

**Tragfähigkeitsberechnung von Zahn- und
Keilwellen-Verbindungen**

Teil 2: Zahnwellen-Verbindungen nach DIN 5480

DIN
5466-2

ICS 21.120.10

Einsprüche bis 2003-02-28

Entwurf

Splined joints — Calculation of load capacity — Part 2: Splined joints
according to DIN 5480

Calcul de la capacité des arbres cannelés — Partie 2: Cannelures à
flancs en développante selon DIN 5480

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

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

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise als Datei per e-Mail an nam@din.de in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter <http://www.din.de/stellungnahme> abgerufen werden;
- oder in Papierform an den Normenausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Postfach 71 08 64, 60498 Frankfurt/Main.

Beginn der Gültigkeit

Diese Norm gilt ab ... *)

*) Wird bei Herausgabe als Norm festgelegt.

Fortsetzung Seite 2 bis 43

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

Inhalt

	Seite
Vorwort	3
1 Anwendungsbereich	3
2 Normative Verweisungen	3
3 Zeichen, Benennungen und Einheiten	4
4 Allgemeine Betriebszustände	6
5 Berechnung der Betriebszustände	6
5.1 Reibungsverhältnisse auf den Flanken flankenzentrierter Verbindungen.....	6
5.2 Maximale Flankennormalkraft.....	6
6 Geometrieabhängige Größen zur Berechnung der Beanspruchungen	7
6.1 Allgemeines.....	7
6.2 Breitenfaktor zur Berechnung der maximalen Flankenpressung.....	8
6.3 Geometrieabhängige Größen zur Berechnung der Wellenbeanspruchung.....	11
6.4 Geometrieabhängige Größen zur Berechnung der Nabenbeanspruchung.....	24
7 Ermittlung der Dauerfestigkeit	29
7.1 Allgemeines.....	29
7.2 Verfahren A (Synthetische Bauteilwöhlerlinie).....	30
7.3 Verfahren B (Bauteilwöhlerlinie aus Probenwöhlerlinie).....	31
7.4 Verfahren C (Vorhandene Bauteilwöhlerlinie).....	31
8 Auslegung nach dem Verschleißkriterium	32
Anhang A (informativ) Festigkeitsnachweis einer Zahnwelle	33
A.1 Allgemeines.....	33
A.2 Ermittlung der statischen Vergleichsspanne.....	33
A.3 Abschätzung der Dauerfestigkeit.....	36
Literaturhinweise	43

Vorwort

Dieser Norm-Entwurf wurde vom Arbeitsausschuss 2.1 „Passverzahnungen“ des Fachbereiches Antriebstechnik im Normenausschuss Maschinenbau (NAM) erarbeitet.

DIN 5466 „Tragfähigkeitsberechnung von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen“ besteht aus:

- Teil 1: Grundlagen
- Teil 2: Zahnwellen-Verbindungen nach DIN 5480

1 Anwendungsbereich

Diese Norm dient in Kombination mit DIN 5466-1 zur Berechnung der Tragfähigkeit und des Verschleißverhaltens von Zahnwellen-Verbindungen mit Evolventenflanken nach DIN 5480. Während in DIN 5466-1 die grundlegenden, geometrieunabhängigen Gleichungen aufgeführt sind, werden in dieser Norm die geometriespezifischen Kenngrößen, wie z. B. Form- und Lastverteilungsfaktoren einer Zahnwellen-Verbindung mit Evolventenflanken nach DIN 5480 mit einem Eingriffswinkel von 30° berechnet.

Behandelt werden Spiel- und Übergangspassungen, wobei Wellen und Naben aus metallischen Werkstoffen ähnlichen Elastizitätsmoduls gefertigt sind.

Zweck dieser Norm ist die einheitliche Berechnung des Tragfähigkeits- und Verschleißverhaltens von Zahnwellen-Verbindungen. Diese Norm enthält Verfahren zur Abschätzung der wirksamen Lasten an den Flanken, der Flankenbeanspruchung, des Verschleißverhaltens sowie einen Ansatz zur Berechnung der Beanspruchungen im gekerbten Bereich (Zahnfußausrundung). Die Benutzung der Verfahren erfordert für jeden Anwendungsfall eine realistische Abschätzung aller Einflussfaktoren, insbesondere der zulässigen Beanspruchungen, des angemessenen Schadensrisikos und des entsprechenden Sicherheitsfaktors.

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 nur zu dieser Norm, falls sie durch Änderung oder Überarbeitung eingearbeitet sind. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe der in Bezug genommenen Publikation (einschließlich Änderungen).

