFZ am geringsten.

Aus einer vorliegenden Rainflow-Matrix kann man, je nach dem Algorithmus zur Bildung von Zufallszahlen, praktisch beliebig viele Beanspruchungsfolgen erzeugen, die zu derselben Matrix gehören. Durch Versuche ist nachgewiesen, dass die unterschiedlichen Lastfolgen zur gleichen Lebensdauer führen.

Die Ergebnisse der Zählverfahren sind nur für den Sonderfall gleich, wenn der Unregelmäßigkeitsfaktor $I = 1$ beträgt, d.h. wenn ganze Schwingspiele vorliegen (schmalbandige Signale). Sonst können sich die Zählergebnisse, insbesondere in Abhängigkeit der Mittelspannungsänderung, stark unterscheiden. Das bedeutet, dass die berechneten Lebensdauern von Zählverfahren zu Zählverfahren deutlich variieren. Werden in der Literatur sog. effektive Schadenssummen (Vergleich Lebensdauer Versuch/Rechnung) angegeben, so macht dies nur Sinn, wenn auch das Zählverfahren und die Schadensakkumulationshypothese mit angegeben sind.

In der vorliegenden Arbeit werden neben den Zählverfahren der Betriebsfestigkeit die Verweildauer- bzw. die Momentanwertzählung behandelt, mit denen die Verweildauer von Größen wie Temperatur und Drehzahl bestimmt wird, die für die Lastannahme von Interesse sein können, z.B. bei der Beanspruchung von Zahnflanke und Zahnfuß bei Getrieben. Gleiches gilt für die zweiparametrische Verweildauer- bzw. Momentanwertzählung. Neu ist der Vorschlag einer bezogenen Momentanwertzählung, die sowohl einparametrisch als auch zweiparametrisch verwendet wird. Als Erweiterung der Momentanwertzählung ist die Klassenhäufigkeit nicht abhängig von der Verweildauer sondern von einer weiteren Referenzgröße, z.B. der Drehzahl. Daher eignet sie sich besonders für die Klassierung von BZFn an rotierenden Bauteilen.

Erläutert wird die Anwendung der Zählverfahren bei mehrachsigen Belastungen und Beanspruchungen. Für komplexe Beanspruchungen, z.B. mehrere Kraftkomponenten mit variablen Amplituden, mit Phasenverschiebung oder unterschiedlicher Frequenz, stößt man gegenwärtig an Grenzen. Hierfür geeignete Zählverfahren zu entwickeln, ist noch Gegenstand der Forschung.

Schließlich werden noch detaillierte Empfehlungen gegeben zur Anwendung der Zählverfahren, zur Ermittlung repräsentativer Kollektive, zur Festlegung der relevanten Messfrequenz, zur Bestimmung der erforderlichen Messdauer sowie zur Auswertung sehr umfangreicher Betriebsmessungen.

Abstract

Stress measurements on components in operation usually result in signals which vary as a function of time; that is, the component is subjected to alternating stress. Consequently, a static stress assessment must be performed for the maximal stress, and a dynamic stress assessment for the fatigue stress. The strength analysis always involves a comparison between the strength and the stress. In the case of static stress, the strength must exceed the maximal stress by a certain safety factor. In the case of alternating stress, the required lifetime must exceed the allowable operating lifetime by a certain safety factor (assessment for structural durability under operating conditions). This safety factor depends on the consequences of a component failure and on the feasibility of inspection at regular intervals, /FKM 03/.

The present special publication is concerned with the measurement and evaluation of the stress-time function. Knowledge of the stress on components is the prerequisite for a reliable load assumption for the strength assessment. The measurement of the stress on components under realistic operating conditions is the best method for obtaining reliable knowledge of the component stress, although this is not always feasible. The result of a measurement provides stress-time functions. Theoretically, it would be possible to perform a stress assessment directly with the measured stress-time functions, either by calculation with the local strain concept (sequence of turning points) or experimentally by applying the measured signals as input on a test stand. These are exceptional cases, however.

In general, the time of measurement is very short in comparison with the time of service; consequently, questions of extrapolation arise. As a rule, various operating states occur. These conditions must be weighted realistically with respect to their frequency of occurrence. In vehicles and machine plants, exceptional events which can result in overloading (for instance, locking processes in a rolling mill) often escape measurement.

