



Prof. em. Dr.-Ing. habil. Günter Schott

# Werkstoffermüdung – Ermüdungsfestigkeit

Unter Mitarbeit von  
Prof. Dr. nat. Michael Schaper  
Dr.-Ing. Helga Worch



WILEY-  
VCH

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Aus technischen Gründen bleibt diese Seite leer

# Werkstoffermüdung – Ermüdungsfestigkeit

herausgegeben von  
Günter Schott

Aus technischen Gründen bleibt diese Seite leer

Prof. em. Dr.-Ing. habil. Günter Schott

# Werkstoffermüdung – Ermüdungsfestigkeit

Unter Mitarbeit von  
Prof. Dr. nat. Michael Schaper  
Dr.-Ing. Helga Worch



WILEY-  
VCH

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung.

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 1997 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

**ISBN** 978-3-527-30958-0

---

# Vorwort

Bislang war der Nachweis ausreichender Ermüdungsfestigkeit eine Domäne des Leichtbaus, nun ist er in zunehmendem Maße auch eine zu erfüllende Forderung für alle ermüdungsgefährdeten Bauteile. Konstrukteure, Berechnungsingenieure, Technologen, Werkstoff- und Versuchsingenieure benötigen für Entwurf, Berechnung, Herstellung und Festigkeitsversuch von wechselbeanspruchten Bauteilen umfassende Kenntnisse über

- das Betriebsfestigkeitsverhalten der Konstruktionswerkstoffe,
- das ermüdungsgerechte Gestalten,
- Vorgehensweisen und Verfahren zum experimentellen und rechnerischen Nachweis ausreichender Ermüdungsfestigkeit (Betriebsfestigkeit).

Schwingelastete Bauteile des Leichtbaus, des Maschinen-, Stahloch-, Hebe- und Fahrzeug- sowie Schiffsbaus und von Offshor-Konstruktionen, aber auch der Mikrosystemtechnik müssen bei optimalem Masse-Leistungsverhältnis während einer sinnvoll vorgegebenen Nutzungsdauer voll funktionstüchtig sein.

Wegen der für die Praxis herausragenden Bedeutung der Forderung nach Produkthaftung, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit ermüdungsgefährdeter Konstruktionen vermittelt das Buch die wichtigsten Erkenntnisse über das Verhalten metallischer, hochpolymerer und keramischer Werkstoffe sowie über die unterschiedlichsten Einflüsse auf die Lebensdauer von Bauteilen bzw. bauteilähnlichen Proben bei schwingenden Belastungen. Das Buch ist eine relativ kurzgefaßte, vor allem die Grundlagen erläuternde Einführung in die Problematik der Werkstoffermüdung und Ermüdungsfestigkeit bzw. Betriebsfestigkeit. Bei der Auswahl der Sachverhalte standen praxisorientierte Aspekte im Vordergrund. Auf kritische Stellungnahme wurde nicht verzichtet, auf vorhandene Wissenslücken hingewiesen. Es geht darum, nicht die verwirrende Vielfalt aller Einzelerkenntnisse, Sachverhalte und Hypothesen zur Thematik darzustellen, sondern vorrangig erfolgversprechende Wege zum Nachweis der Ermüdungsfestigkeit zu zeigen. Um die Darlegungen auf das Wesentliche zu begrenzen, mußte, wenn dies erforderlich schien, auf weiterführende Fachliteratur verwiesen werden.

Das Buch, das aufgrund von Vorlesungen, gehalten an der Technischen Universität Dresden, entstand und in das die Erfahrungen aus zahlreichen Schadensanalysen einfloß, ist für Studierende der Fachrichtungen des Maschinenbaus geschrieben. Es kann auch den in der Praxis tätigen Ingenieur Anregungen und Hinweise geben, über verpflichtende Vorschriften hinausgehende Untersuchungen und Lebensdauerberechnungen von ermüdungsgefährdeten Erzeugnissen mit dem Ziel großer technischer Zuverlässigkeit bei hoher Leistungsfähigkeit der Bauelemente durchzuführen.

---

Trotz einer Fülle neuer Erkenntnisse auf dem Gebiet der Werkstoffermüdung und bemerkenswerter Ergebnisse der Betriebsfestigkeitsforschung bestehen wegen der ungenügenden Erfassung der realen Ermüdungsvorgänge und Schadensakkumulierung erhebliche Unsicherheiten bei der rechnerischen Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit.

Das hier in den Mittelpunkt gestellte Folge-Wöhler-Kurven-Konzept ist für die rechnerische Ermittlung der Lebensdauer sowie Werkstoffauswahl deshalb besonders geeignet, weil es durch simple Zweistufenversuche gestattet, die komplexen Ermüdungsvorgänge zu erfassen. Im Gegensatz zu den bisherigen Verfahrensweisen treten anstelle unsicherer, ja in manchen Fällen sogar falscher Annahmen (z. B. die lineare Schädigungsakkumulierung) nunmehr zuverlässige Informationen über das Ermüdungsverhalten der Bauteile in Form von Ermüdungsfunktionen, die in den Berechnungsablauf einfließen.

*Dresden, Dezember 1996*

*G. Schott*

Herausgeber: *Prof. em. Dr.-Ing. habil. G. Schott*  
Technische Universität Dresden (TUD)

Zum 8. Kapitel leistete *Frau Dr.-Ing. H. Worch (TUD)* den Beitrag über das Ermüdungsverhalten keramischer Werkstoffe.  
*Herr Prof. Dr. rer. nat. M. Schaper (TUD)* überarbeitete das 4. Kapitel und verfaßte das 5. Kapitel. Er beteiligte sich an der Abfassung der Gliederung, an der Präzisierung einer Reihe von Begriffen der Ermüdungsfestigkeit sowie an der Durchsicht des Manuskripts. Ihm dankt der Herausgeber für Änderungs- und Ergänzungsvorschläge.

Satz und Grafik besorgte in anerkennenswerter Weise  
das *Studio „Initial“, Dresden*.

Besonderer Dank gilt dem *Deutschen Verlag für Grundstoffindustrie* für die verständnisvolle Zusammenarbeit und für das Bemühen um eine schnelle Herausgabe des Buches.



---

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3	
1	Begriffsfestlegungen, Abkürzungen, Formelzeichen	9
2	Einführung	13
2.1	Ermüdungsbrüche	13
2.2	Schadensursachen	19
3	Planung, Durchführung und Auswertung von Schwingfestigkeitsversuchen	23
3.1	Problemstellung	23
3.2	Versuchsplanung, Protokollierung	25
3.3	Betriebsbelastungsmessungen und deren Auswertung	27
3.4	Durchführung von Ermüdungsversuchen	33
3.4.1	Ermüdungsversuche mit deterministischem Beanspruchungsverlauf	34
3.4.2	Versuche mit zufälligem Beanspruchungsverlauf	38
3.4.3	Mehrachsige Belastungen	42
3.5	Auswertung von Ermüdungsversuchen	42
3.5.1	Aufbereitung der Ergebnisse großer Stichproben	42
3.5.2	Wahrscheinlichkeitsdichte und Wahrscheinlichkeitsfunktion	44
3.5.3	Parameter von Verteilungen einer Zufallsgröße	46
3.5.4	Aufbereitung der Ergebnisse kleiner Stichproben	49
3.5.5	Die Regressionsgerade	50
3.5.6	Verteilungsfunktionen	52
3.5.7	Beispiel für die Auswertung von Ermüdungsuntersuchungen	55
3.6	Darstellung von Ergebnissen aus Ermüdungsuntersuchungen	58
3.6.1	Das <i>Wöhler</i> -Diagramm	58
3.6.2	Die <i>Manson-Coffin</i> -Beziehung	60
3.6.3	Beziehungen für die Zeitschwingfestigkeit	60
3.6.4	Bestimmung der Dauerschwingfestigkeit	62
3.6.5	Betriebsfestigkeitslinie	68
4.	Verformung und Bruch	69
4.1	Spannungen und Dehnungen	69
4.2	Kristallaufbau und Gitterfehler	71
4.3	Möglichkeiten der Entstehung plastischer Verformungen	74
4.4	Gleitvorgänge	75
4.5	Plastische Verformung von Ein- und Vielkristallen unter monoton steigender Belastung	80
4.6	Thermisch aktivierbare Vorgänge in Metallen	84
4.7	Kriechen, Verfestigung, Erholung	85

