

Betriebsfestigkeit

Sichere und wirtschaftliche Bemessung
schwingbruchgefährdeter Bauteile

2., erweiterte Auflage

von

Dr.-Ing. Otto Buxbaum

Direktor des Fraunhofer-Instituts für Betriebsfestigkeit (LBF)
in Darmstadt

Honorarprofessor an der Technischen Universität München

Wissenschaftliche Mitarbeiter

Dr.-Ing. Vatroslav Grubisic

Dr.-Ing. Heimo Huth

Dr.-Ing. Dieter Schütz



Gliederung

0	Einführung	1
1	Beschreibung zeitlich veränderlicher Beanspruchungen	3
1.1	Systematik zeitlich veränderlicher Beanspruchungen; theoretische Grundlagen	3
1.1.1	<i>Belastung und Beanspruchung</i>	3
1.1.2	<i>Zur Entstehung zeitlich veränderlicher Kräfte und Beanspruchungen</i>	3
1.1.3	<i>Deterministische und stochastische Beanspruchungs-Zeit-Funktionen</i>	4
1.1.4	<i>Zur Definition eines stochastischen Prozesses; Scharmittelwerte</i>	4
1.1.5	<i>Stationäre und ergodische Zufallsprozesse; Zeitmittelwerte</i>	6
1.1.6	<i>Diskussion der vorgestellten statistischen Modelle</i>	8
1.1.7	<i>Eine Systematik der Beanspruchungs-Zeit-Funktionen; kontinuierliche und diskontinuierliche Zufallsprozesse</i>	8
1.2	Ermittlung von Beanspruchungskollektiven mit Hilfe von Zählverfahren	11
1.2.1	<i>Der Lastablauf im Wöhlerversuch</i>	11
1.2.2	<i>Die Zählverfahren</i>	12
1.2.2.1	<i>Allgemeines</i>	12
1.2.2.2	<i>Definition eines Bezugsniveaus; Grund- und Zusatzbeanspruchung</i>	14
1.2.2.3	<i>Einparametrische Zählverfahren</i>	15
1.2.2.4	<i>Rückstellbreiten</i>	17
1.2.2.5	<i>Zweiparametrische Zählverfahren</i>	18
1.2.2.6	<i>Momentanwert- und Verweildauerzählung</i>	19
1.2.3	<i>Interpretation eines Zählergebnisses</i>	19
1.2.4	<i>Statistische Kennwerte einer Häufigkeitsverteilung</i>	21
1.2.5	<i>Zur Auswahl eines geeigneten Zählverfahrens</i>	22
1.2.6	<i>Abschnittsweise veränderliche Grundbeanspruchung; Belastungsabschnitte</i>	25
1.3	Amplituden- und Einheitskollektive	27
1.3.1	<i>Normierte Darstellung von Häufigkeitsverteilungen; Amplitudenkollektive</i>	27
1.3.2	<i>Einheitskollektive</i>	28

1.3.3	Näherungsweise Ermittlung des Verteilungsgesetzes einer Häufigkeitsverteilung	29
1.3.4	Häufigkeitsverteilungen in Wahrscheinlichkeitsnetzen	31
1.3.5	Näherungsweise Extrapolation einer Häufigkeitsverteilung	35
1.4	Extremwertverteilungen	37
1.4.1	Parameter einer Häufigkeitsverteilung	37
1.4.2	Extremwerte von Häufigkeitsverteilungen	38
1.4.3	Beispiel für die Ermittlung einer Extremwertverteilung	40
1.4.4	Extrapolation einer Häufigkeitsverteilung und Ableitung von Bemessungsbeanspruchungen	41
1.4.5	Hinweise für die Anwendung der Extremwertverteilung.	43
1.5	Stationäre und quasistationäre kontinuierliche Zufallsprozesse	48
1.5.1	Gründe für eine Auswertung	48
1.5.2	Die spektrale Leistungsdichte	49
1.5.3	Die Riceschen Beziehungen; der stationäre Gaußsche Zufallsprozeß.	51
1.5.4	Eingeschränkte Stationarität; quasistationäre Prozesse	53
1.5.5	Anwendung des Leistungsspektrums und des Modells quasistationärer Prozesse	55
1.6	Trennung von Beanspruchungsanteilen nach ihren Ursachen	57
1.6.1	Ursachen für die Entstehung von Beanspruchungs-Zeit-Funktionen.	57
1.6.2	Kriterien für die Trennung	58
1.6.3	Frequenzfilterung.	59
1.6.4	Filterung mit variabler Grenzfrequenz	63
1.7	Diskontinuierliche Zufallsprozesse	65
1.7.1	Definition von Arbeitsbeanspruchungen und Arbeitsabschnitten	65
1.7.2	Theoretische Grundlagen	66
1.7.3	Eintrittszeit und Dauer der Arbeitsabschnitte	67
1.7.4	Typen von Arbeitsabschnitten	70
1.7.5	Inhalt der Arbeitsabschnitte	70
1.7.6	Zur Generierung von Arbeitsbeanspruchungen	71
1.8	Beziehungen zwischen Beanspruchungs-Zeit-Funktionen	76
1.8.1	Last- und systembedingte Unterschiede	76
1.8.2	Theoretische Zusammenhänge bei quasistationären Prozessen	77
1.8.3	Der dynamische Vergrößerungsfaktor als Näherungslösung	78
1.8.4	Beziehungen zwischen Häufigkeitsverteilungen	81