DIN 5466-1:2000-10, *Tragfähigkeitsberechnung von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen – Teil 1: Grundlagen*.

DIN 5480, *Zahnwellen-Verbindungen mit Evolventenflanken*.

DIN EN 10002-1:2001-12, *Metallische Werkstoffe — Zugversuch — Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur; Deutsche Fassung EN 10002-1:2001*.

DIN EN 10002-5:1992-02, *Metallische Werkstoffe — Zugversuch — Teil 5: Prüfverfahren bei erhöhter Temperatur; Deutsche Fassung EN 10002-5:1991*.

DIN EN ISO 6506-1, *Metallische Werkstoffe — Härteprüfung nach Brinell — Teil 1: Prüfverfahren (ISO 6506-1:1999); Deutsche Fassung EN ISO 6506-1:1999*.

3 Zeichen, Benennungen und Einheiten

Allgemeine Indizes:

l	Welle	
2	Nabe	
$0,6$	für das Verhältnis Breite zu Bezugsdurchmesser (b/d_B) = 0,6	
a	Rand der Verbindung auf der Seite zur Welleneinspannung	
e	Rand der Verbindung auf der freien Seite der Welle	
u	ungestörter Bereich der Wellenverzahnung am Verzahnungsauslauf	
d	Druckseite	
z	Zugseite	
A_z	tragende Zahnquerschnittsfläche	mm ²
b	gemeinsame Zahnbreite	mm
b^*	Breitenkoordinate	mm
c_h	Geometriefaktor zur Berechnung des Ersatzdurchmessers d_h	
d	Teilkreisdurchmesser	mm
d_B	Bezugsdurchmesser	mm
d_D	Druckdurchmesser	mm
d_{e2min}	kleinster zulässiger Naben-Außendurchmesser für den Geltungsbereich	mm
d_f	Fußkreisdurchmesser	mm
d_h	Ersatzdurchmesser zur Berechnung des Torsions-Trägheitsmoments	mm
d_{i1max}	größter zulässiger Wellen-Innendurchmesser für den Geltungsbereich	mm
$d_{\omega 2}$	Innendurchmesser einer fliehkraftbeanspruchten Kreistringscheibe	mm
E	Elastizitätsmodul	N/mm ²
e_0	Mittenverlagerung der Achsen	mm
F_p	Teilungsgesamtabweichung	mm
f_G	Geometriefaktor	
G	Reibkraft-Aufteilungsfaktor	
H	ideeller Hebelarm	mm
H_{gr}	ideeller Grenz-Hebelarm	mm
h_w	wirksame Berührungshöhe der Flanken in radialer Richtung	mm

j	Drehflankenspiel, allgemein	mm
j_0	Anfangs-Drehflankenspiel	mm
j_{tm}	mittleres Drehflankenspiel	mm
j_{zul}	zulässiges Drehflankenspiel	mm
k_{ax}	Einflussfaktor für den Anteil der Axialkraft	
k_b	Breitenfaktor	
k_t	Einflussfaktor für den Anteil aus Torsion	
k_s	Einflussfaktor für den Anteil Zahnbiegung, Schub, Druck	
k_φ	Umfangsfaktor	
$k_{\varphi max}$	Oberer Grenzwert des Umfangsfaktors	
k_ω	Einflussfaktor für den Fliehkraftanteil	
L_1	verzahnter Überstand der Welle	mm
m	Modul	mm
N	Lastspielzahl	
N_{zul}	ertragbare Lastspielzahl	
p	Teilung	mm
$p(b^*)$	Flankenpressung an der Breitenkoordinate b^*	N/mm ²
p_{max}	maximale Flankenpressung der Verbindung	N/mm ²
Q	resultierende Querkraft	N
Q_{Bez}	bezogene Querkraft	N
r_w	Wirkradius	mm
s		Zahndicke
	mm	
T	Drehmoment	Nmm
T_{Bez}	bezogenes Drehmoment	Nmm
Y_a	Konstante für den Einfluss der Querkraft	
Y_b	Konstante für den Einfluss des Drehflankenspiels	
Y_c	Konstante für den Einfluss der Teilungsgesamtabweichung	
Y_d	Konstante für den Einfluss des Drehmoments	
Y_α	Korrekturfaktor Tragverhalten Zahn/Gegenzahn	
x	Profilverschiebungsfaktor, mit $x_1 = x_2$	

z	Zähnezahl, mit $z_1 = z_2$	—
α	Profilwinkel	°
α_{kax}	Formzahl für Axialspannung	—
α_{kb}	Formzahl für Biegung	—
α_{kk}	Formfaktor für den von d_{i1} bzw. d_{e2} unabhängigen Spannungsanteil	—
α_{kt}	Formzahl für Torsion	—
$\alpha_{k\varphi}$	Formfaktor für Tangentialspannung	—
$\alpha_{k\omega 2}$	Formzahl für Beanspruchung durch Fliehkraft	—
α_w	Wirkwinkel	°
μ	Haftreibungskoeffizient zwischen den Flanken	—
ρ	Fußrundungsradius	mm
ρ_{fp}	Mindest-Fußrundungsradius nach DIN 5480-1	mm