<b>Inhaltsverzeichnis</b>
---------------------------

5	Ermüdung metallischer Werkstoffe	87
5.1	Zyklische plastische Verformung	88
5.1.1	Energiedissipation und mechanische Hysterese	88
5.1.2	Zyklische Ver- und Entfestigung, Wechselverformungskurven	90
5.1.3	Zyklische Spannungs-Dehnungskurve	93
5.1.4	Substrukturentwicklung in Einkristallen	95
5.1.5	Substrukturentwicklung in Vielkristallen und in mehrphasigen Werkstoffen	99
5.2	Rißbildung bei Ermüdung	100
5.3	Ermüdungsrißausbreitung	103
5.3.1	Bruchmechanische Beschreibung des Beanspruchungszustandes an der Rißspitze	105
5.3.2	Beanspruchungszustand an einem Ermüdungsriß	107
5.3.3	Der Rißschließeffect	109
5.3.4	Grenzwerte und Kinetik der Ermüdungsrißausbreitung	112
5.3.5	Einflußfaktoren auf die Ermüdungsrißkinetik	116
5.3.6	Zum Verhalten kleiner / kurzer Ermüdungsrisse	125
6	Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit metallischer Werkstoffe	129
6.1	Einfluß der Belastungsbedingungen	129
6.1.1	Mittelspannung, Spannungsamplitude, Zyklusform, Belastungsfrequenz	129
6.1.2	Reihenfolge-Einflüsse	133
6.1.3	Mehrachsiges Beanspruchungen	148
6.1.4	Einflüsse der Temperatur, des bauteilumgebenden Mediums und von Bestrahlungen	152
6.2	Einflüsse der Bauteilbeschaffenheit	155
7	Thermische Ermüdung	169
7.1	Allgemeines	169
7.2	Wärmespannungen	170
7.3	<i>Coffin-Manson</i> -Beziehung	173
7.4	Thermischer Ermüdungsprozeß	176
7.5	Kriechen	180
8	Ermüdungsverhalten hochpolymerer und keramischer Werkstoffe	185
8.1	Verhalten hochpolymerer Werkstoffe bei ruhender Belastung	185
8.2	Hochpolymere Werkstoffe bei schwingender Beanspruchung	187
8.3	Keramische Werkstoffe unter Ermüdungsbelastung	194
9	Schadensdefinitionen	201
9.1	Die <i>Frenschs</i> che Schadenslinie	201
9.2	Verfahren nach <i>Müller-Stock</i>	203
9.3	Verfahren nach <i>Henry</i>	205
9.4	Sekundäre <i>Wöhler</i> -Kurven	206
9.5	Ermüdungsriß als Maß für den Ermüdungsschaden	207
9.6	Änderung von Werkstoffkennwerten als Ausdruck der Schädigung	207

---

10	Rechnerischer Nachweis ausreichender Ermüdungsfestigkeit	209
10.1	<i>Palmgren-Miner</i> -Formel	210
10.2	Vorschlag von <i>Zenner</i> und <i>Liu</i>	215
10.3	Folge- <i>Wöhler</i> -Kurven-Konzept	216
10.4	Berechnungsbeispiele nach ausgewählten Nennspannungskonzepten im Vergleich mit Versuchsergebnissen	226
10.5	Kerbgrundkonzept	241
10.6	Bruchmechanik-Konzept	246
10.7	FKM-Richtlinie	248
10.7.1	Allgemeines	248
10.7.2	Vorgehensweise beim rechnerischen Ermüdungsfestigkeitsnachweis	248
10.8	Vergleichende Betrachtung der Lebensdauerberechnungsverfahren	250
10.9	Empfehlungen für das Vorgehen beim Nachweis ausreichender Ermüdungsfestigkeit	253
10.10	Rechnerischer Dauerfestigkeitsnachweis	256
10.11	Zur Werkstoffauswahl bei Schwingbelastung	256
11	Analyse des Ermüdungsschadens	259
11.1	Systematik der Schadensfallanalyse	259
11.2	Fraktographie	260
11.3	Rißnachweis	266
12	Zur konstruktiven Gestaltung von ermüdungsbeanspruchten Bauteilen	267
	Literaturverzeichnis	269
	Sachwörterverzeichnis	283

Aus technischen Gründen bleibt diese Seite leer

---

# 1 Begriffsfestlegungen, Abkürzungen, Formelzeichen

## *Begriffsfestlegungen*

Ausfallwahrscheinlichkeit	Wahrscheinlichkeit, mit der für eine bestimmte Lebensdauer ein Bauteil, eine Vorrichtung, eine Maschine oder ein Gerät nicht mehr funktionstüchtig ist.
Beanspruchung	Gesamtheit der in einem Querschnitt des Bauteils wirkenden Spannungen bzw. Dehnungen
Beanspruchungsdauer	Zeit, während der die Beanspruchung wirkt.
Beanspruchungskollektiv	Zusammenstellung der innerhalb einer bestimmten Beanspruchungsdauer im betrachteten Querschnitt eines Bauteils auftretenden Beanspruchungen nach Größe und Häufigkeit
Belastung	Gesamtheit der auf ein Bauteil oder eine Konstruktion einwirkenden Kräfte, Momente und Umgebungseinflüsse (Temperatur, Medium)
Betriebsbelastung	im Betrieb auftretende mechanische und/oder thermische Belastungen unter Beachtung der betrieblichen Einflüsse, z. B. der Einfluß des das Bauteil umgebenden Mediums
Betriebsdauer	vorgesehene Einsatzzeit des Bauteiles unter Betriebsbelastung
Betriebsfestigkeit	für eine vorgegebene Betriebsdauer vom Bauteil mit angegebener Wahrscheinlichkeit ertragbare Betriebsbelastung
Dauerschwingfestigkeit (Dauerfestigkeit)	bei vorgegebener Mittelspannung bzw. vorgegebenem Spannungsverhältnis unendlich oft bzw. bis zu einer festgelegten Grenzschwingspielzahl ertragbare größte Spannungsamplitude
Einstufenbeanspruchung	zyklische Beanspruchung mit konstanter Mittelspannung und überlagerter konstanter Spannungsamplitude bzw. eine zyklische Verformung mit konstanter mittlerer Dehnung und überlagerter konstanter Dehnungsamplitude
Einstufenversuch	Schwingfestigkeitsversuch mit Einstufenbeanspruchung bei konstanter Mittellast bzw. konstantem Amplitudenverhältnis und konstanter Amplitude

## 1 Begriffsfestlegungen, Abkürzungen, Formelzeichen

Ermüdung	Sammelbegriff für die im Werkstoff ablaufenden Prozesse bei mechanischer und/oder thermischer Wechselbeanspruchung, im allgemeinen mit Beeinträchtigung der Funktionstüchtigkeit des Bauteiles im Verlauf der Beanspruchung
Ermüdungsbruch	unter wiederholter mechanischer und/oder thermischer Wechselbeanspruchung infolge Ermüdung eintretender Bruch des Bauteiles
Ermüdungsfestigkeit	Widerstand des Werkstoffes gegenüber wechselnden mechanischen und/oder thermischen Beanspruchungen
Ermüdungsschaden	bei wiederholter mechanischer und/oder thermischer Beanspruchung auftretende Veränderungen am Bauteil, z. B. Werkstoffeigenschaftsänderungen und Risse, mit Beeinträchtigung der Funktionstüchtigkeit als Folge
Gewaltbruch	bei einmaliger Belastung sich ergebende völlige Trennung eines Bauteiles
Grenzwahrschwingzahl	für die Beurteilung der Dauerfestigkeit vorgegebene ertragbare Mindestanzahl von Schwingspielen
Lastwechselzahl	Anzahl der Lastumkehrpunkte
Lebensdauer	Zeit, während der das Bauteil voll funktionstüchtig ist. Die Lebensdauer soll stets größer als die vorgesehene Betriebsdauer sein. Treten keine Belastungspausen auf, darf man die Bruchzyklenzahl als Lebensdauer bezeichnen.
Mehrstufigenbelastung	Aneinanderreihung unterschiedlicher einstufiger Belastungen
Mittelspannung	arithmetisches Mittel aller vorzeichenbehafteten Spannungen eines Schwingspieles
Oberspannung	größter Spannungswert eines Schwingspieles
Restbruch	nach Ausbildung der Ermüdungsbruchfläche auftretender Gewaltbruch
Schadensakkumulation	Anreicherung von Ermüdungsschäden während der Wechselbeanspruchung
Schwingspiel	mechanisch aufgebrachtter Belastungszyklus
Schwingspielzahl	Anzahl von Schwingspielen
Schwingspielzahlverhältnis	Verhältnis der Schwingspielzahl einer bestimmten Belastungshöhe zur zugehörigen Ausfallschwingspielzahl
Unterspannung	niedrigster Spannungswert eines Schwingspieles
Zeitschwingfestigkeit	für eine vorgegebene Ausfallschwingspielzahl ertragbarer zyklischer Spannungswert unter Beachtung der Bruch- bzw. Überlebenswahrscheinlichkeit, auch Zeitfestigkeit genannt