Since the fatigue life under alternating stress depends primarily on the magnitude and frequency of occurrence of the amplitudes, the stress-time functions must be transformed to a frequency distribution for characterizing the stress. The tools employed for this purpose are realised by the counting methods which are described and evaluated in this special publication.

In the case of one-parameter counting methods, the result of counting is the load spectrum, whereas two-parameter counting methods yield the load matrix. For two-parameter counting it is possible to count either the amplitude and the mean stress of a stress time function (e.g. Rainflow-Counting) or classify two independent signals simultaneously (e.g. two-parameter Level Distribution Counting). The load spectrum and matrix are employed for

- calculating the fatigue life of components (damage accumulation),
- appraising the severity of a stress-time function by calculation (spectrum comparison, for instance, for different roads or drivers),
- reconstructing stress-time functions for the assessment of structural durability

under operating conditions.

For a visual consideration, a spectrum is more easily visualized than a matrix.

The transformation of the stress-time functions to a spectrum / matrix results in a loss of information. The stress frequency, the sequence, and the shape of the load cycle are lost during the counting. This means that the results of the fatigue-life calculation are incorrect whenever the frequency, the order, or the shape of the load cycle affects the lifetime. During the history of counting methods, a decisive factor has been the development of the measuring technology and data processing. Throughout the years a certain level of agreement has been achieved, also at the international level: Spectra obtained by range-pair counting and level-crossing counting are preferentially employed for graphical representations, whereas the rainflow counting or range-pair counting (without and with amplitude transformation) are employed for the lifetime calculation. One-parameter counting results, for instance, from level-crossing counting and range-pair counting, can be derived from rainflow counting results. The rainflow count has therefore become established as a standard for the evaluation of measurements. The advantages and disadvantages of the counting methods are described in the present special publication.

Rainflow counting is the only counting method with a physical background. Closed hysteresis loops are counted with this method, rather than successive load cycles or turning points. For a volume element at the critical point of the component, a closed loop represents the range of stresses during one cycle and the position of the stress-strain hysteresis. The area of a hysteresis loop can be interpreted as the energy input into the volume element. This procedure is in conformity with the local strain concept. Arguments in favour of rainflow counting are supported by the following two facts:

As is well known, a comparison of the calculated lifetime with the experimentally determined value is characterised by great scatter. However, if the effect of the counting method is compared, the least scatter occurs with the use of the rainflow counting /Euli 94/, /Euli 97/.

From an existing rainflow matrix, practically any arbitrary number of load sequences can be generated for one and the same matrix, as dictated by the algorithm applied for generating random numbers. Tests have shown that the different load sequences result in the same lifetime /Perr 87/.

The results obtained by the various counting methods are equal only in the special case in which the irregularity factor is equal to unity, $I=1$, that is, if complete load cycles are present (narrow-band random signal). Otherwise, the counting results can differ greatly, especially as a function of the mean-stress variation. This implies that the calculated lifetime will vary decidedly from one counting method to the next. So-called effective damage sums (comparison of experimental and calculated lifetimes) are given in the literature, but these values make sense only if the counting method and the damage accumulation hypothesis are also indicated.

In the present publication, time-at-level counting and level-distribution counting are considered, in addition to the counting methods for the operating strength. Thus, the time at level can be determined for parameters such as the temperature and rotational speed, which can be of interest for the load assumption, for instance, in considering the stress on the profile and dedendum of a gear tooth. The same consideration applies to two-parameter time-at-level or level-distribution counting. A new feature is the proposal for relative level-distribution counting, which is employed for one-parameter as well as two-parameter counting. As an extension of level-distribution counting, the class frequency does not depend on the time at level; instead, it depends on a second reference parameter, such as the rotational speed. Hence, it is especially well suited for the classification of stress-time functions on rotating components.

The application of the counting methods to multiaxial loads and stresses is discussed. The consideration of complex stresses, for instance, several force components with variable amplitude, with a phase shift or a different frequency, is still subject to limitations. The development of appropriate counting methods for such purposes is still the object of present research.

Finally, detailed recommendations are given for applying the counting methods, for determining representative spectra, for specifying the relevant measuring frequency, for determining the necessary duration of the measurements, as well as for evaluating highly extensive operational measurements.

