

Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen

Teil 2: Formzahlen und Kerbwirkungszahlen

DIN
743-2

ICS 21.120.10

Shafts and axles, calculation of load capacity – Part 2: Theoretical stress concentration factors and fatigue notch factors

Calcul de la capacité des arbres et axes – Partie 2: Coefficients théoriques de la concentration des contraintes, coefficients effectifs de la concentration des contraintes

Inhalt

	Seite
Vorwort	2
1 Anwendungsbereich	2
2 Normative Verweisungen	2
3 Allgemeine Formelzeichen, Benennungen und Einheiten	2
4 Kerbwirkungszahl	3
4.1 Definition der Kerbwirkungszahl	3
4.2 Experimentell bestimmte Kerbwirkungszahlen	3
4.3 Kerbwirkungszahlen für Kerben mit bekannter Formzahl	6
5 Formzahlen	7
5.1 Definition der Formzahl	7
5.2 Formzahlen für verschiedene Kerbformen	7
6 Größeneinflussfaktoren	10
7 Einflussfaktor der Oberflächenrauheit $K_{F\sigma,\tau}$	12
8 Einflussfaktor der Oberflächenverfestigung	12

Fortsetzung Seite 2 bis 14

Normenausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

Vorwort

Diese Norm wurde erarbeitet von Fachleuten aus dem Normenausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Antriebstechnik (Ant, AA 2.2) und des Instituts für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion der TU Dresden.

DIN 743 „Tragfähigkeitsberechnung für Wellen und Achsen“ besteht aus:

- Teil 1: „Einführung, Grundlagen“;
- Teil 2: „Formzahlen und Kerbwirkungszahlen“;
- Teil 3: „Werkstoff-Festigkeitswerte“;
- Beiblatt 1: „Anwendungsbeispiele“.

1 Anwendungsbereich

Diese Norm enthält die zur Berechnung der Bauteil-Dauerfestigkeit nach DIN 743-1 notwendigen Größeneinflussfaktoren, Oberflächenfaktoren, Formzahlen oder Kerbwirkungszahlen (weitere Ang. siehe [11]). Liegen dem Anwender eigene Ergebnisse oder Erkenntnisse vor, so kann er diese Größen bzw. Faktoren anstelle der hier angegebenen Faktoren bei der Berechnung verwenden.

Die angegebenen Form- und Kerbwirkungszahlen gelten für Vollwellen oder Hohlwellen mit Wanddicken, bei denen noch keine Beeinflussung der Kerbe durch die Bohrung vorliegt. Für Umlaufkerben dient die Bedingung $(D-d_i)/(2 \cdot t) \geq 3$ als Orientierung (siehe DIN 743-1, Anhang A).

2 Normative Verweisungen

Diese Norm enthält durch datierte oder undatierte Verweisungen Festlegungen aus anderen Publikationen. Diese normativen Verweisungen sind an den jeweiligen Stellen im Text zitiert, und die Publikationen sind nachstehend aufgeführt. Bei datierten Verweisungen gehören spätere Änderungen oder Überarbeitungen dieser Publikationen nur zu dieser Norm, falls sie durch Änderung oder Überarbeitung eingearbeitet sind. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe der in Bezug genommenen Publikation.

DIN 471

Sicherungsringe für Wellen – Regelausführung und schwere Ausführung

DIN 743-1

Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen – Teil 1: Einführung, Grundlagen

DIN 743-3

Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen – Teil 3: Werkstoff-Festigkeitswerte

DIN 6892

Mitnehmerverbindungen ohne Anzug – Passfedern – Berechnung und Gestaltung

[1] R. E. Peterson: Stress concentration factors. John Wiley and Sons, Inc. New York 1974

[2] H. Tauscher: Dauerfestigkeit von Stahl und Gusseisen. VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1982

[3] B. Pfeiffer: Einfluss von Sicherungsringverbindungen auf die Dauerfestigkeit dynamisch belasteter Wellen. Diss. TU Berlin 1985

[4] H. Klamka: Einfluss von Festigkeits- und Nachbehandlungsvarianten auf die dauerfestigkeitsbestimmenden Parameter bei Wellen mit axialbelasteten Sicherungsnuten. Diss. TU Berlin 1990

[5] W. Beitz, A. Meyer-Eschenbach: Dauerschwingfestigkeit von Wellen mit Sicherungsringverbindungen. Antriebs-technik 32 (1993) Nr. 12, S. 58–61

