
Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Übersicht	1
1.1	Einführung	1
1.1.1	Problemstellung der Betriebsfestigkeit	1
1.1.2	Abriss der Zusammenhänge	7
1.1.3	Kenngößen und Grenzfälle der Betriebsfestigkeit	11
1.1.4	Nachweis der Betriebsfestigkeit	13
1.2	Übersicht	15
1.2.1	Anliegen und Gliederung dieses Buches	15
1.2.2	Begriffe und Formelzeichen	17
2	Experimentelle Grundlagen der Betriebsfestigkeit	21
2.1	Wöhler-Versuche	21
2.1.1	Kennzeichnung der Schwingbeanspruchung	21
2.1.2	Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung	23
2.1.3	Darstellung der Ergebnisse durch Wöhlerlinien	25
2.1.4	Darstellung der Ergebnisse im Dauerfestigkeits-Schaubild	27
2.1.5	Statistische Belegung der Zeitfestigkeitslinie	30
2.1.6	Statistische Belegung des Dauerfestigkeitswertes	35
2.1.7	Normierte Wöhlerlinien	39
2.1.8	Kritik des Wöhler-Versuchs	50
2.2	Blockprogramm-Versuche	51
2.2.1	Betriebsbeanspruchung und Beanspruchungskollektiv	51
2.2.2	Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung	58
2.2.3	Einfluss der Kollektivform	63
2.2.4	Normverteilung als Einheitskollektiv	64
2.2.5	Amplitudenkollektiv, Mittelspannung, Spannungsverhältnis	66
2.2.6	Überlagerte Schwingungen unterschiedlicher Frequenz	68
2.2.7	Umlaufend beanspruchte Teile	73
2.2.8	Einflüsse des Werkstoffs und der Bauteileigenschaften	77
2.2.9	Kritik des Blockprogramm-Versuchs	82
2.3	Zufallslasten-Versuche	84
2.3.1	Unterscheidung von Beanspruchungs-Zeit-Funktionen	84

2.3.2	Beschreibung stochastischer Beanspruchungsvorgänge	89
2.3.3	Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung	93
2.3.4	Betriebslastennachfahr-Versuche	96
2.3.5	Digitale Aufbereitung gemessener Beanspruchungs-Zeit-Funktionen	99
2.3.6	Analoge Erzeugung stochastischer Beanspruchungs-Zeit-Funktionen	103
2.3.7	Digitale Erzeugung stochastischer Beanspruchungs-Zeit-Funktionen	106
2.3.8	Standard-Lastfolgen mit Gauß'scher Häufigkeitsverteilung . . .	114
2.3.9	Kritik des Zufallslasten-Versuchs	120
2.4	Einzelfolgen-Versuche und spezielle Versuchstechniken	124
2.4.1	Beanspruchungs-Zeit-Funktionen mit veränderlicher Mittelspannung	124
2.4.2	Standard-Lastfolge Twist	125
2.4.3	Lebensdauer bei verändertem Kollektiv der Standard-Lastfolge	129
2.4.4	Experimentelle Ermittlung der Kerbgrundbeanspruchung . . .	132
2.4.5	Experimentelle Ermittlung des Rissfortschritts	135
2.4.6	Kritik des Einzelfolgen-Versuchs	137
2.5	Übertragbarkeit von Betriebsfestigkeits-Werten	139
2.5.1	Übereinstimmung von Lebensdauerwerten aus Labor und Betrieb	139
2.5.2	Schrifttumsauswertungen zum Reihenfolge-Einfluss	143
3	Rechnerische Verfahren der Betriebsfestigkeit	151
3.1	Berechnen der auftretenden und ertragbaren Spannungen	151
3.1.1	Nennspannung, Formzahl, bezogenes Spannungsgefälle	151
3.1.2	Spannungen aus Finite-Element- oder Randelement-Berechnungen	160
3.1.3	Rechnerische Abschätzung der Wöhlerlinien gekerbter Bauteile	175
3.1.4	Rechnerische Abschätzung der Wöhlerlinien geschweißter Bauteile	198
3.1.5	Rechnerische Behandlung des Eigenspannungseinflusses	225
3.1.6	Rechnerische Behandlung einer mehrachsigen Schwingbeanspruchung	239
3.1.7	Kritik der Verfahren zur Spannungsberechnung	260
3.2	Lebensdauerberechnung anhand der Nennspannungen	266
3.2.1	Miner-Regel (Hypothese der linearen Schädigungsakkumulation)	266

