

DIN EN 13001-3-8

ICS 21.120.10; 53.020.20

Einsprüche bis 2018-07-04

Entwurf

**Krane –
Konstruktion allgemein –
Teil 3-8: Grenzzustände und Sicherheitsnachweise für Maschinenbauteile –
Wellen;
Deutsche und Englische Fassung prEN 13001-3-8:2018**

Cranes –
General design –
Part 3-8: Limit states and proof competence of machinery – Shafts;
German and English version prEN 13001-3-8:2018

Appareils de levage à charge suspendue –
Conception générale –
Partie 3-8: Etats limites et vérification d'aptitude des éléments de mécanismes – Arbres;
Version allemande et anglaise prEN 13001-3-8:2018

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2018-05-04 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nam@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Maschinenbau (NAM), 60498 Frankfurt am Main, Postfach 71 08 64, Lyoner Str. 18, 60528 Frankfurt am Main.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 154 Seiten

DIN-Normenausschuss Maschinenbau (NAM)

Nationales Vorwort

Dieser Norm-Entwurf enthält sicherheitstechnische Festlegungen.

Er beinhaltet die Deutsche Fassung der vom Technischen Komitee CEN/TC 147 „Krane — Sicherheit“ im Europäischen Komitee für Normung (CEN) ausgearbeiteten prEN 13001-3-8:2018.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung der prEN 13001-3-8 beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Für die Anwendung wird darauf hingewiesen, dass unter dem Begriff „Kran“ alle Maschinen zum zyklischen Heben oder zum zyklischen Heben von an Haken oder anderen Lastaufnahmeeinrichtungen hängenden Lasten verstanden werden. Das bedeutet, dass diese Norm auch z. B. für Winden, die diese Definition erfüllen, anzuwenden ist.

Die nationalen Interessen bei der Erarbeitung werden vom Arbeitsausschuss NA 060-22-10 AA „Lenkungsausschuss Krane und Hebezeuge“ und Spiegelausschuss NA 060-22-10-22 AK „Konstruktion, Ausrüstungen (SpA CEN/TC 147/WG 2“ im Fachbereich „Krane und Hebezeuge“ des DIN-Normenausschusses Maschinenbau (NAM) wahrgenommen. Vertreter der Hersteller und Anwender von Krane und Hebezeuge sowie der Berufsgenossenschaften sind an der Erarbeitung beteiligt.

Dieser Norm-Entwurf konkretisiert einschlägige Anforderungen von Anhang I der EU-Maschinenrichtlinie 2006/42/EG an erstmals im Europäischen Wirtschaftsraum (EWR) in Verkehr gebrachte Maschinen, um den Nachweis der Übereinstimmung mit diesen Anforderungen zu erleichtern.

Die im Abschnitt 2 und den Literaturhinweisen zitierten Europäischen Normen sind als DIN EN- bzw. DIN EN ISO-Normen mit gleicher Zählnummer veröffentlicht.

Für die zitierten Internationalen Normen, sofern sie nicht als DIN ISO-Normen mit gleicher Zählnummer veröffentlicht sind, gibt es keine nationalen Entsprechungen.

Krane — Konstruktion allgemein — Teil 3-8: Grenzzustände und Sicherheitsnachweise für Maschinenbauteile — Wellen

Appareils de levage à charge suspendue — Conception générale — Partie 3-8 : Etats limites et vérification d'aptitude des éléments de mécanismes — Arbres

Cranes — General design — Part 3-8: Limit states and proof competence of machinery — Shafts

ICS:

Deskriptoren

Dokument-Typ: Europäische Norm

Dokument-Untertyp:

Dokument-Stage: CEN-Umfrage

Dokument-Sprache: D

STD Version 2.9d

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe, Symbole und Abkürzungen	7
3.1 Begriffe	7
3.2 Symbole und Abkürzungen	8
4 Allgemeines	11
4.1 Dokumentation	11
4.2 Werkstoffe	11
4.2.1 Werkstoffsorten und Werkstoffgüte für Wellen	11
4.2.2 Kerbschlagzähigkeit	19
4.3 Mechanische Bauteile — Wellen	19
4.3.1 Allgemeines	19
4.3.2 Wellen für Gleitlager	19
4.3.3 Geschweißte Wellen	20
5 Sicherheitsnachweis für Wellen	20
6 Nachweis der statischen Festigkeit	21
6.1 Allgemeines	21
6.2 Bemessungsspannungen	21
6.3 Grenzwerte der Bemessungsspannung	21
6.4 Durchführung des Nachweises	22
6.5 Durchbiegungen	22
7 Nachweis der Ermüdungsfestigkeit	22
7.1 Allgemeines	22
7.2 Verfahren basierend auf der Schwingfestigkeit: Wöhlerversuch (S-N-Methode)	24
7.2.1 Bemessungsspannung	24
7.2.2 Grenzwert der zulässigen Ermüdungsspannung $\sigma_{Rd,f}$	30
7.3 Durchführung des Nachweises der Ermüdungsfestigkeit	37
7.3.1 Einzelnachweis	37
7.3.2 Vereinfachter Nachweis	37
7.3.3 Nachweis für mehrachsige Lasten	37
Anhang A (informativ) Werte für den Kerbfaktor f_1	38
A.1 Allgemeines	38
A.2 Beispiele für Kerbfaktoren	39
Anhang B (informativ) ε -N-Methode: Ansatz auf Basis der Dehnungsermüdung	49
B.1 Einleitung	49
B.2 Ursprung der Widerstandskurve im Ansatz auf Basis der Dehnungsermüdung	49
B.3 Bestimmung der Widerstandskurve im Ansatz auf Basis der Dehnungsermüdung für eine Stahlsorte	52
B.4 Bestimmung der Widerstandskurve für ein Maschinenbauteil	54
B.5 Ansatz auf Basis der Dehnungsermüdung: ε -N-Methode	55
B.5.1 Allgemeines	55
B.5.2 Bestimmung des Dehnungsverlaufs	55

B.5.3	Bestimmung des Auslegungsermüdungsschadens anhand des Dehnungsverlaufs.....	58
B.5.4	Bestimmung des Gesamtermüdungsschadens durch kombinierte Normal- und/oder Schubspannungen	59
B.6	Ansatz auf Basis der Dehnungsermüdung (ε -N-Methode): Nachweis der Ermüdungsfestigkeit einer Welle (Beispiel)	62
B.6.1	Einleitung	62
B.6.2	Nachweis der Ermüdungsfestigkeit.....	62
B.7	Ansatz auf Basis der Dehnungsermüdung (ε -N-Methode): Leitfaden für eine numerische Lösung.....	67
B.7.1	Einleitung	67
B.7.2	Spezifisches Beispiel	68
Anhang C (informativ) Auswahl einer geeigneten Gruppe von Krannormen für eine gegebene Anwendung.....		71
Anhang ZA (informativ) Zusammenhang zwischen dieser Europäischen Norm und den grundlegenden Anforderungen der abzudeckenden Richtlinie 2006/42/EG.....		72
Literaturhinweise.....		73

Bilder

Bild 1	— Darstellung des Kürzungsprinzips.....	23
Bild 2	— Ebene der beim Nachweis der Ermüdungsfestigkeit betrachteten Komponente (vereinfachtes Haigh-Diagramm)	25
Bild 3	— Transformation von Spannungsspielen: a) für ein konstantes Grenzspannungsverhältnis, und b) für eine konstante Mittelspannung	25
Bild 4	— Vereinfachte Darstellung der Ebene der Komponente	26
Bild 5	— Ein-Parameter-Darstellung von Spannungsverläufen (Häufigkeiten von Spannungsamplituden bezogen auf ein konstantes Grenzspannungsverhältnis oder eine konstante Mittelspannung)	26
Bild A.1	— Anpassungsbeiwert z	38
Bild A.2	— Spannungskonzentrationsbeiwert K_t für eine Welle mit Kerbe, zugbelastet.....	39
Bild A.3	— Spannungskonzentrationsbeiwert K_t für eine Welle mit Kerbe, biegebelastet.....	40
Bild A.4	— Spannungskonzentrationsbeiwert K_t für Wellen mit Kerbe, torsionsbelastet	41
Bild A.5	— Spannungskonzentrationsbeiwert K_t für eine Welle mit Bund, zugbelastet	42
Bild A.6	— Spannungskonzentrationsbeiwert K_t für eine Welle mit Bund, biegebelastet	43
Bild A.7	— Spannungskonzentrationsbeiwert K_t für eine Welle mit Bund, torsionsbelastet.....	44
Bild A.8	— Kerbfaktor f_1 für eine Keilwelle	45
Bild A.9	— Kerbfaktor f_1 für eine Welle mit Keilnut.....	46
Bild A.10	— Kerbfaktor f_1 für eine Welle mit Bohrung.....	48
Bild B.1	— Wöhlerlinie (Prinzip).....	50
Bild B.2	— Elastische (Adaptation) und elastoplastische (Akkommodation) Beharrungszustände	50
Bild B.3	— Manson-Coffin-Kurve (Prinzip).....	51
Bild B.4	— ε -N-Kurve für die Dehnungsermüdung (Beispiel).....	51

Bild B.5 — ε -N-Kurve für die Dehnungsermüdung für ein Maschinenbauteil (Beispiel).....	55
Bild B.6 — Veranschaulichung eines Dehnungszyklus.....	57
Bild B.7 — Veranschaulichung einer proportionalen Belastung.....	60
Bild B.8 — Veranschaulichung einer nicht proportionalen Belastung.....	61
Bild B.9 — Maße der Welle für Berechnungszwecke	62
Bild B.10 — Ausschnitt aus einem Tabellenblatt in Excel	69
Bild B.11 — Symbolleiste in Excel	69
Bild B.12 — Programmfenster „Zielwertsuche“ („Goal seek“).....	70

Tabellen

Tabelle 1 — Symbole und Abkürzungen.....	8
Tabelle 2 — Spezifische Werte ausgewählter Stähle.....	12
Tabelle 3 — Schlagversuchsanforderung für den Werkstoff der Welle.....	19
Tabelle 4 — Klassen S_s des Spannungsverlaufparameters.....	27
Tabelle 5 — Werte für den Überlebenswahrscheinlichkeitsfaktor f_{prob}	30
Tabelle 6 — Größenfaktor f_2	32
Tabelle 7 — Oberflächenbehandlungsfaktor in Abhängigkeit vom technischen Verfahren.....	34
Tabelle 8 — Ermüdungsfestigkeit σ_d oder τ_d des Bauteils.....	36
Tabelle 9 — Spezifischer Widerstandsbeiwert γ_{Mf}	36
Tabelle A.1 — Kerbfaktor für eine Naben-Wellen-Verbindung.....	47
Tabelle B.1 — Grenzwert des Auslegungsermüdungsschadens D_{Rd}	61
Tabelle B.2 — Normalspannung.....	63
Tabelle B.3 — Schubspannung.....	63
Tabelle B.4 — Normalspannungsverlauf.....	65
Tabelle B.5 — Örtlicher Normalspannungsverlauf.....	65
Tabelle ZA.1 — Zusammenhang zwischen dieser Europäischen Norm und Anhang I der Richtlinie 2006/42/EG.....	72

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 13001-3-8:2018) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 147 „Krane — Sicherheit“ erarbeitet, dessen Sekretariat von BSI gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wurde im Rahmen eines Normungsauftrages erarbeitet, den die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelszone CEN erteilt haben, und unterstützt grundlegende Anforderungen der EU-Richtlinien.

Zum Zusammenhang mit EU-Richtlinien siehe informativen Anhang ZA, der Bestandteil dieses Dokuments ist.

Diese Europäische Norm ist ein Teil der Normenreihe EN 13001. Die anderen Teile sind:

Teil 1: Allgemeine Prinzipien und Anforderungen

Teil 2: Lasteinwirkungen

Teil 3-1: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Stahltragwerken

Teil 3-2: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Drahtseilen in Seiltrieben

Teil 3-3: Grenzzustände und Sicherheitsnachweise von Laufrad/Schiene-Kontakten

Teil 3-4: Grenzzustände und Sicherheitsnachweise für Maschinenbauteile — Lager

Teil 3-5: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von geschmiedeten Haken

Teil 3-6: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Maschinenbauteilen — Hydraulikzylinder

Teil 3-7: Limit states and proof of competence of machinery — Gears

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument ist zusammen mit EN 13001-1 und EN 13001-2 anzuwenden und legt gemeinsam mit ihnen grundlegende Bedingungen, Anforderungen und Verfahren fest, um so anhand der Konstruktion und der theoretischen Überprüfung Gefährdungen für Krane zu verhindern.

Spezifische Anforderungen an bestimmte Kranarten sind in der entsprechenden Europäischen Norm für die jeweilige Kranart angegeben.

Dieses Dokument behandelt Wellen (Achsen) in Kranen, die nicht in den anderen Normen der Reihe EN 13001 behandelt werden (z. B. Steckbolzenverbindungen in EN 13001-3-1). Sie ist nicht für Achsen vorgesehen, die Teil von Standardbauteilen sind, z. B. Getriebe, Motoren, ...; dennoch müssen solche Achsen unter Beachtung der Lasteinwirkungen von EN 13001-2 und der Klassifizierungsparameter von EN 13001-1 konstruiert werden.

ANMERKUNG EN 13001-3-7 ist in Vorbereitung für Getriebe und Getriebegehäuse und behandelt die Lasteinwirkungen auf Achsen in Getriebegehäusen.

Nachfolgend sind signifikante Gefährdungssituationen und Gefährdungseignisse aufgelistet, die während der bestimmungsgemäßen Verwendung und der vernünftigerweise vorhersehbaren Fehlanwendung zu Risiken für Personen führen könnten. Die Anwendung der Abschnitte 4 bis 7 des vorliegenden Dokuments ist notwendig, um Risiken in Verbindung mit den folgenden Gefährdungen zu mindern oder zu beseitigen:

- Überschreitung der Festigkeitsgrenzwerte (Fließgrenze, Bruch- und Ermüdungsfestigkeit);
- Überschreitung von Temperaturgrenzwerten des Werkstoffs oder der Komponenten.

Dieses Dokument gilt nicht für Krane, die vor dem Datum der Veröffentlichung dieses Dokuments als Europäische Norm hergestellt wurden und dient als Bezugsbasis für die Europäischen Normen für bestimmte Kranarten (siehe Anhang C).

