

# Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern

Anwendungsnorm für Schiffsgetriebe

DIN

3990

Teil 31

Calculation of load capacity of cylindrical gears; application standard for marine gears

Zusammenhang mit den in Vorbereitung befindlichen Internationalen Norm-Entwürfen der ISO über die Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern siehe Erläuterungen.

Kursiv gedruckte Textteile sind Angaben, die zur unmittelbaren Berechnung nicht erforderlich sind, wohl aber zur Kenntnis des Zusammenhanges dieser Norm mit anderen Normen. Außerdem erleichtern sie das Verständnis der einzelnen Berechnungsschritte.

Die vorliegende Norm ist von den Grundregeln nach DIN 3990 Teil 1 bis Teil 3 abgeleitet, die auch für diese Norm gelten. Sie enthält eindeutige Berechnungshinweise. Wegen des begrenzten Anwendungsbereiches entfallen einige Berechnungsanteile und werden für einige Faktoren vereinfachte Berechnungsansätze oder Konstante verwendet. Dadurch ergibt sich eine einfachere Berechnung. Die Annahmen, die den hier verwendeten Verfahren zugrunde liegen, sind in DIN 3990 Teil 1 bis Teil 3 beschrieben.

Die Werkstoffqualitäten und Dauerfestigkeitswerte in DIN 3990 Teil 5 gelten auch für diese Norm.

Will man genauere Berechnungsansätze verwenden oder wird der Anwendungsbereich nach Abschnitt 1 in einem oder mehreren Punkten überschritten, so ist nach DIN 3990 Teil 1 bis Teil 3 oder nach der entsprechenden Anwendungsnorm zu verfahren.

Liegen für einzelne Einflußgrößen abgesicherte Erfahrungen oder Versuchsergebnisse vor, so kann man die hieraus abgeleiteten Faktoren anstelle der Faktoren dieser Norm verwenden. Dabei gelten die in DIN 3990 Teil 1, Ausgabe Dezember 1987, Abschnitt 1.3, für Methode A angegebenen Kriterien. Abweichungen von den Regeln dieser Norm müssen bei der Angabe des Berechnungsergebnisses vermerkt werden. Im übrigen muß man die Tragfähigkeitsberechnung genau nach dieser Norm durchführen, wenn Spannungen, Sicherheiten oder übertragbare Leistungen nach „DIN 3990 Teil 31“ angegeben werden.

Die Vereinbarungen zwischen Hersteller und Betreiber müssen die Bestimmungen der in Frage kommenden Klassifikationsgesellschaft berücksichtigen und sollen Angaben über die Schmierung (vergleiche Abschnitt 1.3), den Sicherheitsfaktor und von außen in das Getriebe eingeleitete Schwingungskräfte (vergleiche Abschnitt 3.2) enthalten.

Die Gleichungen nach dieser Norm sind zum Teil Zahlenwertgleichungen. Deshalb sind grundsätzlich die in Abschnitt 2 angegebenen Einheiten zu verwenden.

Um die Anwendung dieser Norm zu erleichtern, sind zusätzliche Informationen in den Anhängen A bis D zusammengefaßt.