### Abkürzungen

AWK	Ausgangs-Wöhler-Kurve	HCF	(high cycle fatigue) hochzyklische Ermüdung mit relativ großer Bruchschwingspielzahl
BZF	Belastungs-Zeit-Funktion	PGB	persistentes Gleitband (persistent slip band)
EF	Ermüdungsfunktion	LEBM	linear-elastische Bruchmechanik
FW-	Folge-Wöhler-	ZSD	zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve
FWK	Folge-Wöhler-Kurve	EDZ	ebener Dehnungszustand
SIF	Spannungsintensitätsfaktor	ESZ	ebener Spannungszustand
TF	Transformationsfunktion		
LCF	(low cycle fatigue) niederzyklische Ermüdung mit relativ kleiner Bruchschwingspielzahl		

### Häufig benutzte Formelzeichen

A	Querschnittsfläche	$N_B$	Schwingspielzahl bis Bruch
D	Schädigungssumme	$N_{FWK}$	rechn. Lebensdauer nach dem FWK-Konzept
$D_i$	Schädigung in der i-ten Laststufe	$N_{G,i}$	Lebensdauerwert, der zur ‚aktuellen‘ Dauerschwingfestigkeit $S_{D,i}$ gehört
$D^{i-1,i}$	Drehpunkt als Schnittpunkt der (i-1)-ten und der i-ten FW-Kurve	$N_M; N_{M0}$	rechn. Lebensdauer nach der Original-Miner-Regel
bzw.	für steigende bzw. fallende	$N_{ME}$	rechn. Lebensdauer nach der Elementar-Miner-Regel
$D_{i-1,i}$	Belastungsfolge	$N_{ML}$	rechn. Lebensdauer nach <i>Zenner und Liu</i>
$\Delta D$	Teilschädigung	$N_R$	rechn. Lebensdauer
E	Elastizitätsmodul	$N_V$	experimentell ermittelte Lebensdauer, Ausfallschwingspielzahl
F	Kraft	P	Wahrscheinlichkeit
H	absolute Häufigkeit	$P_A; P_B$	Ausfallwahrscheinlichkeit, Bruchwahrscheinlichkeit
$\bar{H}; \Sigma H$	Summenhäufigkeit	$P_{HL}$	Schädigungsparameter nach <i>Haibach</i> und <i>Lehrke</i>
$H_i$	Häufigkeit, mit der die i-te Laststufe innerhalb einer Teilfolge überschritten wird	$P_{SWT}$	Schädigungsparameter nach <i>Smith, Watson</i> und <i>Topper</i>
$H_T$	Teilfolgenumfang	$P_{\bar{U}}$	Überlebenswahrscheinlichkeit
$H_0$	Häufigkeit der einsinnigen Mittelwertdurchgänge	R	Spannungsverhältnis
$H_1$	Häufigkeit der oberen (unteren) Umkehrpunkte der Lastfolge	$\bar{R}$	Spannungsverhältnis einer Lastfolge
K	Spannungsintensitätsfaktor	$R_m$	Zugfestigkeit
$\Delta K$	zyklischer Spannungsintensitätsfaktor		
M	Mittelspannungsempfindlichkeit		
N	Schwingspielzahl, (Lebensdauer)		
$N_{AR}$	Schwingspielzahl bis Anriß		

**1 Begriffsfestlegungen, Abkürzungen,  
Formelzeichen**

$R_V$	Spannweite	$m_{t,h}$	Anstieg bei Belastungsfolge tief-hoch
$S$	Nennspannung		
$\bar{S}, S_{max}$	maximale Nennspannung einer Lastfolge	$n$	Anzahl von Schwingspielen
$S_a$	Spannungsamplitude	$n_K$	Kollektivumfang
$S_{b,W}$	Biegewechselfestigkeit	$n_V$	Schwingspielanzahl der Vorbela-stung
$S_h$	höchste (größte) Spannungs-amplitude des Zweistufen-versuchs	$r$	Korrelationskoeffizient
		$s$	empirische Standardabweichung
		$s^2$	empirische Streuung
$S_m$	Mittelspannung	$u$	Stichprobenumfang
$S_o$	Oberspannung	$x$	Zufallsgröße
$S_t$	tiefste (kleinste) Spannungs-amplitude des Zweistufen-versuchs	$x$	empirischer Erwartungswert
		$\bar{x}$	Zentralwert
		$\bar{\bar{x}}$	Dichtemittel
$S_u$	Unterspannung	$\hat{z}$	Anzahl periodischer Teilfolgen, bzw. Anzahl der Merkmalsträger in einer Stichprobe
$S_W$	Wechselfestigkeit		
$T_N; T_{90}$	Streuspanne, Streuspanne zwischen 90 und 10 %	$\alpha_K$	elastizitätstheoretische Formzahl
$V$	Völligkeit des Kollektivs	$\beta_K$	Kerbwirkungszahl
$W$	Arbeit	$\gamma$	Schiefe einer Verteilung
$a$	Rißlänge	$\delta$	Durchmischungskennwert
$a_o$	Anfangsrißlänge	$\epsilon$	Dehnung
$a_c$	kritische Rißlänge	$\epsilon_a$	Dehnungsamplitude
$d$	Klassenbreite, Probendurch-messer	$\epsilon_e; \epsilon_{el}$	elastische Dehnung
		$\epsilon_g$	Gesamtdehnung
$f$	Frequenz	$\epsilon_p; \epsilon_{pl}$	plastische Dehnung
$h$	relative Häufigkeit	$\Delta\epsilon_p$	doppelte plastische Dehnungs-amplitude
$i$	Regelmäßigkeit, Ordnungszahl		
$j$	Ordnungszahl für die Einzel-werte einer Stichprobe	$\eta$	bezogene Härteänderung
		$\eta_K$	Kerbempfindlichkeit
$j_N$	lebensdauerbezogene Sicher-heitszahl	$\vartheta$	Temperatur
		$\mu$	Erwartungswert
$j_S$	spannungsbezogene Sicherheits-zahl	$\rho$	Kerbradius
		$\sigma$	Spannung bzw. Standard-abweichung
$k$	Exponent in der Gleichung der <i>Wöhler-Linie</i> bzw. Kollektivbei-wert	$\sigma_a$	Spannungsamplitude
		$\sigma_E$	Eigenspannung
$m$	Anstieg	$\tau$	Schubspannung
$m_0$	Anstieg der AWK ( $m_0 = -1/k$ )	$\chi$	bezogenes Spannungsgefälle
$m_{h,t}$	Anstieg bei Belastungsfolge hoch-tief		



---

## 2 Einführung

### 2.1 Ermüdungsbrüche

Zahlreiche Konstruktionsteile des allgemeinen Maschinenbaues, des Förderanlagen-, Schienen- und Straßenfahrzeugbaues, des Flugzeug- und Motorenbaues, des Hebezeug-, Brücken- und Schiffsbaues unterliegen im Verlaufe ihrer Betriebszeit mehr oder weniger großen wechselnden mechanischen und thermischen Beanspruchungen. An wechselbeanspruchten Bauteilen entstehen häufig Schäden, die die Funktionstüchtigkeit der Gesamtkonstruktion beeinträchtigen oder sogar zu ihrem Ausfall führen. Einige Beispiele über das Versagen von Bauelementen sollen die Vielfalt der bei wechselnden Beanspruchungen bzw. Betriebsbeanspruchungen auftretenden konstruktiven und werkstofftechnischen Fragen sowie die Festigkeits-, Herstellungs- und Instandhaltungsprobleme andeuten, die gelöst werden müssen, um nicht nur ein Bauteil, sondern die Gesamtkonstruktion für eine vorgegebene Betriebszeit funktionstüchtig zu erhalten.