ANMERKUNG prEN 13001-3-8 behandelt ausschließlich die Methode der Grenzzustände in Übereinstimmung mit EN 13001-1.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

EN 10025-2, *Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen — Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle*

EN 10025-3, *Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen — Teil 3: Technische Lieferbedingungen für normalgeglühte/normalisierend gewalzte schweißgeeignete Feinkornbaustähle*

EN 10025-4, *Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen — Teil 4: Technische Lieferbedingungen für thermomechanisch gewalzte schweißgeeignete Feinkornbaustähle*

EN 10025-6, *Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen — Teil 6: Technische Lieferbedingungen für Flacherzeugnisse aus Stählen mit höherer Streckgrenze im vergüteten Zustand*

EN 10083-1, *Vergütungsstähle — Teil 1: Allgemeine technische Lieferbedingungen*

EN 10083-2, *Vergütungsstähle — Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Stähle*

EN 10083-3, *Vergütungsstähle — Teil 3: Technische Lieferbedingungen für legierte Stähle*

EN 10084, *Einsatzstähle — Technische Lieferbedingungen*

EN 10085, *Nitrierstähle — Technische Lieferbedingungen*

EN 10088-2, *Nichtrostende Stähle — Teil 2: Technische Lieferbedingungen für Blech und Band aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung*

EN 10088-3, *Nichtrostende Stähle — Teil 3: Technische Lieferbedingungen für Halbzeug, Stäbe, Walzdraht, gezogenen Draht, Profile und Blankstahlerzeugnisse aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung*

EN 10149-2, *Warmgewalzte Flacherzeugnisse aus Stählen mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen — Teil 2: Technische Lieferbedingungen für thermomechanisch gewalzte Stähle*

EN 10149-3, *Warmgewalzte Flacherzeugnisse aus Stählen mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen — Teil 3: Technische Lieferbedingungen für normalgeglühte oder normalisierend gewalzte Stähle*

EN 13001-1, *Krane — Konstruktion allgemein — Teil 1: Allgemeine Prinzipien und Anforderungen*

EN 13001-2, *Krane — Konstruktion allgemein — Teil 2: Lasteinwirkungen*

EN 13001-3-1, *Krane — Konstruktion allgemein — Teil 3-1: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Stahltragwerken*

EN 13001-3-4, *Krane — Konstruktion allgemein — Teil 3-4: Grenzzustände und Sicherheitsnachweise für Maschinenbauteile — Lager*

EN 13001-3-7, *Cranes — General design — Part 3-7: Limit states and proof of competence of machinery — Gears and gear boxes*

EN ISO 12100:2010, *Sicherheit von Maschinen — Allgemeine Gestaltungsleitsätze — Risikobeurteilung und Risikominderung (ISO 12100:2010)*

ISO 4306-1:2007, *Cranes — Vocabulary — Part 1: General*

3 Begriffe, Symbole und Abkürzungen

3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach EN ISO 12100:2010 und die folgenden Begriffe. Für die Definition von Lasten gilt ISO 4306-1:2007, Abschnitt 6.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

— IEC Electropedia: unter <http://www.electropedia.org/>

— ISO Online Browsing Platform: unter <http://www.iso.org/obp>

3.1.1

Welle

langer zylindrischer rotierender Stab zur Übertragung von Bewegungen oder Kraft, an dem Komponenten für die Übertragung dieser Bewegungen oder Kraft befestigt sind

3.1.2

Achse

Drehspindel, auf der sich ein Rad dreht oder die sich mit daran befestigtem Rad (bzw. mit den daran befestigten Rädern) dreht

3.1.3

Bolzen

schmales, üblicherweise zylindrisches Teil oder Metallstück zum Zusammenhalten oder aneinander Befestigen von Teilen

3.2 Symbole und Abkürzungen

Die in diesem Dokument verwendeten Symbole und Abkürzungen sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1 — Symbole und Abkürzungen

Symbole, Abkürzungen	Beschreibung
A_v	Mindest-Kerbschlagzähigkeit
b	Exponent für die Ermüdungsfestigkeit, für einen Werkstoff (ε -N-Methode)
bp	Exponent für die Ermüdungsfestigkeit, für eine Komponente (ε -N-Methode)
c	Exponent für die Ermüdungsduktilität, für einen Werkstoff (ε -N-Methode)
C	Gesamtzahl von Arbeitsspielen (siehe EN 13001-1)
cp	Exponent für die Ermüdungsduktilität, für eine Komponente (ε -N-Methode)
D_{Sd}	Auslegungsermüdungsschaden
D_{Rd}	Grenzwert des Auslegungsermüdungsschadens
d	Durchmesser
d_{equ}	Äquivalenter Durchmesser
E	Elastizitätsmodul
$f_{Rd,\sigma}$	Grenzwert der zulässigen Normalspannung
$f_{Rd,\tau}$	Grenzwert der zulässigen Schubspannung
f_u	Bruchfestigkeit des Werkstoffs
f_y	Fließgrenze des Werkstoffs
f_1	Kerbfaktor
f_2	Größenfaktor
f_3	Oberflächenrauigkeitsfaktor
f_4	Oberflächenbehandlungsfaktor
f_5	Faktor für eine große Anzahl an Schwingspielen
K'	Faktor für den zyklischen Widerstand (ε -N-Methode)
K_t	Spannungskonzentrationsbeiwert

Symbole, Abkürzungen	Beschreibung
k_m	Spannungskollektivbeiwert (siehe EN 13001-1)
k_s	Spannungskollektivbeiwert der Welle
l_s	Auslegungszahl der Wellensätze
m_σ	Inverse Steigung der Wöhlerlinie (oder der S-N-Kurve), für Normalspannungen
m_τ	Inverse Steigung der Wöhlerlinie (oder der S-N-Kurve), für Schubspannungen
n_i	Anzahl der Spannungsspiele der Schwingbreite i
n'	Zyklischer Verfestigungsexponent (ε -N-Methode)
$\hat{n}$	Gesamtzahl von Spannungsspielen (siehe EN 13001-1)
N_{fi}	Anzahl der Spannungsspiele bis zum Versagen, für Spannungen der Schwingbreite i
$N; N_f$	Anzahl der Spannungsspiele bis zum Versagen
N_{Ref}	Referenzzahl der Spannungsspiele
r	Kerbradius
R	Grenzspannungsverhältnis
R_d	Bemessungswiderstand
R_a	Mittlere Tiefe des Oberflächenprofils nach EN ISO 4287:1998
S_d	Bemessungsspannung oder Auslegungskraft
s_s	Spannungsverlaufparameter der Welle
T	Betriebstemperatur
z	Anpassungsbeiwert
ε'_f	Beiwert für die Ermüdungsduktilität (ε -N-Methode)
ε_a	Gesamtdehnungsamplitude (ε -N-Methode)
ε_{ae}	Elastische Dehnungsamplitude (ε -N-Methode)
ε_{ap}	Plastische Dehnungsamplitude (ε -N-Methode)
$\varepsilon_{e,a}$	Amplitude der elastischen Dehnung (ε -N-Methode)
$\varepsilon_{e,loc}$	Wert der elastischen örtlichen Dehnung (ε -N-Methode)
ε_r	Wert der tatsächlichen Dehnung (ε -N-Methode)
$\varepsilon_{r,a}$	Amplitude des Dehnungswerts (ε -N-Methode)
$\varepsilon_{r,i}$	Amplitude des Dehnungswerts, der Schwingbreite i (ε -N-Methode)
$\varepsilon_{r,loc}$	Wert der tatsächlichen örtlichen Dehnung (ε -N-Methode)
γ_{ff}	Sicherheitsbeiwert für die Ermüdungsfestigkeit

Symbole, Abkürzungen	Beschreibung
γ_m	Allgemeiner Widerstandsbeiwert
γ_{Mf}	Spezifischer Widerstandsbeiwert für die Ermüdungsfestigkeit
γ_p	Teilsicherheitsbeiwert (siehe EN 13001-2)
γ_{Rm}	Resultierender Widerstandsbeiwert
γ_{sm}	Spezifischer Widerstandsbeiwert
ν_s	Relative Gesamtzahl der Spannungsspiele
$\sigma_{a,i}$	Bemessungsspannungsamplitude
$\hat{\sigma}_{a,i}$	Höchstwert der Bemessungsspannungsamplitude
$\sigma_{d,ref}$	Ermüdungsfestigkeit des Werkstoffs (Normalspannung)
σ_d	Ermüdungsfestigkeit der Komponente (Normalspannung)
σ_{dtr}	Alternative Ermüdungsfestigkeit (Normalspannung)
$\sigma_{e,loc}$	Elastische örtliche Spannung (ε -N-Methode)
$\sigma_{e,nom}$	Elastische Nennspannung (ε -N-Methode)
$\sigma_{eq,e,loc,m}$	Äquivalente elastische örtliche Mittelspannung (ε -N-Methode)
$\sigma_{eq,e,loc,a}$	Amplitude der äquivalenten elastischen örtlichen Spannung (ε -N-Methode)
$\sigma_{eq,e,loc,max}$	Maximale äquivalente elastische örtliche Spannung (ε -N-Methode)
$\sigma_{eq,e,loc,min}$	Minimale äquivalente elastische örtliche Spannung (ε -N-Methode)
σ_{eq}	Äquivalente Normalspannung
$\sigma_{eq,a}$	Amplitude der äquivalenten Normalspannung
σ'_f	Ermüdungswiderstandsbeiwert (ε -N-Methode)
σ_m	Mittelspannung
$\sigma_{r,a}$	Amplitude der tatsächlichen örtlichen Spannung (ε -N-Methode)
$\sigma_{r,loc}$	Tatsächliche örtliche Spannung (ε -N-Methode)
$\sigma_{r,m}$	Tatsächliche örtliche Mittelspannung (ε -N-Methode)
$\sigma_{Rd,f}$	Grenzwert der zulässigen Normalspannung für die Ermüdungsfestigkeit
σ_{Sd}	Bemessungswert der Normalspannung
$\sigma_{Sd,f}$	Bemessungswert der Normalspannung für die Ermüdungsfestigkeit
$\sigma_{Sd,eq}$	Äquivalenter Bemessungswert der Normalspannung
$\tau_{Rd,f}$	Grenzwert der zulässigen Schubspannung für die Ermüdungsfestigkeit
τ_{Sd}	Bemessungswert der Schubspannung

4 Allgemeines

4.1 Dokumentation

Die Dokumentation zum Sicherheitsnachweis muss Folgendes umfassen:

- Bemessungsannahmen mit Berechnungsmodellen;
- anwendbare Lasten und Lastkombinationen;
- Werkstoffsorten und Werkstoffgüte;
- relevante Grenzzustände;
- Ergebnisse aus den Berechnungen für den Sicherheitsnachweis und aus Prüfungen, soweit zutreffend.

4.2 Werkstoffe

4.2.1 Werkstoffsorten und Werkstoffgüte für Wellen

In Europäischen und Internationalen Normen sind Werkstoffe und spezifische Werte festgelegt. Dieses Dokument enthält eine bevorzugte Auswahl an Werkstoffen und deren mechanischen Eigenschaften.

Für Wellen sollte Stahl in Übereinstimmung mit den folgenden Europäischen Normen verwendet werden:

- Vergütungsstähle (siehe Tabelle 2):
 - unlegierte Stähle: EN 10083-2;
 - legierte Stähle: EN 10083-3;
- Baustähle (siehe Tabelle 2):
 - unlegierte Baustähle: EN 10025-2;
 - schweißgeeignete Feinkornbaustähle in den folgenden Zuständen:
 - 1) normalgeglüht (N) EN 10025-3;
 - 2) thermomechanisch gewalzt (M) EN 10025-4;
 - Stähle mit höherer Streckgrenze im vergüteten Zustand: EN 10025-6;
 - Stähle mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen in den folgenden Zuständen:
 - 1) thermomechanisch gewalzt (M) EN 10149-2;
 - 2) normalgeglüht (N) EN 10149-3;
- austenitische nichtrostende Stähle (siehe Tabelle 2):
 - Halbzeuge (Stäbe, Walzdraht ...): EN 10088-3;
- wärmebehandelte Stähle:
 - Einsatzstähle: EN 10084;
 - Nitrierstähle (siehe Tabelle 2): EN 10085.

Tabelle 2 enthält spezifische Werte für die Nennfestigkeiten f_u , f_y . Für weitere Informationen siehe die einschlägigen, vorstehend aufgelisteten Europäischen Normen.

Andere Werkstoffsorten und Werkstoffgüten als in den vorstehend genannten Normen angegeben dürfen verwendet werden, sofern die mechanischen Eigenschaften und die chemische Zusammensetzung auf die gleiche Weise wie in den entsprechenden Europäischen Norm angegeben ist.

Tabelle 2 — Spezifische Werte ausgewählter Stähle

Vergütungsstähle, im vergüteten Zustand (+QT)				
Stahl	Norm	Durchmesser d /Dicke t mm	Nennfestigkeit	
			f_y Fließgrenze N/mm ²	f_u Bruchfestigkeit N/mm ²
C22E	EN 10083-2	$d \leq 16$ oder $t \leq 8$	340	500
C22R		$16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$	290	470
C35E		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$	430	630
C35R		$16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$	380	600
C35		$40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$	320	550
C40E		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$	460	650
C40R		$16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$	400	630
C40		$40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$	350	600
C45E		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$	490	700
C45R		$16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$	430	650
C45		$40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$	370	630
C50E		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$	520	750
C50R		$16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$	460	700
		$40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$	400	650
C55E		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$	550	800
C55R		$16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$	490	750
C55		$40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$	420	700
C60E		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$	580	850
C60R		$16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$	520	800
C60		$40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$	450	750
28Mn6		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$	590	800
		$16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$	490	700
		$40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$	440	650
C22E	EN 10083-2	$d \leq 16$ oder $t \leq 8$	340	500
C22R		$16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$	290	470
C35E		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$	430	630
C35R		$16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$	380	600
C35		$40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$	320	550
C40E		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$	460	650
C40R		$16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$	400	630
C40		$40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$	350	600
C45E		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$	490	700
C45R		$16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$	430	650
C45		$40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$	370	630
C50E		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$	520	750
C50R		$16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$	460	700
		$40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$	400	650
C55E		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$	550	800
C55R		$16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$	490	750
C55		$40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$	420	700
C60E		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$	580	850
C60R		$16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$	520	800
C60		$40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$	450	750
28Mn6		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$	590	800
		$16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$	490	700
		$40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$	440	650

Vergütungsstähle, im vergüteten Zustand (+QT)				
Stahl	Norm	Durchmesser d/Dicke t mm	Nennfestigkeit	
			f_y Fließgrenze N/mm ²	f_u Bruchfestigkeit N/mm ²
38Cr2	EN 10083-3	$d \leq 16$ oder $t \leq 8$ $16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$ $40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$	550 450 350	800 700 600
46Cr2		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$ $16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$ $40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$	650 550 400	900 800 650
34Cr4 34CrS4		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$ $16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$ $40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$	700 590 460	900 800 700
37Cr4 37CrS4		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$ $16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$ $40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$	750 63 510	950 850 750
41Cr4 41CrS4		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$ $16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$ $40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$	800 660 560	1 000 900 800
25CrMo4 25CrMoS4		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$ $16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$ $40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$ $100 < d \leq 160$ oder $60 < t \leq 100$	700 600 450 400	900 800 700 650
34CrMo4 34CrMoS4		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$ $16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$ $40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$ $100 < d \leq 160$ oder $60 < t \leq 100$ $160 < d \leq 250$ oder $100 < t \leq 160$	800 650 550 500 450	1 000 900 800 750 700
42CrMo4 42CrMoS4		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$ $16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$ $40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$ $100 < d \leq 160$ oder $60 < t \leq 100$ $160 < d \leq 250$ oder $100 < t \leq 160$	900 750 650 550 500	1 100 1 000 900 800 750
50CrMo4		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$ $16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$ $40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$ $100 < d \leq 160$ oder $60 < t \leq 100$ $160 < d \leq 250$ oder $100 < t \leq 160$	900 780 700 650 550	1 100 1 000 900 850 800
34CrNiMo6		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$ $16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$ $40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$ $100 < d \leq 160$ oder $60 < t \leq 100$ $160 < d \leq 250$ oder $100 < t \leq 160$	1 000 900 800 700 600	1 200 1 100 1 000 900 800
30CrNiMo8		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$ $16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$ $40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$ $100 < d \leq 160$ oder $60 < t \leq 100$ $160 < d \leq 250$ oder $100 < t \leq 160$	1 050 1 050 900 800 700	1 250 1 250 1 000 1 000 900
35NiCr6		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$ $16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$ $40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$	740 740 640	880 880 780