1.9	Ableiten von Lastannahmen	84
2	Ermittlung ertragbarer Beanspruchungen	87
2.1	Das Phänomen der Schädigung metallischer Werkstoffe unter zeitlich veränderlicher Beanspruchung	87
2.1.1	<i>Abriß der historischen Entwicklung</i>	87
2.1.2	<i>Theoretische Ansätze</i>	88
2.1.3	<i>Zum Wechselverformungsverhalten</i>	90
2.1.4	<i>Zum Bruchverhalten</i>	96
2.2	Statistische Hilfsmittel zur Beschreibung der natürlichen Streuung der Schwingfestigkeit	106
2.2.1	<i>Zur Wahl eines Verteilungsgesetzes</i>	106
2.2.2	<i>Die logarithmische Normalverteilung</i>	107
2.2.3	<i>Abdecken des Risikos aus den Zufälligkeiten weniger Schwingfestigkeitsversuche</i>	109
2.2.4	<i>Verfahren zur Bestimmung der Dauerfestigkeit</i>	111
2.2.5	<i>Signifikanztests</i>	116
2.3	Festigkeitsverhalten unter schwingender Belastung zwischen konstanten Grenzen (Wöhlerversuche)	122
2.3.1	<i>Die Kurzzeitfestigkeit</i>	122
2.3.2	<i>Die Zeitfestigkeit</i>	124
2.3.3	<i>Die Dauerfestigkeit</i>	129
2.3.4	<i>Zur Streuung der Schwingfestigkeit und Empfehlungen über die Zahl der Versuche</i>	131
2.3.5	<i>Zum Rißfortschritt unter einstufiger Belastung</i>	132
2.3.6	<i>Zeit- und Dauerfestigkeitsschaubilder</i>	134
2.4	Festigkeitsverhalten unter beliebig veränderlicher Belastung (Betriebsfestigkeitsversuche)	142
2.4.1	<i>Definitionen und Darstellung der Ergebnisse</i>	142
2.4.2	<i>Programmbelastungsversuche</i>	146
2.4.3	<i>Zufallslastenversuche</i>	150
2.4.4	<i>Standardisierte Lastfolgen</i>	154
2.4.5	<i>Betriebslastennachfahrversuche</i>	156
2.4.6	<i>Zum Rißfortschritt unter beliebig veränderlicher Belastung</i>	158
2.5	Einflüsse auf das Festigkeitsverhalten metallischer Werkstoffe bei schwingender Beanspruchung	166
2.5.1	<i>Beanspruchungsabhängige Einflüsse</i>	166

