

Vorwort zur 5. Ausgabe Ri01-DE.doc

Für Konstrukteure und Berechnungsingenieure im Maschinenbau und in verwandten Bereichen der Industrie gibt es seit 1994 die **FKM-Richtlinie** für den rechnerischen Festigkeitsnachweis. Sie entstand im Arbeitskreis Bauteilfestigkeit mit der Förderung durch das Forschungskuratorium Maschinenbau und die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke".

Die Richtlinie wurde auf der Grundlage ehemaliger TGL-Standards, der früheren Richtlinie VDI 2226 und weiterer Quellen erarbeitet und auf den neuen Erkenntnisstand weiterentwickelt.

Die **FKM-Richtlinie**

- ist im Maschinenbau und in verwandten Bereichen der Industrie anwendbar,
- ermöglicht den rechnerischen Festigkeitsnachweis für stabförmige, für flächenförmige und für volumenförmige Bauteile ^{*1} unter Beachtung aller relevanten Einflüsse,
- beschreibt den statischen und den Ermüdungsfestigkeitsnachweis, letzteren je nach Beanspruchungscharakteristik als Dauer- oder als Betriebsfestigkeitsnachweis,
- gilt für Stahl, auch für nichtrostenden, bei Bauteiltemperaturen von - 40 °C bis 500 °C,
- gilt für Eisengusswerkstoff bei Bauteiltemperaturen von - 25 °C bis 500 °C,
- gilt für Aluminiumwerkstoff bei Bauteiltemperaturen von - 25 °C bis 200 °C,
- ist anwendbar für Bauteile, die mit oder ohne spannende Bearbeitung oder auch durch Schweißen hergestellt werden,
- erlaubt die Bewertung von Nennspannungen wie auch örtlicher, elastisch bestimmter Spannungen, die mittels elastizitätstheoretischer Lösungen, Finite-Elemente- oder Randelement-Berechnungen oder aus Messungen erhalten werden.

Für alle diese Anwendungsfälle gilt ein einheitlich strukturierter Berechnungsablauf. Dieser ist zum überwiegenden Teil zwangsläufig. Der Anwender hat nur wenige Entscheidungen zu treffen.

Die Richtlinie ist ein Berechnungsalgorithmus, bestehend aus Anweisungen, Formeln und Tabellen. Die eingefügten Bilder haben meistens nur erläuternde

Funktion. Textliche Erklärungen erfolgen, wenn sie zur sicheren Anwendung erforderlich erscheinen.

Der Inhalt mit seinen recht umfassenden Berechnungsmöglichkeiten entspricht dem in einer Richtlinie anwendbaren Stand des Wissens. Die verwendeten Formelzeichen sind zum Teil der neueren Entwicklung angepasst. Der Berechnungsablauf wird zur besseren Verständlichkeit durch Beispiele ergänzt.

Die praktische Durchführung des Festigkeitsnachweises sollte zweckmäßigerweise mittels Rechnerprogrammen erfolgen. Verfügbar sind zur Zeit die PC-Rechnerprogramme **RIFESTPLUS** (gültig für die Berechnung mit örtlichen, elastisch bestimmten Spannungen in flächenförmigen oder in volumenförmigen Bauteilen) und **WELLE** (gültig für die Berechnung mit Nennspannungen und für den wichtigen Fall der Achsen und Wellen, auch mit Getrieben).

Die bisherigen vier Ausgaben der Richtlinie haben erfreulich großes Interesse hervorgerufen, woran das Bedürfnis der Anwender nach einer solchen modernen Bemessungsgrundlage für viele Anwendungsfälle erkennbar ist. Das wurde auch durch die VDI-Tagungen "Festigkeitsberechnung metallischer Bauteile" bestätigt, die zum Themenkreis der Richtlinie 1995, 1998 und 2002 in Fulda stattfanden.

Die *inhaltlichen* Änderungen in der dritten Ausgabe betrafen unter anderem die Berücksichtigung von nichtrostendem und von Schmiedestahl, den technologischen Größenfaktor, die plastischen Stützzahlen für den statischen Festigkeitsnachweis, die Dauerfestigkeit von Grauguss und von Temperguss, die Aufnahme neuer Kerbfälle und die Berücksichtigung einer ertragbaren Minersumme kleiner als eins für den Betriebsfestigkeitsnachweis, die rechnerische Behandlung geschweißter Bauteile, den Nachweis für mehrachsige Spannungen und die Berücksichtigung eines Festigkeitsnachweises mit experimentell bestimmten Bauteilfestigkeitswerten.

Eine wesentliche *formale* Änderung seit der dritten Ausgabe ist die neue Gliederung mit den vier Kapiteln über den statischen Festigkeitsnachweis mit Nennspannungen, den Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit Nennspannungen, den statischen Festigkeitsnachweis mit örtlichen elastisch bestimmten Spannungen und den Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit örtlichen elastisch bestimmten Spannungen. Für eine einfache Anwendung ist der jeweilige Berechnungsablauf in jedem dieser Kapitel vollständig dargestellt, auch wenn sich dadurch eine Wiederholung gleicher oder fast gleicher Textteile ergibt.

¹ In der englischen Fassung als „stabförmige (1D), flächenförmige (2D) oder volumenförmige (3D) Bauteile“ bezeichnet.

Die wesentliche Änderung in der vierten Ausgabe von 2002 ist die Möglichkeit eines rechnerischen Festigkeitsnachweises auch für Bauteile aus Aluminiumwerkstoffen, und zwar nach der gleichen Berechnungsweise, wie sie bisher für Bauteile aus Stahl und Eisengusswerkstoffen zutraf.

Die für die Einbeziehung von Aluminiumwerkstoff notwendigen Festlegungen wurden nach Literaturlösungen getroffen. Dabei zeigte sich allerdings, dass einige der relevanten Einflussgrößen noch nicht mit der wünschenswerten Ausführlichkeit untersucht wurden oder dass vorliegende Ergebnisse aufgrund großer Streuungen nicht objektiv bewertbar waren. In diesen Fällen wurden die Festlegungen nach sorgfältiger Abwägung der sachlichen Zusammenhänge vorgenommen.

Bezüglich dieses rechnerischen Festigkeitsnachweises für Bauteile aus Aluminiumwerkstoff wird die Richtlinie der Fachöffentlichkeit mit dem Hinweis übergeben, dass sie vorerst mit der gebotenen Umsicht und im kritischen Vergleich zum bisherigen Erfahrungshintergrund angewendet werden soll.

Die beteiligten Forschungsstellen und das Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. (FKM) sind offen für Erfahrungsberichte und Änderungsvorschläge, die sich aus praktischen Anwendungen der Richtlinie ergeben.

Die vorliegende fünfte, überarbeitete Ausgabe der *FKM-Richtlinie* berücksichtigt neben berichtigten Druckfehlerern und verbesserten Formulierungen auch sachlich notwendige Änderungen gegenüber der vierten Ausgabe. Diese betreffen

- eine neue Formulierung des Haftungsausschlusses,
- ergänzende Hinweise zum statischen Festigkeitsnachweis dahingehend, dass die statische Bauteilfestigkeit nicht notwendigerweise durch Versagen in einem Kerbquerschnitt bestimmt wird, sondern dass auch globales Versagen in einem anderen, evtl. nicht oder kaum gekerbten Bauteilquerschnitt maßgebend sein kann, was bei der Ermittlung der plastischen Formzahl zu beachten ist,
- eine konsequente Unterscheidung zwischen der Dauerfestigkeit = Bezugspunkt für die Berechnung am Abknickpunkt der Zeitfestigkeitslinie und der Grenzspannungsamplitude für $N = \infty$ bei Wöhlerlinien Typ II, wie sie für nichtgeschweißten Aluminiumwerkstoff und nunmehr auch für austenischen Stahl in Ansatz kommen,
- einen einheitlichen Berechnungsgang für den Nachweis der Zeitfestigkeit, der Dauerfestigkeit bzw. der Grenzspannungsamplitude für $N = \infty$ im Fall eines Einstufenkollektivs und für den Nachweis der Betriebsfestigkeit im Fall eines Mehrstufenkollektivs, einschließlich der Berechnung mit einer Äquivalentspannungsamplitude für Wöhlerlinien vom Typ I oder Typ II,

- einen überarbeiteten Berechnungsgang nach dem Verfahren Miner konsequent bei Wöhlerlinien vom Typ II,
- klar unterschiedene Regeln für die Überlagerung von Spannungskomponenten bei proportionaler Beanspruchung bzw. bei nichtproportionaler Beanspruchung entsprechend den diesbezüglichen Ausführungen im Kap. 5.10,
- eine neue Formulierung des Kap. 5.6 zur Anpassung eines Spannungskollektivs an die Bauteil-Wöhlerlinie,
- eine neue Formulierung des Kap. 5.11 zur experimentellen Bestimmung von Bauteil-Festigkeitswerten,
- eine inhaltlich und textliche Überarbeitung des Anwendungsbeispiels nach Kap. 6.5 in Entsprechung zu Kap 5.10.