#### □ 1. Beispiel

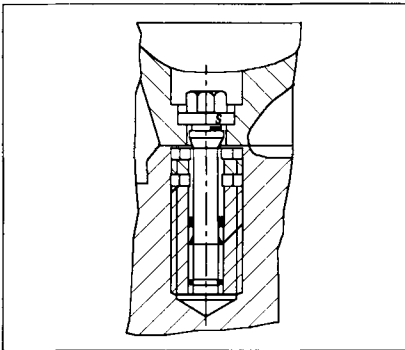


Bild 2.1  
Dehnschraubenverbindung  
S Bruchstelle

Bild 2.1 zeigt eine Dehnschraube aus 42CrMo4 mit Umlaufkerb am Schraubenkopf. Die Schraube verbindet zwei Flanschteile, an denen wiederholte Zugbelastungen wirken. Die Beanspruchung der vorgespannten Schraubenverbindung ist in Bild 2.2 skizziert.

Neben der im allgemeinen als konstant anzunehmenden Vorspannkraft  $F_v$  wirkt die Betriebslast anteilig als Zugschwellbeanspruchung auf die Schraube und zum anderen auf die Flanschteile ein. Unter dieser zyklischen Belastung ging eine derartige Schraube nach etwa  $9 \cdot 10^4$  Belastungszyklen im Umlaufkerb zu Bruch. Auf Bild 2.3 ist links die Bruchfläche am Schraubenkopf und rechts die am Schaftteil zu sehen. Den unter wiederholten Zugbelastungen

## 2 Einführung

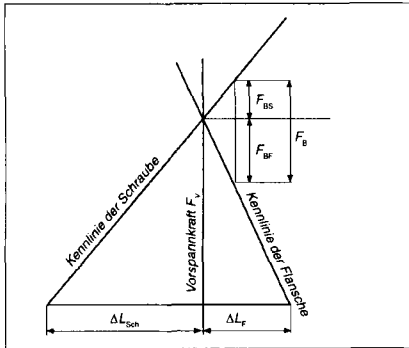


Bild 2.2

Verspannungsschaubild mit eingezeichneter Zugschwellbelastung

- $F_B$  Betriebslast ( $F_B = F_{BS} + F_{BF}$ )
- $F_{BS}$  Anteil der Schraube an der Betriebslast
- $F_{BF}$  anteilige Betriebsbelastung der Flansche
- $F_V$  Vorspannkraft
- $\Delta L_{Sch}$  Längung der Schraube unter der Vorspannkraft  $F_V$
- $\Delta L_F$  Verkürzung der Flansche unter der Vorspannkraft  $F_V$

eingetretenen Bruch bezeichnet man als Schwing- oder Ermüdungsbruch. Die helle, feinkörnige Ermüdungsbruchfläche umschließt im vorliegenden Fall die dunklere, grobkörnige Gewalt- oder Restbruchfläche. Man erkennt vom Kerbgrund ausgehende, radial gerichtete Markierungen, die sogenannten keilförmigen Absätze.

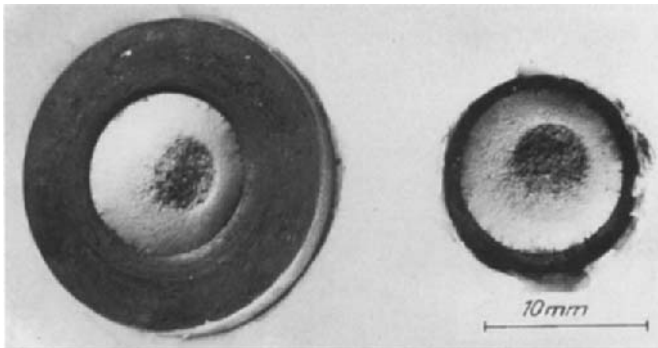


Bild 2.3

Ermüdungsbruch an der Umlaufkerbe einer Dehnschraube aus 42CrMo4 nach  $9 \cdot 10^4$  Belastungszyklen

Die Schadensanalyse ergab, daß die an der Umlaufkerbe wirkende Spannungsüberhöhung während der Zugschwellbelastung zu zahlreichen Anrissen in benachbarten Querschnitten des Kerbwirkungsbereiches führte. Aus diesen Anrissen entwickelten sich Teilermüdungsbruchflächen, die im Verlaufe der weiteren zyklischen Belastung zusammenwuchsen und dabei keilförmige Absätze entstehen ließen. Je weiter die Ermüdungsbruchfläche sich ausbildete, um so größer wurde die bei gleicher äußerer Belastung an der Reißfront wirksame Spannungsintensität. Dies hatte zur Folge, daß der Reißfortschritt je Belastungszyklus ständig größer wurde. Dabei nahm die Rauigkeit der Bruchfläche zu. Schließlich widerstand der Restquerschnitt nicht mehr der aufgetragenen Zugbelastung, und die Schraube brach.

Die Ursache für den Schwingbruch ist in der unzureichenden Gestaltung der Schraube zu suchen. Durch geeignete konstruktive Maßnahmen, die eine derartig wirkungsvolle SpannungsKonzentration ausschließen, läßt sich die Dauerschwingfestigkeit bzw. die Lebensdauer der Schraube verbessern.

## 2.1 Ermüdungsbrüche

### □ 2. Beispiel

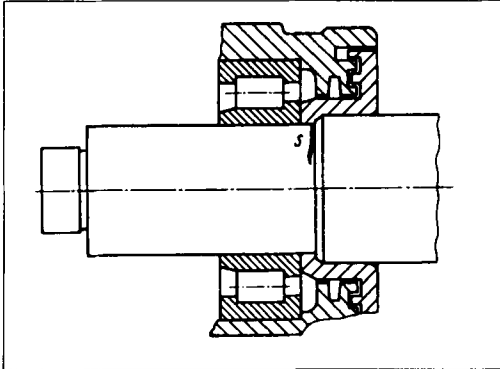


Bild 2.4  
Teil einer  
Straßenbahnwagenachse  
mit eingezeichneter  
Schadensstelle S

An Eisenbahn- und Straßenbahnwagenachsen (Bild 2.4), die einer Umlaufbiegebelastung ausgesetzt waren, traten, wie Bild 2.5 zeigt, Ermüdungsbrüche auf. Sie nahmen ihren Ausgang vom Übergangsradius an der Stelle der Querschnittsänderung. Dieser Radius betrug nur 3 mm. Die Gefahrenstelle konnte durch Vergrößerung des Übergangsradius auf 15 mm beseitigt werden, so daß an derartigen Achsen keine weiteren vorzeitigen Versager mehr zustande kamen.



Bild 2.5  
Ermüdungsbruchbild einer Straßenbahnachse  
(Die Aufnahme wurde von der Ingenieurschule für  
Verkehrstechnik Dresden zur Verfügung gestellt.)

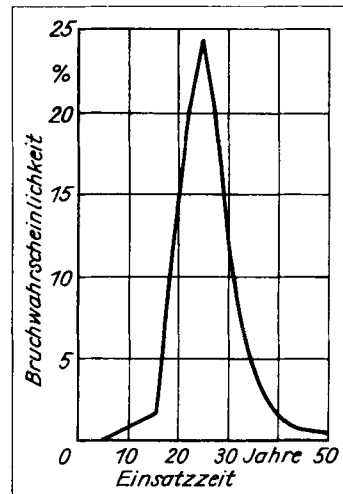


Bild 2.6  
Bruchhäufigkeit von  
1029 Eisenbahnwagenachsen in  
Abhängigkeit von der Einsatzzeit,  
nach [NADA 61]

## 2 Einführung

Aus der Zusammenstellung der prozentualen Häufigkeit von Schäden an Eisenbahnwagenachsen in Abhängigkeit von der Betriebszeit (Bild 2.6) ist ersichtlich, daß in den hier angegebenen Fällen Achsen bereits nach 3 Jahren zu Bruch gehen können. Eine Häufung der Brüche ist nach etwa 25 Jahren feststellbar. Es gibt aber auch Achsen, die über 50 Jahre ohne Bruch oder Anriß betriebsfähig sind. Diese Feststellungen besagen, daß die Lebensdauerwerte von gleichen Bauteilen, die einer nahezu gleichen schwingenden Beanspruchung ausgesetzt sind, große Streuungen aufweisen.