Vergütungsstähle, im vergüteten Zustand (+QT)				
Stahl	Norm	Durchmesser d /Dicke t mm	Nennfestigkeit	
			f_y Fließgrenze N/mm ²	f_u Bruchfestigkeit N/mm ²
36NiCrMo16	EN 10083-3	$d \leq 16$ oder $t \leq 8$	1 050	1 250
		$16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$	1 050	1 250
		$40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$	900	1 100
		$100 < d \leq 160$ oder $60 < t \leq 100$	800	1 000
		$160 < d \leq 250$ oder $100 < t \leq 160$	800	1 000
39NiCrMo3		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$	785	980
		$16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$	735	930
		$40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$	685	880
		$100 < d \leq 160$ oder $60 < t \leq 100$	635	830
		$160 < d \leq 250$ oder $100 < t \leq 160$	540	740
30NiCrMo16-6		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$	880	1 080
		$16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$	880	1 080
		$40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$	880	1 080
		$100 < d \leq 160$ oder $60 < t \leq 100$	790	900
		$160 < d \leq 250$ oder $100 < t \leq 160$	880	900
51CrV4		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$	900	1 100
		$16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$	800	1 000
		$40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$	700	900
		$100 < d \leq 160$ oder $60 < t \leq 100$	650	850
		$160 < d \leq 250$ oder $100 < t \leq 160$	600	800
20MnB5		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$	700	900
		$16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$	600	750
30MnB5		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$	800	950
		$16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$	650	800
38MnB5		$d \leq 16$ oder $t \leq 8$	900	1 050
	$16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$	700	850	
27MnCrB5-2	$d \leq 16$ oder $t \leq 8$	800	1 000	
	$16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$	750	900	
	$40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$	700	800	
33MnCrB5-2	$d \leq 16$ oder $t \leq 8$	850	1 050	
	$16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$	800	950	
	$40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$	750	900	
39MnCrB6-2	$d \leq 16$ oder $t \leq 8$	900	1 100	
	$16 < d \leq 40$ oder $8 < t \leq 20$	850	1 050	
	$40 < d \leq 100$ oder $20 < t \leq 60$	800	1 000	

Vergütungsstähle, im vergüteten Zustand (+QT)				
Stahl	Norm	Durchmesser d/Dicke t mm	Nennfestigkeit	
			f_y Fließgrenze N/mm ²	f_u Bruchfestigkeit N/mm ²
C22E	EN 10083-2	$d \leq 16$ oder $t \leq 16$	240	430
C22R		$16 < d \leq 100$ oder $16 < t \leq 100$	210	410
C35E		$d \leq 16$ oder $t \leq 16$	300	550
C35R		$16 < d \leq 100$ oder $16 < t \leq 100$	270	520
C35		$100 < d \leq 250$ oder $100 < t \leq 250$	245	500
C40E		$d \leq 16$ oder $t \leq 16$	320	580
C40R		$16 < d \leq 100$ oder $16 < t \leq 100$	290	550
C40		$100 < d \leq 250$ oder $100 < t \leq 250$	260	530
C45E		$d \leq 16$ oder $t \leq 16$	340	620
C45R		$16 < d \leq 100$ oder $16 < t \leq 100$	305	580
C45		$100 < d \leq 250$ oder $100 < t \leq 250$	275	560
C50E		$d \leq 16$ oder $t \leq 16$	355	650
C50R		$16 < d \leq 100$ oder $16 < t \leq 100$	320	610
		$100 < d \leq 250$ oder $100 < t \leq 250$	290	590
C55E		$d \leq 16$ oder $t \leq 16$	370	680
C55R		$16 < d \leq 100$ oder $16 < t \leq 100$	330	640
C55		$100 < d \leq 250$ oder $100 < t \leq 250$	300	620
C60E		$d \leq 16$ oder $t \leq 16$	380	710
C60R		$16 < d \leq 100$ oder $16 < t \leq 100$	340	670
C60		$100 < d \leq 250$ oder $100 < t \leq 250$	310	650
28Mn6		$d \leq 16$ oder $t \leq 16$	345	630
		$16 < d \leq 100$ oder $16 < t \leq 100$	310	600
		$100 < d \leq 250$ oder $100 < t \leq 250$	290	590

Vergütungsstähle, im vergüteten Zustand (+QT)				
Stahl	Norm	Dicke t mm	Nennfestigkeit	
			f_y Fließgrenze N/mm ²	f_u Bruchfestigkeit N/mm ²
S235	EN 10025-2	$t \leq 16$	235	340
		$16 < t \leq 40$	225	
		$40 < t \leq 100$	215	
		$100 < t \leq 150$	195	
S275		$t \leq 16$	275	430
		$16 < t \leq 40$	265	
		$40 < t \leq 63$	255	
		$63 < t \leq 80$	245	
		$80 < t \leq 100$	235	
		$100 < t \leq 150$	225	
S355		$t \leq 16$	355	490
		$16 < t \leq 40$	345	
		$40 < t \leq 63$	335	
		$63 < t \leq 80$	325	
		$80 < t \leq 100$	315	
		$100 < t \leq 150$	295	
S355	EN 10025-3 (N) EN 10025-4 (M)	$t \leq 16$	355	450
		$16 < t \leq 40$	345	
		$40 < t \leq 63$	335	
		$63 < t \leq 80$ (N)	325	
		$80 < t \leq 100$ (N)	315	
		$100 < t \leq 150$ (N)	295	
S420		$t \leq 16$	420	500
		$16 < t \leq 40$	400	
		$40 < t \leq 63$	390	
		$63 < t \leq 80$ (N)	370	
		$80 < t \leq 100$ (N)	360	
		$100 < t \leq 150$ (N)	340	
S460		$t \leq 16$	460	530
		$16 < t \leq 40$	440	
		$40 < t \leq 63$	430	
		$63 < t \leq 80$ (N)	410	
	$80 < t \leq 100$ (N)	400		

Vergütungsstähle, im vergüteten Zustand (+QT)				
Stahl	Norm	Dicke t mm	Nennfestigkeit	
			f_y Fließgrenze N/mm ²	f_u Bruchfestigkeit N/mm ²
S460	EN 10025-6	$3 < t \leq 50$	460	550
		$50 < t \leq 100$	440	
S500		$3 < t \leq 50$	500	590
		$50 < t \leq 100$	480	
S550		$3 < t \leq 50$	550	640
		$50 < t \leq 100$	530	
S620		$3 < t \leq 50$	620	700
		$50 < t \leq 100$	580	
S690		$3 < t \leq 50$	690	770
		$50 < t \leq 100$	650	760
S890		$3 < t \leq 50$	890	940
		$50 < t \leq 100$	830	880
S960			$3 < t \leq 50$	960
S315	EN 10149-3 EN 10149-2	alle t	315	390
S355			355	430
S420			420	480
S460	EN 10149-2	alle t	460	520
S500			500	550
S550			550	600
S600			600	650
S650		$t \leq 8$	650	700
		$t > 8$	630	
S700		$t \leq 8$	700	750
		$t > 8$	680	
S900		alle t	900	930
S960			960	980
X2CrNi18-9	EN 10088-2	$t \leq 75$	200 ^a	500 ^a
X5CrNi18-10			210 ^a	520 ^a
X2CrNi19-11			200 ^a	500 ^a
X2CrNiMo17-12-2			220 ^a	520 ^a
X5CrNiMo17-12-2			220 ^a	520 ^a

Vergütungsstähle, im vergüteten Zustand (+QT)					
Stahl	Norm	Durchmesser d mm	Nennfestigkeit		
			f_y Fließgrenze N/mm ²	f_u Bruchfestigkeit N/mm ²	
24CrMo13-6	EN 10085	$16 \leq d \leq 40$	800	1 000	
		$40 < d \leq 100$	750	950	
		$100 < d \leq 160$	700	900	
		$160 < d \leq 250$	650	850	
31CrMo12		$16 \leq d \leq 40$	835	1 030	
		$40 < d \leq 100$	785	980	
		$100 < d \leq 160$	735	930	
		$160 < d \leq 250$	675	880	
32CrAlMo7-10		$16 \leq d \leq 40$	835	1 030	
		$40 < d \leq 100$	835	980	
		$100 < d \leq 160$	735	930	
		$160 < d \leq 250$	675	880	
31CrMoV9		$16 \leq d \leq 40$	900	1 100	
		$40 < d \leq 100$	800	1 000	
		$100 < d \leq 160$	700	900	
		$160 < d \leq 250$	650	850	
33CrMoV12-9		$16 \leq d \leq 40$	950	1 150	
		$40 < d \leq 100$	850	1 050	
		$100 < d \leq 160$	750	950	
		$160 < d \leq 250$	700	900	
34CrAlNi7-10		$16 \leq d \leq 40$	680	900	
		$40 < t \leq 100$	650	850	
		$100 < d \leq 160$	600	800	
		$160 < d \leq 250$	600	800	
41CrAlMo7-10		$16 \leq d \leq 40$	750	950	
		$40 < d \leq 100$	720	900	
		$100 < d \leq 160$	670	850	
		$160 < d \leq 250$	625	800	
40CrMoV13-9		$16 \leq d \leq 40$	750	950	
		$40 < d \leq 100$	720	900	
		$100 < d \leq 160$	700	870	
		$160 < d \leq 250$	625	800	
34CrAlMo5-10			$16 \leq d \leq 100$	600	800
^a 0,2 %-Dehngrenze und Zugfestigkeit für warmgewalztes Blech					

4.2.2 Kerbschlagzähigkeit

Die Wellen müssen eine ausreichende Duktilität aufweisen, um Sprödbruch zu verhindern.

Der Werkstoff der Welle muss im Anschluss an Schmiedearbeiten und nach der Wärmebehandlung eine Mindest-Kerbschlagzähigkeit nach Tabelle 3 aufweisen.

Tabelle 3 — Schlagversuchsanforderung für den Werkstoff der Welle

Betriebstemperatur	Temperatur während des Kerbschlagversuchs	Mindest-Kerbschlagzähigkeit A_v
$T \geq 0\text{ °C}$	+20 °C	27 J
$T \geq -20\text{ °C}$	-0 °C	27 J
$T \geq -30\text{ °C}$	-20 °C	27 J
$T \geq -40\text{ °C}$	-30 °C	35 J
$T \geq -50\text{ °C}$	-40 °C	35 J

4.3 Mechanische Bauteile — Wellen

4.3.1 Allgemeines

Diese Europäische Norm behandelt die Maschinenbauteile, vornehmlich Wellen, die üblicherweise Biege-, Schub- und/oder Torsionsspannungen unterliegen, was durch vorhandene Kerben gekennzeichnet ist.

Die Maße, Grenzabmaße und Oberflächenrauigkeit von Anpress- oder Schrumpfverbänden sollten den Angaben in den Literaturhinweisen entsprechen.

Die Gestaltung der Schrumpfkomponten sollte den Angaben in den Literaturhinweisen entsprechen.

Diese Europäische Norm behandelt keine anderen Arten von Keilnuten. Es können Verriegelungsvorrichtungen verwendet werden.

Es sollten vorzugsweise Keilwellen-Verbindungen in Übereinstimmung mit den folgenden Normen verwendet werden:

- Keilwellen-Verbindungen mit gerade Flanken: ISO 14;
- Passverzahnungen mit Evolventenflanken: ISO 4156.

Für die vorstehend genannten Keilwellen-Verbindungen sowie für Zahnwellen mit Evolventenflanken sind weitere Angaben in den Literaturhinweisen enthalten.

4.3.2 Wellen für Gleitlager

Siehe maßgeblichen Abschnitt in EN 13001-3-4.

4.3.3 Geschweißte Wellen

Schweißverbindungen mit Bauteilen aus Vergütungsstählen werden nicht empfohlen (z. B. eine auf einen Trommelflansch aus Baustahl geschweißte Seiltrommelwelle aus Vergütungsstahl). Bei solchen Verbindungen ist besonders auf den Schweißvorgang zu achten, um Warmrissbildung oder Kälterissbildung zu verhindern.

Diese Norm behandelt keine Festigkeitsnachweise von geschweißten Wellen.

Es ist ein zukünftiger Teil der Normenreihe EN 13001-3-X für Trommeln geplant, der die Konstruktion von mit Trommeln verschweißten Wellen behandeln sollte.

5 Sicherheitsnachweis für Wellen

Ziel des Sicherheitsnachweises für Wellen ist es, aufzuzeigen, dass die Bemessungsspannungen bzw. Auslegungskräfte S_d nicht die Bemessungswiderstände R_d überschreiten:

$$S_d \leq R_d \quad (1)$$

Die Bemessungsspannungen bzw. Auslegungskräfte S_d müssen ermittelt werden, indem die maßgeblichen Lasten, Lastkombinationen und Teilsicherheitsbeiwerte in Übereinstimmung mit EN 13001-2 angewendet werden.

In den folgenden Abschnitten werden die Bemessungswiderstände R_d wie folgt dargestellt:

- Grenzwert der statischen Bemessungsspannungen f_{Rd} oder Grenzwert der zulässigen Normalspannung für die Ermüdungsfestigkeit $\sigma_{Rd,f}$
- Grenzwert des Auslegungsermüdungsschadens D_{Rd} .

Die folgenden Sicherheitsnachweise müssen für Wellen erbracht werden:

- Nachweis der statischen Festigkeit, in Übereinstimmung mit 6.4;
- Nachweis der Ermüdungsfestigkeit, in Übereinstimmung mit 7.3.
- Alle diese Sicherheitsnachweise basieren auf Nennspannungen, d. h. auf Spannungen, die mithilfe der herkömmlichen Elastizitätstheorie der Werkstofffestigkeit berechnet wurden. Der Einfluss lokaler Spannungsunregelmäßigkeiten wird mithilfe des spezifischen Kerbfaktors im Nachweis der Ermüdungsfestigkeit berücksichtigt.

Wie bereits in EN 13001-1 erwähnt, können alternativ auch fortschrittlichere und anerkannte theoretische oder experimentelle Methoden angewendet werden, vorausgesetzt, sie erfüllen die Grundsätze dieser Normenreihe. Diese Methoden können technisch ausgereifte Programme sein (z. B. Verfahren von Getriebeherstellern oder die Finite-Elemente-Methode). Die Übereinstimmung mit den Grundsätzen der Normenreihe EN 13001 bedeutet vor allem Folgendes:

- Die Klassifizierungsparameter der betrachteten Welle müssen in Übereinstimmung mit EN 13001-1 erstellt werden.
- Die ungünstigsten Lasteinwirkungen (Nachweis der statischen Festigkeit) und der Lastverlauf (Nachweis der Ermüdungsfestigkeit) müssen anhand der Lastkombinationen nach EN 13001-2 erstellt werden.
- Gesonderte Sicherheitsnachweise müssen sowohl für die statische Festigkeit als auch für die Ermüdungsfestigkeit erbracht werden.