Laufende Forschungsvorhaben zum statischen Festigkeitsnachweis mit örtlichen, elastisch bestimmten Spannungen und zu Bauteilen mit scharfen Kerben werden zukünftig weitere Verbesserungen der Richtlinie bringen.

Diese fünfte, überarbeitete Ausgabe der *FKM-Richtlinie* liegt erstmals auch in einer (inhaltlich identischen) englischen Ausgabe vor. Mit ihr verbindet sich die Erwartung, dass sie nun auch in internationalen Anwenderkreisen ein unverändert großes Interesse wie die vorangehenden Ausgaben erfahren möge.

**Künftige Aktualisierungen und
Änderungen siehe unter
www.fkm-richtlinie.de**

Literatur

- /1/ TGL 19 340 (1983). Ermüdungsfestigkeit, Dauerfestigkeit der Maschinenbauteile.
- /2/ TGL 19 341 (1988). Festigkeitsnachweis für Bauteile aus Eisengusswerkstoffen.
- /3/ TGL 19 333 (1979). Schwingfestigkeit, Zeitfestigkeit von Achsen und Wellen.
- /4/ TGL 19 350 (1986). Ermüdungsfestigkeit, Betriebsfestigkeit der Maschinenbauteile.
- /5/ TGL 19 352 (Entwurf 1988). Aufstellung und Überlagerung von Beanspruchungskollektiven.
- /6/ Richtlinie VDI 2226 (1965). Empfehlung für die Festigkeitsberechnung metallischer Bauteile.
- /7/ DIN 18 800 Teil 1 (1990). Stahlbauten, Bemessung und Konstruktion.
- /8/ DIN ENV 1993 (1993). Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln, ... (*Eurocode 3*).
- /9/ *Hobbacher, A.*: Empfehlungen zur Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungen und Bauteile. Düsseldorf: DVS Verlag GmbH, 1997 (*IIW-Empfehlungen*).
- /10/ *Haibach, E.*: Betriebsfestigkeit – Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung, 2. Aufl. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 2002, ISBN 3-540-43142-X.
- /11/ *Radaj, D.*: Ermüdungsfestigkeit. Grundlage für Leichtbau, Maschinenbau und Stahlbau, 2. Aufl. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 2003, ISBN 3-540-44063-1.
- /12/ FKM-Forschungsheft 241 (1999). Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Bauteile aus Aluminiumwerkstoff.
- /13/ FKM-Forschungsheft 230 (1998). Randschichthärtung.
- /14/ FKM-Forschungsheft 227 (1997). Lebensdauervorhersage II.
- /15/ FKM-Forschungsheft 221-2 (1997). Mehrachsige und zusammengesetzte Beanspruchungen.
- /16/ FKM-Forschungsheft 221 (1996). Wechselfestigkeit von Flachproben aus Grauguss.
- /17/ FKM-Forschungsheft 183-2 (1994). Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile *¹, Richtlinie.
- /18/ FKM-Forschungsheft 183-1 (1994). Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile, Kommentare.
- /19/ FKM-Forschungsheft 180 (1994). Schweißverbindungen II.
- /20/ FKM-Forschungsheft 143 (1989). Schweißverbindungen I.
- /21/ FKM-Richtlinie Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile, 3., vollständig überarbeitete und erweiterte Ausgabe (1998).
- /22/ FKM-Richtlinie Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile, 4., erweiterte Ausgabe (2002).

Einschlägige Tagungsberichte

Festigkeitsberechnung metallischer Bauteile, Empfehlungen für Konstrukteure und Entwicklungsingenieure. VDI Berichte 1227, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1995.

Festigkeitsberechnung metallischer Bauteile, Empfehlungen für Entwicklungsingenieure und Konstrukteure. VDI Berichte 1442, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1998.

Festigkeitsberechnung metallischer Bauteile, Empfehlungen für Entwicklungsingenieure und Konstrukteure. VDI Berichte 1698, Düsseldorf, VDI-Verlag, 2002.

Bauteillebensdauer Nachweiskonzepte. DVM-Bericht 800, Deutscher Verband für Materialsorschung und -prüfung, Berlin 1997.

Betriebsfestigkeit – Neue Entwicklungen bei der Lebensdauerberechnung von Bauteilen. DVM-Bericht 802, Deutscher Verband für Materialsorschung und -prüfung, Berlin 2003.

¹ aus Stahl und Eisengusswerkstoff.

Inhalt

0	Allgemeines	<i>Seite</i>	5	Anhänge	<i>Seite</i>
0.1	Anwendungsbereich	9	5.1	Werkstofftabellen	131
0.2	Grundlagen		5.2	Formzahlen	178
0.3	Struktur und Elemente		5.3	Kerbwirkungszahlen	187
1	Statischer Festigkeitsnachweis mit Nennspannungen		5.4	Bauteilklassen für geschweißte Bauteile aus Baustahl und Aluminiumlegierungen	195
1.0	Allgemeines	19	5.5	Zur Ermüdungsfestigkeit geschweißter Bauteile	209
1.1	Spannungskennwerte		5.6	Anpassung eines Spannungskollektives an die Bauteil-Wöhlerlinie und Stufung eines Kollektivs	216
1.2	Werkstoffkennwerte	22	5.7	Berechnung mit Beanspruchungsgruppen	218
1.3	Konstruktionskennwerte	30	5.8	Besonderheiten der Bauteilfestigkeit randschichtgehärteter Bauteile	222
1.4	Bauteilfestigkeit	33	5.9	Ein verbessertes Verfahren zur Berechnung der Bauteil-Dauerfestigkeit bei synchronen mehrachsigen Spannungen	223
1.5	Sicherheitsfaktoren	34	5.10	Näherungslösung für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis bei nichtproportionalen mehrachsigen Spannungen	226
1.6	Nachweis	36	5.11	Experimentelle Bestimmung von Bauteil-Festigkeitswerten	227
2	Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit Nennspannungen		5.12	Formzahl für eine Ersatzstruktur	230
2.0	Allgemeines	41	6	Anwendungsbeispiele	
2.1	Spannungskollektivkennwerte		6.1	Achse mit Absatz	231
2.2	Werkstoffkennwerte	47	6.2	Welle mit Keilriemengetriebe	236
2.3	Konstruktionskennwerte	50	6.3	Verdichterflansch aus Grauguss	241
2.4	Bauteilfestigkeit	57	6.4	Geschweißter Lochstab	245
2.5	Sicherheitsfaktoren	68	6.5	Achse mit zwei unabhängigen Kräften	250
2.6	Nachweis	70	6.6	Bauteil aus Aluminiumknetwerkstoff	256
3	Statischer Festigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen		7	Formelzeichen	
3.0	Allgemeines	73	7.1	Abkürzungen	259
3.1	Spannungskennwerte		7.2	Indizes	
3.2	Werkstoffkennwerte	76	7.3	Kleinbuchstaben	
3.3	Konstruktionskennwerte	85	7.4	Großbuchstaben	260
3.4	Bauteilfestigkeit	89	7.5	Griechische Buchstaben	261
3.5	Sicherheitsfaktoren	90	7.6	Zugrundeliegende Formeln	262
3.6	Nachweis	93	8	Sachwörterverzeichnis	263
4	Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen		9	Änderungen	267
4.0	Allgemeines	97			
4.1	Spannungskollektivkennwerte				
4.2	Werkstoffkennwerte	103			
4.3	Konstruktionskennwerte	106			
4.4	Bauteilfestigkeit	113			
4.5	Sicherheitsfaktoren	125			
4.6	Nachweis	127			

Eine zusammenfassenden Beschreibung des Berechnungsablaufes
nach den Gleichungen der Richtlinie
ist als lose eingelegtes Blatt ganz hinten zu finden.