Nach [NADA 61] ist die Lebensdauer der Eisenbahnwagenachsen abhängig von der konstruktiven Gestaltung, dem Werkstoff, der im Einsatz auftretenden Belastung sowie von den Bedingungen bei der Herstellung der Achsen.

Daß die Ermüdungsfestigkeit von Achsen auch gegenwärtig eine große Rolle spielt, geht aus [GROS 96] hervor.

### □ 3. Beispiel

Am Geräteträger (Kastenträger) eines Landwirtschaftsfahrzeuges traten nach sehr kurzer Einsatzzeit in den vier Ecken des Trägers im Übergang der Schweißnaht zum Flansch Risse auf, die der Schweißnaht folgten und schließlich auch in den Flansch einwanderten (Bild 2.7 a). Der Flansch behinderte die durch Querkraftbiegung und Torsion sich einstellenden Wechselverformungen des Trägers und damit bildeten sich sog. wechselnde Wölbspannungen aus. Die in den vier Ecken paarweise entgegengesetzt gerichteten, mit der äußeren Belastung wechselnden Wölbkräfte (Wölbkraftgruppe) sind für die hier entstehenden Risse verantwortlich. Die aufgeklebten elektrischen Dehnungsmeßstreifen dienten der Beanspruchungsermittlung

Um die Lebensdauer zu erhöhen, wurden in den vier Innenkanten des Kastenträgers Rundstäbe eingeschweißt, die am Trägeranschluß überstehenden Stabenden durch vorher am Flansch angebrachte Bohrungen geführt und auf der Flanschrückseite mit dem Flansch verschweißt (Bild 2.7 b). Auf diese Weise konnten die Wölbnormalspannungen drastisch reduziert werden. Die so veränderte Konstruktion ertrug gegenüber der ursprünglichen eine mehr als dreißigfach höhere Lebensdauer bei Zugrundelegung einer Bruchwahrscheinlichkeit  $P_b = 10\%$ . (Erläuterungen über Wölbkräfte in Kastenträgern findet man z. B. in [WIED 86].)

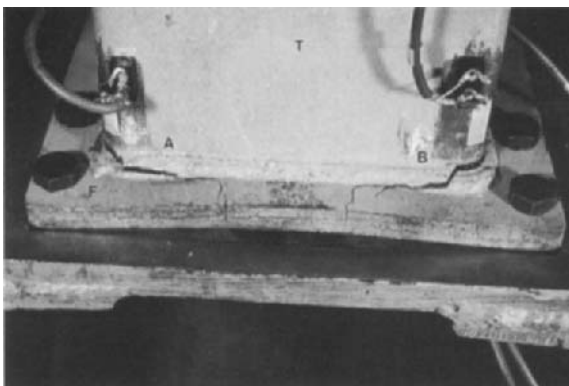


Bild 2.7a

Risse im Geräteträger eines landwirtschaftlichen Nutzfahrzeuges (Geräteträgertraktor) im Übergang zum Flansch.

A, B Dehnungsmeßstreifen

F Flansch

S Schweißnaht

T Träger mit Rechteckquerschnitt

Höhe 250 mm;

Breite 200 mm

## 2.1 Ermüdungsbrüche

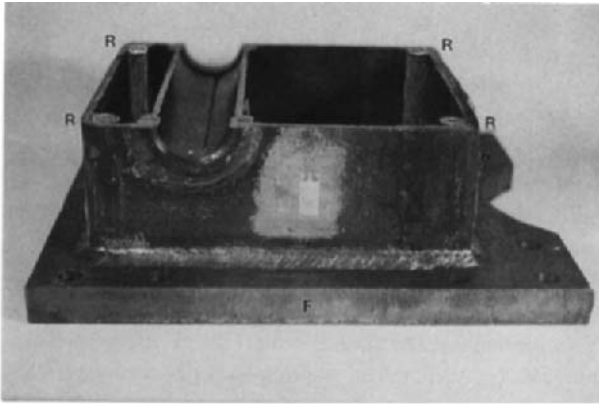


Bild 2.7b  
Durchgetrennter Geräteträger mit  
eingeschweißten Rundstäben (*R*) in  
den Ecken.  
*F* Flansch



Bild 2.8  
Schadhafter Kolben aus  
einem Dieselmotor  
*A* Kolbenbolzenauge;  
*E* Ermüdungsbruchfläche;  
*K* Kolbenkopf;  
*R* Rippen  
Kolbendurchmesser 200 mm

### □ 4. Beispiel

Die Kolben eines Motors unterliegen durch die Gas- und Massenkraftbelastung sowie infolge der Temperaturwechsel im Verbrennungsraum einer mechanischen und thermischen Wechselbeanspruchung. Bild 2.8 zeigt den schadhaften Kolben eines Dieselmotors. Die Schadensanalyse ergab, daß sich in der Rippenpartie des Kolbens auf Grund der Massenkraftbelastung und aus der Verwölbung des Kolbenkopfes infolge der Temperatureinwirkung Zugspannungen ausbildeten, die sich den an dieser Stelle bei der Kolbenherstellung entstandenen Zugeigenstressungen überlagerten. In der Rippenpartie waren vom Gußvorgang her auch Mikrolunker vorhanden, so daß der Kolben bei verminderter Werkstofffestigkeit schon nach kurzer Zeit versagte ( 37 Betriebsstunden). Durch spätere Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, daß die thermische Wechselbeanspruchung eine Verschlechterung der mechanischen Festigkeitseigenschaften des Kolbenwerkstoffes bewirkte. Innerhalb eines Vierteljahres waren 50 % der mit den gleichen Kolben ausgerüsteten Diesellokomotiven durch derartige Kolbenschäden ausgeschieden.

### □ 5. Beispiel

Das Versagen bestimmter Bauteile infolge Ermüdungsschäden kann katastrophale Folgen haben, wie es die in den fünfziger Jahren erfolgten Abstürze von Flugzeugen des Typs Comet [STEV 55] belegen. Die Schadensanalyse, die umfangreichen Versuche an Werkstoffproben, Bauteilen und kompletten Flugzeugen dieses Musters ergaben, daß durch die beim Start-Flug-Lande-Zyklus in der Flugzeugkabine auftretenden Druckwechsel an den genieteten Rahmen der seitlichen Kabinenfenster Ermüdungsrisse entstanden, die ein Aufreißen der Kabine in Flugzeuglängsrichtung zur Folge hatten. Während in Versuchen unter statischer Belastung diese Fensterrahmen dem doppelten Überdruck standhielten, versagten sie bei zwei zyklischen Versuchen nach 3060 und 5546 Druckwechseln.