[6] W. Beitz, A. Meyer-Eschenbach: Dauerschwingfestigkeit von Wellen mit Sicherungsnuten für Werkstoff-, Nachbehandlungs- und Fertigungsvarianten. Konstruktion 45 (1993), S. 263–268

[7] E. Leidich: Beanspruchung von Pressverbindungen im elastischen Bereich und Auslegung gegen Dauerbruch. Diss. TH Darmstadt 1983

[8] J. Heinrich: Kerbwirkung an Sicherungsringnuten und Berechnung von Sicherungsringverbindungen. Diss. TH Darmstadt 1984

[9] H. Neuber: Über die Berücksichtigung der Spannungskonzentration bei Festigkeitsberechnungen. Konstruktion 20 (1968) Nr. 7

[10] N. Häusler: Zum Mechanismus der Biegemomentübertragung in Schrumpferverbindungen. Konstruktion 28 (1976) Nr. 3

[11] FKM-Richtlinie: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile. Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM), VDMA-Verlag Frankfurt/Main 1998

3 Allgemeine Formelzeichen, Benennungen und Einheiten

Formelzeichen	Benennungen	Einheiten
d	Bauteildurchmesser im Kerbquerschnitt	mm
D	Bauteildurchmesser am Wellenabsatz	mm
d_B	Werkstoff-Bezugsdurchmesser	mm
d_{BK}	Kerb-Bezugsdurchmesser	mm
d_{eff}	für die Wärmebehandlung maßgebender Durchmesser	mm
d_i	Bauteil-Innendurchmesser	mm
r	Kerbradius	mm
t	Kerbtiefe	mm
F	Kraft	N
M_b	Biegemoment	Nm
T	Torsionsmoment	Nm
R_{zB}	mittlere Rauheit der Probe	μm
$\alpha_{\sigma, \tau}$	Formzahl	
$\beta_{\sigma, \tau}$	Kerbwirkungszahl	
$\beta_{\sigma, \tau}^*$	Hilfsgröße für Kerbwirkungszahl	
$\sigma_{\max K}$	maßgebende örtliche Hauptspannung im Kerbquerschnitt	N/mm^2
$\tau_{\max K}$	maßgebende örtliche Torsionsspannung (Hauptschubspannung) im Kerbquerschnitt	N/mm^2
σ_n, τ_n	Nennspannung im Kerbquerschnitt	N/mm^2
$\sigma_{zd,bW}(d)$ $\tau_{tW}(d)$	Wechselfestigkeit der ungekerbten, polierten Rundprobe mit dem Durchmesser d	N/mm^2
$\sigma_{zd,b WK}$ τ_{tWK}	Bauteil-Wechselfestigkeit (Nennspannung)	N/mm^2
σ_B	Werkstoff-Zugfestigkeit	N/mm^2

4 Kerbwirkungszahl

4.1 Definition der Kerbwirkungszahl

Die Kerbwirkungszahl des Bauteils ist durch die Gleichungen (1) und (2) definiert:

$$\beta_{\sigma} = \frac{\sigma_{zd,bW}(d)}{\sigma_{zd,bWK}} \quad (1)$$

$$\beta_{\tau} = \frac{\tau_{tW}(d)}{\tau_{tWK}} \quad (2)$$

In den Gleichungen (1) und (2) sind:

$\sigma_{zd,bWK}$, τ_{tWK} Wechselfestigkeit des Bauteils mit dem Durchmesser d im Kerbquerschnitt (durch die Nennspannung ausgedrückt);

$\sigma_{zd,bW}(d)$, $\tau_{tW}(d)$ Wechselfestigkeit der ungekerbten, polierten Rundprobe mit dem Durchmesser d unter sonst gleichen Bedingungen.

Die Bestimmung der Kerbwirkungszahl für Zug/Druck, Biegung β_{σ} oder Torsion β_{τ} kann entsprechend den Möglichkeiten rechnerisch oder experimentell erfolgen.