- Die Sicherheitsnachweise müssen auf anerkannter Fachliteratur oder auf Normen basieren und durch eine Ermüdungsversuchsdatenbank unterstützt werden.
- Zusätzlich zu den in den Abschnitten 6 und 7 ausführlich beschriebenen Sicherheitsnachweisen sollten mögliche dynamische Instabilitäten (wie z. B. Wellenauslenkung), die nicht in den Anwendungsbereich dieser Norm fallen, betrachtet und im Rahmen des Konstruktionsprozesses berücksichtigt werden.

6 Nachweis der statischen Festigkeit

6.1 Allgemeines

Ein rechnerischer Nachweis der statischen Festigkeit soll übermäßige Verformungen infolge des Fließverhaltens des Werkstoffs und das Brechen von Wellen verhindern. Es sind die in EN 13001-2 angegebenen Dynamik-Beiwerte zu verwenden, um äquivalente statische Lasten zu erzeugen, mit denen die dynamischen Lasteinwirkungen simuliert werden.

Der Nachweis ist für die jeweiligen Maschinenbauteile durchzuführen, wobei die ungünstigsten Lasteinwirkungen aus den Lastkombinationen A, B oder C nach EN 13001-2 und die nach 6.3 berechneten Widerstände berücksichtigt werden.

6.2 Bemessungsspannungen

σ_{Sd} ist der Bemessungswert der Normalspannung, τ_{Sd} ist der Bemessungswert der Schubspannung; aufgrund von Schub und Torsion kann stattdessen auch die Vergleichsspannung nach von Mises angewendet werden.

σ_{Sd} und τ_{Sd} sind Nennspannungen, d. h. Spannungen, die mithilfe der herkömmlichen Elastizitätstheorie der Werkstofffestigkeit berechnet wurden, und bei denen im Allgemeinen lokale ungleichmäßige Spannungsverteilungen außer Acht gelassen werden. Wenn alternative Verfahren mit einer höheren Präzision für den rechnerischen Spannungsnachweis verwendet werden, wie z. B. die Finite-Elemente-Methode, können durch die Verwendung solcher Spannungen bei dem in dieser Norm angegebenen Nachweis übermäßig konservative Ergebnisse erzielt werden.

6.3 Grenzwerte der Bemessungsspannung

Die Grenzwerte der Bemessungsspannung f_{Rd} müssen wie folgt berechnet werden:

$$f_{Rd\sigma} = \frac{f_y}{\gamma_{Rm}} \quad \text{für Normalspannungen} \quad (2)$$

$$f_{Rd\tau} = \frac{f_y}{\gamma_{Rm} \cdot \sqrt{3}} \quad \text{für Schubspannungen} \quad (3)$$

mit

$$\gamma_{Rm} = \gamma_m \cdot \gamma_{sm}$$

Dabei ist

f_y der Wert der Fließgrenze des Werkstoffs am Berechnungspunkt (siehe Tabelle 2);

γ_m der allgemeine Widerstandsbeiwert, mit $\gamma_m = 1,1$;

γ_{sm} der spezifische Widerstandsbeiwert, festgelegt mit:

$\gamma_{sm} = 0,95$ für Baustähle und austenitische nichtrostende Stähle nach Tabelle 2;

$\gamma_{sm} = \frac{f_y}{0,7 \cdot f_u}$ für Vergütungsstähle im vergüteten Zustand nach Tabelle 2, mit $\gamma_{sm} \geq 1,0$.

Dabei ist

f_u der Wert der Bruchfestigkeit des Werkstoffs (siehe Tabelle 2);

$\gamma_{sm} = \frac{f_y}{0,65 \cdot f_u}$ für Einsatzstähle und Nitrierstähle nach Tabelle 2 und für alle anderen Stähle, die nicht in Tabelle 2 aufgelistet sind, mit $\gamma_{sm} \geq 1,0$.

6.4 Durchführung des Nachweises

Für Maschinenbauteile muss der Nachweis im kritischsten Punkt im Hinblick auf die Bemessungsspannung und die Werkstoffeigenschaften erbracht werden. Für gehärtete Wellen sind beispielsweise zwei Nachweise zu erbringen, d. h. innerhalb und außerhalb der gehärteten Schicht.

Es ist nachzuweisen, dass:

$$\sigma_{Sd} \leq f_{Rd\sigma} \text{ und } \tau_{Sd} \leq f_{Rd\tau} \quad (4)$$

Dabei sind

σ_{Sd}, τ_{Sd} die Bemessungsspannungen, in Übereinstimmung mit 6.2;

$f_{Rd\sigma}, f_{Rd\tau}$ die dazugehörigen Grenzwerte der Bemessungsspannungen nach 6.3. Bei Verwendung der Vergleichsspannung nach von Mises ist $f_{Rd\sigma}$ der Grenzwert der Bemessungsspannung.

Im Fall von ebenen Spannungszuständen, für die die Vergleichsspannungen nach von Mises keine Anwendung finden, muss außerdem nachgewiesen werden, dass:

$$\left(\frac{\sigma_{Sd,x}}{f_{Rd\sigma,x}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{Sd,y}}{f_{Rd\sigma,y}} \right)^2 - \frac{\sigma_{Sd,x} \cdot \sigma_{Sd,y}}{f_{Rd\sigma,x} \cdot f_{Rd\sigma,y}} + \left(\frac{\tau_{Sd}}{f_{Rd\tau}} \right)^2 \leq 1 \quad (5)$$

Dabei sind

x, y die Indizes für die orthogonalen Richtungen der Spannungskomponenten.

6.5 Durchbiegungen

Die Wellendurchbiegungen müssen berücksichtigt werden.

Für jedes Bauteil muss sichergestellt werden, dass seine Durchbiegung nicht seine ordnungsgemäße Funktionsweise beeinträchtigt (z. B. übermäßiger Randeffect in einem Gleitlager oder Störung eines idealen Zahnflankenkontakts).

7 Nachweis der Ermüdungsfestigkeit

7.1 Allgemeines

Ein Nachweis der Ermüdungsfestigkeit soll das Versagensrisiko verhindern, das auf die Bildung von kritischen Rissen in Maschinenbauteilen unter zyklischer Belastung zurückzuführen ist.

Im Allgemeinen muss der Nachweis erbracht werden, indem die Lastkombinationen A nach EN 13001-2 angewendet und alle Teilsicherheitsbeiwerte mit $\gamma_p = 1$ angenommen werden.

Die charakteristischen Werte der Ermüdungsfestigkeit eines Maschinenbauteils enthalten den Einfluss durch:

- den Werkstoff;
- die Art der Lasteinwirkungen;
- die örtlichen Spannungskonzentrationen aufgrund der Bauteilform;
- die Größe;
- den Oberflächenzustand.

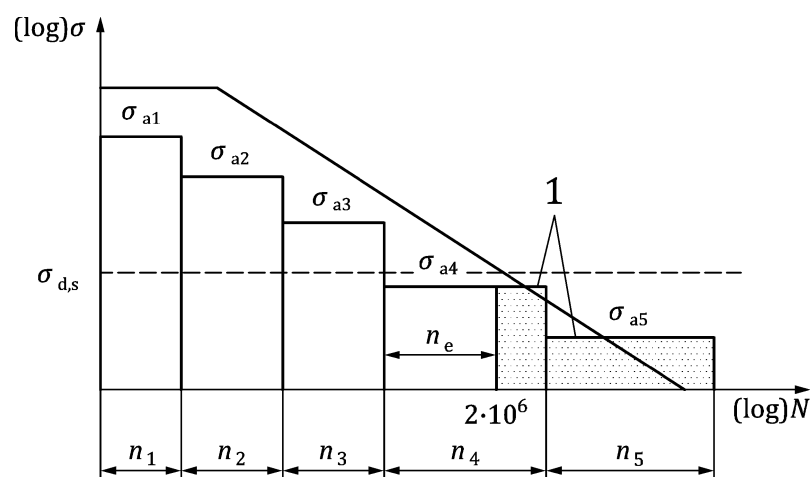
Der Nachweis der Ermüdungsfestigkeit nach 7.2 ist ein Standardverfahren für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit, das auf der Schwingfestigkeit basiert und üblicherweise als Wöhlerversuch (S-N-Methode) bezeichnet wird.

Der informative Anhang B enthält ein weiteres Verfahren, das als ε -N-Verfahren bezeichnet wird und auf der Dehnungsermüdung basiert; es kann für jeden örtlichen Dehnungswert angewendet werden und wird empfohlen, wenn der Spannungsverlaufparameter kleiner ist als 0,01.

Der Spannungsverlauf und die Anzahl der Spannungsspiele sind im Spannungsverlaufparameter s_s enthalten (siehe EN 13001-1), der rechnerisch oder durch Prüfung ermittelt werden kann. Der Einfluss der Mittelspannung wird in EN 13001-1 behandelt und kann für Wellen nicht vernachlässigt werden. Daher ist der Spannungsverlaufparameter s_s abhängig von der Mittelspannung.

Die Unsicherheit der Werte für die Ermüdungsfestigkeit und die möglichen Folgen durch Ermüdungsschäden werden durch den spezifischen Widerstandsbeiwert für die Ermüdungsfestigkeit, γ_{Mf} , berücksichtigt, der in Tabelle 9 angegeben ist.

Im Fall von Bauteilen, bei denen die Anzahl der Spannungsspiele n_i mit einer Spannungsamplitude der Schwingbreite i größer ist als $2 \cdot 10^6$ Spiele (siehe EN 13001-1), wird diese Anzahl n_i durch $2 \cdot 10^6$ Spiele ersetzt. Die Summierungen für die Berechnung des Spannungs-kollektivs k_m (nach EN 13001-1) und für die Berechnung der Gesamtzahl von Spannungsspielen $\hat{n}$ werden für diese neue Anzahl n_i gekürzt: siehe Prinzip in Bild 1 nachstehend, in dem die nicht berücksichtigten Spiele grau schraffiert dargestellt sind.



Legende

- 1 nicht berücksichtigte Spiele

Bild 1 — Darstellung des Kürzungsprinzips

7.2 Verfahren basierend auf der Schwingfestigkeit: Wöhlerversuch (S-N-Methode)

7.2.1 Bemessungsspannung

7.2.1.1 Transformation der identifizierten Spannungsspiele in Spiele mit konstanter Mittelspannung oder konstantem Grenzspannungsverhältnis

Durch Anwendung der Anforderungen von EN 13001-1 wird die Zwei-Parameter-Darstellung der Häufigkeiten von Spannungsspielen in eine Ein-Parameter-Darstellung der Häufigkeiten für die konstante Mittelspannung oder das konstante Grenzspannungsverhältnis transformiert.

Die transformierten Spannungsamplituden werden wie folgt berechnet (siehe Bild 3):

$$\sigma_{a,i}(R) = \frac{\sigma_{a,i} + \tan \alpha \cdot \sigma_{m,j}}{1 + \tan \alpha \cdot \frac{1+R}{1-R}} \quad (6)$$

$$\sigma_{a,i}(\sigma_m) = \sigma_{a,i} + \tan \alpha \cdot (\sigma_{m,j} - \sigma_m) \quad (7)$$

Dabei ist

$$\text{für } \sigma_{m,j} \geq 0 \text{ und } \sigma_m \geq 0 \quad (8)$$

$$\text{für } \sigma_{m,j} < 0 \text{ und } \sigma_m < 0 \quad (9)$$

Dabei ist/sind

$\sigma_{a,i}$	die Spannungsamplitude der Schwingbreite i aus der „Rainflow-Zählung“ (siehe EN 13001-1:2014, Bild 6);
$\sigma_{m,j}$	die Mittelspannung der Schwingbreite j aus der „Rainflow-Zählung“ (siehe EN 13001-1:2014, Bild 6);
$\sigma_{a,i}(R)$	die transformierte Spannungsamplitude für ein konstantes Grenzspannungsverhältnis;
$\sigma_{a,i}(\sigma_m)$	die transformierte Spannungsamplitude für eine konstante Mittelspannung;
R	das konstante Grenzspannungsverhältnis, ausgewählt für die Ein-Parameter-Klassifikation von Spannungsspielen;
σ_m	die konstante Mittelspannung, ausgewählt für die Ein-Parameter-Klassifikation von Spannungsspielen;
α_1, α_2	die Winkel zwischen der Horizontalen und den Geraden mit konstantem N in der $\sigma_a - \sigma_m$ -Ebene (siehe Bild 2 und Bild 3), stets positive Zählrichtung;
N	die Anzahl von Spannungsspielen bis zum Versagen durch Ermüdung für das durch $\sigma_{a,i}$ und $\sigma_{m,j}$ beschriebene Spannungsspiel;
$\sigma_a(R = -1)$, $\sigma_a(R = 0)$, $\sigma_a(R = \infty)$	die Spannungsamplituden, bei denen Versagen durch Ermüdung auftritt, in Abhängigkeit von dem spezifizierten Grenzspannungsverhältnis R und der Anzahl von Spielen N .

Der Zusammenhang zwischen Spannungsamplituden beim Versagen durch Ermüdung und Mittelspannung oder Grenzspannungsverhältnis für die bei der Bewertung der Ermüdungsfestigkeit betrachtete Komponente ist in Bild 2 dargestellt.

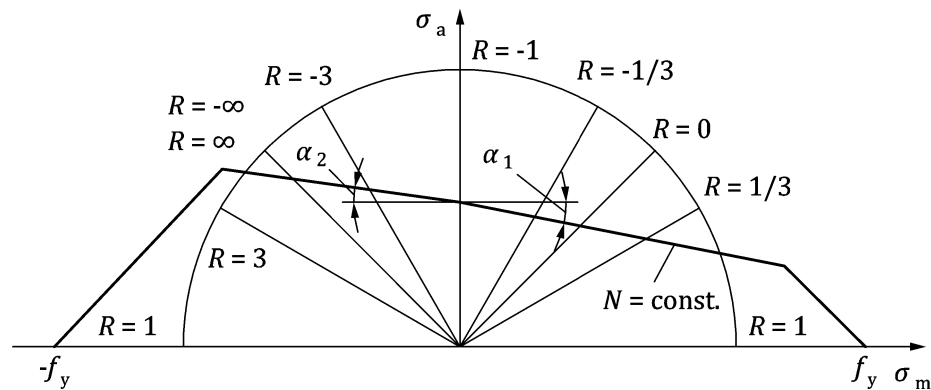


Bild 2 — Ebene der beim Nachweis der Ermüdungsfestigkeit betrachteten Komponente (vereinfachtes Haigh-Diagramm)

Die Transformation von Spannungsspielen nach den vorstehend angegebenen Gleichungen wird in Bild 3 veranschaulicht.