Inhalt

Vorwort	17
1. Einführung	19
2. Beschreibung der Zählverfahren	21
2.1 Grundlagen	21
2.2 Normen	23
2.3 Einparametrische Zählverfahren	24
2.3.1 Spitzenzählung SZ	24
2.3.2 Klassengrenzenüberschreitungszählung KGÜZ	25
2.3.3 Bereichszählung BZ	27
2.3.4 Bereichspaarzählung BPZ	28
2.4 Zweiparametrische Zählverfahren	30
2.4.1 Bereichs-Mittelwert Zählung BMZ	30
2.4.2 Von-Bis-Zählung	31
2.4.3 Bereichspaar-Mittelwert Zählung BPMZ	32
2.4.4 Rainflow-Zählung RFZ	34
3. Ableitung von Kollektiven aus Matrizen	39
3.1 Übergangsmatrix	39
3.2 Rainflowmatrix	44
4. Vergleich der Zählverfahren für vier Beispiel-Beanspruchungszeitfunktionen	51
4.1 Untersuchte Beanspruchungszeitfunktionen	51
4.2 Randombeanspruchung mit Unregelmäßigkeitsfaktor $I = 0,99$	51
4.3 Randombeanspruchung mit Unregelmäßigkeitsfaktor $I = 0,7$	52
4.4 Gedämpfte Schwingung	54
4.5 Überlagerte Sinus-Sinusbeanspruchung	55
5. Verweildauer- und Momentanwertzählung	57
5.1 Einparametrisch	57
5.1.1 Verweildauerzählung VZ	57
5.1.2 Momentanwertzählung MWZ	58
5.1.3 Bezogene Momentanwertzählung	59
5.2 Zweiparametrisch	61
5.2.1 Zweiparametrische Verweildauerzählung	61
5.2.2 Zweiparametrische Momentanwertzählung	61
5.2.3 Bezogene zweiparametrische Momentanwertzählung	62
6. Mehrachsige Belastungen und Beanspruchungen	65
6.1 Begriffsklärung	65
6.2 Messtechnische Erfassung	66
6.3 Klassierung mehrachsiger Belastungen	66
6.4 Klassierung mehrachsiger Spannungszustände	67

7.	Hinweise zur Anwendung der Zählverfahren	69
7.1	Grundsätzliche Bemerkungen	69
7.2	Empfehlungen	70
7.2.1	Grafische Darstellung	70
7.2.2	Lebensdauerberechnung	71
7.2.3	Praktische Erfahrungen	73
8.	Empfehlungen zur Ermittlung repräsentativer Kollektive	77
8.1	Vorbemerkung	77
8.2	Festlegung der relevanten Messfrequenz	77
8.3	Ermittlung von Teilkollektiven	78
8.4	Bildung von Gesamtkollektiven	78
8.5	Bestimmung der erforderlichen Messdauer	79
8.6	Empfehlung für die Auswertung umfangreicher Betriebsmessungen	81
9.	Literatur	83
10.	Abkürzungsverzeichnis	92

Vorwort

Die vorliegende Arbeit geht zurück auf ein Forschungsvorhaben der Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA), Arbeitskreis „Lastkollektive“, Obmann Dr. W. Fischer, „Sonderereigniskollektive - Kennzeichnende Zeitfunktionen und Kollektive für Anlagen und Arbeitsprozesse“, in dem u.a. eine Darstellung und Bewertung der Zählverfahren vorgenommen wurde, /West 88-I/. Die Ergebnisse sind in dem FVA-Merkblatt 0/14 "Zählverfahren zur Bildung von Kollektiven aus Zeitfunktionen - Vergleich der verschiedenen Verfahren und Beispiele" von der wissenschaftlichen Bearbeiterin des Forschungsvorhabens, Frau Dipl.-Ing. A. Westermann-Friedrich, zusammengefasst worden, /West 88-II/.

Seither hat es bei den Zählverfahren spezifische Weiterentwicklungen gegeben. Bei Belastungsmessungen im Betrieb und bei der Anwendung der Ergebnisse im Festigkeitsnachweis sind neue Erfahrungen gesammelt worden. Die Rainflow-Zählung hat sich weltweit etabliert.

Die vorliegende Arbeit verdankt sich zwei Gründen: Seit Langem wurde an die Autoren immer wieder der Wunsch einer Aktualisierung herangetragen. Nach wie vor ist die Anwendung der Zählverfahren nicht unproblematisch, wie Diskussionen immer wieder zeigen.