0 Allgemeines

Ri02-DE.doc

0.1 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie gilt für den Maschinenbau und für verwandte Bereiche der Industrie. Ihre Anwendung ist zwischen den Vertragspartnern zu vereinbaren.

Für mechanisch beanspruchte Bauteile ermöglicht sie einen rechnerischen Nachweis der statischen Festigkeit und der Ermüdungsfestigkeit, letzteren je nach Beanspruchungscharakteristik als Dauer-, als Zeit- oder als Betriebsfestigkeitsnachweis.

Andere rechnerische Nachweise wie beispielsweise der Sprödbruchsicherheit, der Stabilität, der Standsicherheit oder der Verformung unter Last, oder auch experimentelle Festigkeitsnachweise *¹ sind nicht Gegenstand der Richtlinie.

Es wird vorausgesetzt, dass die Bauteile hinsichtlich Konstruktion, Werkstoff und Verarbeitung fachgerecht und im technischen Sinne fehlerfrei ausgeführt sind.

Die Richtlinie gilt für Bauteile aus Eisen- und Aluminiumwerkstoff - auch bei höherer Temperatur, die mit oder ohne spanabhebende Bearbeitung oder auch durch Schweißen hergestellt werden, und im einzelnen

- für Bauteile mit geometrischen Kerben,
- für Bauteile mit Schweißverbindungen,
- für statische Beanspruchung,
- für Ermüdungsbeanspruchung ab etwa 10⁴ Zyklen als Einstufen- oder Kollektivbeanspruchung,
- für Walz- und Schmiedestahl, auch nichtrostenden, Eisengusswerkstoff sowie Aluminiumknet- und -gusswerkstoff,
- für Bauteiltemperaturen
 - von - 40°C bis 500°C bei Stahl,
 - von - 25°C bis 500°C Eisengusswerkstoff und
 - von - 25°C bis 200°C bei Aluminiumwerkstoff,
- für nichtkorrosives Umgebungsmedium.

Bei Anwendung der Richtlinie außerhalb des genannten Anwendungsbereiches sind ergänzende Vereinbarungen zu treffen.

Die Richtlinie gilt nicht, wenn ein Festigkeitsnachweis nach anderen Normen, Vorschriften oder Richtlinien gefordert ist, oder wenn speziellere Berechnungsunterlagen, wie beispielsweise für Schraubenverbindungen, vorliegen.

¹ Gegenstand des Kap. 5.11 "Experimentelle Bestimmung von Bauteil-Festigkeitswerten" ist nicht die Durchführung eines experimentellen Festigkeitsnachweises, sondern nur die Frage, wie aus wenigen experimentell bestimmten Bauteilfestigkeitswerten ein hinreichend sicherer, für einen allgemeingültigen Festigkeitsnachweis geeigneter Bauteilfestigkeitswert bestimmt werden kann.

² für die versagenskritischen Nachweispunkte der betrachteten Querschnitte oder des Bauteiles.

0.2 Grundlagen

Grundlage der Richtlinie sind die auf Seite 8 angegebenen Literaturstellen, insbesondere die ehemaligen TGL-Standards, die frühere VDI-Richtlinie 2226 sowie Regelungen der DIN 18 800, der IIW-Empfehlungen und des Eurocode 3. Unter Einbeziehung neuerer Forschungsergebnisse wurde die Richtlinie auf den neuen Erkenntnisstand weiterentwickelt.

0.3 Struktur und Elemente

Inhalt	Seite
0.3.0 Allgemeines	9
0.3.1 Berechnungsablauf	10
0.3.2 Spannungskennwerte	
0.3.3 Formen des Festigkeitsnachweises	11
0.3.3.0 Allgemeines	
0.3.3.1 Statischer Festigkeitsnachweis mit Nennspannungen, Kap. 1	
0.3.3.2 Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit Nennspannungen, Kap. 2	12
0.3.3.3 Statischer Festigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen, Kap. 3	
0.3.3.4 Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen, Kap. 4	13
0.3.4 Bauteilarten	
0.3.4.0 Allgemeines	
0.3.4.1 Stabförmige Bauteile	
0.3.4.2 Flächenförmige Bauteile	14
0.3.4.3 Volumenförmige Bauteile	15
0.3.5 Einachsige und mehrachsige Spannungen	16

0.3.0 Allgemeines

Der statische Festigkeitsnachweis wird für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis vorausgesetzt.

Vor einer Anwendung der Richtlinie ist zu entscheiden,

- für welche Querschnitte oder konstruktiven Details des Bauteiles ein Festigkeitsnachweis durchzuführen ist *² und
- welche Belastungen bei der Beanspruchungsermittlung zu berücksichtigen sind.

Die Höhe der Belastungen ist so festzulegen, dass sie auf der sicheren Seite liegen und mit hinreichender Wahrscheinlichkeit größer als die meisten der auftretenden Belastungen sind *³.

³ Eine quantifizierte Angabe dieser Wahrscheinlichkeit ist aber in der Regel kaum möglich.

Die Festigkeitswerte sollen einem Erwartungswert mit 97,5 % Wahrscheinlichkeit entsprechen (mittlere Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{u}} = 97,5 \%$).

0.3.1 Berechnungsablauf

Der Berechnungsablauf beim statischen Festigkeitsnachweis ist im Bild 0.0.1 dargestellt, der im Prinzip gleiche Berechnungsablauf des Ermüdungsfestigkeitsnachweises im Bild 0.0.2 *4.

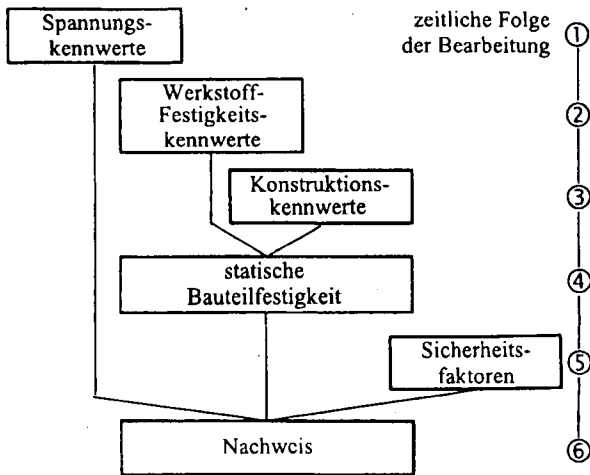


Bild 0.0.1 Ablauf des statischen Festigkeitsnachweises.

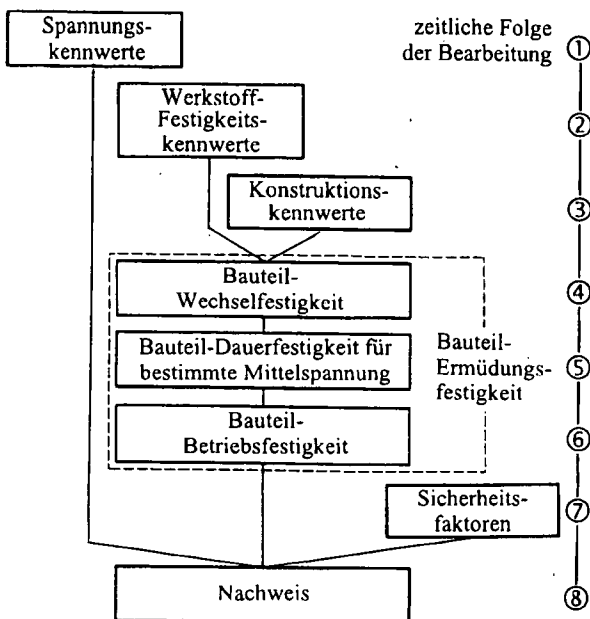


Bild 0.0.2 Ablauf des Ermüdungsfestigkeitsnachweises.