4 Allgemeine Betriebszustände

Die allgemeinen Betriebszustände von Zahnwellen-Verbindungen mit Evolventenflanken nach DIN 5480 sind DIN 5466-1 zu entnehmen.

5 Berechnung der Betriebszustände

5.1 Reibungsverhältnisse auf den Flanken flankenzentrierter Verbindungen

Zur Festlegung des gültigen Betriebsbereiches ist der ideelle Grenzhebelarm H_{gr} zu bestimmen. Für Zahnwellen-Verbindungen nach DIN 5480 mit einem Flankenwinkel $\alpha = 30^\circ$ und Zähnezahlen $z \geq 10$ gilt näherungsweise (siehe [1]):

$$f_G = 0,63 \quad \text{für } z \geq 10 \quad (1)$$

5.2 Maximale Flankennormalkraft

Durch das elastische Verhalten, das Spiel, die Belastungskombination und die Geometrieabweichungen der Verbindung sowie die Reibungsbedingungen entstehen unterschiedlich große Flankennormalkräfte über dem Verbindungsumfang. Zur Berechnung der maximalen Flankennormalkraft müssen die Kenngrößen Reibkraft-Aufteilungsfaktor G und Umfangsfaktor k_φ bestimmt werden:

— Reibkraft-Aufteilungsfaktor G

Der Reibkraft-Aufteilungsfaktor G beschreibt für den Betriebszustand I, welcher Anteil der Querkraft Q durch Reibungskräfte zwischen den Flanken übertragen wird. Für Zahnwellen-Verbindungen nach DIN 5480 gilt, siehe [1]:

$$G = 0,46 \cdot \mu \cdot \left(1 + 0,36 \cdot \frac{H}{r_w} \right) \quad (2)$$

— Umfangsfaktor k_φ

Der Umfangsfaktor k_φ beschreibt das Lastaufteilungsverhalten der Verbindung über dem Verbindungsumfang, siehe [2]. Die Lastaufteilung über dem Umfang wird beeinflusst durch Flankenspiel, Teilungs- und Zahndickenabweichungen, elastisches Nachgeben der Zähne unter Last sowie dem Flankenverschleiß.

$$k_\varphi = 1 + \left[\frac{Y_a \cdot Q}{Q_{Bez}} \cdot \left(1 + \frac{Y_b \cdot j_{tm}}{p} \right) \right] + \left(\frac{Y_c \cdot F_p}{p} \cdot \frac{1}{1 + \frac{Y_d \cdot T}{T_{Bez}}} \right) \text{ und } k_{\varphi \max} = z/2 \quad (3)$$

mit den Konstanten $Y_a = 0,8 \quad Y_b = 50 \quad Y_c = 2\,200 \quad Y_d = 7\,500$ (4)

bezogene Querkraft $Q_{Bez} = T / r_w$ (5)

bezogenes Drehmoment $T_{Bez} = E \cdot z \cdot h_w \cdot b \cdot r_w$ (6)

Ersatzelastizitätsmodul $E = (2 \cdot E_1 \cdot E_2) / (E_1 + E_2)$ (7)

Die angegebenen Werte der Konstanten Y_a bis Y_d wurden an neuwertigen Verbindungen mit glatten Flankenoberflächen ermittelt. Durch Einlaufvorgänge (wie z. B. Setzen, Glätten der Oberflächenrauigkeiten) kann sich eine günstigere Lastverteilung einstellen, als mit Gleichung (3) berechnet. Für Zahnflanken mit nicht glatten Oberflächen können größere Werte für Y_d eingesetzt werden ($7500 < Y_d < 11000$).