## Inhalt

	Seite		Seite
<b>1 Anwendungsbereich und Zweck</b> .....	2	4.8 Faktoren für die Schmierfilmbildung $Z_L, Z_V, Z_R$ ...	9
1.1 Tragfähigkeitsgrenzen .....	2	4.9 Werkstoffpaarungsfaktor $Z_W$ .....	10
1.2 Getriebe und Verzahnungen .....	2	4.10 Größenfaktor (Flanke) $Z_X$ .....	10
1.3 Konstruktion .....	2	4.11 Mindest-Grübchensicherheit $S_{Hmin}$ .....	10
1.4 Sicherheitsfaktoren .....	2	<b>5 Berechnung der Zahnfußtragfähigkeit</b> .....	10
1.5 Eingangsgrößen .....	2	5.1 Grundgleichungen .....	10
<b>2 Zeichen, Benennungen und Einheiten</b> .....	3	5.2 Formfaktor $Y_F$ für Außenverzahnung .....	11
<b>3 Allgemeine Einflußfaktoren</b> .....	4	5.3 Spannungskorrekturfaktor $Y_S$ .....	12
3.1 Reihenfolge der Kraftfaktoren .....	4	5.4 Schrägenfaktor (Zahnfuß) $Y_\beta$ .....	12
3.2 Umfangskraft, Drehmoment, Leistung .....	4	5.5 Zahnfuß-Grundfestigkeit $\sigma_{FE}$ .....	12
3.3 Dynamikfaktor $K_v$ .....	5	5.6 Relative Stützziffer $Y_{\delta rel T}$ für die Dauerfestigkeit	12
3.4 Breitenfaktoren $K_{H\beta}, K_{F\beta}$ .....	7	5.7 Relativer Oberflächenfaktor (Zahnfuß) $Y_{R rel T}$ für die Dauerfestigkeit .....	12
3.5 Stirnfaktoren $K_{H\alpha}, K_{F\alpha}$ .....	8	5.8 Größenfaktor (Zahnfuß) $Y_X$ .....	13
<b>4 Berechnung der Grübchentragfähigkeit</b> .....	8	5.9 Mindest-Zahnbruchsicherheit $S_{Fmin}$ .....	13
4.1 Grundgleichungen .....	8	<b>Anhang A</b> Anhaltswerte für den	
4.2 Einzeleingriffsfaktoren $Z_B$ und $Z_D$ .....	9	Anwendungsfaktor $K_A$ .....	13
4.3 Zonenfaktor $Z_H$ .....	9	<b>Anhang B</b> Zahnfedersteifigkeiten .....	14
4.4 Elastizitätsfaktor $Z_E$ .....	9	<b>Anhang C</b> Besonderheiten der Tragfähigkeitsberechnung für einfache Planetengetriebe	16
4.5 Überdeckungsfaktor (Flanke) $Z_e$ .....	9	<b>Anhang D</b> Tragbildkontrolle (Eingriffsgenauigkeit) ..	18
4.6 Schrägenfaktor (Flanke) $Z_\beta$ .....	9		
4.7 Dauerfestigkeit für Flankenpressung $\sigma_{Hlim}$ .....	9		

Fortsetzung Seite 2 bis 20

Normenausschuß Antriebstechnik (NAN) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

Jede Art der Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, gestattet.

## 1 Anwendungsbereich und Zweck

### 1.1 Tragfähigkeitsgrenzen

Die vorliegende Norm enthält Verfahren zur Berechnung der Grübchen- und der Zahnfußtragfähigkeit (Dauerfestigkeit) für Getriebe in Haupt- und Nebenantrieben von Schiffen und Bohrplattformen, die von Klassifikationsgesellschaften überprüft werden.

Wenn während des Betriebes kurzzeitig starke Stöße auftreten, muß man hierfür die Grübchen- und Zahnfußsicherheit gegen statische oder Zeitfestigkeit überprüfen, siehe DIN 3990 Teil 2 und Teil 3.

### 1.2 Getriebe und Verzahnungen

#### a) Getriebearten

Die vorliegende Norm gilt für Außen-Stirnräder mit Evolventenverzahnung. Bei Doppelschrägverzahnung wird angenommen, daß sich die Gesamt-Umfangskraft gleichmäßig auf beide Schrägen aufteilt. Trifft dies – z. B. infolge von außen eingeleiteten Axialkräften – nicht zu, so ist dies zu berücksichtigen. Beide Schrägen werden wie zwei parallel angeordnete Schrägstirnräder behandelt.

Die Norm darf auch für Innenverzahnung angewendet werden; dann gelten die entsprechenden Regeln der Normen DIN 3990 Teil 1 bis Teil 3. Besonderheiten der Planetengetriebe siehe Anhang C.

#### b) Überdeckung

Profilüberdeckung  $1,2 < \varepsilon_{\alpha n} < 2,5$   
In Ausnahmefällen kann  $\varepsilon_{\alpha n}$  den Wert 1,0 erreichen.

#### c) Bereich des Schrägungswinkels

Schrägungswinkel  $\beta \leq 45^\circ$  (betrifft  $K_v$ ,  $K_{H\beta}$  wegen  $c_v$ ; vergleiche Anhang B).

#### d) Bezugsprofile

Für Bezugsprofile keine Einschränkung, siehe jedoch Aufzählung b).

#### e) Korrekturen

Die vorliegende Norm gilt für Verzahnungen mit oder ohne Profil- und Flankenlinienkorrekturen.

### 1.3 Konstruktion

Die vorliegende Norm gilt unter der Voraussetzung, daß Radkörper, Wellen-Naben-Verbindungen, Wellen, Lager, Gehäuse, Verschraubungen, Fundamente, Anschlußkuppelungen bezüglich Genauigkeit, Tragfähigkeit und Steifigkeit den Anforderungen entsprechen, die für die Tragfähigkeitsberechnung der Zahnräder zugrunde gelegt sind.