Beim *Nachweis* (in beiden Bildern ganz unten) sind die *Spannungskennwerte* für die im Bauteil auftretende Beanspruchung (links oben) und die aus den *Werkstoff-Festigkeitskennwerten* und den *Konstruktionskennwerten* abgeleiteten *Bauteilfestigkeitswerte* (mittlere Spalte) unter Berücksichtigung der *Sicherheitsfaktoren* (rechts unten) gegenüberzustellen. Bei den Bauteil-Ermüdungsfestigkeitswerten werden Mittelspannung und Betriebsfestigkeit als wesentliche Einflüsse erfasst. Der Festigkeitsnachweis ist erbracht, wenn die Spannungskennwerte die Bauteilfestigkeitswerte unter Berücksichtigung der Sicherheitsfaktoren höchstens zu 100 % auslasten.

Die Anordnung der einzelnen Berechnungselemente in Bild 0.0.1 und 0.0.2 veranschaulicht (von oben nach unten) die zeitlich mögliche Folge ihrer Bearbeitung im Berechnungsablauf.

0.3.2 Spannungskennwerte

Für eine Anwendung der Richtlinie sind die aus den Belastungen des Bauteiles sich ergebenden Beanspruchungen zu bestimmen, und zwar als Spannungen im *Nachweispunkt*, d. h. im versagenskritischen Punkt des betrachteten Querschnittes oder des Bauteiles. Im Zweifelsfall sind mehrere Nachweispunkte zu betrachten, so beispielsweise bei Schweißverbindungen der Schweißnahtübergang und die Schweißnahtwurzel.

Dabei ist es notwendig zu unterscheiden hinsichtlich der Bezeichnung und Indizierung der verschiedenen Spannungskomponenten bzw. Spannungsarten, die in stabförmigen, in flächenförmigen und in volumenförmigen Bauteilen auftreten, Kap. 0.3.4.

Die Spannungen sind nach bekannten Grundsätzen und Methoden zu bestimmen: analytisch nach der elementaren oder höheren Festigkeitslehre, numerisch nach der Finite-Elemente-Methode oder nach der Randelement-Methode, oder experimentell durch Messung.

Alle Spannungen, außer den Spannungsamplituden, sind vorzeichenbehaftet, insbesondere sind Druckspannungen negativ.

Für den Berechnungsablauf ist es notwendig, nach der Art der Spannungsermittlung für den betrachteten Nachweispunkt zu unterscheiden: Die Spannungen können bestimmt werden

- als Nennspannungen *5, mit S und T bezeichnet,
- als örtliche Spannungen (elastische Kerbspannungen bzw. Strukturspannungen *6), mit σ und τ bezeichnet.

4 Eine zusammenfassende Beschreibung des Berechnungsablaufes nach den Gleichungen der Richtlinie ist als loses Blatt ganz hinten zu finden.

5 Nennspannungen sind nur für einen definierten Querschnitt berechenbar.

6 Elastische Kerbspannungen sind um eine Formzahl höher als Nennspannungen. Bei Schweißverbindungen werden sie als effektive

Dementsprechend sind auch die Bauteilfestigkeitswerte zu bestimmen

- als Nennfestigkeitswerte oder
- als örtliche Festigkeitswerte der Kerbspannung bzw. der Strukturspannung.

Mit der in beiden Fällen gleichartigen Struktur des Berechnungsablaufes ist angestrebt, dass für vergleichbare Berechnungen mit Nennspannungen oder mit örtlichen Spannungen möglichst gleiche Ergebnisse erhalten werden.

0.3.3 Formen des Festigkeitsnachweises

0.3.3.0 Allgemeines

Um die Richtlinie übersichtlich und eindeutig zu gestalten, ist sie in vier Kapitel gegliedert, Bild 0.0.3:

- Statischer Festigkeitsnachweis mit Nennspannungen, Kap. 1,
- Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit Nennspannungen, Kap. 2,
- Statischer Festigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen, Kap. 3,
- Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen, Kap. 4.

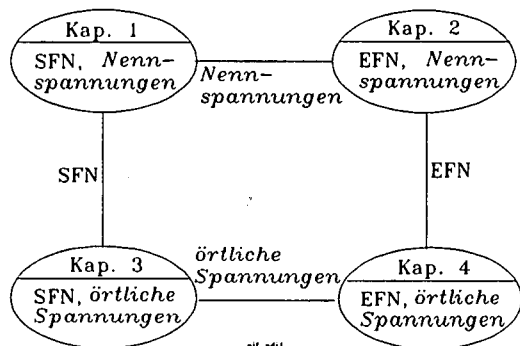


Bild 0.0.3 Gliederung der Richtlinie.

Der Berechnungsablauf ist in jedem der vier Kapitel vollständig dargestellt, selbst wenn sich daraus Wiederholungen gleicher oder fast gleicher Teile in Kap. 1 und Kap. 3 bzw. in Kap. 2 und Kap. 4 ergeben.

Die Berechnung mit Nennspannungen ist für einfache stabförmige und für flächenförmige Bauteile zu bevorzugen. Die Berechnung mit örtlichen Spannungen ist bei volumenförmigen Bauteilen anzuwenden und darüber hinaus ganz allgemein, wenn die Spannungsbestimmung nach der Finite-Element-Methode oder nach der Randelement-Methode durchgeführt wird, wenn

keine definierten Querschnitte oder keine einfachen Querschnittsformen vorliegen, wenn keine Formzahlen oder Kerbwirkungszahlen bekannt sind oder (bezüglich des statischen Festigkeitsnachweises) bei sprödem Werkstoff.

0.3.3.1 Statischer Festigkeitsnachweis mit Nennspannungen, Kap. 1

Maßgebliche Spannungskennwerte sind die extremen Maximalspannungen und Minimalspannungen der einzelnen Spannungsarten bzw. Spannungskomponenten (als Nennspannungswerte für Zugdruck, S_{zd} , usw. ^{*7}) ^{*8}, Kap. 1.1.

Werkstoff-Festigkeitskennwerte sind Zugfestigkeit und Fließgrenze (Streckgrenze bzw. 0,2-Dehngrenze) unter Beachtung des technologischen Größeneinflusses sowie hieraus abgeleitete Werte für Schubspannung. Der Einfluss höherer Temperatur auf die Werkstoff-Festigkeitskennwerte - Warmfestigkeit und Zeitstandfestigkeit, Warmdehngrenze und 1%-Zeitdehngrenze - ist mittels Temperaturfaktoren zu berücksichtigen, Kap. 1.2.

Konstruktionskennwerte sind vor allem die plastischen Stützzahlen, mit denen eine erfahrungsgemäß zulässige Teilplastizierung des Bauteiles je nach Fließgrenze, Belastung, Querschnitt und Formzahl berücksichtigt wird. Aus den plastischen Stützzahlen und aus weiteren Größen ist ein zusammenfassender Konstruktionsfaktor zu berechnen, Kap. 1.3.

Die ertragbaren Nennwerte der statischen Bauteilfestigkeit ergeben sich aus der Zugfestigkeit, dividiert durch den jeweiligen Konstruktionsfaktor, Kap. 1.4.

Grundwert der Sicherheitsfaktoren ist der praxisübliche Wert 2,0 gegenüber der Zugfestigkeit bzw., bei Werkstoffen mit einem Verhältnis von Fließgrenze zu Zugfestigkeit kleiner als 0,75, der Wert 1,5 gegenüber der Fließgrenze. Bei günstigen Voraussetzungen dürfen diese Sicherheitsfaktoren vermindert werden, Kap. 1.5.