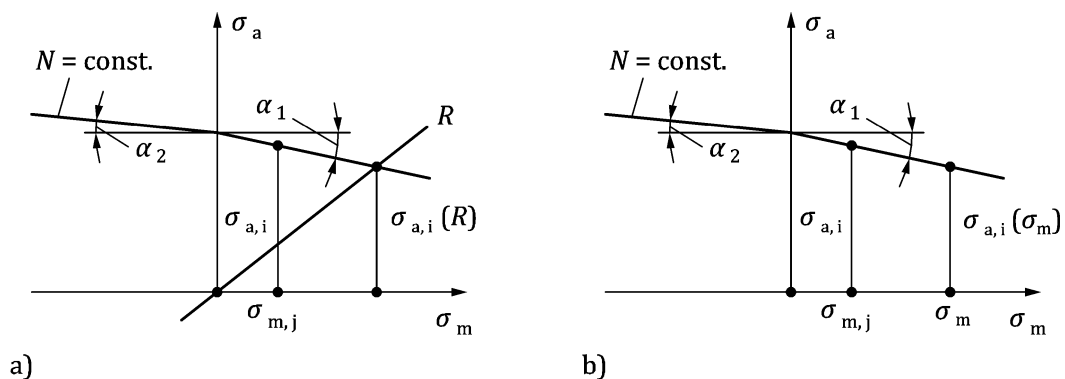


Bild 3 — Transformation von Spannungsspielen: a) für ein konstantes Grenzspannungsverhältnis, und b) für eine konstante Mittelspannung

Wird die Mittelspannung σ_m als nicht maßgebend angenommen (z. B. für geschweißte Strukturen), dann ist $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$.

Wenn $\sigma_a(R = 0)$ und $\sigma_a(R = \infty)$ nicht vorliegen, kann das in Bild 4 dargestellte vereinfachte Haigh-Diagramm verwendet werden.

Daraus ergibt sich:

$$\alpha = \alpha_1 = \alpha_2 \quad (10)$$

$$\tan \alpha = \frac{\sigma_d}{2 \cdot f_u - \sigma_d} \quad (11)$$

Dabei ist

f_u die Bruchfestigkeit des Wellenwerkstoffs;

σ_d die Ermüdungsfestigkeit der Wellen (siehe 7.2.2.4).

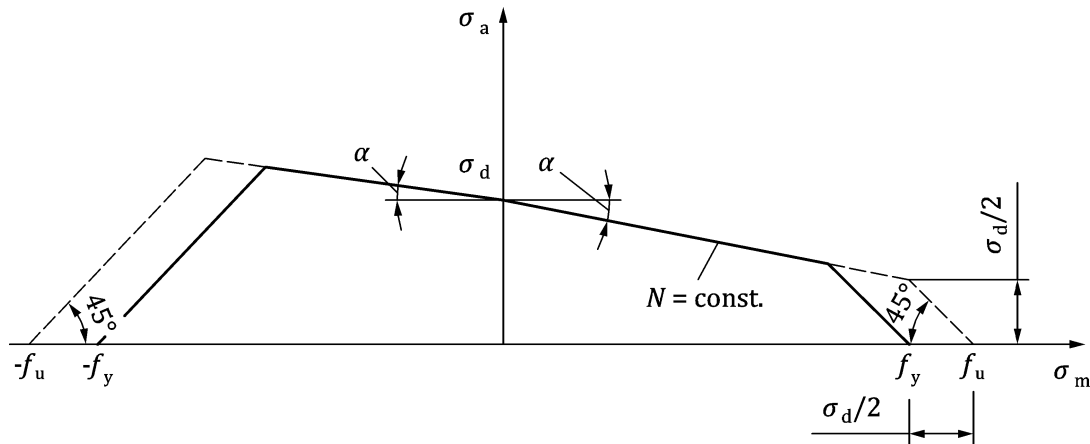
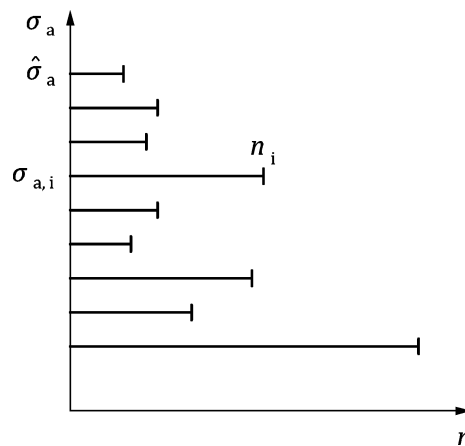


Bild 4 — Vereinfachte Darstellung der Ebene der Komponente

Die Transformation ergibt eine Ein-Parameter-Darstellung der Häufigkeiten von Spannungsamplituden bezogen auf das konstante Grenzspannungsverhältnis oder die konstante Mittelspannung. Bild 5 zeigt ein Beispiel für die Ein-Parameter-Darstellung von Spannungsverläufen mit diskreter Verteilung.

Die Transformation der vorstehend beschriebenen Spannungsamplituden ist für Schubspannungen nicht erforderlich.



Legende

- $\hat{\sigma}_a$ maximale Spannungsamplitude
- $\sigma_{a,i}$ Spannungsamplitude der Schwingbreite i aus der „Rainflow-Zählung“
- n_i Anzahl der Spannungsspiele mit der Spannungsamplitude der Schwingbreite i

Bild 5 — Ein-Parameter-Darstellung von Spannungsverläufen (Häufigkeiten von Spannungsamplituden bezogen auf ein konstantes Grenzspannungsverhältnis oder eine konstante Mittelspannung)

7.2.1.2 Spannungsverlaufparameter der Welle

Analog zum Spannungsverlaufparameter s_m , der in EN 13001-1 definiert ist, wird der Spannungsverlaufparameter der Welle wie folgt definiert:

$$s_s = k_s \times v_s \quad (12)$$

Dabei ist

k_s der Spannungskollektivbeiwert der Welle, definiert in 7.2.1.3;

v_s die relative Gesamtzahl der Spannungsspiele, definiert in 7.2.1.4.

Der Spannungsverlaufparameter der Welle s_s muss direkt aus den Gleichungen (13) und (18) ermittelt werden.

Die Wellen können in die Klassen S_s des Spannungsverlaufparameters s_s eingeteilt werden. Die Klassifizierung ist in Tabelle 4 angegeben. Wenn der Nachweis der Ermüdungsfestigkeit einer Welle auf einer Klasse S_s basieren soll, muss der dazugehörige Wert des Spannungsverlaufparameters s_s nach Tabelle 4 angenommen werden.

Schubspannungen werden auf die gleiche Weise behandelt.

Tabelle 4 — Klassen S_s des Spannungsverlaufparameters

Klasse	S_{s0}	S_{s1}	S_{s2}	S_{s3}	S_{s4}	S_{s5}	S_{s6}	S_{s7}	S_{s8}	S_{s9}
s_s	0,008	0,016	0,032	0,063	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0

ANMERKUNG Durch eine Änderung der Wellenkonstruktion (Geometrie, Oberflächenzustand ...) ändert sich der Spannungsverlaufparameter s_s und kann sich die Klasse S_s des Spannungsverlaufparameters ändern.

7.2.1.3 Kollektivbeiwert k_s der Wellenspannung

In Übereinstimmung mit EN 13001-1 müssen die Spannungsspiele, die auf die betrachtete Komponente aufgebracht werden, wie folgt dargestellt werden:

- entweder für eine konstante Mittelspannung σ_m ,
- oder für ein konstantes Grenzspannungsverhältnis R :

$$R = \frac{\sigma_b}{\sigma_u}$$

Dabei ist

σ_u der obere Grenzwert eines Spannungsspiels;

σ_b der untere Grenzwert eines Spannungsspiels.

Der Spannungskollektivbeiwert k_s der Welle errechnet sich wie folgt:

$$k_s = \sum_{i=1}^{i_{\max}} \left(\frac{\sigma_{a,i}}{\hat{\sigma}_a} \right)^m \times \frac{n_i}{\hat{n}} \quad (13)$$

Dabei ist

$\sigma_{a,i}$ die Spannungsamplitude der Schwingbreite i für das konstante Grenzspannungsverhältnis R bzw. für die konstante Mittelspannung σ_m ;

$\hat{\sigma}_a$ die maximale Spannungsamplitude für das konstante Grenzspannungsverhältnis R oder die konstante Mittelspannung σ_m ;

n_i die Anzahl der Spannungsspiele mit der Spannungsamplitude $\sigma_{a,i}$;

$\hat{n} = \sum_i n_i$ die Gesamtzahl der Spannungsspiele während der Nutzungsdauer der Komponente;

— für eine Laufradwelle (siehe EN 13001-3-3) ergibt sich die Gesamtzahl der Biegespannungsspiele wie folgt:

$$\hat{n} = \frac{2 \cdot \bar{x} \cdot C}{l_s \cdot \pi \cdot D_w} \quad (14)$$

Dabei ist

$\bar{x}$ die durchschnittliche Verlagerung der zugehörigen Kranbewegung, siehe EN 13001-1;

C die Gesamtzahl der Arbeitsspiele während der Auslegungslebensdauer des Krans, siehe EN 13001-1;

l_s die Auslegungszahl der Wellensätze, die während der Auslegungslebensdauer des Krans verwendet werden;

D_w der Raddurchmesser.

— für eine Laufradwelle ergibt sich die Gesamtzahl der Torsionsschubspannungsspiele wie folgt:

$$\hat{n} = (2 \cdot C) + C \cdot (p - 2) = C \cdot p \quad (15)$$

Dabei ist

C die Gesamtzahl der Arbeitsspiele während der Auslegungslebensdauer des Krans, siehe EN 13001-1;

p die durchschnittliche Anzahl von Beschleunigungen, siehe EN 13001-1.

— für eine Seiltrommelwelle ergibt sich die Gesamtzahl der Biegespannungsspiele wie folgt:

$$\hat{n} = \frac{2 \cdot \bar{x} \cdot C}{\pi \cdot l_d \cdot D_1} \quad (16)$$

Dabei ist

- $\bar{x}$ der durchschnittliche Weg der Hubbewegung, siehe EN 13001-1;
- C die Gesamtzahl der Arbeitsspiele während der Auslegungslebensdauer des Krans, siehe EN 13001-1;
- l_d die Auslegungsanzahl der eingesetzten Trommeln während der Auslegungslebensdauer des Krans;
- D_1 der Teilkreisdurchmesser der Seiltrommel.

— für eine Seiltrommelwelle ergibt sich die Gesamtzahl der Torsionsschubspannungsspiele wie folgt:

$$\hat{n} = C \cdot p \quad (17)$$

Dabei ist

- C die Gesamtzahl der Arbeitsspiele während der Auslegungslebensdauer des Krans, siehe EN 13001-1;
- p die durchschnittliche Anzahl von Beschleunigungen, siehe EN 13001-1.

7.2.1.4 Relative Gesamtzahl der Spannungsspiele v_s

Die relative Gesamtzahl der Spannungsspiele v_s ergibt sich wie folgt:

$$v_s = \frac{\hat{n}}{N_{\text{ref}}} \quad (18)$$

Dabei ist

- $\hat{n}$ die Gesamtzahl der Spannungsspiele während der Auslegungslebensdauer der Komponente;
- N_{ref} die Referenzzahl der Spannungsspiele: $N_{\text{ref}} = 2 \cdot 10^6$.

ANMERKUNG Siehe 7.1 für die Behandlung von Fällen, in denen die Anzahl der Spannungsspiele größer als $2 \cdot 10^6$ ist.

7.2.1.5 Bemessungswert der Ermüdungsspannung $\sigma_{\text{Sd,f}}$

Der Spannungsverlaufparameter s_s , der in 7.2.1.2 definiert ist, muss mit Nennspannungen berechnet werden.

Eine Nennspannung ist eine Spannung im Grundwerkstoff an einer potentiellen Rissstelle, berechnet nach der einfachen Elastizitätstheorie der Werkstofffestigkeit und unter Ausschluss der Auswirkungen örtlicher Spannungskonzentrationen.

Der Bemessungswert der Normalspannung $\sigma_{\text{Sd,f}}$ wird dann wie folgt ermittelt:

$$\sigma_{\text{Sd,f}} = \sigma_m + \hat{\sigma}_a \quad (19)$$

Dabei ist

- $\hat{\sigma}_a$ die maximale Spannungsamplitude für das konstante Grenzspannungsverhältnis R bzw. für die konstante Mittelspannung σ_m .

Der Bemessungswert der Schubspannung $\tau_{\text{Sd,f}}$ errechnet sich auf die gleiche Weise.

7.2.2 Grenzwert der zulässigen Ermüdungsspannung $\sigma_{Rd,f}$

7.2.2.1 Grenzwert der zulässigen Ermüdungsspannung

Der Grenzwert der zulässigen Ermüdungsspannung $\sigma_{Rd,f}$ eines Maschinenbauteils ergibt sich aus:

$$\sigma_{Rd,f} = \frac{\sigma_d}{\gamma_{Mf} \cdot \sqrt[m]{S_s}} \quad (20)$$

Dabei ist

- σ_d die Ermüdungsfestigkeit des Bauteils für die Referenzzahl der Spannungsspiele $N_{ref} = 2 \cdot 10^6$. Die Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit σ_d wird ausführlich in 7.2.2.2 bis 7.2.2.5 beschrieben;
- γ_{Mf} der spezifische Widerstandsbeiwert für die Ermüdungsfestigkeit, definiert in 7.2.2.6;
- S_s der Spannungsverlaufparameter, definiert in 7.2.1.2;
- m die inverse Steigung der Wöhlerlinie nach 7.2.2.5.

Für Schubspannungen wird der Grenzwert der zulässigen Ermüdungsspannung $\tau_{Rd,f}$ auf die gleiche Weise unter Verwendung von τ_d nach 7.2.2.4 berechnet.

7.2.2.2 Ermüdungsfestigkeit für Stahl und unendliche Ermüdungsbeständigkeit

Die vorhandene Ermüdungsfestigkeit muss mit der für Stahl übereinstimmen und muss der Spannungsart entsprechen, die in dem betrachteten Bauteil vorhanden ist, d. h.:

- Torsion im Fall von Schubspannung;
- Zug, gerade Biegung oder Umlaufbiegung im Fall von Normalspannung.

$\sigma_{d,ref}$ ist die Ermüdungsfestigkeit des Werkstoffs für $2 \cdot 10^6$ Spannungsspiele und eine ernannte Überlebenswahrscheinlichkeit. $\sigma_{d,ref}$ sollte vorzugsweise aus Ermüdungsversuchen bestimmt werden, die mit polierten Prüfkörpern nach ISO 12107 durchgeführt werden.

Fehlen spezifische oder anerkannte Versuchsdaten, kann die Ermüdungsfestigkeit unter einer alternierend rotierenden Biegelast (Mittelspannung von null, $R = -1$) mithilfe Gleichung (21) berechnet werden:

$$\sigma_{d,ref} = 0,45 \cdot f_u \cdot f_{prob} \quad (21)$$

Dabei ist

- f_{prob} der Überlebenswahrscheinlichkeitsfaktor, ausgewählt aus der nachstehenden Tabelle 5:

Tabelle 5 — Werte für den Überlebenswahrscheinlichkeitsfaktor f_{prob}

Überlebenswahrscheinlichkeit	50	90	97,7	99	99,9
f_{prob}	1,00	0,91	0,86	0,84	0,79

Es wird eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 99 % empfohlen, wobei die kurzzeitige Rissausbreitungsphase in den Maschinenbauteilen, verglichen mit Strukturbauteilen, berücksichtigt ist.

Die Ermüdungsfestigkeit unter Zug/Druck wird durch Multiplikation von $\sigma_{d,ref}$ mit 0,9 berechnet.