Beschrieben werden die wichtigsten Zählverfahren mit ihren Vor- und Nachteilen. Die Unterschiede der Zählverfahren werden anhand von Beispiel-Beanspruchungszeitfunktionen (Beispiel-BZFn) erläutert. Eingegangen wird auf spezifische Anwendungen. Empfehlungen werden gegeben zur Ermittlung von repräsentativen Kollektiven. Einige Randgebiete wie die Generierung (Rekonstruktion) von BZFn aus Kollektiven und Matrizen, die Standardisierung von BZFn und Kollektiven sowie die Zählung bei komplexen mehrachsigen Beanspruchungen konnten nur gestreift werden.

Im Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit der TU Clausthal wurden in den vergangenen zwei Jahrzehnten die Zählverfahren immer wieder kritisch hinterfragt. Die dabei gemachten Erfahrungen sind zusammen mit neueren Ergebnissen aus der Literatur in die vorliegende Arbeit eingeflossen.

Herrn Dr. W. Fischer, dem langjährigen Obmann des FVA-Arbeitskreises "Lastkollektive" sei an dieser Stelle nochmals gedankt für die nicht ermüdende Unterstützung der Projekte, für die kritische Durchsicht des vorliegenden Berichtes so wie für Ergänzungen zur Anwendung der Zählverfahren.

Die Autoren
September 2009

1. Einführung

Die Festigkeitsbemessung von Bauteilen stellt einen Vergleich zwischen Belastbarkeit und Belastung bzw. Beanspruchbarkeit und Beanspruchung dar. Bei den meisten Bauteilen und Strukturen treten schwingende Beanspruchungen auf, und zwar fast ausnahmslos mit variabler Amplitude. Für die Lastannahme, d.h. für die Kennzeichnung der der Berechnung zugrunde zu legenden Belastung werden Kollektive und Matrizen verwendet, die Häufigkeitsverteilungen von Schwingspielen darstellen. Diese werden, soweit möglich, aus Betriebsmessungen gewonnen. Sie sind die Basis für die rechnerische Lebensdauerabschätzung sowie in vielen Fällen auch für den experimentellen Lebensdauernachweis.

Für die Belange der Betriebsfestigkeit, d.h. im Hinblick auf eine Lebensdauerabschätzung für Bauteile, interessiert in erster Linie die Größe der Beanspruchungsamplituden und deren Häufigkeit. Der Frequenzinhalt der BZF, die Reihenfolge des Auftretens der Ereignisse und die Schwingungsform werden dabei vernachlässigt. Damit können die in der BZF enthaltenen Informationen reduziert werden, z.B. auf die Größe und Häufigkeit der auftretenden Maxima und Minima. Für diese Datenreduktion stehen verschiedene Zählverfahren, auch Klassierverfahren genannt, zur Verfügung.

Bei der Anwendung von Zählverfahren ist deshalb zu prüfen, ob im spezifischen Anwendungsfall die Voraussetzungen für die Vernachlässigungen zulässig sind. So kann die Vernachlässigung des Frequenzinhaltes nicht zulässig sein, wenn ein zeitabhängiges Werkstoff- und Bauteilverhalten auftritt, wie zum Beispiel bei hohen Temperaturen im Kriechbereich, bei Ermüdung in korrosiven Medien oder bei Elastomeren zum Beispiel bereits bei normalen Umgebungsbedingungen. Ein Reihenfolgeeinfluss der Belastung auf die ertragbare Lebensdauer lässt sich im Labor als signifikant nachweisen, zum Beispiel im high-low und low-high-Zweistufenversuch oder beim Aufbringen von Überlasten zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Dagegen aber steht die Jahrzehnte lange Erfahrung, dass bei Auftreten von sehr vielen Schwingspielen und einer starken Durchmischung kleiner und großer Amplituden die Reihenfolge der Belastung keinen Einfluss ausübt. Für mehrachsige, nichtproportionale Beanspruchung ist bekannt, dass die Schwingungsform (Dreieck, Sinus, Trapez) die Lebensdauer und die Höhe der Dauerfestigkeit beeinflusst, /Liu 93/.