Der Nachweis ist mittels des Auslastungsgrades durchzuführen, der höchstens den Wert eins annehmen darf. Der Auslastungsgrad für eine einzelne Spannungskomponente bzw. Spannungsart ist gleich dem Nennspannungskennwert, dividiert durch den zulässigen Nennwert der statischen Bauteilfestigkeit. Der zulässige Nennwert ist gleich dem ertragbaren Nennwert der statischen Bauteilfestigkeit, dividiert durch den Sicherheitsfaktor.

⁷ je nach Bauteilart, Kap. 0.3.4.

⁸ Die extremen Maximal- oder Minimalspannungen für den statischen Festigkeitsnachweis können verschieden sein von den Maximal- und Minimalspannungen für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis, die sich aus größter Amplitude und zugehörigem Mittelwert ergeben.

Kerbspannungen berechnet und nur für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis angewendet. Strukturspannungen, auch als geometrische oder Hot-Spot-Spannungen bezeichnet, sind in der Regel nur bei Schweißverbindungen gebräuchlich. Näheres siehe Kap. 0.3.4 und 5.5.

1 Statischer Festigkeitsnachweis mit Nennspannungen

Ril1-DE.doc

1.0 Allgemeines

Nach diesem Kapitel ist der statische Festigkeitsnachweis mit Nennspannungen durchzuführen.

Es ist zu beachten, dass die statische Bauteilfestigkeit nicht notwendigerweise durch Versagen in einem Kerbquerschnitt bestimmt wird. Stattdessen kann auch globales Versagen in einem anderen, evtl. nicht oder kaum gekerbten Bauteilquerschnitt maßgebend werden, **Bild 1.0.1**

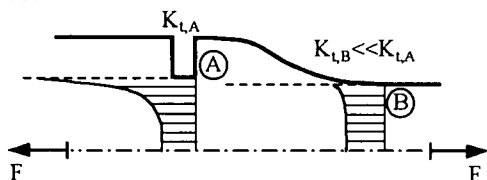


Bild 1.0.1 Unterschiedliche Querschnitte für örtliches (A) und globales (B) Versagen.

Für GGG-Sorten und Aluminiumknetwerkstoffe mit geringer Bruchdehnung, $A < 12,5 \%$, für alle Sorten GT und GG sowie für Aluminiumgusswerkstoffe ist der statische Festigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen nach Kapitel 3 durchzuführen *¹.

Für sehr große Formzahlen ist der statische Festigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen nach Kapitel 3 durchzuführen *².

Für volumenförmige Bauteile ist der statische Festigkeitsnachweis mit örtlichen Spannungen nach Kapitel 3 durchzuführen.

Für alle anderen Werkstoffgruppen (GGG-Sorten und Aluminiumknetwerkstoffe mit hoher Bruchdehnung, $A \geq 12,5 \%$, GS, Walz- und Schmiedestahl) und für kleinere Formzahlen bei stabförmigen und bei flächenförmigen Bauteilen ist der statische Festigkeitsnachweis mit Nennspannungen anwendbar.

¹ weil die Voraussetzung hinreichend plastizierbaren Werkstoffes nicht erfüllt ist.

² weil die Dehnungen unkontrolliert groß werden. Als Grenzfall maßgeblich soll der Flachstab mit Bohrung und der Formzahl 3 sein.

1.1 Spannungskennwerte

Inhalt

	Seite
1.1.0 Allgemeines	19
1.1.1 Spannungskennwerte	20
1.1.1.0 Allgemeines	
1.1.1.1 Stabförmige Bauteile	
1.1.1.2 Flächenförmige Bauteile	21

1.1.0 Allgemeines

Nach diesem Kapitel sind die erforderlichen Spannungskennwerte festzulegen.

Maßgeblich sind die extremen Maximal- und Minimalspannungen $S_{\max,ex,zd}$ und $S_{\min,ex,zd}$, ... der einzelnen Spannungskomponenten entsprechend den ungünstigsten Betriebszuständen und den Sonderlastfällen nach Vorgabe oder infolge physikalischer Begrenzung *³. Beide Spannungen können positiv oder negativ sein. Es wird angenommen, daß alle Spannungen gleichzeitig ihre extremen Werte erreichen.

Höhere Temperatur

Bei höherer Temperatur sind die Werte $S_{\max,ex,zd}$ bzw. $S_{\min,ex,zd}$, ... nur für die Kurzzeitfestigkeit (Warmfestigkeit, Warmdehngrenze) maßgeblich.

Für die Langzeitfestigkeit (Zeitstandfestigkeit, 1%-Zeitdehngrenze) sind Ergebnisse nur dann zutreffend, wenn eine zeitlich konstante (statische) Zugspannung $S_{\max,ex,zd}$ gleichverteilt auf den betrachteten Querschnitt einwirkt.

In allen anderen Fällen einer konstanten oder veränderlichen Belastung wird der Nachweis mehr oder weniger auf der sicheren Seite liegen, wenn sich die Werte $S_{\max,ex,zd}$, ... bzw. $S_{\min,ex,zd}$, ... auf eine gradientenbehaftete Spannungsverteilung beziehen, und/oder wenn sie als Höchstwerte eines veränderlichen Spannungs-

³ Die Werte $S_{\max,ex,zd}$ und $S_{\min,ex,zd}$ für den *statischen Festigkeitsnachweis* sind die extremen Werte eines im allgemeinen veränderlichen Spannungs-Zeitverlaufes. Für den *Ermüdungsfestigkeitsnachweis* ist hieraus ein Spannungskollektiv abzuleiten, das aus Spannungszyklen der Amplituden $S_{a,zd,i}$ und der Mittelwerte $S_{m,zd,i}$ besteht, **Kapitel 2.1**.

Die größte Amplitude dieses Spannungskollektives ist $S_{a,zd,1}$, und der zugehörige Mittelwert ist $S_{m,zd,1}$. Aus beiden ergeben sich die Maximal- und Minimalwerte $S_{\max,zd,1} = S_{m,zd,1} + S_{a,zd,1}$ und $S_{\min,zd,1} = S_{m,zd,1} - S_{a,zd,1}$. Die Werte $S_{\max,ex,zd}$ und $S_{\min,ex,zd}$ können verschieden sein von den Werten $S_{\max,zd,1}$ und $S_{\min,zd,1}$. Denn extreme, sehr selten auftretende Ereignisse sind nur für die statische Festigkeit bedeutsam, aber kaum für die Ermüdungsfestigkeit. In einem Spannungskollektiv, das in der Regel nur für *normalen* Betrieb gelten soll, müssen sie deshalb nicht unbedingt berücksichtigt werden.

Wenn es in solchen Fällen erforderlich ist, die Warmfestigkeit des Bauteils optimal auszunutzen (weil andernfalls der Nachweis nicht erbracht werden kann) ist eine sachkundige Beanspruchungsanalyse zu empfehlen, um einen für den Nachweis geeigneten Spannungswert abzuleiten. Eine solche Beanspruchungsanalyse geht jedoch über den Rahmen dieser Richtlinie hinaus.

Überlagerung

Wenn im Nachweispunkt mehrere Spannungskomponenten gleichzeitig zusammenwirken, sind sie zu überlagern. Für gleiche Spannungsart (beispielsweise Zug und Zug, $S_{\max,ex,zd,1}$, $S_{\max,ex,zd,2}$, ...) ist die Überlagerung hier durchzuführen, so dass im Folgenden für jede Spannungsart nur noch jeweils eine Spannungskomponente ($S_{\max,ex,zd}$, ...) besteht *4. Für unterschiedliche Spannungsarten (beispielsweise Biegung und Torsion oder Zug in Richtung x und Zug in Richtung y) wird die Überlagerung beim Nachweis durchgeführt, Kapitel 1.6.

Gegensinnig wirkende Spannungskomponenten, die nicht immer gleichzeitig auftreten, sind jedoch nicht zu überlagern.

1.1.1 Spannungskennwerte

1.1.1.0 Allgemeines

Es sind stabförmige und flächenförmige, nichtgeschweißte und geschweißte Bauteile zu unterscheiden.