Mit dem Elastizitätsmodul wird die Fähigkeit der Verbindungswerkstoffe zum Ausgleich von Teilungsabweichungen berücksichtigt. Durch elastisches Nachgeben der Zähne bzw. Zahnflanken können die Auswirkungen von Teilungs- und Richtungsabweichungen auf die Lastverteilung reduziert werden. Dieser Ausgleichsvorgang ist ebenso im plastischen Bereich möglich. Die rechnerische Entscheidung, in welchem Bereich die Beanspruchungen liegen, kann anhand der Zahnfuß-Vergleichsspannung bzw. der maximalen Flankenpressung getroffen werden. Eine vollständige Durchplastifizierung im Zahnfuß sollte als Grenzwert vermieden werden. Bei der iterativen Berechnung des bezogenen Drehmomentes wird für den Fall plastischer Verformung statt des Elastizitätsmoduls die Steigung der Spannungs-Dehnungs-Kennlinie eingesetzt (im elastischen Bereich entspricht die Steigung dem Elastizitätsmodul). Die Bestimmung eines Ersatzelastizitätsmoduls für die Kontaktpaarung Welle/Nabe bleibt grundsätzlich erhalten, muss aber dann auch mit den entsprechenden Steigungswerten erfolgen.

6 Geometrieabhängige Größen zur Berechnung der Beanspruchungen

6.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt werden die zur Ermittlung der Beanspruchungen benötigten geometrieabhängigen Kenngrößen für Zahnwellen-Verbindungen nach DIN 5480 berechnet.

6.2 Breitenfaktor zur Berechnung der maximalen Flankenpressung

Die maximale Flankenpressung p_{max} einer Zahnwellen-Verbindung wird berechnet aus der maximalen Pressung der Verbindungsscheibe und dem Breitenfaktor k_b . Der Breitenfaktor k_b wird zur Zeit bei Zahnwellen-Verbindungen nach DIN 5480 aus der Nachgiebigkeit der Verbindung unter Drehmoment-Belastung bestimmt. Die Einflüsse aus Querkraft, Biegung und axialen Flankenabweichungen werden nicht berücksichtigt.

Bei Variation der gemeinsamen Zahnbreite b kann unter gleichbleibender Drehmoment-Beanspruchung T der in Bild 1 dargestellte Zusammenhang zwischen Zahnbreite b und maximaler Flankenpressung festgestellt werden. Durch Vergrößern der gemeinsamen Zahnbreite lässt sich die maximale Flankenpressung bei gleichbleibendem Drehmoment praktisch nur bis zu einer Breite b senken, die etwa dem halben Bezugsdurchmesser d_B entspricht, siehe [3]. Bei der Berechnung wird ab einem Verhältnis $(b/d_B) \geq 0,6$ von einer konstanten maximalen Pressung p_{max} ausgegangen.

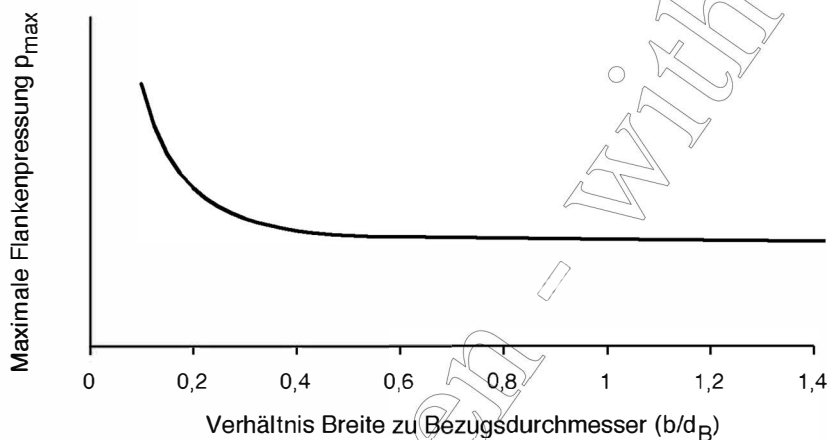


Bild 1 — Qualitative Abhängigkeit der maximalen Flankenpressung vom Verhältnis (b/d_B) unter gleichbleibender Drehmoment-Belastung

Bild 2 zeigt die prinzipielle Abhängigkeit des Breitenfaktors vom Verhältnis Breite zu Bezugsdurchmesser.