Die Ermüdungsfestigkeit unter gerader Biegung wird durch Multiplikation von $\sigma_{d,ref}$ mit 1,05 berechnet.

Die Ermüdungsfestigkeit bei Torsion ergibt sich aus:

$$\tau_{d,ref} = \frac{\sigma_{d,ref}}{\sqrt{3}} \quad (22)$$

Die Werte für die Ermüdungsfestigkeit unter einer alternierenden Belastung können der einschlägigen Fachliteratur entnommen werden (siehe Literaturhinweise).

7.2.2.3 Korrektur der Ermüdungsfestigkeit durch weitere Einflussfaktoren

7.2.2.3.1 Allgemeines

Im Gegensatz zum Idealfall mit einem polierten Prüfkörper können die Geometrie, die Größe und der Oberflächenzustand (durch maschinelle Bearbeitung oder Oberflächenhärtung) des betrachteten Bauteils Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit unter einer alternierenden Belastung nehmen.

Diese Einflüsse werden durch die folgenden Faktoren berücksichtigt:

- f_1 Kerbfaktor, siehe 7.2.2.3.2;
- f_2 Größenfaktor, siehe 7.2.2.3.3;
- f_3 Oberflächenrauigkeitsfaktor, siehe 7.2.2.3.4;
- f_4 Oberflächenbehandlungsfaktor, siehe 7.2.2.3.5;
- f_5 Faktor für eine große Anzahl an Spannungsspielen, siehe 7.2.2.3.6.

Die Werte dieser Faktoren für alternierende Belastungen können der einschlägigen Fachliteratur entnommen oder durch Prüfungen ermittelt werden.

7.2.2.3.2 Kerbfaktor f_1

Der Einfluss von Spannungskonzentrationen wird durch den Kerbfaktor f_1 berücksichtigt.

Werte für f_1 sind in Anhang A angegeben.

7.2.2.3.3 Größenfaktor f_2

Bei gleichbleibender Nennspannung nimmt die Ermüdungsfestigkeit eines Bauteils bei steigender Bauteilgröße ab. Dies ist im Wesentlichen auf das Spannungsgefälle zurückzuführen (je nach Art der Belastung) sowie auf die Eintrittswahrscheinlichkeit von Unregelmäßigkeiten.

Der Größenfaktor f_2 ist definiert als das Verhältnis der Ermüdungsfestigkeit eines Prüfkörpers von bestimmter Größe zur Ermüdungsfestigkeit eines polierten Prüfkörpers mit einem Bezugsdurchmesser von 7,5 mm, der auf die gleiche Weise maschinell bearbeitet wurde.

Für Bauteile, die durch Rotation hergestellt werden, achsensymmetrische Bauteile, hängt der Größenfaktor f_2 von deren Durchmesser d (in [mm]) ab; für eine Welle unter gerader Biegung oder Umlaufbiegung ergibt er sich wie folgt:

$$f_2 = 9,308 \cdot d^{-0,0065} - 0,0116 \cdot \sqrt{d} - 8,169 \quad (23)$$

In Tabelle 6 sind einige repräsentative Werte angegeben:

Tabelle 6 — Größenfaktor f_2

Durchmesser d (mm)	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
f_2	0,84	0,82	0,8	0,79	0,77	0,76	0,75	0,74	0,73	0,72	0,71	0,7	0,69	0,68

ANMERKUNG Vorsichtig gesagt, können für eine Biegebeanspruchung die gleichen Werte wie für eine Zugbeanspruchung verwendet werden.

Für Maschinenbauteile, die nicht durch Rotation hergestellt werden, muss der Größenfaktor f_2 abgeschätzt werden, indem der unter Spannung stehende Bereich eines ‚nicht unter Rotation hergestellten Bauteils‘ in den Bereich eines Bauteils mit äquivalenter Achsensymmetrie konvertiert wird. Der äquivalente Durchmesser d_{equ} kann wie folgt festgelegt werden:

$$d_{\text{equ}} = \left(\frac{area_{0,95}}{0,077} \right)^{1/2} \quad (24)$$

Dabei ist

$area_{0,95}$ der Schnittbereich mit einer Spannung größer als 95 % der Höchstspannung, in [mm²].

7.2.2.3.4 Oberflächenrauigkeitsfaktor f_3

Die Erfahrung zeigt, dass Teile, die mit einer groben Oberfläche hergestellt wurden, eine niedrigere Ermüdungsfestigkeit aufweisen als sorgfältig polierte Teile.

Viele Faktoren können hier Einfluss nehmen: Rauigkeit, Kalthärtung und Restspannungen. Der nachstehend für die Oberflächenrauigkeit definierte Faktor f_3 umfasst nur die Auswirkungen des ersten Einflusses dieser Art:

Der Faktor der Oberflächenrauigkeit f_3 ergibt sich wie folgt:

$$f_3 = 1 - 0,22 \cdot \log \frac{R_a}{0,4} \cdot \left(\log \frac{f_u}{200} \right) \quad (25)$$

Dabei ist

R_a die mittlere Tiefe des Oberflächenprofils nach EN ISO 4287:1998, in [µm];

f_u die Bruchfestigkeit des Werkstoffs, in [N/mm²].

7.2.2.3.5 Oberflächenbehandlungsfaktor f_4

Der Oberflächenbehandlungsfaktor f_4 berücksichtigt den Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit durch die Änderung des Oberflächenzustands, der von dem angewendeten technischen Verfahren abhängt.

Mindestwerte des Oberflächenbehandlungsfaktors f_4 können aus Tabelle 7 ausgewählt werden, mit $f_4 \geq 1$.

Für oberflächenbehandelte ungekerbte Wellen unter Zug/Druck gilt $f_4 = 1$.

Wenn der Nachweis der Ermüdungsfestigkeit mit den Kerbfaktoren f_1 erbracht wird, die durch Prüfungen nach einer Oberflächenbehandlung bestimmt worden sind, dann muss f_4 gleich 1,0 sein (f_4 erhöht sich mit dem Spannungskonzentrationsbeiwert K_t , siehe Anhang A).

Tabelle 7 — Oberflächenbehandlungsfaktor in Abhängigkeit vom technischen Verfahren

Verfahren und Anforderungen		Kerbfaktor	Fall ^b	d mm	f ₄
Chemo- thermische Prozesse	Nitrieren Nitriertiefe 0,1 mm bis 0,4 mm Oberflächen- härte 700 HV10 bis 1 000 HV10	— f ₁ ermittelt in Übereinstimmung mit Anhang A ^a	1	7 ≤ d ≤ 25	1,15
		— f ₁ experimentell ermittelt mit nitrierten Stählen ^b		25 < d	$1,15 \cdot \left(\frac{25-d}{45} + 1 \right)$
		— ungekerbte Prüfstäbe/-wellen	2	7 ≤ d ≤ 25	1,5
		— f ₁ experimentell ermittelt mit gekerbten Prüfstäben/-wellen, nicht nitriert		25 < d	$1,5 \cdot \left(\frac{25-d}{31} + 1 \right)$
	Einsatzhärtung Einsatztiefe 0,2 mm bis 0,8 mm Oberflächen- härte 670 HV bis 750 HV	— f ₁ ermittelt in Übereinstimmung mit Anhang A ^a	1	7 ≤ d ≤ 25	1,2
		— f ₁ experimentell ermittelt mit Einsatzstählen ^a		25 < d	$1,2 \cdot \left(\frac{25-d}{45} + 1 \right)$
		— ungekerbte Prüfstäbe/-wellen	2	7 ≤ d ≤ 25	1,5
		— f ₁ experimentell ermittelt mit gekerbten Prüfstäben/-wellen, nicht einsatzgehärtet		25 < d	$1,5 \cdot \left(\frac{25-d}{31} + 1 \right)$
	Karbonitrieren Härtetiefe 0,2 mm bis 0,4 mm Oberflächen- härte mindestens 670 HV10	— f ₁ ermittelt in Übereinstimmung mit Anhang A ^a	1	7 ≤ d ≤ 25	1,1
		— f ₁ experimentell ermittelt mit karbonitrierten Stählen ^a		25 < d	$1,1 \cdot \left(\frac{25-d}{45} + 1 \right)$
		— ungekerbte Prüfstäbe/-wellen	2	7 ≤ d ≤ 25	1,4
		— f ₁ experimentell ermittelt mit gekerbten Prüfstäben/-wellen, nicht karbonitriert		25 < d	$1,4 \cdot \left(\frac{25-d}{31} + 1 \right)$
Mecha- nische Prozesse	Walzen	— f ₁ experimentell ermittelt mit ungekerbten Prüfstäben/-wellen mit mechanisch behandelten Oberflächen ^a	1	7 ≤ d ≤ 25	1,2
		— ungekerbte Prüfstäbe/-wellen		25 < d	$1,2 \cdot \left(\frac{25-d}{75} + 1 \right)$
		— f ₁ ermittelt in Übereinstimmung mit Anhang A	2	7 ≤ d ≤ 25	1,5
		— f ₁ experimentell ermittelt mit ungekerbten Prüfstäben/-wellen, ohne mechanische Behandlung		25 < d	$1,5 \cdot \left(\frac{25-d}{65} + 1 \right)$
	Kugelstrahlen	— f ₁ experimentell ermittelt mit mechanisch behandelten Oberflächen ^a	1	7 ≤ d ≤ 42	1,1
		— ungekerbte Prüfstäbe/-wellen		25 < d	$1,1 \cdot \left(\frac{42-d}{21} + 1 \right)$
		— f ₁ ermittelt in Übereinstimmung mit Anhang A	2	7 ≤ d ≤ 25	1,4
		— f ₁ experimentell ermittelt mit gekerbten Prüfstäben/-wellen, ohne mechanische Behandlung		25 < d	$1,4 \cdot \left(\frac{25-d}{24} + 1 \right)$

Verfahren und Anforderungen		Kerbfaktor	Fall ^b	d mm	f ₄
Thermische Prozesse	Induktionshärten Flammhärten Effektive Einhärtetiefe 0,9 bis 1,5 mm	— f ₁ ermittelt in Übereinstimmung mit Anhang A ^b	1	7 ≤ d ≤ 25	1,2
		— f ₁ experimentell ermittelt mit induktionsgehärteten (flammergehärteten) Stählen ^a		25 < d	1,2 · $\left(\frac{25 - d}{38} + 1\right)$
	— ungekerbte Prüfstäbe/-wellen	2	7 ≤ d ≤ 25	1,4	
	— f ₁ experimentell ermittelt mit gekerbten Prüfstäben/-wellen, ohne thermische Oberflächenbehandlung		25 < d	1,4 · $\left(\frac{25 - d}{38} + 1\right)$	

^a f₄ berücksichtigt den Festigkeitsanstieg der ungekerbten Komponente (Grundwerkstoff). Die Abnahme des Kerbfaktors f₁ ist bereits inbegriffen.

^b Fall 1: f₄ gilt für den Anstieg der Ermüdungsfestigkeit eines ungekerbten Prüfstabs mit Oberflächenbehandlung, verglichen mit einem ungekerbten Prüfstab ohne Oberflächenbehandlung. Die Werte für Fall 1 gelten nur bei f₁ > f₄, anderenfalls ist f₄ für den ungekerbten Fall 1 anzuwenden.

Fall 2: f₄ gilt für den Anstieg der Ermüdungsfestigkeit eines gekerbten Prüfstabs mit Oberflächenbehandlung, verglichen mit einem gekerbten Prüfstab ohne Oberflächenbehandlung.

Die Enden der Oberflächenbehandlung haben einen negativen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit des Werkstoffs und müssen mithilfe eines Faktors f₄ von 0,6 in diesen Übergangsbereichen berücksichtigt werden, es sei denn, andere anerkannte Werte sind verfügbar.

7.2.2.3.6 Faktor für eine große Anzahl an Spannungsspielen f₅

Zahlreiche Prüfungen haben ergeben, dass die Ermüdungsfestigkeit bei einer sehr hohen Anzahl an Spannungsspielen (N > 10⁸) allmählich sinkt, was im Wesentlichen auf den Einfluss von Mikroeinschlüssen zurückgeführt wird. Dieses Sinken der Ermüdungsfestigkeit muss gesondert betrachtet werden, indem ein spezieller Faktor f₅ zum Einsatz kommt, der auf der tatsächlichen Gesamtzahl an Spannungsspielen $\hat{n}$ basiert (d. h. vor einer eventuellen Kürzung, deren Prinzip in Bild 1 dargestellt ist, siehe 7.1). Siehe nachstehende Gleichung:

$$f_5 = 1,315 \cdot 1 - 0,05 \cdot \log(\hat{n}); \hat{n} \geq 2 \cdot 10^6 \quad (26)$$

7.2.2.3.7 Anwendung der Einflussfaktoren

Die mittlere alternierende Ermüdungsfestigkeit $\sigma_{d,s}$ oder $\tau_{d,s}$ für das betrachtete Maschinenbauteil muss wie folgt definiert sein:

$$\sigma_{d,s} = \sigma_{d,ref} \cdot \frac{f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot f_5}{f_1} \quad \text{für Biege-, Zug- oder Drucknormalspannungen} \quad (27)$$

$$\tau_{d,s} = \tau_{d,ref} \cdot \frac{f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot f_5}{f_1} \quad \text{für Torsionsschubspannungen} \quad (28)$$

7.2.2.4 Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit σ_d oder τ_d des Bauteils

Die Ermüdungsfestigkeit σ_d oder τ_d des Bauteils wird im Hinblick auf Höchstwerte bei 2 Millionen Spannungsspielen mithilfe des Grenzspannungsverhältnisses R oder der Mittelspannung σ_m nach Bild 4 oder Tabelle 8 bestimmt.

Tabelle 8 — Ermüdungsfestigkeit σ_d oder τ_d des Bauteils

Spannungsart	Bezug	Bedingung	Ermüdungsfestigkeit σ_d oder τ_d
Normalspannungen	Mittelspannung σ_m	$0 \leq \sigma_m \leq f_u - (\sigma_{d,s}/2)$	$\frac{2 \cdot (f_u - \sigma_{d,s})}{2 \cdot f_u - \sigma_{d,s}} \cdot \sigma_m + \sigma_{d,s} \leq f_u$
	Grenzspannungsverhältnis R	$-1 \leq R \leq \frac{2 \cdot f_u}{2 \cdot f_u - \sigma_{d,s}}$	$\frac{\sigma_{d,s}}{1 - \frac{f_u - \sigma_{d,s}}{2 \cdot f_u - \sigma_{d,s}} \cdot (1 + R)} \leq f_u$
Schubspannungen	Mittelspannung τ_m	$0 \leq \tau_m \leq \frac{f_u}{\sqrt{3}} - \frac{\tau_{d,s}}{2}$	$\tau_{d,s} + \tau_m \leq \frac{f_u}{\sqrt{3}}$
	Grenzspannungsverhältnis R	$-1 \leq R \leq \frac{\frac{f_u}{\sqrt{3}}}{\frac{f_u}{\sqrt{3}} - \frac{\tau_{d,s}}{2}}$	$\tau_{d,s} \cdot (2 + R) \leq \frac{f_u}{\sqrt{3}}$

7.2.2.5 Bestimmung der inversen Steigung m der Wöhlerlinie

Die inverse Steigung im Intervall zwischen $n = 1\,000$ Spielen und $n = 2 \cdot 10^6$ Spielen wird wie folgt berechnet:

— für Normalspannungen aus:

$$m_\sigma = \frac{\log(2 \cdot 10^6) - \log(1\,000)}{\log(0,9 \cdot f_u) - \log(\sigma_d)} \quad (29)$$

— für Schubspannungen aus:

$$m_\tau = \frac{\log(2 \cdot 10^6) - \log(1\,000)}{\log\left(\frac{0,9 \cdot f_u}{\sqrt{3}}\right) - \log(\tau_d)} \quad (30)$$

7.2.2.6 Spezifischer Widerstandsbeiwert γ_{Mf}

Für die Überlebenswahrscheinlichkeit von 99 %, wie in 7.2.2.2 empfohlen, muss der Beiwert γ_{Mf} von Tabelle 9 nachstehend verwendet werden:

Tabelle 9 — Spezifischer Widerstandsbeiwert γ_{Mf}

Art des Mechanismus	Betriebssichere Bauteile ^a	Nicht betriebssichere Bauteile	
		Keine Gefährdung für Personen ^a	Gefährdung für Personen ^a
Horizontale Bewegungen	1,00	1,05	1,10
Heben, Wippen	1,15	1,20	1,25

^a Siehe Definitionen in EN 13001-3-1.