4.2 Experimentell bestimmte Kerbwirkungszahlen

Die Kerbwirkungszahlen der im folgenden angegebenen Kerbfälle wurden experimentell nur für bestimmte Proben-durchmesser ($\beta_{\sigma}(d_{BK})$, $\beta_{\tau}(d_{BK})$) für Bezugsdurchmesser d_{BK} ermittelt. Die Kerbwirkungszahl für den Bauteildurchmesser d ist nach Gleichung (3) zu berechnen:

$$\beta_{\sigma} = \beta_{\sigma}(d_{BK}) \cdot \frac{K_3(d_{BK})}{K_3(d)} \quad (3)$$

Dabei ist:

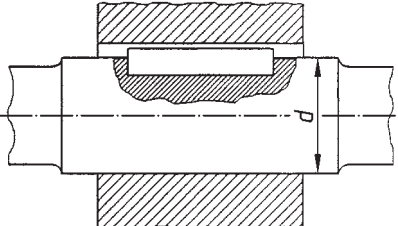
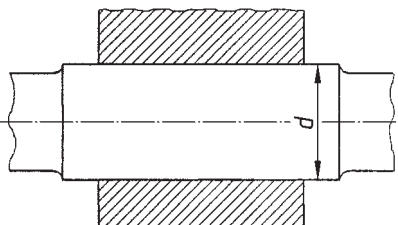
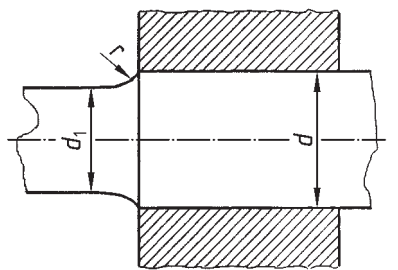
$K_3(d)$, $K_3(d_{BK})$ geometrischer Größeneinflussfaktor (siehe Bild 13).

Gleichung (3) gilt für Zug/Druck oder Biegung, aber auch für Torsion, wenn σ durch τ ersetzt wird. Für spezielle Bauteile sind die Kerbwirkungszahlen experimentell zu bestimmen.

Passfedernut und Presssitz:

Für die in der Praxis häufigsten Welle-Nabe-Verbindungen sind die Kerbwirkungszahlen der Tabelle 1 zu entnehmen.

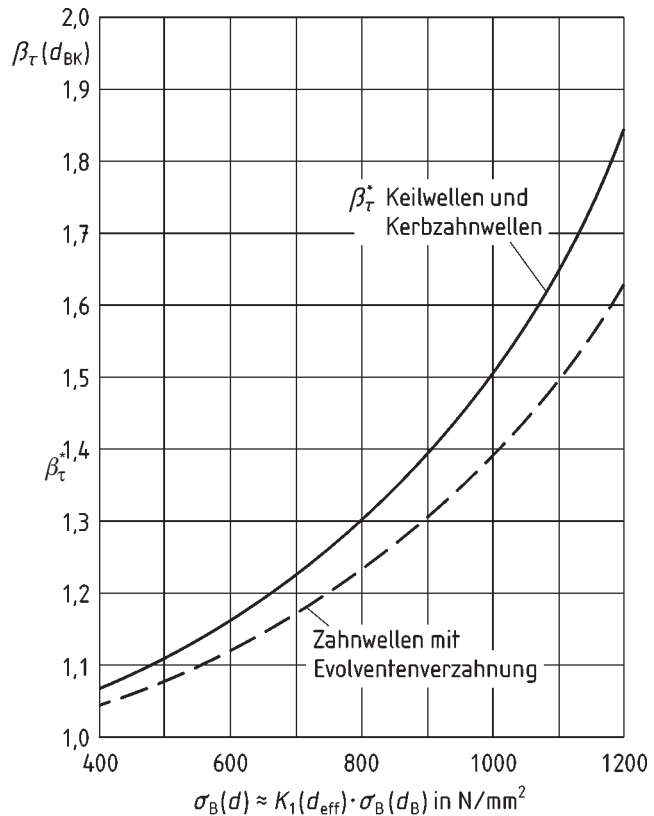
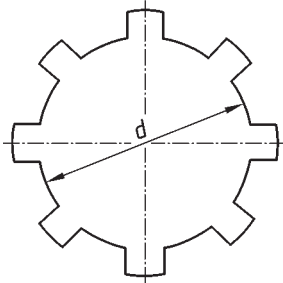
Tabelle 1: Kerbwirkungszahlen $\beta_{\sigma,\tau}(d_{BK})$ für Welle-Nabe-Verbindungen