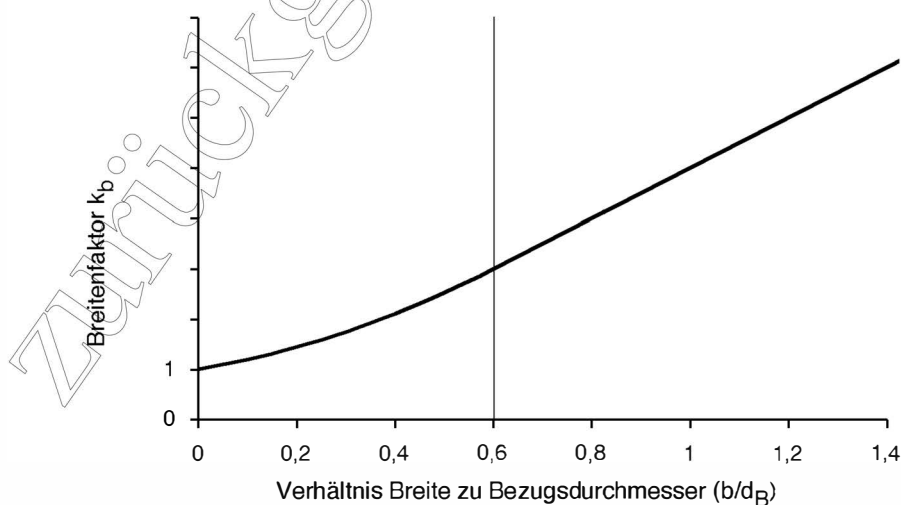


Bild 2 — Qualitative Abhängigkeit des Breitenfaktors vom Verhältnis (b/d_B)

Die Abhängigkeit des Breitenfaktors vom Verhältnis Breite zu Bezugsdurchmesser kann durch folgende Gleichungen beschrieben werden:

$$k_b = 1 + \left[\frac{1}{0,6} \cdot k_{b0,6} - \frac{2}{0,6} \right] \cdot \left(\frac{b}{d_B} \right) + \left[\frac{1}{0,6} \cdot \left(\frac{b}{d_b} \right) \right]^2 \quad (8)$$

$$k_b = \frac{1}{0,6} \cdot k_{b0,6} \cdot \left(\frac{b}{d_B} \right) \quad (9)$$

Der Zahlenwert $k_{b0,6}$ kennzeichnet den Breitenfaktor für das Verhältnis Breite zu Bezugsdurchmesser $(b/d_B) = 0,6$. Er ist abhängig von der Steifigkeit der Verbindung, die vor allem durch die Wellen- und Nabenwanddicke, die Nabeneinspannung und die Zahnform bestimmt wird. Der Einfluss der Zahnform auf die Steifigkeit der Verbindung wird bei der Berechnung des Breitenfaktors $k_{b0,6}$ durch die Zähnezah z und den Profilverschiebungsfaktor x berücksichtigt.

Die Wanddicke der Welle hat nur untergeordneten Einfluss auf den Breitenfaktor [4].

Die grundsätzliche Abhängigkeit von der Nabeneinspannung und vom Nabenaußendurchmesser wird am Beispiel einer Zahnwellen-Verbindung DIN 5480 – 60x3x30x18 mit einer gemeinsamen Zahnbreite von $b = 30 \text{ mm}$ in den Bildern 3 und 4 dargestellt. Die Breitenkoordinate $b^* = 0 \text{ mm}$ kennzeichnet den Verbindungsanfang und $b^* = 30 \text{ mm}$ das Verbindungsende.

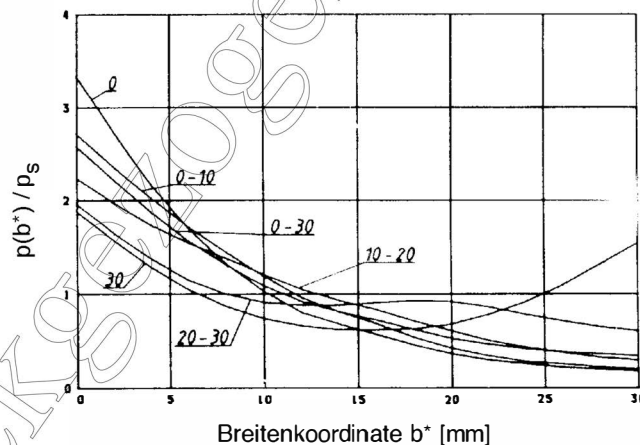


Bild 3 — Lastverteilung über der Verbindungsbreite in Abhängigkeit von der Nabeneinspannung ab einer Zahnwellen-Verbindung DIN 5480 – 60x3x30x18 mit dem Verhältnis Nabenaußendurchmesser zu Bezugsdurchmesser $d_{e2}/d_B=1,5$ [3]