Der Mindestwert von γ_{Mf} beträgt 1,0, da er einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 99 % entspricht. Die Werte von Tabelle 9 sollten für eine andere Überlebenswahrscheinlichkeit als 99 % oder für den Fall, dass ein Risikobeiwert $\gamma_n > 1,10$ in den Lastkombinationen nach EN 13001-2 enthalten ist, neu berechnet werden.

7.3 Durchführung des Nachweises der Ermüdungsfestigkeit

7.3.1 Einzelnachweis

Für die zu konstruierenden Maschinenbauteile muss nachgewiesen werden, dass:

$$\sigma_{Sd,f} \leq \sigma_{Rd,f} \quad \text{und} \quad \tau_{Sd,f} \leq \tau_{Rd,f} \quad (31)$$

Dabei sind

$\sigma_{Sd,f}$, $\tau_{Sd,f}$ die Bemessungswerte der Ermüdungsspannungen, in Übereinstimmung mit 7.2.1.5;

$\sigma_{Rd,f}$, $\tau_{Rd,f}$ die Grenzwerte der zulässigen Ermüdungsspannungen, in Übereinstimmung mit 7.2.2.1.

7.3.2 Vereinfachter Nachweis

Für Bauteile mit mindestens der Anzahl n_i an Spannungsspielen (entsprechend einer Spannungsamplitude $\sigma_{a,i}$ von über $2 \cdot 10^6$ Spannungsspielen) könnte der nachstehend aufgeführte vereinfachte Nachweis erbracht werden:

$$\sigma_{a,i} \leq \frac{\sigma_{d,s}}{\gamma_{Mf}} \quad (32)$$

Dabei ist

$\sigma_{d,s}$ die alternierende Ermüdungsfestigkeit für das Maschinenbauteil, in Übereinstimmung mit 7.2.2.3.7.

7.3.3 Nachweis für mehrachsige Lasten

Zusätzlich zum separaten Nachweis für $\sigma_{Sd,f}$ und $\tau_{Sd,f}$ (siehe 7.3.1), sofern $\left(\frac{\tau_{Sd,f}}{\sigma_{Sd,f}}\right) > 0,20$, muss der kombinierte Einfluss von phasengleich und proportional schwankenden Schwingbreiten von Normal- und Schubspannungen berücksichtigt werden, indem ein Sicherheitsbeiwert γ_{ff} für die Ermüdung wie folgt berechnet wird:

$$\gamma_{ff} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{Sd,f}}{\sigma_{Rd,f}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{Sd,f}}{\tau_{Rd,f}}\right)^2}} \quad (33)$$

Für die zu konstruierenden Maschinenbauteile muss nachgewiesen werden, dass:

$$\gamma_{ff} \geq 1,0 \quad (34)$$

Anhang A (informativ)

Werte für den Kerbfaktor f_1

A.1 Allgemeines

Dieser Anhang enthält Vorschläge für Werte für die folgenden Fälle (nach [2-3] und [2-4]):

- Bilder A.2 bis A.7: Welle mit Kerbe oder Wellenbund, für unterschiedliche Lastarten;
- Bild A.8: Keilwelle;
- Bild A.9: Welle mit Keilnut;
- Tabelle A.1: Naben-Wellen-Verbindung;
- Bild A.10: Welle mit Bohrung.

Für die in den Bildern A.2 bis A.7 dargestellten Fälle ergibt sich der Kerbfaktor f_1 wie folgt:

$$f_1 = z \cdot K_t \quad (A.1)$$

Dabei ist

- z der Anpassungsbeiwert mit Berücksichtigung des Fließverhaltens am Grund der Kerbe, nach Bild A.1;
- K_t der statische Spannungskonzentrationsbeiwert. Die Bilder A.2 bis A.7 enthalten Vorschläge für Werte für übliche Fälle.

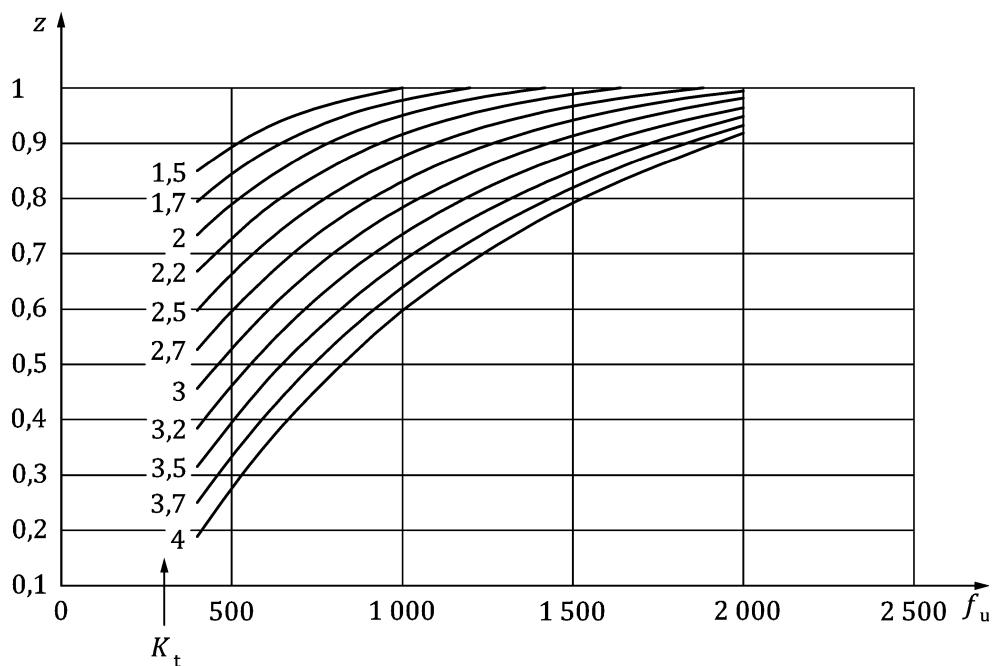


Bild A.1 — Anpassungsbeiwert z

A.2 Beispiele für Kerbfaktoren

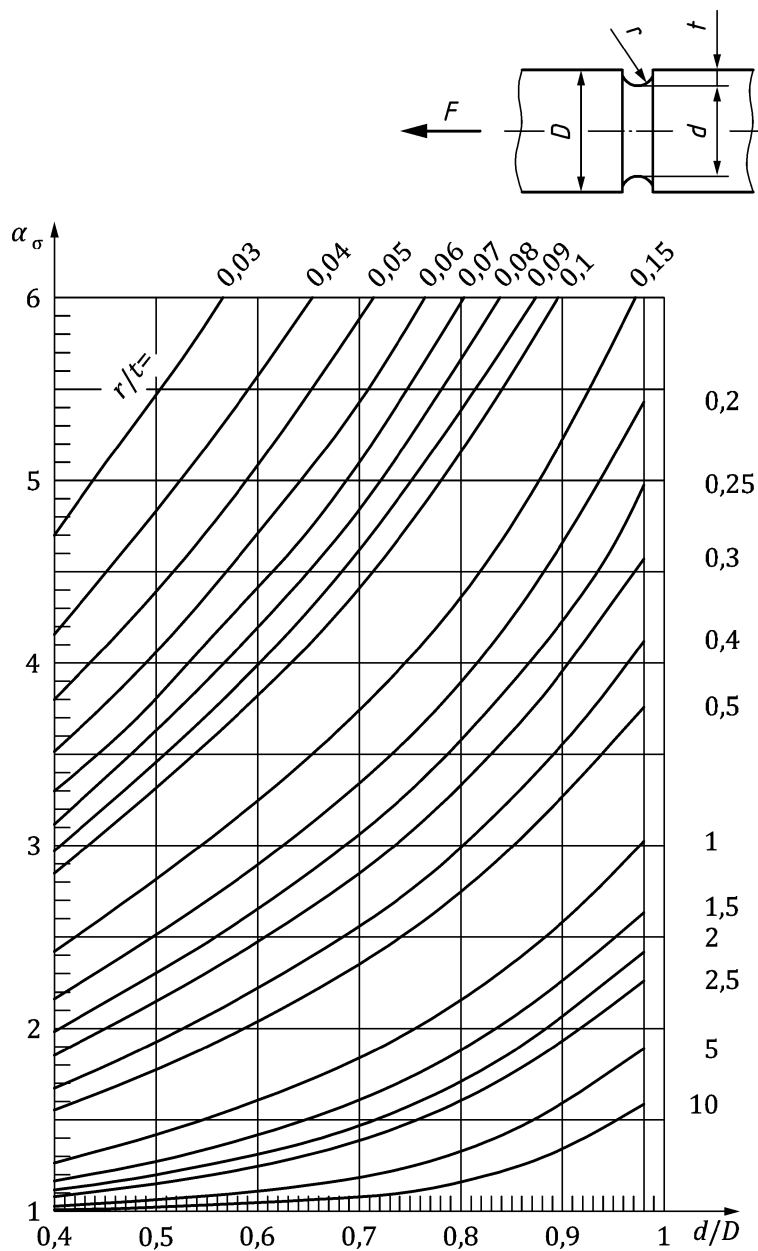


Bild A.2 — Spannungskonzentrationsbeiwert K_t für eine Welle mit Kerbe, zugbelastet

$$K_t = 1 + \frac{1}{\sqrt{0,22 \cdot \frac{r}{t} + 2,74 \cdot \frac{r}{d} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{r}{d}\right)^2}} \quad (\text{A.2})$$

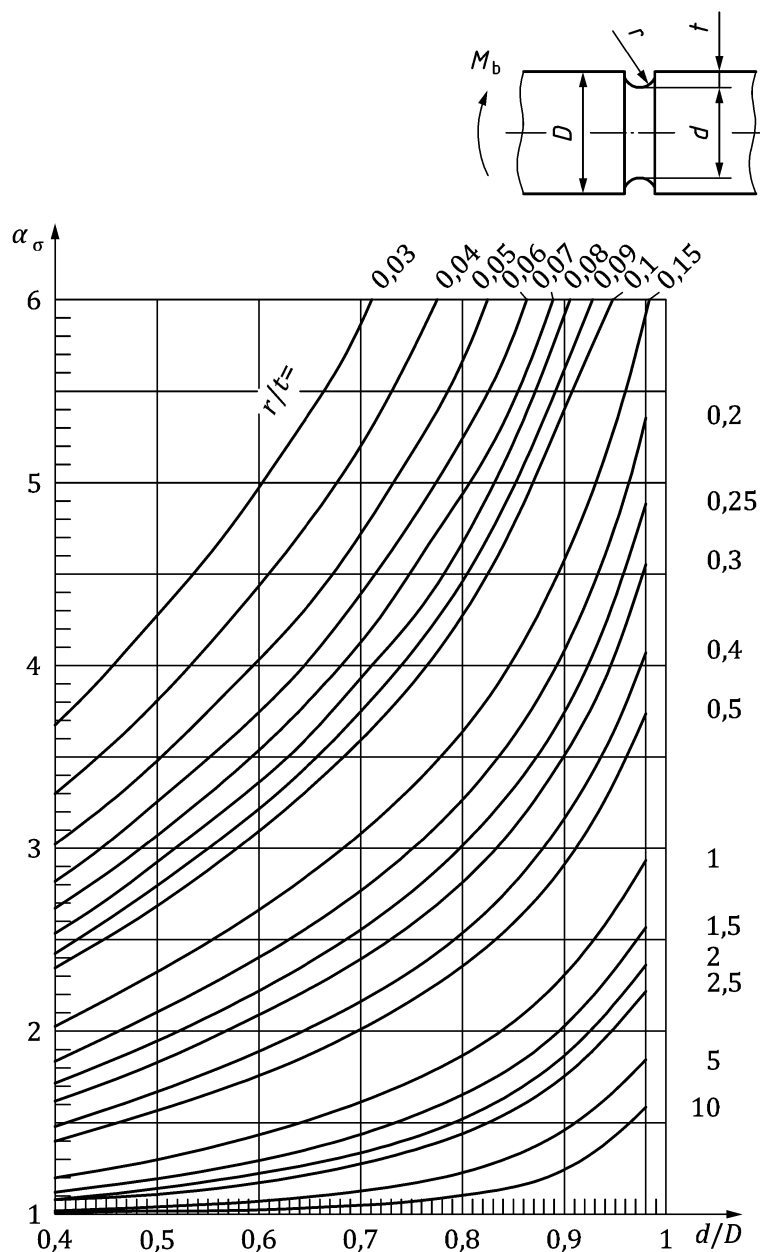


Bild A.3 — Spannungskonzentrationsbeiwert K_t für eine Welle mit Kerbe, biegebelastet