1.1.1.1 Stabförmige Bauteile

Stabförmige nichtgeschweißte Bauteile

Bei stabförmigen nichtgeschweißten Bauteilen sind eine Zug- oder Druckspannung S_{zd} , eine Biegespannung S_b , eine Schubspannung T_s *5 und eine Torsionsspannung T_t zu berücksichtigen. Die extremen Maximal- und Minimalspannungen sind

$$\begin{aligned} S_{\max,ex,zd}, S_{\max,ex,b}, T_{\max,ex,s}, T_{\max,ex,t}, \\ S_{\min,ex,zd}, S_{\min,ex,b}, T_{\min,ex,s}, T_{\min,ex,t} \end{aligned} \quad (1.1.1)$$

Zug (mit Vorzeichen +) und Druck (mit Vorzeichen -) sind im allgemeinen getrennt zu betrachten *6. Für Schub und Torsion gilt der jeweils betragsmäßig größere Wert.

⁴ Gegensinnig wirkende Spannungskomponenten können sich teilweise oder ganz aufheben.

⁵ Gegebenenfalls sind Biegung und Schub in zwei Ebenen zu betrachten (Komponenten y und z), siehe Kapitel 0.

⁶ bei Eisengusswerkstoff mit unterschiedlicher Zug- und Druckfestigkeit sowie bei unsymmetrischem Querschnitt.

Stabförmige geschweißte Bauteile

Bei stabförmigen geschweißten Bauteilen sind die Nennspannungen für den Schweißnahtquerschnitt und für den Schweißnahtübergangsquerschnitt im allgemeinen getrennt zu bestimmen *7.

Für den Schweißnahtübergangsquerschnitt sind die Nennspannungen wie für nichtgeschweißte Bauteile zu berechnen, Gl. (1.1.1).

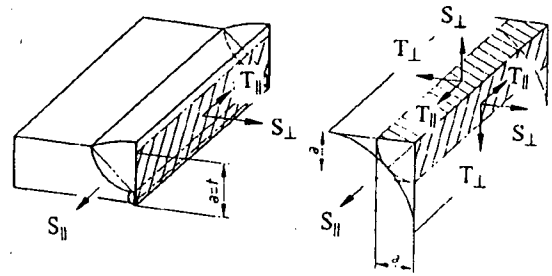


Bild 1.1.1 Nennspannungskomponenten $S_{||}$, $T_{||}$, S_{\perp} und T_{\perp} in Schweißnähten. Nach DIN 18 800 Teil 1.

Links: Stumpfnahtheit, rechts: Kehlnahtheit; die Nennspannung ist mit der Nahtdicke a zu berechnen.

Für den Schweißnahtquerschnitt ist je nach Lastart Zug oder Druck, ... aus den daraus folgenden Nennspannungen, Bild 1.1.1, eine Vergleichsnennspannung zu berechnen *8:

$$S_{wv,zd} = \sqrt{S_{\perp,zd}^2 + T_{\perp,zd}^2 + T_{||,zd}^2} \quad (1.1.2)$$

$S_{\perp,zd}$ Normalspannung senkrecht zur Nahtichtung *9,

$T_{\perp,zd}$ Schubspannung senkrecht zur Nahtichtung,

$T_{||,zd}$ Schubspannung parallel zur Nahtichtung.

$S_{wv,b}$, $T_{wv,s}$ und $T_{wv,t}$ analog. Deren extreme Maximal- und Minimalspannungen (Vergleichsnennspannungen) sind

$$S_{\max,ex,wv,zd} \text{ und } S_{\min,ex,wv,zd}, \dots \quad (1.1.3)$$

Bei gegensinniger Wirkung ist $S_{\max,ex,wv,zd}$ als positiv und $S_{\min,ex,wv,zd}$ als negativ anzusehen. Zug und Druck sind im allgemeinen getrennt zu betrachten. Für Schub und Torsion gilt jeweils der betragsmäßig größere Wert.

⁷ Für geschweißte Bauteile ist im allgemeinen ein zweifacher statischer Festigkeitsnachweis durchzuführen, weil die Querschnittsflächen unterschiedlich sein können und weil das Festigkeitsverhalten unterschiedlich bewertet wird. Der Nachweis für den Schweißnahtübergangsquerschnitt ist wie für nichtgeschweißte Bauteile durchzuführen. Der Nachweis für den Schweißnahtquerschnitt ist mit der Vergleichsnennspannung $S_{wv,zd}$, ... durchzuführen.

⁸ nach DIN 18 800 Teil 1, Seite 36. Die Nennspannung $S_{||}$ (Normalspannung parallel zur Nahtichtung) ist zu vernachlässigen.

⁹ $S_{wv,zd}$ wird sich in der Regel im Wesentlichen aus $S_{\perp,zd}$ ergeben. Weitere Lastarten analog.

1.1.1.2 Flächenförmige Bauteile**Flächenförmige nichtgeschweißte Bauteile**

Bei flächenförmigen nichtgeschweißten Bauteilen sind Normalspannungen (Zug mit Vorzeichen + oder Druck mit Vorzeichen -) in den Richtungen x und y , $S_{zdx} = S_x$ und $S_{zdy} = S_y$, sowie eine Schubspannung $T_s = T$ zu berücksichtigen. Die extremen Maximal- und Minimalspannungen sind

$$\begin{aligned} S_{\max,ex,x}, S_{\max,ex,y}, T_{\max,ex}, \\ S_{\min,ex,x}, S_{\min,ex,y}, T_{\min,ex} \end{aligned} \quad (1.1.4)$$

Zug und Druck sind im allgemeinen getrennt zu betrachten ^{*10}. Bei Schub gilt der betragsmäßig größere Wert.

Flächenförmige geschweißte Bauteile

Bei flächenförmigen geschweißten Bauteilen, **Bild 0.0.6**, sind die Nennspannungen im allgemeinen für den Schweißnahtquerschnitt und für den Schweißnahtübergangsquerschnitt getrennt zu bestimmen ^{*7}.

Für den Schweißnahtübergangsquerschnitt sind die Nennspannungen wie für nichtgeschweißte Bauteile zu berechnen, *Gl. (1.1.4)*.

Für den Schweißnahtquerschnitt ist je nach Lastart Normallast in Richtung x , ... aus den daraus folgenden Nennspannungen, **Bild 1.1.1**, nach *Gl. (1.1.2)* eine Vergleichsnennspannung $S_{wv,x}$ zu berechnen ($S_{wv,y}$ und T_{wv} analog). Deren extreme Maximal- und Minimalspannungen sind

$$S_{\max,ex,wv,x} \text{ und } S_{\min,ex,wv,x}, \dots \quad (1.1.5)$$

Bei gegensinniger Wirkung ist $S_{\max,ex,wv,x}$ als positiv und $S_{\min,ex,wv,x}$ als negativ anzusehen. Zug und Druck sind im allgemeinen getrennt zu betrachten. Für Schub gilt der betragsmäßig größere Wert.

¹⁰ analog Fußnote 6. Außerdem wegen der möglicherweise entlastenden Wirkung der zweiten Normalspannung S_y .

2 Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit Nennspannungen

RI21-DE.doc

2.0 Allgemeines

Nach diesem Kapitel ist der Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit Nennspannungen durchzuführen.

2.1 Spannungskollektivkennwerte

Inhalt	Seite
2.1.0 Allgemeines	41
2.1.1 Spannungskennwerte je nach Bauteilart	
2.1.1.0 Allgemeines	
2.1.1.1 Stabförmige Bauteile	
2.1.1.2 Flächenförmige Bauteile	42
2.1.2 Spannungskollektivkennwerte	
2.1.2.0 Allgemeines	
2.1.2.1 Mittelspannungskollektiv	43
2.1.2.2 Spannungsverhältniskollektiv	
2.1.3 Anpassung des Spannungskollektives an die Bauteil-Wöhlerlinie	
2.1.4 Bestimmung der Spannungskollektivkennwerte	
2.1.4.0 Allgemeines	
2.1.4.1 Normkollektiv	44
2.1.4.2 Beanspruchungsgruppe	45
2.1.4.3 Äquivalentspannungsamplitude	

2.1.0 Allgemeines

Nach diesem Kapitel sind die erforderlichen Spannungskollektivkennwerte festzulegen. Die Berechnung gilt ab etwa $\bar{N} = 10^4$ Zyklen.