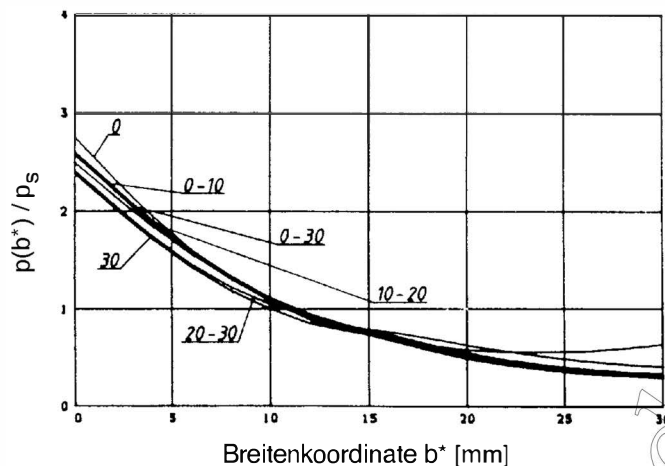


Bild 4 — Lastverteilung über der Verbindungsbreite in Abhängigkeit von der Nabeneinspannung ab einer Zahnwellen-Verbindung DIN 5480 – 60x3x30x18 mit dem Verhältnis Nabenaußendurchmesser zu Bezugsdurchmesser $d_{e2}/d_B=1,5$ [3]

Die maximale Flankenpressung entsteht bei praktisch anwendbaren Verhältnissen d_{e2}/d_B und zylindrischen Naben unabhängig von der Nabeneinspannung und dem Nabenaußendurchmesser grundsätzlich am Anfang der drehmomentbelasteten Verbindung ($b^* = 0 \text{ mm}$). Ab einem Verhältnis Nabenaußen/Bezugsdurchmesser $d_{e2}/d_B \geq 1,5$ hat die Nabeneinspannung und der Nabenaußendurchmesser nur noch untergeordneten Einfluss auf die maximale Flankenpressung und damit auf den Breitenfaktor k_b . Um einen von der Nabeneinspannung und dem Nabenaußendurchmesser unabhängigen Berechnungsansatz zu ermöglichen, kann der Breitenfaktor zur Zeit nur für Verhältnisse $d_{e2}/d_B \geq 1,5$ angegeben werden.

$$\text{Geltungsbereich der Abschätzung: } d_{e2}/d_B \geq 1,5 \quad (10)$$

Der Verlauf des Breitenfaktors $k_{b0,6}$ für $d_{e2}/d_B \geq 1,5$ in Abhängigkeit von der Zähnezahl z und dem Profilverschiebungsfaktor x ist in Bild 5 dargestellt. Die rechnerische Abschätzung des Breitenfaktors für das Verhältnis $(b/d_B) = 0,6$ erfolgt mit:

$$k_{b0,6} = 20,4 \cdot \left[1 - e^{\left(\frac{z+95}{34,8+16 \cdot x} \right)} \right] - 16 \quad (11)$$

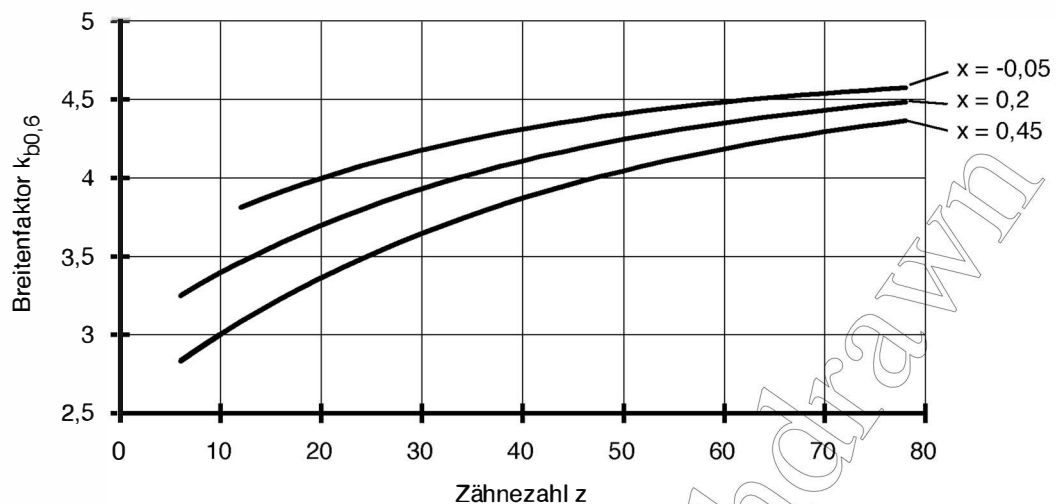


Bild 5 — Breitenfaktor für das Verhältnis Breite zu Bezugsdurchmesser ($b/d_B = 0,6$) [4]

Bei Naben mit kleinerem Außendurchmesser ist die Lastüberhöhung am Verbindungsanfang (Breitenfaktor) abhängig von der Einleitungsstelle (siehe Bild 3). Eine Drehmomenteinleitung am Verbindungsende ist wegen der dadurch erreichbaren Vergleichmäßigung der Pressungsverteilung zu bevorzugen.