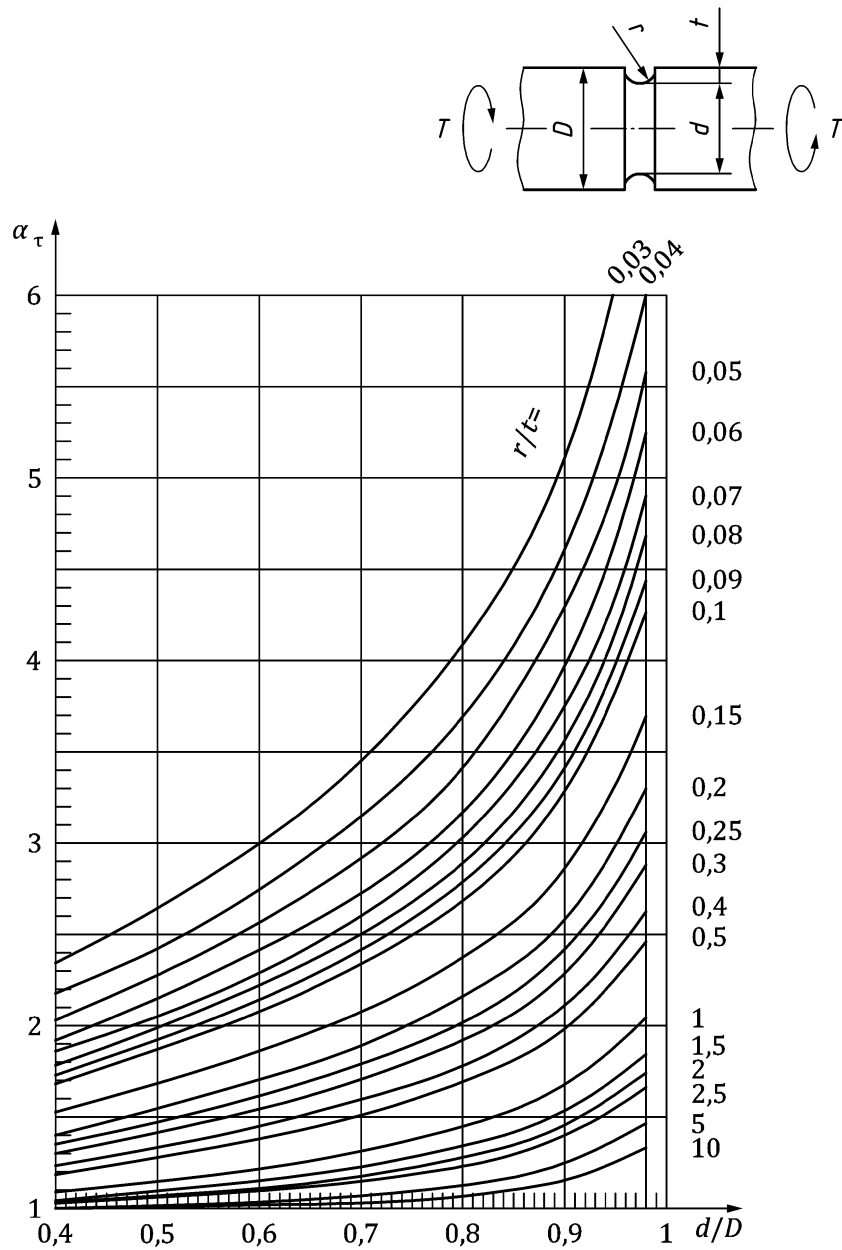


Bild A.4 — Spannungskonzentrationsbeiwert K_t für Wellen mit Kerbe, torsionsbelastet

$$K_t = 1 + \frac{1}{\sqrt{0,7 \cdot \frac{r}{t} + 20,6 \cdot \frac{r}{d} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{r}{d}\right)^2}} \quad (\text{A.4})$$

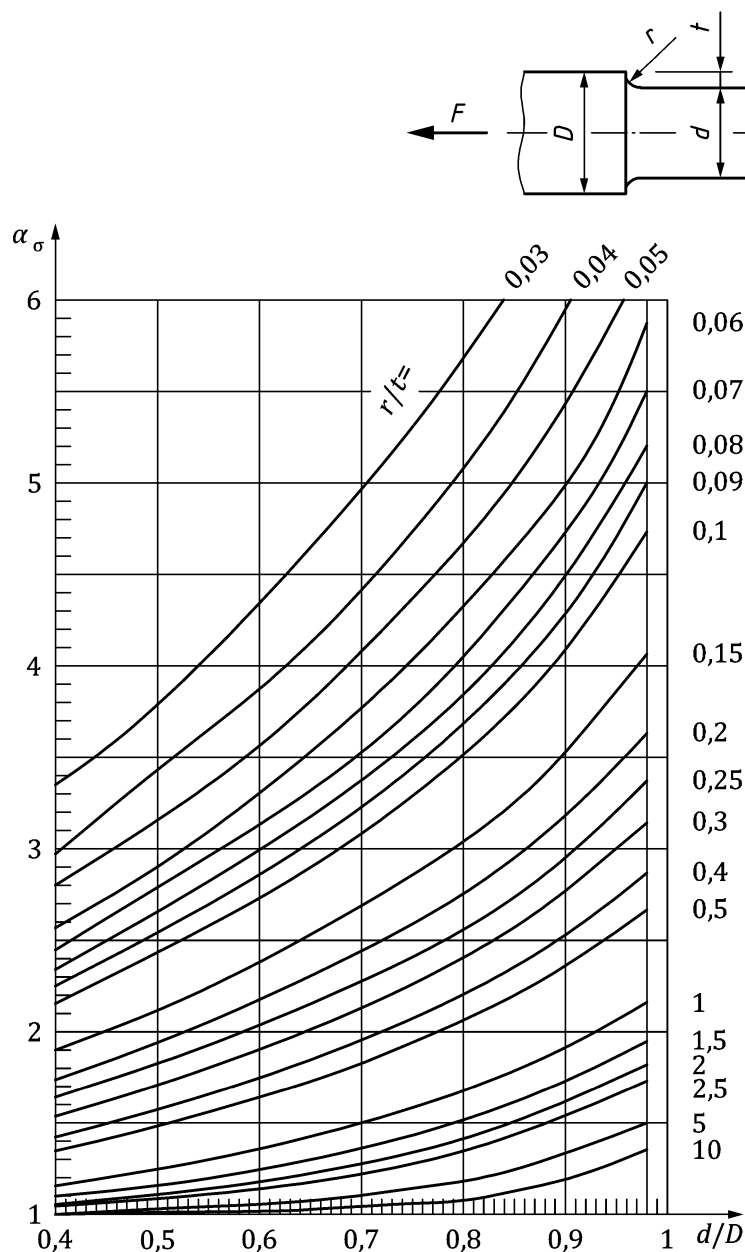


Bild A.5 — Spannungskonzentrationsbeiwert K_t für eine Welle mit Bund, zugbelastet

$$K_t = 1 + \frac{1}{\sqrt{0,62 \cdot \frac{r}{t} + 7 \cdot \frac{r}{d} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{r}{d}\right)^2}} \quad (\text{A.5})$$

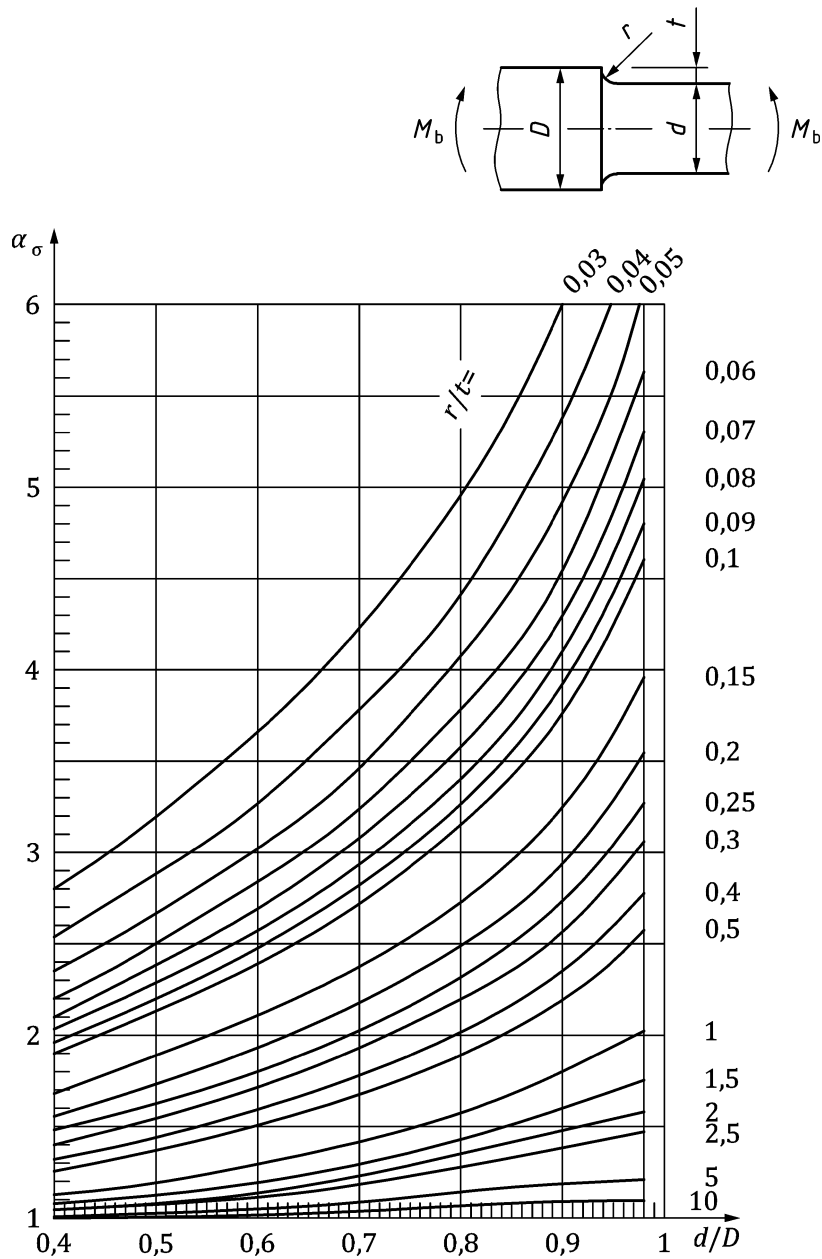


Bild A.6 — Spannungskonzentrationsbeiwert K_t für eine Welle mit Bund, biegebelastet

$$K_t = 1 + \frac{1}{\sqrt{0,62 \cdot \frac{r}{t} + 11,6 \cdot \frac{r}{d} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{r}{d}\right)^2 + 0,2 \cdot \left(\frac{r}{d}\right)^3 \cdot \frac{d}{D}}} \quad (\text{A.6})$$

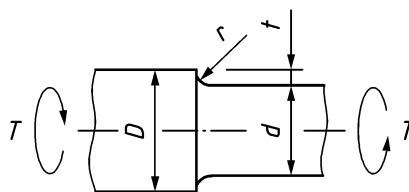
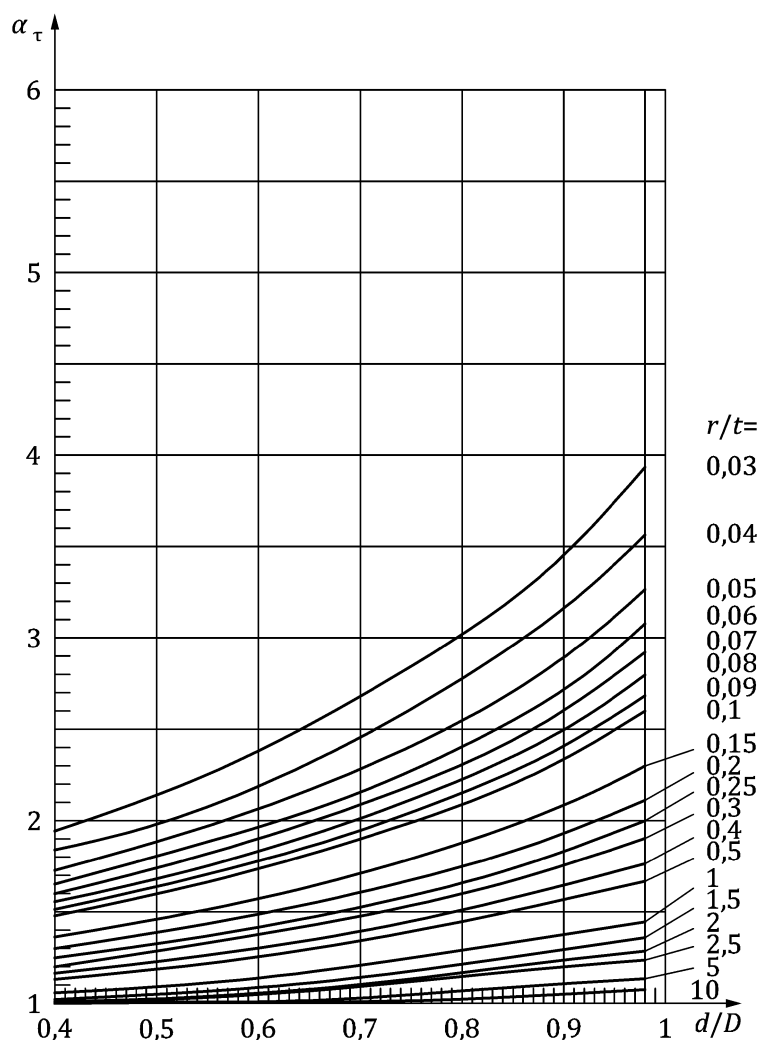
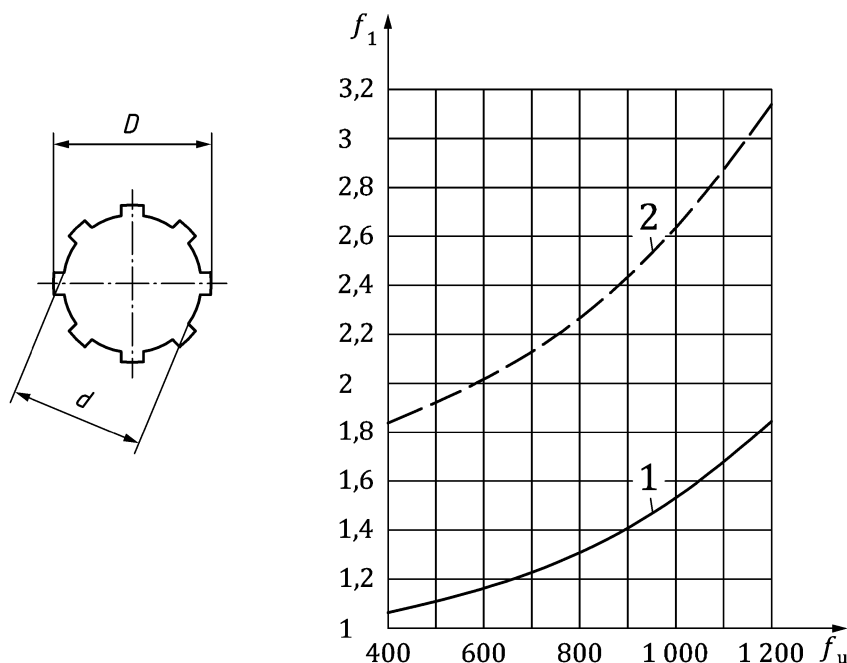


Bild A.7 — Spannungskonzentrationsbeiwert K_t für eine Welle mit Bund, torsionsbelastet

$$K_t = 1 + \frac{1}{\sqrt{3,4 \cdot \frac{r}{t} + 38 \cdot \frac{r}{d} \cdot \left(1 + 2 \cdot \left(\frac{r}{d}\right)^2\right) + \left(\frac{r}{d}\right)^3 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)}} \quad (\text{A.7})$$



Legende

- 1 Biegung
- 2 Torsion

Bild A.8 — Kerbfaktor f_1 für eine Keilwelle

Für eine torsionsbelastete Keilwelle ergibt sich der Kerbfaktor $f_{1torsion}$ nach Bild A.8 wie folgt:

$$f_{1torsion} = 1,93 - 0,073 \cdot \frac{f_u}{100} + 0,014 \cdot \left(\frac{f_u}{100}\right)^2 \quad (\text{A.8})$$

Dabei ist

f_u die Bruchfestigkeit des Werkstoffs, in $[\text{N/mm}^2]$.

Für eine biegebelastete Keilwelle ergibt sich der Kerbfaktor $f_{1bending}$ wie folgt:

$$f_{1bending} = 0,85 \cdot f_{1torsion} \quad (\text{A.9})$$