Maßgeblich sind die Spannungskollektive der einzelnen Spannungskomponenten, mit den Spannungszyklen der Amplituden $S_{a,zd,i}$, ... und der Mittelwerte $S_{m,zd,i}$, ..., **Bild 2.1.1**, sowie mit den zugehörigen *Zyklenzahlen* entsprechend der geforderten Lebensdauer, n_i , Stufen $i = 1$ bis j *¹.

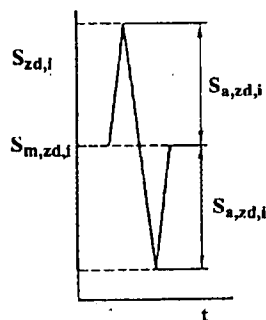


Bild 2.1.1

Spannungszyklus
Beispiel: Zugdruck,
Spannungsverhältnis

$$R_{zd,i} = \frac{S_{m,zd,i} - S_{a,zd,i}}{S_{m,zd,i} + S_{a,zd,i}}$$

Ein Sonderfall des Spannungskollektives ist das Einstufenkollektiv mit nur einer Stufe $i = j = 1$, für Zugdruck gilt $S_{a,zd} = S_{a,zd,i} = S_{a,zd,1}$, $S_{m,zd} = S_{m,zd,i} = S_{m,zd,1}$.

Überlagerung

Proportionale oder synchrone Spannungen

Wenn im Nachweispunkt mehrere proportionale oder synchrone Spannungskomponenten zusammenwirken, **Kap. 0.3.5**, sind sie zu überlagern. Für gleiche Spannungsarten (beispielsweise Zugdruck und Zugdruck, $S_{a,zd,1}$, $S_{m,zd,1}$, $S_{a,zd,2}$, $S_{m,zd,2}$, ...) ist die Überlagerung hier durchzuführen, so dass im Folgenden für jede Spannungsart nur noch jeweils eine Spannungskomponente ($S_{a,zd}$, $S_{m,zd}$, ...) besteht *². Für unterschiedliche Spannungsarten (beispielsweise Biegung und Torsion oder Zugdruck in Richtung x und Zugdruck in Richtung y) ist die Überlagerung beim Nachweis durchzuführen, **Kap. 2.6**.

Nichtproportionale Spannungen

Wenn im Nachweispunkt mehrere nichtproportionale Spannungskomponenten zusammenwirken, **Kap. 0.3.5**, sind sie nach **Kap. 5.10** zu überlagern.

2.1.1 Spannungskennwerte je nach Bauteilart

2.1.1.0 Allgemeines

Es sind *stabförmige* und *flächenförmige* Bauteile zu unterscheiden. Beide können *nichtgeschweißt* oder *geschweißt sein*.

2.1.1.1 Stabförmige Bauteile

Stabförmige nichtgeschweißte Bauteile

Bei stabförmigen nichtgeschweißten Bauteilen sind eine Zugdruckspannung S_{zd} , eine Biegespannung S_b , eine Schubspannung T_s *³ und eine Torsionsspannung T_t zu berücksichtigen. Deren Amplituden und zugehörige Mittelwerte sind

$$\begin{aligned} S_{a,zd,i}, S_{a,b,i}, T_{a,s,i}, T_{a,t,i}, \\ S_{m,zd,i}, S_{m,b,i}, T_{m,s,i}, T_{m,t,i}. \end{aligned} \quad (2.1.1)$$

¹ Ein Spannungskollektiv ist in der Regel für normalen Betrieb zu bestimmen, vgl. Fußnote 3 auf S. 19. Bezugswert eines Spannungskollektives für die Berechnung ist die größte Amplitude $S_{a,zd,1}$ mit dem zugehörigen Mittelwert $S_{m,zd,1}$, die zugleich die Stufe $i = 1$ bestimmt.

² Gegensinnig wirkende Spannungskomponenten können sich teilweise oder ganz aufheben.

Stabförmige geschweißte Bauteile

Bei stabförmigen geschweißten Bauteilen sind die Nennspannungen für den *Schweißnahtquerschnitt* und für den *Schweißnahtübergangsquerschnitt* im allgemeinen getrennt zu bestimmen ^{*4}. Nennspannungen wie Gl. (2.1.1).

2.1.1.2 Flächenförmige Bauteile**Flächenförmige nichtgeschweißte Bauteile**

Bei flächenförmigen nichtgeschweißten Bauteilen sind Normalspannungen (Zugdruck) in den Richtungen x und y , $S_{zdx} = S_x$ und $S_{zdy} = S_y$, sowie eine Schubspannung $T_s = T$ zu berücksichtigen. Deren *Amplituden* und zugehörige *Mittelwerte* sind

$$\begin{aligned} S_{a,x,i}, S_{a,y,i}, T_{a,i}, \\ S_{m,x,i}, S_{m,y,i}, T_{m,i} \end{aligned} \quad (2.1.4)$$

Flächenförmige geschweißte Bauteile

Bei flächenförmigen geschweißten Bauteilen, **Bild 0.0.6**, sind die Nennspannungen für den *Schweißnahtquerschnitt* und für den *Schweißnahtübergangsquerschnitt* im allgemeinen getrennt zu bestimmen ^{*4}. Nennspannungen wie Gl. (2.1.4).

2.1.2 Spannungskollektivkennwerte**2.1.2.0 Allgemeines**

Ein Spannungskollektiv ^{*5} beschreibt die Spannungszyklen, die im Spannungs-Zeitverlauf enthalten sind.

Bei veränderlichen Amplituden ist für jede Spannungs-komponente ein Spannungskollektiv festzulegen ^{*6}. Die *Einstufenspannung* mit konstanten Amplituden kann als Sonderfall betrachtet werden ^{*7}, für den $i = 1$ und

$$S_{a,zd} = S_{a,zd,i} = S_{a,zd,1} \quad (2.1.8)$$

$$N = \bar{N} = n_i = n_1$$

³ Gegebenenfalls sind Biegung und Schub in zwei Ebenen zu betrachten (Komponenten y und z), siehe **Kap. 0.3.4.1**

⁴ Für geschweißte Bauteile ist im allgemeinen ein *zweifacher* Ermüdungsfestigkeitsnachweis für den *Schweißnahtquerschnitt* und für den *Schweißnahtübergangsquerschnitt* durchzuführen, beide Nachweise in gleicher Art, aber mit den jeweiligen, im Allgemeinen unterschiedlichen Querschnittswerten und Nennspannungen.

⁵ Alles Folgende ist für Zugdruck S_{zd} geschrieben, gilt aber sinngemäß auch für die anderen Spannungsarten.

⁶ In diesem Fall ist ein Betriebsfestigkeitsnachweis durchzuführen.

Spannungskollektivkennwerte sind:

- $S_{a,zd,1}$ größte Amplitude, $i = 1$ (Kollektivgrößtwert), (2.1.9)
 $S_{m,zd,1}$ Mittelwert zu $S_{a,zd,1}$, Stufe 1,
 $S_{a,zd,i}$ Amplitude in Stufe i ,
 $S_{a,zd,i} > 0$, $S_{a,zd,i+1} / S_{a,zd,i} \leq 1$,
 $S_{m,zd,i}$ Mittelwert in Stufe i ,
 \bar{N} Gesamtzyklenanzahl entsprechend der geforderten Lebensdauer (geforderter Kollektivumfang),
 $\bar{N} = \sum n_i$ (summiert von 1 bis j),
 n_i zugehörige Zyklanzahl in Stufe i ,
 $N_i = \sum n_i$ (summiert von 1 bis i),
 \bar{H} Gesamtzyklenanzahl eines gegebenen Kollektivs,
 $\bar{H} = H_j = \sum h_i$ (summiert von 1 bis j) ^{*8},
 h_i zugehörige Zyklanzahl in Stufe i ,
 $H_i = \sum h_i$ (summiert von 1 bis i),
 i Kollektivstufe, $i = 1$ bis j ,
 j letzte Kollektivstufe bzw. Anzahl aller Kollektivstufen,
 v_{zd} Völligkeitsmaß.

