

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung und Übersicht</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1.1	Problemstellung der Betriebsfestigkeit	1
1.1.2	Abriss der Zusammenhänge	7
1.1.3	Kenngrößen und Grenzfälle der Betriebsfestigkeit	11
1.1.4	Nachweis der Betriebsfestigkeit	13
<b>1.2</b>	<b>Übersicht</b>	<b>15</b>
1.2.1	Anliegen und Gliederung dieses Buches	15
1.2.2	Begriffe und Formelzeichen	17
<b>2</b>	<b>Experimentelle Grundlagen der Betriebsfestigkeit</b>	<b>21</b>
<b>2.1</b>	<b>Wöhler-Versuche</b>	<b>21</b>
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
<b>2.2</b>	<b>Blockprogramm-Versuche</b>	<b>51</b>
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
<b>2.3</b>	<b>Zufallslasten-Versuche</b>	<b>84</b>
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
<b>2.4</b>	<b>Einzelfolgen-Versuche und spezielle Versuchstechniken . . . . .</b>	<b>124</b>
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
<b>2.5</b>	<b>Übertragbarkeit von Betriebsfestigkeits-Werten . . . . .</b>	<b>139</b>
2.5.1	Übereinstimmung von Lebensdauerwerten aus Labor und Betrieb . . . . .	139
2.5.2	Schrifttumsauswertungen zum Reihenfolge-Einfluss . . . . .	143
<b>3</b>	<b>Rechnerische Verfahren der Betriebsfestigkeit . . . . .</b>	<b>151</b>
<b>3.1</b>	<b>Berechnen der auftretenden und ertragbaren Spannungen . . . . .</b>	<b>151</b>
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
<b>3.2</b>	<b>Lebensdauerberechnung anhand der Nennspannungen . . . . .</b>	<b>266</b>
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
<b>3.3</b>	<b>Lebensdauerberechnung anhand der Kerbgrundbeanspruchung</b>	<b>335</b>
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
<b>3.4</b>	<b>Lebensdauerberechnung anhand des Rissfortschritts</b> . . . . .	<b>431</b>
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
<b>3.5</b>	<b>Berechnen der Sicherheitszahl und Ausfallwahrscheinlichkeit</b>	<b>501</b>
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
<b>4</b>	<b>Praktische Umsetzung des Betriebsfestigkeits-Konzeptes . . . . .</b>	<b>551</b>
<b>4.1</b>	<b>Abzuhandelnde Teilaufgaben als Leitlinie des Vorgehens . . . . .</b>	<b>551</b>
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
<b>4.2</b>	<b>Maßnahmen bei unbefriedigendem Betriebsfestigkeits-</b>	
	<b>Nachweis . . . . .</b>	<b>580</b>
4.2.1	Maßnahmen bei unbefriedigendem Ergebnis des Nachweises . . . . .	580
4.2.2	Maßnahmen bei Schwingbrüchen im Betrieb . . . . .	584
<b>4.3</b>	<b>Betriebsfestigkeit und methodisches Konstruieren . . . . .</b>	<b>592</b>
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
<b>4.4</b>	<b>Betriebsfestigkeit und unternehmerische Entscheidungen . . . . .</b>	<b>610</b>
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
<b>5</b>	<b>Anhang . . . . .</b>	<b>625</b>
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
<b>6</b>	<b>Schrifttumshinweise . . . . .</b>	<b>681</b>
<b>7</b>	<b>Verwendete Formelzeichen . . . . .</b>	<b>707</b>
<b>8</b>	<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>737</b>