Wellen- und Nabenform		$\sigma_B(d)$ in N/mm ²									
		400	500	600	700	800	900	1 000	1 100	1 200	
	$\beta_{\sigma}(d_{BK})$	2,1 ¹⁾	2,3 ¹⁾	2,5 ¹⁾	2,6 ¹⁾	2,8 ¹⁾	2,9 ¹⁾	3,0 ¹⁾	3,1 ¹⁾	3,2 ¹⁾	
	$\beta_{\sigma}(d_{BK}) \approx 3,0 \cdot (\sigma_B(d)/(1\,000\text{ N/mm}^2))^{0,38}$										
	$\beta_{\tau}(d_{BK})$	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,8	1,9	2,0	
	$\beta_{\tau}(d_{BK}) \approx 0,56 \cdot \beta_{\sigma}(d_{BK}) + 0,1$										
		Bei zwei Passfedern ist die Kerbwirkungszahl $\beta_{\sigma,\tau}$ mit dem Faktor 1,15 zu erhöhen (Minderung des Querschnittes): $\beta_{\sigma(2\text{ Passfedern})} = 1,15 \cdot \beta_{\sigma}$									
	$\beta_{\sigma}(d_{BK})$	1,8	2,0	2,2	2,3	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	
	$\beta_{\sigma}(d_{BK}) \approx 2,7 \cdot (\sigma_B(d)/(1\,000\text{ N/mm}^2))^{0,43}$										
	$\beta_{\tau}(d_{BK})$	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,8	1,9	
	$\beta_{\tau}(d_{BK}) \approx 0,65 \cdot \beta_{\sigma}(d_{BK})$										
	Hinsichtlich des minimalen Gesamtvolumens der Welle im Bereich der Welle-Nabe-Verbindung sind die Abmessungen für maximale Übertragbarkeit $d/d_1 \approx 1,1$ und $r/(d-d_1) \approx 2$ [10]. Der Presssitz beeinflusst die Kerbwirkung des Wellenübergangs nur wenig. Die Kerbwirkungszahl der Welle ist dann nach 4.3 zu bestimmen, wobei der Berechnung ein um etwa 10 % vergrößerter Wellenabsatz zugrunde zu legen ist.										
	ANMERKUNG: Bei ungünstiger Gestaltung kann es zur gegenseitigen Beeinflussung der Kerbwirkung im Wellenübergang (Radius r) und Nabensitz kommen. Dieses kann bei sehr kleinen Unterschieden zwischen d_1 und d und direkt am Nabensitz liegenden Wellenübergängen eintreten. Bei kleinen rechnerischen Sicherheiten und großer Bedeutung der Anlage ist die Haltbarkeit der Welle dann gesondert zu überprüfen (z. B. mittels FEM oder experimentell; siehe auch [7]).										
Zug: $\sigma_n = 4 \cdot F/(\pi \cdot d^2)$ Biegung: $\sigma_n = 32 \cdot M_b/(\pi \cdot d^3)$ Torsion: $\tau_n = 16 \cdot T/(\pi \cdot d^3)$ Bei Zug/Druck: gleiche Werte wie für Biegung		Bezugsdurchmesser $d = d_{BK} = 40\text{ mm}$ Einflussfaktor der Oberflächenrauheit: $K_{F\sigma} = 1$ oder $K_{F\tau} = 1$ Biege- oder Torsionsmoment wird auf die Nabe übertragen Die Kerbwirkungszahlen gelten für die Enden des Nabensitzes									
¹⁾ Die angegebenen β_{σ} -Werte gelten für $\tau_{tm}/\sigma_{ba} = 0,5$. Es sind Richtwerte. Abhängig von der Passung, der Wärmebehandlung (z. B. einsatzgehärtete Nabe) und den Abmessungen der Nabe können Abweichungen entstehen. Für $\tau_{tm}/\sigma_{ba} > 0,5$ sinken die Kerbwirkungszahlen. Bei reiner Umlaufbiegung sind dagegen Erhöhungen von β_{σ} um den Faktor 1,3 möglich. Weitere Angaben zu Kerbwirkungszahlen und Einflüssen siehe DIN 6892.											

Kerbwirkungszahlen für Keilwellen, Kerbzahnwellen und Zahnwellen:

Die Kerbwirkungszahlen für Keilwellen, Kerbzahnwellen und Zahnwellen bei Torsion und Biegung können näherungsweise aus Bild 1 abgelesen oder nach der in Bild 1 angegebenen Gleichung berechnet werden.

Kerbwirkungszahlen für Rundstäbe mit Spitzkerbe: Die Kerbwirkungszahlen für Rundstäbe mit umlaufender Spitzkerbe bei Zug/Druck, Biegung oder Torsion sind aus Bild 2 abzulesen oder nach der in Bild 2 angegebenen Gleichung zu berechnen.