Der angegebene Breitenfaktor wurde für neuwertige Verbindungen ermittelt. Da sich die maximale Flankenpressung nur auf einen lokal eng begrenzten Bereich am Verbindungsanfang (siehe Bild 4) beschränkt, kann durch Verschleiß der Wert des Breitenfaktors im Betrieb reduziert werden.

6.3 Geometrieabhängige Größen zur Berechnung der Wellenbeanspruchung

6.3.1 Kenngrößen zur Berechnung der Torsionsbeanspruchung

Der zur Berechnung des Ersatzdurchmessers d_{hl} benötigte Geometriefaktor c_{hl} ist abhängig von der Zähnezahl z und vom Fußaustrundungsverhältnis (ρ_1/m). Der Einfluss der Profilverschiebung kann vernachlässigt werden. Der Geometriefaktor kann bestimmt werden mit:

$$c_{hl} = 1,3 \cdot z^{(-1,2)} + 0,06 \cdot (\rho_1/m) + 0,23 \quad (12)$$

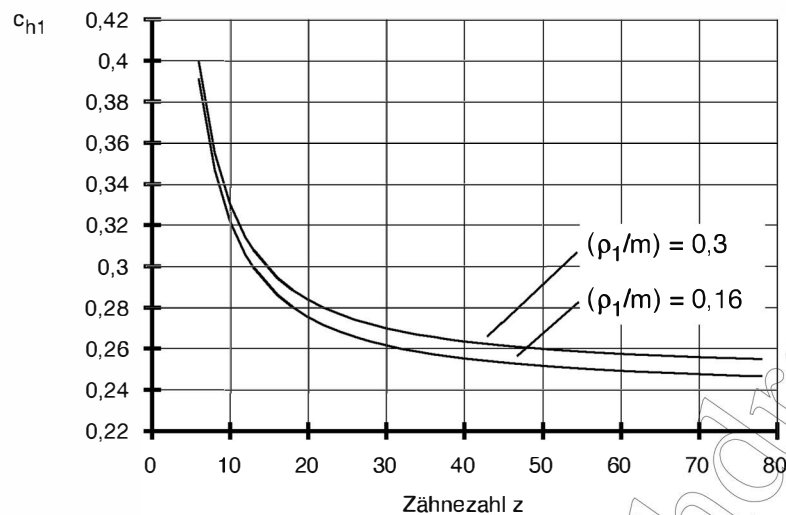


Bild 6 — Geometriefaktor als Funktion der Zähnezahlszahl und des Fußausrundungsverhältnisses [4]

Zur Berechnung der maximalen Torsionsspannung im Bereich der Fußausrundung einer verzahnten Welle wird die Formzahl für Torsion α_{kt1} benötigt. Die Torsions-Formzahl α_{kt1} ist abhängig von der Zähnezahlszahl z und vom Fußausrundungsverhältnis (ρ_1/m) . Der Einfluss der Profilverschiebung kann vernachlässigt werden. Die Abhängigkeit der Torsions-Formzahl von der Zähnezahlszahl und dem Fußausrundungsverhältnis zeigt Bild 7, die Näherungsgleichung zur Berechnung der Formzahl gibt Gleichung (13) an.

$$\alpha_{kt1} = 1,39 \cdot (\rho_1 / m)^{(-0,22)} + 0,08 - 0,03 \cdot e^{(1-z/8)} \quad (13)$$