Die erste Anwendung von Zählverfahren fällt zeitlich zusammen mit dem Beginn der Betriebsfestigkeit (1938), /Gaßn 41/. Seither sind eine Reihe von Zählverfahren für die Belange der Betriebsfestigkeit veröffentlicht worden. Die Entwicklung von Verfahren war dabei eng an die Entwicklung von in Flugzeugen einsetzbaren Zählgeräten gekoppelt /Schi 63/. Heute stehen leistungsfähige Rechner und Speichermedien zur Verfügung. War in der Vergangenheit durch die begrenzten Ressourcen eine Notwendigkeit zur online-Klassierung gegeben, können heute große Datenmengen zum Teil über Stunden als transiente Signale aufgezeichnet werden. Die anschließende Datenreduktion durch Zählverfahren ist damit heute, neben anderen Verfahren der allgemeinen Signalanalyse, hauptsächlich ein Instrument zur Kennwertermittlung. Ein häufig verwendeter Kennwert zum Vergleich von Messungen ist die Schadenssumme. Sie ergibt sich durch eine Schadensakku-

mulationsrechnung gegen eine reale oder fiktive Wöhlerlinie. Wird eine fiktive Wöhlerlinie verwendet, liefert die Schadenssumme keine Aussage bezüglich der tatsächlichen Bauteilschädigung, sondern dient ausschließlich der vergleichenden Analyse von Messdaten.

Früher wurden in der Praxis mehrere Zählverfahren angewendet, wobei teilweise eine Mittelung der für verschiedene Zählverfahren ermittelten Kollektive vorgenommen wurde, /Lipp 67/, /Sons 07/. Heute hat sich für die Lebensdauerberechnung und die Generierung von BZFn die Rainflow-Zählung durchgesetzt.

Das Ergebnis einer Zählung ist eine Häufigkeitsverteilung oder eine Häufigkeitsmatrix. Die Häufigkeitsverteilung, d.h. das Kollektiv, zeigt in anschaulicher Weise die Größe und Häufigkeit der gemessenen Beanspruchungen. Anwendungen sind

- die Kontrolle von Messungen (Plausibilität z.B. im Hinblick auf die Extremwerte, den Mittelwert und die Häufigkeit)
- der qualitative und quantitative Vergleich von Messungen zur Beurteilung unterschiedlicher Betriebszustände (Kollektiv-Form, Schadenssumme)
- die rechnerische Lebensdauerabschätzung
- die Trennung von Beanspruchungsursachen soweit möglich, z.B. durch die Bildung von Teilkollektiven
- die Generierung von BZFn für die Durchführung von Betriebsfestigkeitsversuchen.

Grundsätzlich gibt es mehrere Möglichkeiten, Ereignisse einer kontinuierlichen BZF zu zählen:

- die Messgröße erreicht einen Umkehrpunkt (Maximum, Minimum)
- die Messgröße überstreicht einen Bereich, d.h. sie geht von einem Minimum zum nächsten Maximum und umgekehrt
- die Messgröße schließt Hysteresen in positiver und negativer Richtung
- die Messgröße kreuzt oder überschreitet einen vorgegebenen Horizont in positiver oder negativer Richtung
- die Messgröße wird für äquidistante Zeitpunkte bestimmt
- die Messgröße wird zu Zeitpunkten bestimmt, die von einer anderen Größe, z.B. Drehzahl oder Drehwinkel vorgegeben werden.

Die kennzeichnenden Größen für die Beanspruchbarkeit sind die Amplitude und der Mittelwert eines Schwingspiels bzw. das Maximum und Minimum. Je nachdem, ob die Amplitude bzw. Klassengrenze allein gezählt wird oder das Wertepaar Amplitude und Mittelwert bzw. Maximum und Minimum, unterscheidet man ein- und zwei-parametrische Zählverfahren.

Die Zählverfahren können das Kollektiv und damit das Ergebnis der rechnerischen Lebensdauerabschätzung stark beeinflussen. Je nach Art der BZF sind die Unterschiede größer oder kleiner. Die Bewertung einer BZF ist dabei stark abhängig von Mittellaständerungen. Aus Sicht der Betriebsfestigkeit ist dem Zählverfahren der Vorzug zu geben, das die für die Lebensdauer maßgebende Schädigung am Besten erfasst. Nach heutigem Kenntnisstand ist das die Rainflow-Zählung, /Euli 94/, /Euli 97/.