Bezugsdurchmesser $d_{BK} = d = 29 \text{ mm}$

Nennspannungen für Vollwelle:

$$\text{Torsion: } \tau_n = \frac{16 \cdot T}{\pi \cdot d^3}; \quad \text{Biegung: } \sigma_n = \frac{32 \cdot M_b}{\pi \cdot d^3}$$

Kerbwirkungszahlen

$$\beta_\tau^*(d_{BK}) = \exp\left(4,2 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{\sigma_B(d)}{\text{N/mm}^2}\right)^2\right)$$

Torsion:

- Keilwellen und Kerbzahnwellen: $\beta_\tau(d_{BK}) = \beta_\tau^*(d_{BK})$
- Zahnwellen mit Evolventenverz.: $\beta_\tau(d_{BK}) = 1 + 0,75 (\beta_\tau^*(d_{BK}) - 1)$

Biegung:

- Keilwellen $\beta_\sigma(d_{BK}) = 1 + 0,45 \cdot (\beta_\tau^*(d_{BK}) - 1)$
- Kerbzahnwellen $\beta_\sigma(d_{BK}) = 1 + 0,65 \cdot (\beta_\tau^*(d_{BK}) - 1)$
- Zahnwellen mit Evolventenverz.: $\beta_\sigma(d_{BK}) = 1 + 0,49 \cdot (\beta_\tau^*(d_{BK}) - 1)$

Zug/Druck:

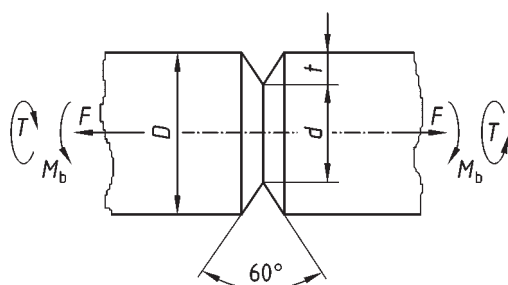
- Für Zug/Druck gelten näherungsweise dieselben Werte wie für Biegung

Einflussfaktor der Oberflächenrauheit: $K_{F\tau} = 1$ oder $K_{F\sigma} = 1$

Einsatzstähle einsatzgehärtet: $\beta_\tau(d_{BK}) = 1,0$; $\beta_\sigma(d_{BK}) = 1,0$; $K_V = 1$

ANMERKUNG: Die Kerbwirkungszahlen können bei relativ steifer Nabe und ungünstiger Gestaltung aufgrund der konzentrierten Lastenleitung am Übergang Welle-Nabe wesentlich größer sein. Die Werte gelten für die Welle ohne Nabeneinfluss.

Bild 1: Kerbwirkungszahlen für Keilwellen, Kerbzahnwellen und Zahnwellen



Bezugsdurchmesser: $d_{BK} = d = 15 \text{ mm}$

Zug/Druck: $\beta_{\sigma}(d_{BK}) = 0,109 \cdot \frac{\sigma_B(d)}{100 \text{ N/mm}^2} + 1,074$

Biegung: $\beta_{\sigma}(d_{BK}) = 0,0923 \cdot \frac{\sigma_B(d)}{100 \text{ N/mm}^2} + 0,985$

Zug/Druck: $\sigma_n = 4 \cdot F / (\pi \cdot d^2)$

Biegung: $\sigma_n = 32 \cdot M_b / (\pi \cdot d^3)$

Torsion: $\tau_n = 16 \cdot T / (\pi \cdot d^3)$

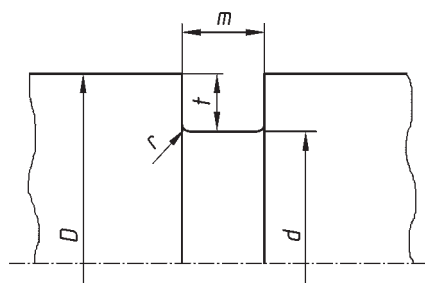
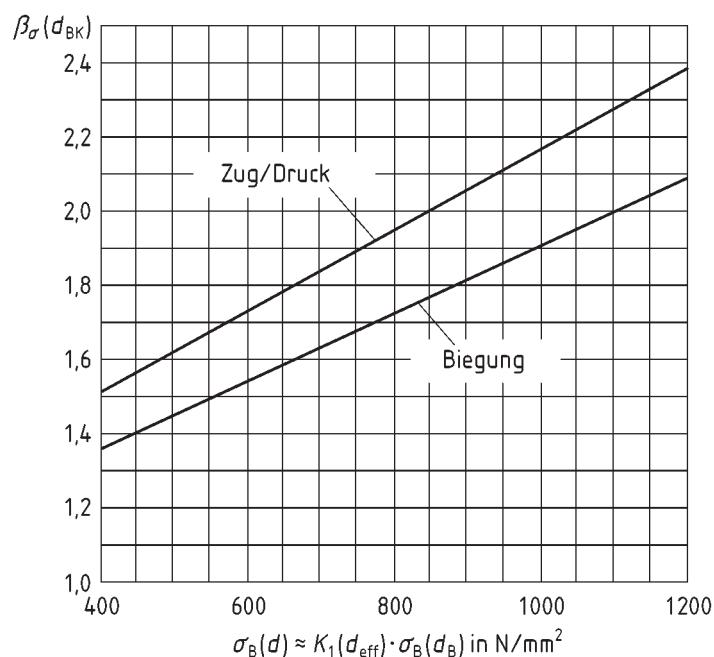
Radius im Kerbgrund: $r = 0,1 \text{ mm}$