Das Völligkeitsmaß ist, mit dem Bauteil-Wöhlerlinienexponenten k_σ ^{*9},

$$v_{zd} = k_\sigma \sqrt[k_\sigma]{\sum_{i=1}^j \frac{h_i}{\bar{H}} \left(\frac{S_{a,zd,i}}{S_{a,zd,1}} \right)^{k_\sigma}} \quad (2.1.10)$$

$S_{a,zd,i} / S_{a,zd,1}$ und h_i / \bar{H} kennzeichnen die Kollektivform. Die Amplituden $S_{a,zd,i}$ sind immer positiv, die Mittelwerte $S_{m,zd,i}$ sind positiv, negativ oder null.

In der Regel ist die Beschränkung auf die folgenden Arten des Spannungskollektivs möglich: *Mittelspannungskollektiv* und *Spannungsverhältniskollektiv* (mit dem Sonderfall *Schwellspannungskollektiv*), **Bild 2.1.2** ^{*10}.

⁷ In diesem Fall ist ein Dauerfestigkeitsnachweis durchzuführen, wenn $N = \bar{N} \geq N_{D,\sigma}$ oder $N = \bar{N} \geq N_{D,\sigma, II}$ für Wöhlerlinien vom Typ I bzw. Typ II, oder ein Zeitfestigkeitsnachweis (formal entsprechend einem Betriebsfestigkeitsnachweis), wenn $N = \bar{N} < N_{D,\sigma}$ oder $N = \bar{N} \geq N_{D,\sigma, II}$ für Wöhlerlinie vom Typ I bzw. Typ II. $N_{D,\sigma}$ ist die Zyklanzahl der Bauteil-Wöhlerlinie bei der Dauerfestigkeit.

⁸ Die Werte \bar{N} und \bar{H} - geforderter und für die Berechnung gegebener Kollektivumfang - sind im Allgemeinen unterschiedlich. h_i / \bar{H} kann auch durch n_i / \bar{N} ersetzt werden.

⁹ Das Völligkeitsmaß ist ein Kennwert für die Kollektivform. Für nichtgeschweißte Bauteile gelten die Werte $k_\sigma = 5$ für Normalspannung und $k_\tau = 8$ für Schubspannung. Für geschweißte Bauteile gelten die Werte $k_\sigma = 3$ bzw. $k_\tau = 5$.

¹⁰ Ein *Mittelspannungskollektiv* ergibt sich beispielsweise für eine statische Last, der sich eine dynamische Last überlagert, ein *Schwellspannungskollektiv* beispielsweise für einen Kranhaken aus dem Anheben unterschiedlicher Lasten.

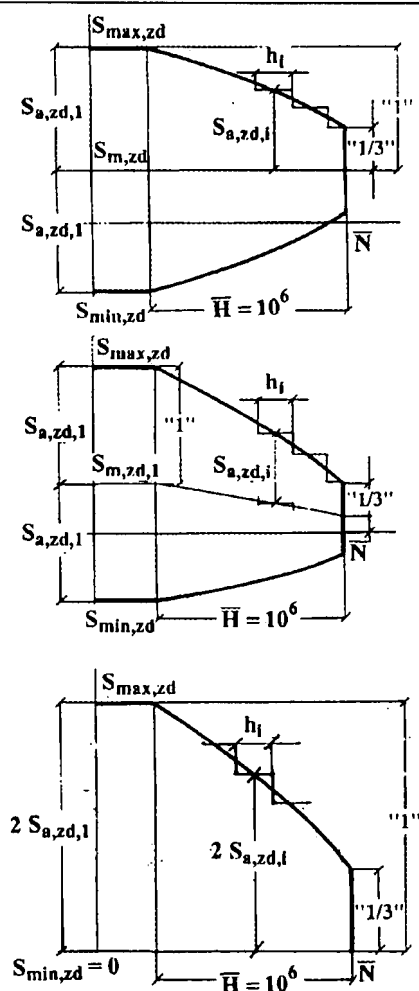


Bild 2.1.2 Spannungskollektive.

Oben: Mittelspannungskollektiv, mitte: Spannungsverhältniskollektiv, unten: Schwellspannungskollektiv. Beispiel: Spannungskollektive auf der Grundlage eines binomialverteilten Normkollektives mit dem Beiwert $p = 1/3$ und dem Umfang $\bar{H} = 10^6$, erweitert auf den geforderten Kollektivumfang \bar{N} .

2.1.2.1 Mittelspannungskollektiv

Das Mittelspannungskollektiv hat konstante Mittelspannungen in allen Kollektivstufen:

$$S_{m,zd,i} = S_{m,zd} \quad (2.1.11)$$

2.1.2.2 Spannungsverhältniskollektiv

Das Spannungsverhältniskollektiv hat konstante Spannungsverhältnisse in allen Kollektivstufen:

$$R_{zd,i} = R_{zd} \quad (2.1.12)$$

Es gilt

$$R_{zd} = (S_{m,zd,i} - S_{a,zd,i}) / (S_{m,zd,i} + S_{a,zd,i}) \quad (2.1.13)$$

oder

$$S_{m,zd,i} / S_{a,zd,i} = (1 + R_{zd}) / (1 - R_{zd}) \quad (2.1.14)$$

Sonderfall: Schwellspannungskollektiv

Das Schwellspannungskollektiv hat konstantes Spannungsverhältnis null in allen Kollektivstufen:

$$R_{zd,i} = R_{zd} = 0 \quad (2.1.15)$$

Es gilt

$$S_{m,zd,i} / S_{a,zd,i} = 1 \quad (2.1.16)$$

2.1.3 Anpassung des Spannungskollektives an die Bauteil-Wöhlerlinie und Stufung

Dieses Kapitel gilt nur für solche Spannungskollektive, die nicht in allen Kollektivstufen dasselbe Spannungsverhältnis haben *11.

Die Bauteil-Wöhlerlinie, Kap. 2.4.3.2, gilt für konstantes Spannungsverhältnis R_{zd} . Z. B. ein Mittelspannungskollektiv hat aber unterschiedliche Amplituden $S_{a,zd,i}$, und gleiche Mittelwerte $S_{m,zd,i} = S_{m,zd}$, folglich unterschiedliche Spannungsverhältnisse $R_{zd,i}$ in den einzelnen Kollektivstufen. Zur Anpassung des Mittelspannungskollektives an die Bauteil-Wöhlerlinie sind alle Kollektivstufen auf das Spannungsverhältnis der größten Stufe, $R_{zd,i} = R_{zd,1}$, $i = 2$ bis j , oder einer anderen geeigneten Kollektivstufe umzurechnen, Kap. 5.6.1.

2.1.4 Bestimmung der Spannungskollektivkennwerte

2.1.4.0 Allgemeines

Bei fehlenden Erfahrungen über die Beanspruchung des Bauteiles und / oder bei hohen Anforderungen an die Genauigkeit sind die Spannungskollektivkennwerte zu berechnen (auch durch Simulation) oder experimentell zu bestimmen. Die Ableitung des Spannungskollektives aus dem Spannungs-Zeitverlauf hat nach dem Rainflowverfahren oder im Sinne dieses Verfahrens zu erfolgen.

Die Stufung eines gemessenen oder grafisch vorgegebenen Spannungskollektivs kann nach Kap. 5.6.2 durchgeführt werden.

Bei bestehenden Erfahrungen - abhängig vom Bauteil und seiner Einsatzart - kann die Bestimmung der Spannungskollektivkennwerte durch die Anwendung von Normkollektiven, Beanspruchungsgruppen oder Äquivalentspannungsamplituden vereinfacht werden.

*11 z. B. für Mittelspannungskollektive, nicht für Spannungsverhältniskollektive und nicht für Schwellspannungskollektive.