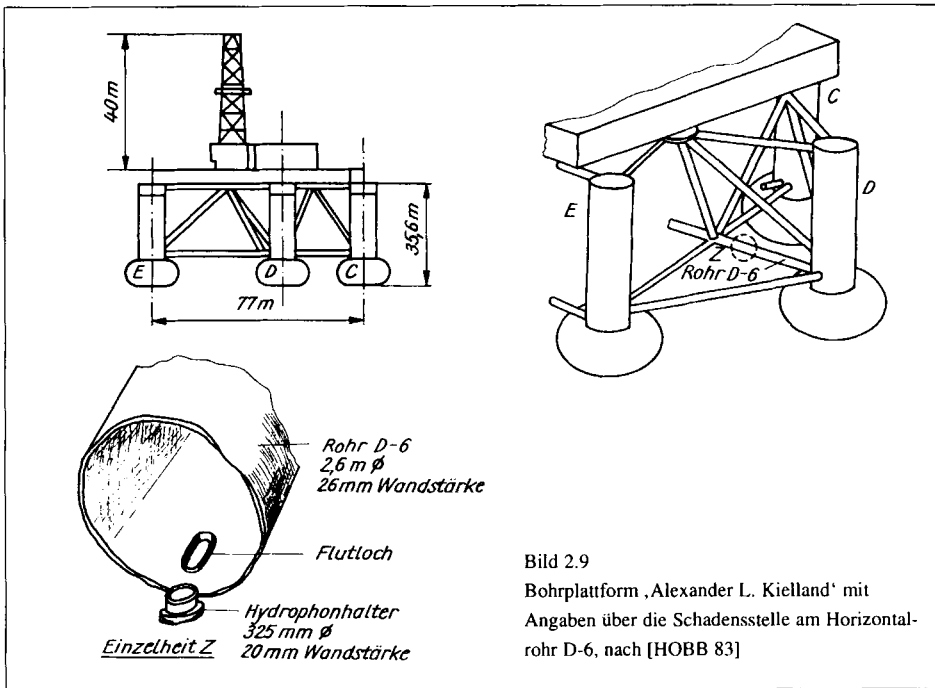
Nachfolgend sei noch auf ein weiteres Beispiel für einen Ermüdungsschaden mit katastrophalen Folgen hingewiesen:

### □ 6. Beispiel

Am 27. März 1980 kenterte die 1976 gebaute Bohrplattform ‚Alexander L. Kielland‘ [HOBB 83]. Die Untersuchung des Schadens erbrachte den Beweis, daß die Mängel an der Schweißnaht des Hydrophon-Halters am Horizontalrohr D-6 Ausgangspunkt von Ermüdungsrisen waren (Bild 2.9). Die Risse breiteten sich unter Einwirkung der Wellenbelastungen in Umfangsrichtung des Horizontalrohres aus. Nachdem der Hauptermüdungsriß etwa 2/3 des Rohrumfanges durchlaufen hatte, brach das Rohr.

Man hatte beim Bau der Plattform den Hydrophon-Halter als nichttragendes Bauelement angesehen und für ihn keinen Festigkeitsnachweis vorgeschrieben. Offensichtlich beachtete man nicht, daß nichttragende Bauelemente als Rißstartstellen in Betracht kommen und der Riß in das tragende Bauteil hineinwachsen kann.

Wie die angeführten Beispiele zeigen, rufen relativ kleine, schwingend aufgebrauchte Beanspruchungen Ermüdungsrisse hervor, die meist nicht nur zum Bruch des Bauelements, sondern zum Versagen der Baugruppe oder der Gesamtkonstruktion führen. Für die Auslegung von Konstruktionen, deren Ausfall nicht zugelassen werden darf, sollte man eines der beiden nachfolgend genannten *Konstruktionsprinzipien* anwenden:



### □ 1. Lebensdauersichere Konstruktion (*safe-life-design*)

Die Konstruktion ist so auszuführen, daß während der vorgegebenen Nutzungsdauer bzw. innerhalb exakt festgelegter Zeiträume kein Bauelement versagt. Die Termine für das Auswechseln der Bauelemente müssen in den Bedienungsanleitungen und -vorschriften festgelegt sein.

### □ 2. Ausfallsichere Konstruktion (*fail-safe-design*)

Beim Versagen eines Bauelements der Konstruktion muß ihre Funktionstüchtigkeit bis zur nächsten Inspektion gewährleistet sein. Innerhalb zweier benachbarter Inspektionstermine dürfen Risse und sogar Brüche einzelner Bauelemente auftreten. Es muß jedoch sicher sein, daß Teile der Konstruktion die Belastungen des gebrochenen Bauelements übernehmen und die Schäden bei der nächsten Inspektion entdeckt werden.

## 2.2 Schadensursachen

An einer Vielzahl von Bauteilen, z. B. Blattfedern und Schrauben, treten *Ermüdungsschäden* auf, die in der Gesamtheit erhebliche Materialkosten, Arbeitsaufwand und Ausfallzeiten verursachen sowie im Rahmen von Garantieleistungen zu bedeutenden Produktions- und Absatzschwierigkeiten führen können. Anhand der im Abschnitt 2.1 beschriebenen Beispiele erkennt man, daß unter

## 2 Einführung

Wechselbeanspruchung Ermüdungsbrüche im allgemeinen unerwartet entstehen. Die Höhe der Wechselbeanspruchung ist dabei kleiner als die bis zum statischen Bruch ertragbare Belastungshöhe. Die Lebensdauerwerte gleicher Bauteile unter gleichartiger wechselnder Belastung weisen sehr große Streuungen auf. An den zu Bruch gegangenen Bauteilen kann man im allgemeinen die Ermüdungsbruchfläche von der restlichen Gewaltbruchfläche unterscheiden.

Die Auswertung zahlreicher Schadensfälle läßt folgende als Schadensauslösung geltende Ursachen erkennen:

- Die Konstruktion wurde der Betriebsbeanspruchung nicht gerecht.
- Die Betriebsbelastung war nicht bekannt, und der Konstrukteur ging von nicht zutreffenden Belastungen aus.
- Es wurde ein ungeeigneter Werkstoff eingesetzt.
- Eine falsche technologische Behandlung in der Fertigung war Anlaß für die Entstehung von Rissen und Schwachstellen.
- Unsachgemäße Montage führte zu Teilplastizierungen oder Eigenspannungen im Bauteil. Bei der Überlagerung von Eigen- und Lastspannungen versagte das Bauteil.
- Unzulässige Überbeanspruchungen im Betrieb bewirkten Ribbildungen und vorzeitiges Versagen.
- Unsachgemäße Reparaturen führten zu Festigkeitsminderungen und Eigenspannungen.
- Es waren keine Schutzmaßnahmen gegen oberflächenaggressive Medien vorhanden, so daß eine Schädigung des Bauteiles eintrat, die durch Wechselbeanspruchung vergrößert wurde.
- Die vorgegebene Betriebszeit bzw. Inspektionszeit wurde überschritten.

Quantitative Aussagen über die Bruchursachen von Konstruktions- und Maschinenteilen aus unlegiertem Stahl trifft Lehofer [LEHO 60]. Danach sind die häufigsten Ursachen mit 27 % die technologischen Fehler, vorwiegend Schweißfehler. Es folgen mit 9,6 % Werkstofffehler, mit 4,5 % Bedienungsfehler oder Betriebsüberlastungen, mit 2,8 % Konstruktionsfehler und mit 1,7 % Montagefehler. Die Zahlenangaben sind nicht repräsentativ für alle wechselbeanspruchten Bauteile, da die Beobachtungen sich nur auf verhältnismäßig wenige Bauteile beschränken. Als Schadensursachen an Achsen und Wellen für die Zeit von 1968 bis 1970 wurden von der Allianz Versicherung [ALLI 72] Kerben mit 80 %, Korrosionsstellen mit 15 % und sonstige Ursachen mit 5 % angegeben.

Eine Statistik von Hempel [HEMP 52] wertet die Brüche an 4142 Flugmotoren und 465 Maschinenteilen aus (Tabelle 2.1).

Tab. 2.1  
Ursachen für die Entstehung von Ermüdungsschäden

Bauteil	Montage- fehler in %	Werkstoff- fehler in %	Oberflächen- fehler in %	Kerben in %	Überlastungen in %
Maschinenteile	22,5	12	19	33	7
Flugmotorenteile	13,5	0,5	6	3,5	76,5



Die Übersicht in Tabelle 2.1 läßt erkennen, daß im Flugmotorenbau die Montage sorgfältiger ausgeführt wurde und die Werkstoffqualität, die Oberflächenbearbeitung sowie die konstruktive Durchbildung hinsichtlich Kerben und Querschnittsübergänge wesentlich besser waren als im Maschinenbau. Der zehnmal höhere Ausfall der Flugmotorenteile durch betriebliche Überlastungen kennzeichnet die Tatsache, daß auf Grund der Leichtbauforderungen im Flugmotorenbau die einzelnen Bauteile weitestgehend ausdimensioniert wurden.