Torsion: $\beta_{\tau}(d_{BK}) = 0,80 \cdot \beta_{\sigma \text{ Biegung}}(d_{BK})$

$t/d = 0,05$ bis $0,20$; für andere Werte weichen die Kerbwirkungszahlen von diesen Angaben ab

mittlere Rauheit der Kerbe: $R_{zB} = 20 \text{ }\mu\text{m}$

Bild 2: Kerbwirkungszahlen für Rundstäbe mit umlaufender Spitzkerbe [2]



Zug/Druck: $\sigma_n = 4 \cdot F / (\pi \cdot d^2)$

Biegung: $\sigma_n = 32 \cdot M_b / (\pi \cdot d^3)$

Torsion: $\tau_n = 16 \cdot T / (\pi \cdot d^3)$

Zug/Druck: $\beta_{\sigma}^* = 0,9 \cdot (1,27 + 1,17 \cdot \sqrt{t/r_f})$

Biegung: $\beta_{\sigma}^* = 0,9 \cdot (1,14 + 1,08 \cdot \sqrt{t/r_f})$

Torsion: $\beta_{\tau}^* = (1,48 + 0,45 \cdot \sqrt{t/r_f})$

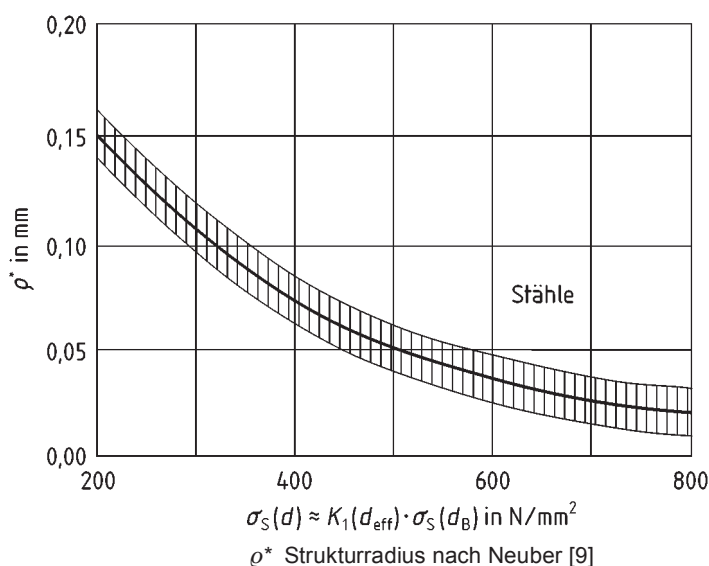
Zug/Druck, Biegung: $r_f = r + 2,9 \cdot \varrho^*$

Torsion: $r_f = r + \varrho^*$

$\varrho^* = 10^{-(0,514 + 0,00152 \cdot \sigma_S(d))}$ (Stähle)

$m/t \geq 1,4$: $\beta_{\sigma, \tau} = \beta_{\sigma, \tau}^*$

$m/t < 1,4$: $\beta_{\sigma, \tau} = \beta_{\sigma, \tau}^* \cdot 1,08 \cdot (m/t)^{-0,2}$



ANMERKUNG: Ergibt sich bei Zug/Druck oder Biegung $\beta_{\sigma} > 4$, ist mit $\beta_{\sigma} = 4$ zu rechnen. Ergibt sich bei Torsion $\beta_{\tau} > 2,5$, ist mit $\beta_{\tau} = 2,5$ zu rechnen.

Bild 3: Kerbwirkungszahlen für umlaufende Rechtecknut für Wellen nach DIN 471 [8]