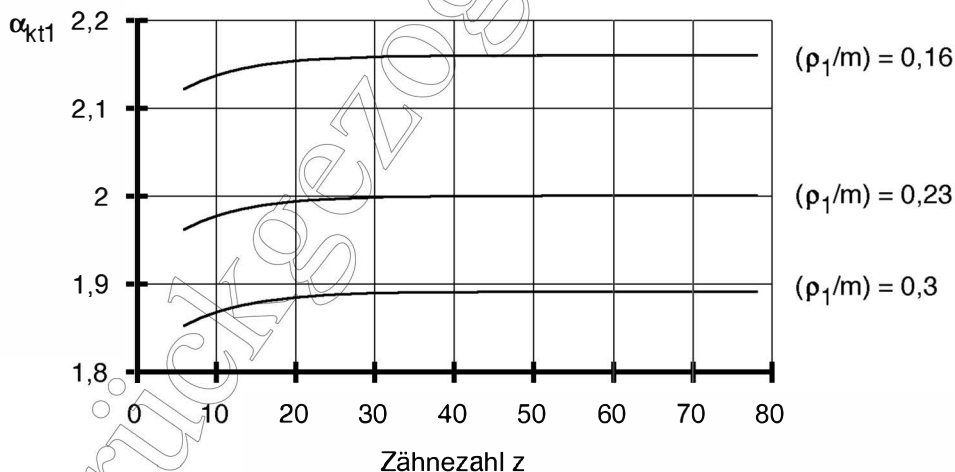


Bild 7 — Torsions-Formzahl als Funktion der Zähnezahlszahl und des Fußausrundungsverhältnisses [4]

Die Berechnung gekerbter Hohlwellen ist bis zu einem größten zulässigen Innendurchmesser d_{i1max} gültig. Bild 8 zeigt die Abhängigkeiten von d_{i1max} , bezogen auf den Modul. Der größte zulässige Innendurchmesser d_{i1max} kann näherungsweise berechnet werden mit:

$$d_{i1max} = m \cdot (0,7 \cdot z^{1,07} - 2,7 + 2 \cdot x) \quad (14)$$

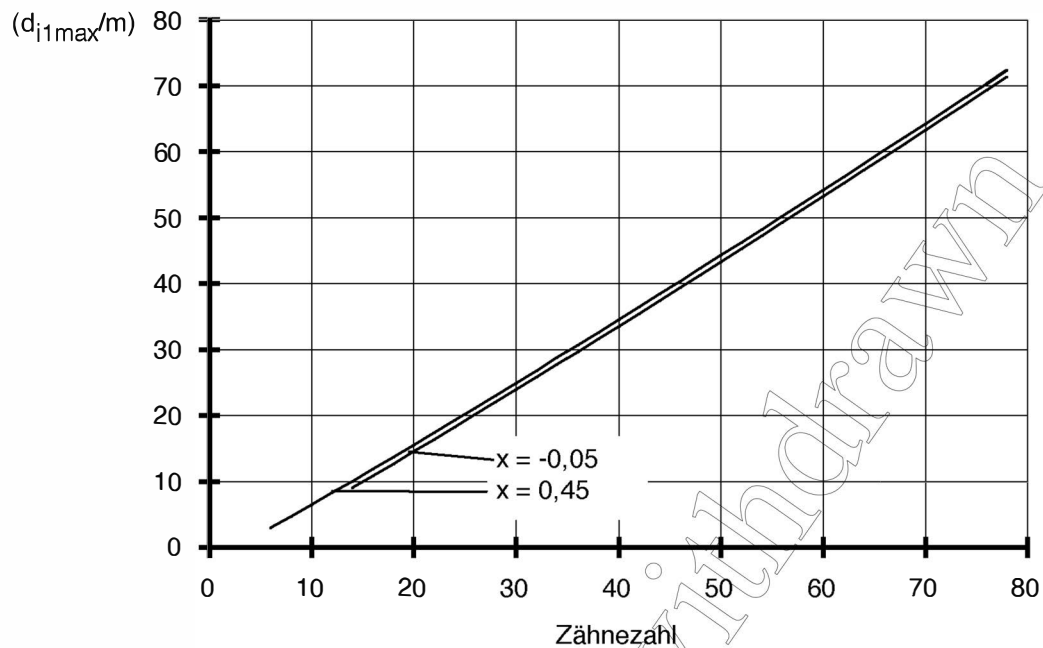


Bild 8 — Abhängigkeit des Verhältnisses d_{i1max}/m von Zähnezahl und Profilverschiebungsfaktor [4]

6.2.2 Kenngrößen

Die Spannungen in der Zahnfußausrundung werden durch das Tragverhalten beeinflusst, das von der tatsächlichen Berührfläche Zahn/Gegenzahn abhängt. Der Spannungskorrekturfaktor $Y_{\alpha I}$ berücksichtigt das Tragverhalten über der Flankenhöhe je nach Tragart. Bild 9 zeigt die prinzipielle Abhängigkeit der Spannungen (Vergleichsspannung) über der Zahnrandkontur bei unterschiedlichen Tragarten am Beispiel einer Zahnwellen-Verbindung DIN 5480 – 45x2x30x21.