

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

1.3.3	<i>Näherungsweise Ermittlung des Verteilungsgesetzes einer Häufigkeitsverteilung</i>	29
1.3.4	<i>Häufigkeitsverteilungen in Wahrscheinlichkeitsnetzen</i>	31
1.3.5	<i>Näherungsweise Extrapolation einer Häufigkeitsverteilung</i>	35
1.4	Extremwertverteilungen	37
1.4.1	<i>Parameter einer Häufigkeitsverteilung</i>	37
1.4.2	<i>Extremwerte von Häufigkeitsverteilungen</i>	38
1.4.3	<i>Beispiel für die Ermittlung einer Extremwertverteilung</i>	40
1.4.4	<i>Extrapolation einer Häufigkeitsverteilung und Ableitung von Bemessungsbeanspruchungen</i>	41
1.4.5	<i>Hinweise für die Anwendung der Extremwertverteilung</i>	43
1.5	Stationäre und quasistationäre kontinuierliche Zufallsprozesse	48
1.5.1	<i>Gründe für eine Auswertung</i>	48
1.5.2	<i>Die spektrale Leistungsdichte</i>	49
1.5.3	<i>Die Riceschen Beziehungen; der stationäre Gaußsche Zufallsprozeß</i>	51
1.5.4	<i>Eingeschränkte Stationarität; quasistationäre Prozesse</i>	53
1.5.5	<i>Anwendung des Leistungsspektrums und des Modells quasistationärer Prozesse</i>	55
1.6	Trennung von Beanspruchungsanteilen nach ihren Ursachen	57
1.6.1	<i>Ursachen für die Entstehung von Beanspruchungs-Zeit-Funktionen</i>	57
1.6.2	<i>Kriterien für die Trennung</i>	58
1.6.3	<i>Frequenzfilterung</i>	59
1.6.4	<i>Filterung mit variabler Grenzfrequenz</i>	63
1.7	Diskontinuierliche Zufallsprozesse	65
1.7.1	<i>Definition von Arbeitsbeanspruchungen und Arbeitsabschnitten</i>	65
1.7.2	<i>Theoretische Grundlagen</i>	66
1.7.3	<i>Eintrittszeit und Dauer der Arbeitsabschnitte</i>	67
1.7.4	<i>Typen von Arbeitsabschnitten</i>	70
1.7.5	<i>Inhalt der Arbeitsabschnitte</i>	70
1.7.6	<i>Zur Generierung von Arbeitsbeanspruchungen</i>	71
1.8	Beziehungen zwischen Beanspruchungs-Zeit-Funktionen	76
1.8.1	<i>Last- und systembedingte Unterschiede</i>	76
1.8.2	<i>Theoretische Zusammenhänge bei quasistationären Prozessen</i>	77
1.8.3	<i>Der dynamische Vergrößerungsfaktor als Näherungslösung</i>	78
1.8.4	<i>Beziehungen zwischen Häufigkeitsverteilungen</i>	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	<i>Werkstoff- und fertigungsabhängige Einflüsse</i>	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	<i>Umgebungsabhängige Einflüsse</i>	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 Einflußgrößen	251
3.3.2 Tendenzen	252
3.3.3 Zum Übertragen von Werkstoffkennwerten auf Bauteile	254
3.4 Die lineare Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner	256
3.4.1 Entstehung und Prinzip	256
3.4.2 Aufbereiten einer Häufigkeitsverteilung mit konstanter Grundbeanspruchung	257
3.4.3 Veränderliche Grundbeanspruchung	258
3.5 Zur Anwendung der Schadensakkumulationshypthesen	261
3.5.1 Abschätzungen auf der Grundlage von Nennspannungen	261
3.5.2 Zur Streuung der Ergebnisse	261
3.5.3 Beispiele für Vorschläge zur Verbesserung der Palmgren-Miner-Regel	265
3.5.4 Abschätzungen auf der Grundlage von Kerbgrundbeanspruchungen.	266
3.6 Lebensdauerabschätzung auf der Grundlage von Betriebsfestigkeitsversuchen; Relativ-Miner-Regel	271
3.7 Vorhersage der Lebensdauer rißbehafteter Bauteile	274
3.7.1 Vorgehensweise	274
3.7.2 Vorhersage des Rißfortschritts unter Einstufenbeanspruchung	276
3.7.3 Vorhersage des Rißfortschritts unter betriebsähnlichen Beanspruchungen	278
3.7.3.1 Empirische Verfahren	279
3.7.3.2 Halbempirische Verfahren	280
3.7.3.3 Rißschließ-Verfahren	282
3.7.3.4 Näherungslösung nach Schijve	282
4 Bemessung und Nachweisführung	284
4.1 Bemessungsrichtlinien	284
4.1.1 Statische, dauerfeste und betriebsfeste Bemessungsweise.	284
4.1.2 Schwingbruchsichere und schadenstolerante Bauweise	285
4.1.3 Kriterien für das Bauteil-Versagen	287
4.1.4 Statistische Betrachtungsweise	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