3.2.2	Elementare Form der Miner-Regel	268
3.2.3	Völligkeitsgrad und Schädigungsfunktion eines Kollektivs . . .	271
3.2.4	Schädigungsgleiches Rechteck-Ersatzkollektiv	274
3.2.5	Sinnvolle Festlegung der Kollektivtreppe	277
3.2.6	Amplitudentransformation auf ein Kollektiv mit $R_i = -1$	282
3.2.7	Original-Form der Miner-Regel	283
3.2.8	Modifizierte Form der Miner-Regel	285
3.2.9	Konsequente Form der Miner-Regel	294
3.2.10	Schädigungsäquivalente Spannungsamplitude	303
3.2.11	Überprüfung der Miner-Regel an Versuchsergebnissen	305
3.2.12	Folgerungen für die praktische Anwendung	324
3.2.13	Kritik der Miner Regel	333
3.3	Lebensdauerberechnung anhand der Kerbgrundbeanspruchung	335
3.3.1	Dehnungskontrollierte Wöhler-Versuche	335
3.3.2	Experimentell ermittelte Kerbgrundbeanspruchung und Lebensdauer	353
3.3.3	Rechnerische Ermittlung der Kerbgrundbeanspruchung	358
3.3.4	Rainflow-Verfahren	370
3.3.5	Lebensdauerberechnung anhand der Kerbgrundbeanspruchung	384
3.3.6	Lebensdauerberechnung mittels Amplituden-Transformation . .	404
3.3.7	Lebensdauerberechnung ausgehend von Finite-Element- Berechnungen	414
3.3.8	Kerbgrundbeanspruchung und normierte Wöhlerlinie	424
3.3.9	Kritik des Kerbgrund-Konzeptes	429
3.4	Lebensdauerberechnung anhand des Rissfortschritts	431
3.4.1	Spannungsfeld eines Risses	431
3.4.2	Rissfortschrittsgesetz bei Schwingbeanspruchung	436
3.4.3	Rissfortschritt bei konstanter Schwingbreite der Spannung . . .	443
3.4.4	Wöhlerlinie eines Bauteils mit Anfangsriss	447
3.4.5	Normierte Wöhlerlinie für Risse in hochbeanspruchten Bauteilen	449
3.4.6	Rissfortschritt bei veränderlicher Schwingbreite der Spannung	451
3.4.7	Rissfortschritt und Miner-Regel	453
3.4.8	Berücksichtigung von Reihenfolgeeffekten	455
3.4.9	Rissfortschrittsverhalten kurzer Risse	468
3.4.10	Rissmodell sowie Bauteil- und Werkstoffeigenschaften	487
3.4.11	Kritik des Bruchmechanik-Konzeptes	498
3.5	Berechnen der Sicherheitszahl und Ausfallwahrscheinlichkeit	501
3.5.1	Lebensdauer, Ausfallwahrscheinlichkeit, Sicherheitszahl	501
3.5.2	Extrapolation auf niedrige Ausfallwahrscheinlichkeiten	511
3.5.3	Streuung der betrieblichen Beanspruchungshöhe	518
3.5.4	Abdeckung der Zufälligkeiten weniger Einzelversuche	523
3.5.5	Anzusetzende Streuspannen und abzudeckende Streueinflüsse	526

3.5.6	Statistischer Größeneinfluss	536
3.5.7	Kritik der anzusetzenden Sicherheitszahl	548
4	Praktische Umsetzung des Betriebsfestigkeits-Konzeptes . . .	551
4.1	Abzuhandelnde Teilaufgaben als Leitlinie des Vorgehens	551
4.1.1	Festlegen der Anforderungen und der Vorgehensweise	551
4.1.2	Erkennen der schwingbruchkritischen Querschnitte	555
4.1.3	Bestimmen der einwirkenden Betriebslasten	557
4.1.4	Berechnen der kennzeichnenden Beanspruchung	568
4.1.5	Ermitteln der ertragbaren Beanspruchungshöhe	570
4.1.6	Ableiten der angemessenen Sicherheitszahl	574
4.1.7	Erstellen und Beurteilen des Nachweises	577
4.1.8	Dokumentieren des Nachweises	579
4.2	Maßnahmen bei unbefriedigendem Betriebsfestigkeits-	
	Nachweis	580
4.2.1	Maßnahmen bei unbefriedigendem Ergebnis des Nachweises . .	580
4.2.2	Maßnahmen bei Schwingbrüchen im Betrieb	584
4.3	Betriebsfestigkeit und methodisches Konstruieren	592
4.3.1	Wesen des methodischen Konstruierens	592
4.3.2	Knotenpunkte zur Betriebsfestigkeit	600
4.3.3	Gewinnen der erforderlichen Informationen	601
4.3.4	Bewertungskriterien zur Lösungsauswahl	605
4.4	Betriebsfestigkeit und unternehmerische Entscheidungen . . .	610
4.4.1	Gesichtspunkte einer Kosten-Nutzen-Analyse	610
4.4.2	Neuzeitliche Konzepte der Betriebsfestigkeit	613
4.4.3	Elemente eines Gesamtkonzeptes	622
4.4.4	Unternehmerische Entscheidungen	624
5	Anhang	625
5.1	Daten zu statistischen Verfahren	625
5.2	Typisierte Kollektive und Standard-Lastfolgen	636
5.3	Approximationsformeln für Formzahlen	641
5.4	Ältere Vorschläge zur Abschätzung der Dauerfestigkeit	649
5.5	Kurzfassung des Berechnungsablaufs nach der FKM-Richtlinie	652
5.6	Hinweise auf Daten zur Betriebsfestigkeit	663
6	Schrifttumshinweise	681
7	Verwendete Formelzeichen	707
8	Sachverzeichnis	737