Diese Forderung nach optimaler Nutzung der Werkstofffestigkeit gegenüber wechselnden Beanspruchungen sowie statischen Belastungen bleibt nicht auf den extremen Leichtbau beschränkt, sondern wird auch in zunehmendem Maße auf den Maschinen-, Geräte- und Fahrzeugbau übertragen. Der Erhöhung der Leistungsfähigkeit aller technischen Erzeugnisse bei zuverlässiger Erfüllung der vorgesehenen Funktion während einer bestimmten Betriebszeit unter Berücksichtigung sparsamen Materialeinsatzes dienen neben der begründeten Werkstoffauswahl, der sorgfältigen Dimensionierung und Gestaltung der Bauteile auch die geeignetsten Technologien bei der Herstellung der Erzeugnisse. Dies erfordert die intensive Zusammenarbeit zwischen Konstrukteur, Technologen, Festigkeits- und Werkstoffingenieur, wobei alle Beteiligten über solide Kenntnisse des Betriebsfestigkeitsverhaltens der Werkstoffe verfügen müssen. Sie sollten die im wechselbeanspruchten Werkstoff ablaufenden Ermüdungs- und Schädigungsprozesse und die Einflüsse auf die Lebensdauer der Bauteile kennen, um Ermüdungsschäden zu verhüten bzw. gezielt lebensdauererhöhende Effekte zu nutzen.

Vom Konstrukteur erwartet man, daß er seine Konstruktion für eine vorgegebene Betriebszeit dimensioniert. Zur Gewährleistung der Betriebssicherheit von Konstruktionen bedient man sich neben der rechnerischen Lebensdauerabschätzung auch des experimentellen Festigkeitsnachweises und geeigneter Betriebskontrollverfahren.

Der Betriebsfestigkeitsversuch liefert zwar für die untersuchten Bauteile und Konstruktionen in der Regel eindeutige Ergebnisse, jedoch muß man wegen der bekannten Streuungen der Lebensdauerwerte bei Wechselbeanspruchungen eine Vielzahl von Ermüdungsversuchen mit gleichartigen Bauteilen oder vollständigen Konstruktionen durchführen, um statistisch verlässliche Aussagen zu erhalten. Das ist meist wegen des hohen Material-, Zeit- und Kostenaufwandes nicht realisierbar. Man muß deshalb vielfach rechnerische Lebensdauerabschätzungen treffen. Leider geht man hierbei immer noch von Annahmen aus, die – wie beispielsweise bei der *Miner*-Regel und deren Modifikationen – höchst selten zutreffen, wobei man nie den Erfolgsfall vorhersagen kann. Nur gesicherte Erkenntnisse über das werkstoffbauteilspezifische Ermüdungsverhalten ermöglichen verlässliche Abschätzungen der Lebensdauer. Ein Verfahren, das solche Erkenntnisse in den Berechnungsablauf einbezieht, ist das im 10. Kapitel beschriebene Folge-*Wöhler*-Kurven-Konzept.

Für wichtige Bauteile sind Betriebskontrollen (Inspektionen) durchzuführen, um vorzeitige Ermüdungsschäden aufzudecken und ein Versagen mit Nachfolgeschäden zu vermeiden. Die Kontrollen konzentrieren sich hauptsächlich auf das Auffinden von Rissen, Funktionsminderungen, Verschleiß und Korrosionsschäden sogenannter lebenswichtiger Bauelemente, d. h. Bauteile, deren Versagen u. U. zu einer Katastrophe führen kann. Die Inspektionsmethode wird seit geraumer Zeit in bestimmten Bereichen der Technik angewandt, z. B. in Flugzeugen und Kraftwerksanlagen, wo Überwachungspläne für regelmäßige Durchsichten im Hinblick

## 2 Einführung

---

auf Risse und deren Ausbreitungsgeschwindigkeit existieren. Die Erarbeitung von Kontrollvorschriften zur Überwachung des Werkstoffverhaltens wechselbeanspruchter Konstruktionen kann nur auf Grund von umfassenden Kenntnissen auf dem Gebiet der Werkstoffermüdung geschehen.

Treten an Konstruktionselementen im betrieblichen Einsatz Ermüdungsbrüche auf, so ist eine sorgfältige Schadensanalyse durchzuführen, wobei der tatsächliche Belastungszustand einschließlich der Umweltbedingungen für das betreffende Bauteil erfaßt und die Werkstoffeignung, die Qualität, die technologische Behandlung, die Festigkeit und konstruktive Gestaltung des Bauteiles überprüft werden müssen. Eine exakte Schadensanalyse erleichtert es, Maßnahmen einzuleiten, um das betreffende Bauteil technisch zuverlässig zu gestalten.

In den folgenden Kapiteln wird auf die angedeuteten Probleme, insbesondere auf das Verhalten metallischer Werkstoffe unter zyklischer Beanspruchung sowie auf den experimentellen und rechnerischen Nachweis ausreichender Ermüdungsfestigkeit näher eingegangen.

---

# 3 Planung, Durchführung und Auswertung von Schwingfestigkeitsversuchen

## 3.1 Problemstellung

Konstrukteure und Festigkeitsingenieure sind gefordert, die schwingbelasteten Bauteile so zu gestalten und zu dimensionieren, daß sie während der vorgesehenen Nutzungszeit voll funktionssicher bleiben. Wie *Pfender* in [POHL 56] sagt, gelingt die Lösung dieser Aufgabe um so besser, je umfassender die Beanspruchungsverhältnisse der betreffenden Konstruktion und je genauer das Werkstoffverhalten unter diesen Bedingungen bekannt sind.

Tab. 3.1

Experimenteller Nachweis der Ermüdungsfestigkeit - Betriebsfestigkeitsversuche an Konstruktionen, Bauteilen, bauteilähnlichen Proben

---

Teilaufgabe	
E 1: Belastungsgeschehen:	<ul style="list-style-type: none"><li>- Ermittlung der Betriebsbelastungen einschließlich der Umgebungsbedingungen durch Betriebsbelastungsmessungen;</li><li>- oder Festlegung der Belastungen aufgrund von Erfahrungen;</li><li>- Zusammenstellung typischer, repräsentativer Belastungs-Zeit-Funktionen;</li><li>- Lastannahmen aus verbindlichen Vorschriften;</li></ul>
E 2: Beanspruchungszustand:	<ul style="list-style-type: none"><li>- Ermittlung örtlicher Spannungs-Dehnungszustände;</li><li>- Eigenspannungsnachweis;</li><li>- Bestimmung versagensgefährdeter Bauteilquerschnitte;</li></ul>
E 3: Versuchskörperbeschaffenheit:	<ul style="list-style-type: none"><li>- Beschreibung der Prüflinge durch Kennwerte, Kennfunktionen, z. B. Werkstoff, Oberfläche, Kerbgeometrie, Bauteilfügungen</li></ul>
E 4: Schadensnachweis:	<ul style="list-style-type: none"><li>- Angaben über Vorschädigungen, Rißnachweis und plastische Verformungen vor, während und nach der Ermüdungsbelastung;</li><li>- Werkstoffveränderungen infolge Ermüdung</li></ul>
E 5: Versuchsergebnisse:	<ul style="list-style-type: none"><li>- experimentelle Ermittlung der Lebensdauer, der Schwingspiele bis zum Erreichen einer bestimmten Rißlänge;</li><li>- Ermittlung der Ermüdungsfestigkeitsreserve oder der statischen Restfestigkeit nach vorgegebener Schwingspielzahl und Belastungsniveau;</li></ul>
E 6: Auswertung:	<ul style="list-style-type: none"><li>- Schadensanalyse;</li><li>- Streuung der Versuchsergebnisse;</li><li>- Zuverlässigkeitsbetrachtungen;</li><li>- Wahrscheinlichkeitsangaben bezüglich der bei bestimmten Belastungs-Zeit-Funktionen erreichten Schwingspiele bis Bruch, bestimmter Rißlänge etc.</li><li>- Unterschiede im Ermüdungsverhalten der bauteilähnlichen Probe im Vergleich zum entsprechenden Bauteil;</li><li>- Bauteilverhalten im Verbund mit der zugehörigen Konstruktion.</li></ul>

---

### 3 Planung, Durchführung u. Auswertung von Schwingfestigkeitsversuchen

Wie in den Kapiteln 5 bis 8 näher erläutert, kann es bei schwingenden Belastungen bereits relativ weit unterhalb der technischen Fließgrenze im Bauteilwerkstoff zu strukturellen Veränderungen, zu Ribbildung und Ribausbreitung kommen. Diese Vorgänge, die man als Ermüdung bezeichnet, führen unter Umständen zum Versagen des Bauteils mit oftmals katastrophalen Folgeschäden. Um dies zu verhindern, muß die Bauteilfestigkeit der Konstruktion, insbesondere die *Schwingfestigkeit* bzw. *Ermüdungsfestigkeit* oder *Betriebsfestigkeit* für die vorgesehene Nutzungsdauer mit Sicherheit nachgewiesen werden. Den betrieblichen Anforderungen ist das Bauteilverhalten gegenüberzustellen. Dafür müssen verbindliche Aussagen über die betrieblichen Einsatzbedingungen und verlässliche Informationen über das Ermüdungsverhalten der Bauteile vorhanden sein. Die benötigten Informationen gewinnt man zum einen aus Betriebsbeanspruchungsmessungen und zum anderen aus Schwingfestigkeits- bzw. Ermüdungsversuchen. Tabelle 3.1 vermittelt erste Hinweise auf die dabei auftretenden Teilaufgaben und deren Bearbeitung.