2.5.1.1	Die Formzahl	166
2.5.1.2	Nichtlineare Spannungskonzentration	168
2.5.1.3	Kerbwirkung	170
2.5.1.4	Die äquivalente Formzahl	172
2.5.1.5	Mittelspannung	174
2.5.1.6	Beanspruchungsart	176
2.5.2	Werkstoff- und fertigungsabhängige Einflüsse	177
2.5.2.1	Werkstoffeigenschaften	177
2.5.2.2	Größeneinfluß	185
2.5.2.3	Oberflächenzustand	186
2.5.2.4	Eigenspannungen	189
2.5.3	Umgebungsabhängige Einflüsse	193
2.5.3.1	Korrosion	193
2.5.3.2	Reibkorrosion	194
2.5.3.3	Temperatur	196
2.5.3.4	Frequenz und Form der Beanspruchung	198
2.5.3.5	Neutronenbestrahlung	199
2.6	Festigkeitsverhalten unter mehrachsiger Schwingbeanspruchung .	206
2.6.1	<i>Problembeschreibung</i>	206
2.6.2	<i>Versuchsergebnisse</i>	207
2.6.3	<i>Interpretation der Versuchsergebnisse und Ableiten von Berechnungsverfahren</i>	209
2.6.3.1	Duktile Werkstoffe	210
2.6.3.2	Semiduktile Werkstoffe	213
2.6.3.3	Spröde Werkstoffe	215
2.6.4	<i>Bestimmen der Anstrengung bei elastoplastischer Verformung</i>	216
2.7	Zur Schwingfestigkeit von Bauteilen und Fügungen	222
2.7.1	<i>Bauteile</i>	222
2.7.1.1	Einfluß der konstruktiven Gestaltung, Unterschiede zwischen Bauteil und Probestab	222
2.7.1.2	Einfluß von Herstellung und Einsatzbedingungen, Lebensdauerstreuung	227
2.7.2	<i>Schweißverbindungen</i>	233
2.7.3	<i>Mechanische Fügungen</i>	238
2.7.3.1	Beanspruchungsverhältnisse	238
2.7.3.2	Fertigungseinflüsse	241
3	Rechnerische Lebensdauervorhersage	246
3.1	Probleme der Lebensdauervorhersage und Lösungsansätze . . .	246
3.1.1	<i>Zum Begriff der Schädigung</i>	246
3.1.2	<i>Absolute oder relative Schadensakkumulation</i>	247
3.1.3	<i>Beanspruchungs-Zeit-Funktion und Bauteileigenschaften als Einflußgrößen</i>	249

3.2	Hinweise für das Aufstellen eines Beanspruchungskollektivs . . .	250
3.3	Auswahl von Unterlagen über ertragbare Beanspruchungen . . .	251
3.3.1	<i>Einflußgrößen</i>	251
3.3.2	<i>Tendenzen</i>	252
3.3.3	<i>Zum Übertragen von Werkstoffkennwerten auf Bauteile . . .</i>	254
3.4	Die lineare Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner . . .	256
3.4.1	<i>Entstehung und Prinzip</i>	256
3.4.2	<i>Aufbereiten einer Häufigkeitsverteilung mit konstanter Grundbeanspruchung</i>	257
3.4.3	<i>Veränderliche Grundbeanspruchung</i>	258
3.5	Zur Anwendung der Schadensakkumulationshypothesen . . .	261
3.5.1	<i>Abschätzungen auf der Grundlage von Nennspannungen . . .</i>	261
3.5.2	<i>Zur Streuung der Ergebnisse</i>	261
3.5.3	<i>Beispiele für Vorschläge zur Verbesserung der Palmgren-Miner-Regel</i>	265
3.5.4	<i>Abschätzungen auf der Grundlage von Kerbgrundbeanspruchungen</i>	266
3.6	Lebensdauerabschätzung auf der Grundlage von Betriebsfestigkeitsversuchen; Relativ-Miner-Regel	271
3.7	Vorhersage der Lebensdauer rißbehafteter Bauteile	274
3.7.1	<i>Vorgehensweise</i>	274
3.7.2	<i>Vorhersage des Rißfortschritts unter Einstufenbeanspruchung .</i>	276
3.7.3	<i>Vorhersage des Rißfortschritts unter betriebsähnlichen Beanspruchungen</i>	278
3.7.3.1	<i>Empirische Verfahren</i>	279
3.7.3.2	<i>Halbempirische Verfahren</i>	280
3.7.3.3	<i>Rißschließ-Verfahren</i>	282
3.7.3.4	<i>Näherungslösung nach Schijve</i>	282
4	Bemessung und Nachweisführung	284
4.1	Bemessungsrichtlinien	284
4.1.1	<i>Statische, dauerfeste und betriebsfeste Bemessungsweise . . .</i>	284
4.1.2	<i>Schwingbruchsichere und schadenstolerante Bauweise . . .</i>	285
4.1.3	<i>Kriterien für das Bauteil-Versagen</i>	287
4.1.4	<i>Statistische Betrachtungsweise</i>	290

4.2	Optimierung	294
4.2.1	<i>Zur Realisierung des Bemessungskonzepts</i>	294
4.2.2	<i>Zugehörige Verfahren</i>	295
4.2.3	<i>Zur Einleitung von Versuchskräften in Bauteile</i>	297
4.2.4	<i>Verkürzung der Versuchszeit</i>	299
4.3	Nachweisführung	303
4.3.1	<i>Kriterien und Verfahren</i>	303
4.3.2	<i>Nachweisversuche</i>	304
4.3.3	<i>Unvermeidbare und beabsichtigte Beanspruchungsänderungen</i>	308
4.3.4	<i>Empfehlungen zur Vorgehensweise bei der rechnerischen Nachweisführung</i>	311
	Stichwortverzeichnis	315