Da es um die Bauteilfestigkeit geht, wäre es ratsam, die Ermüdungsversuche an den in Betracht kommenden Bauteilen durchzuführen. Das ist aus mancherlei Gründen nicht immer möglich. Dies trifft zu für Bauteile in der Entwurfsphase, wenn sie noch nicht in der Realität existieren. Vielfach jedoch ist diese Wunschvorstellung vor allem aus Kostengründen und wegen des prüftechnischen Aufwands nicht realisierbar. Deshalb verwendet man für die *Ermüdungsversuche* relativ kleine Proben. Diese Vorgehensweise wirft die Frage auf, ob die so ermittelten Versuchsergebnisse ohne weiteres auf Bauteile übertragen werden dürfen.

Als Voraussetzungen für die *Übertragbarkeit* sind zu nennen:

- gleicher Werkstoff,
- gleiche technologische Vorbehandlung,
- Oberflächenbeschaffenheit,
- Kerbgeometrie,
- Belastungsart,
- Spannungs-Dehnungsverteilung,
- Belastungs-Zeit-Funktionen,
- äußere Einflüsse und
- gleiche Auswirkungen auf das Bauteil im Verbund mit der Gesamtkonstruktion.

Mit anderen Worten:

Alle Einflüsse, die zum Teil im 6. Kapitel genannt werden, müßten bei Bauteil und Probe im gleichen Ausmaß wirksam sein. Diese Forderung ist sicher nicht in jedem Fall erfüllbar. Vor Beginn der Ermüdungsversuche sollte man sorgfältig die Problematik der Übertragbarkeit überdenken und das Nichtübereinstimmen von Einflußfaktoren bei Bauteil und Probe hinsichtlich der Auswirkungen auf das Ermüdungsfestigkeitsverhalten abschätzen. Diese außerordentlich wichtige Thematik wird z. B. in [BERG 94], [VDI 79], [KLOO 91], [SCHÜ 89] behandelt; weitere Untersuchungen hierzu stehen noch aus.

## 3.2 Versuchsplanung, Protokollierung

Die Durchführung von Experimenten erfordert die Lösung der Teilaufgaben:

- *Versuchsplanung und -vorbereitung,*
- *Versuchsdurchführung und -protokollierung,*
- *Versuchsauswertung und Darstellung der Versuchsergebnisse.*

Der Versuchsplan enthält Angaben über die Versuchsziele sowie die Mittel und Wege zu deren Realisierung. Bei der Erstellung des Versuchsplanes ist darauf zu achten, daß einerseits durch ihn alle Teilaufgaben so exakt wie möglich fixiert werden und daß er andererseits flexibel genug sein muß, notwendige Präzisierungen der ursprünglichen Aufgabenstellung entsprechend den im Verlauf der Untersuchungen erzielten Zwischenergebnissen zu ermöglichen.

Schwerpunktkriterien der Versuchsplanung sind:

- Dringlichkeit der Versuche,
- räumliche, zeitliche, personelle und finanzielle Kapazitäten,
- verfügbare Prüf- und Meßeinheiten,
- Möglichkeiten für die Probenherstellung,
- die zur Verfügung stehenden Auswerteverfahren und
- die zu erwartende Genauigkeit.

Bei der Planung muß stets die richtige Relation zwischen Aufwand und Nutzen beachtet werden.

Eine der wesentlichsten Grundlagen der Versuchsplanung ist die *heuristische Versuchsstrategie*. Im Rahmen dieser Methode sind gezielte Fragen zu allen wichtigen Versuchs-kriterien zu beantworten; die Gesamtheit der Antworten stellt das Gerüst des Versuchsplanes dar. Die folgende Frageliste soll als Beispiel für die heuristische Versuchsstrategie dienen:

### ***Fragen für die Planung von Versuchen***

- Welche Ergebnisse und Aussagen sollen durch die Untersuchungen erreicht werden?
  - Sollen die Ergebnisse und Aussagen speziellen und/oder allgemeingültigen und/oder verallgemeinerungsfähigen Charakter und/oder Modellcharakter tragen?
  - Gewährleisten die zu erwartenden Ergebnisse und Aussagen eine eindeutige Beantwortung der Fragestellung?
- Worauf kann/muß bei der Lösung des vorliegenden Problems aufgebaut werden?
  - Welche allgemeinen physikalischen Gesetzmäßigkeiten liegen dem Versuch zugrunde?
  - Welche Erkenntnisse können aus vergleichbaren, bereits ausgeführten Untersuchungen gewonnen werden?
  - Welche Vor- und/oder Vergleichsuntersuchungen sind notwendig?

### 3 Planung, Durchführung u. Auswertung von Schwingfestigkeitsversuchen

- Wie sind die angestrebten Ergebnisse und Aussagen zu erreichen? (Verfahren, Methoden)
  - Können/müssen theoretische Methoden die Untersuchungen ergänzen oder ersetzen?
  - Gibt es Näherungsverfahren und wie genau sind diese?
  - Welche Standards sind zu berücksichtigen?
- Wie ist der Stand der technischen Realisierbarkeit?
  - Welche technischen Einrichtungen sind vorhanden?
  - Welche Investitionen (spezielle Geräte, Neu-, Weiterentwicklungen oder Veränderungen an Einrichtungen und Meßvorrichtungen usw.) sind erforderlich?
  - Entspricht der zu erwartende Nutzen dem technischen und ökonomischen Aufwand?
- Wie erfolgt die Kontrolle der Versuchsparameter?
  - Welche Einflüsse dürfen vernachlässigt werden?
  - Welche speziellen Anforderungen bestehen?
- Wie groß ist der Zeitaufwand?
  - Können die gestellten Termine eingehalten werden?
  - Dürfen zugunsten eines Zeitgewinnes Abstriche bei der Genauigkeit gemacht werden?
- Welche statistischen Verfahren sollen genutzt werden?
  - Welche statistischen Methoden (Verteilungen, Schätzungen, Tests) werden für die Auswertung der Versuchsergebnisse herangezogen?
  - Welche statistischen Prüfpläne kommen in Frage?
- Welche Fachleute bzw. Institutionen und Betriebe können zur fachlichen Beratung und Unterstützung hinzugezogen werden?
- Wer erhält die Ergebnisse?

Neben einer sorgfältigen Planung ist eine gewissenhafte *Protokollierung* aller den Versuch betreffenden Maßnahmen, Ereignisse und Ergebnisse vorzunehmen. Damit sind zwei Voraussetzungen für eine verlässliche und umfassende Versuchsauswertung genannt.

Das Protokoll sollte folgende Angaben enthalten:

- |                          |  |
|--------------------------|--|
| 1. Versuchskennzeichnung | Kurzcharakteristik des Versuchs (Angaben zum Versuchsplan)                                       |
| 2. Versuchsbedingungen   | Zeit, Ort, Temperatur, Umgebungsmedium, spezielle Angaben  |
| 3. Versuchseinrichtungen | Prüfmaschine (Beanspruchungsrealisierung), Art der Einspannung, Meß- und Registriereinrichtungen |
| 4. Beanspruchungsart     | Zug-Druck, Biegung, Torsion, Temperatur  |