Die vorliegende Norm gilt für Radpaare, bei denen die Gesamt-Umfangskraft durch einen Zahneingriff übertragen wird. Einfache Planetengetriebe (Getriebe mit Leistungsverzweigung) siehe Anhang C. Vergleiche auch Fußnote 4.

#### a) Lagerung

Jedes Zahnrad ist mittig zwischen seinen Lagern angeordnet (betrifft  $K_{H\beta}$ ,  $K_{F\beta}$ ). Trifft dies nicht zu, dann ist die zusätzliche Biegeverformung beim Ansatz von  $f_{ma}$  zu berücksichtigen.

#### b) Ritzelwelle

Vollwelle oder Hohlwelle mit  $d_{sh}/d_{sh} < 0,5$  (betrifft  $K_{H\beta}$ ).

#### c) Zahnradwerkstoffe

Die vorliegende Norm gilt für: Stahlwerkstoffe (betrifft  $Z_E$ ,  $c'$ ,  $c_v$ ,  $Z_w$ ,  $K_v$ ,  $K_{H\beta}$ ); Vergütungsstahl (vergütet), Einsatzstahl (einsatzgehärtet), Nitrierstahl oder Vergütungsstahl (nitriert), Vergütungsstahl oder Einsatzstahl (nitrokarburiert) (betrifft  $\gamma_\alpha$ ,  $\gamma_\beta$ ,  $\alpha_\beta$ ,  $Z_L$ ,  $Z_X$ ,  $\sigma_{H\lim}$ ,

$\sigma_{FE}$ ,  $Y_X$ ). Im Falle anderer Werkstoffe siehe DIN 3990 Teil 1 bis Teil 5.

#### d) Schmierung

Die vorliegende Norm gilt für Getriebe mit Öleinspritzschmierung oder Tauchschmierung. Der Schmierstoff wird vom Getriebehersteller angegeben oder mit diesem vereinbart. Das Norm-Berechnungsverfahren basiert auf der Voraussetzung, daß im Zahneingriff zu jeder Zeit des Betriebes Schmierstoff in ausreichender Menge und in der angegebenen oder vereinbarten Qualität (Viskosität, Sauberkeit, Freßkraftstufe) zur Verfügung steht. Die Kühlung muß so intensiv sein, daß die der Berechnung zugrunde gelegte Temperatur nicht überschritten wird (betrifft Einfluß der Schmierfilmbildung  $Z_L$ ,  $Z_v$ ,  $Z_R$ ).

Fettschmierung für langsamlaufende Hilfsgetriebe ist nicht ausgeschlossen, sofern im Zahneingriff zu jeder Zeit Schmierstoff in ausreichender Menge vorhanden ist.

Hinweis zur Wahl von Schmierstoffen und Schmierstoffversorgung siehe [1], [2], [3].

### 1.4 Sicherheitsfaktoren

Beim Ansatz der Sicherheitsfaktoren nach Abschnitt 4.1.3 und Abschnitt 5.1.3 ist zu beachten, daß die Festigkeitswerte nach DIN 3990 Teil 5 bis 1% Schadenswahrscheinlichkeit gelten.

Die in Abschnitt 4.11 und Abschnitt 5.9 angegebenen Mindestwerte sind nur ausreichend, wenn alle Einflußgrößen für die Berechnung sicher bekannt sind und im Betrieb eingehalten werden, zum Beispiel Belastung, Werkstoffqualität, Fertigungsqualität, Montagegenauigkeit, Aufstellung, Anschlüsse an Antriebs- und Arbeitsmaschine, Schmierung, Wartung, Sicherheits- und Kontrolleinrichtungen.

Höhere Sicherheitsfaktoren sind erforderlich, wenn diese Einflußgrößen nicht sicher bekannt sind, ferner in kritischen Anwendungsfällen, d. h. insbesondere bei hohem Schadensrisiko (zum Beispiel wenn ein Schaden Menschenleben gefährden oder langdauernden Stillstand von Anlagen verursachen würde). Zahnbruch bedingt oft ein größeres Schadensrisiko als Grübchen. Deshalb ist  $S_F$  im allgemeinen größer zu wählen als  $S_H$ . Es wird empfohlen, den Sicherheitsfaktor zwischen Anwender und Hersteller zu vereinbaren.

### 1.5 Eingangsgrößen

Für die Nachrechnung müssen mindestens folgende Eingangsgrößen bekannt sein oder berechnet werden:

Zahnradaten:  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $m_n$ ,  $a$ ,  $b$ , ( $b_B$ ,  $B$ ),  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $\beta$ ,  $d_{a1}$ ,  $d_{a2}^{1)}$ , ( $\varepsilon_\alpha$ ,  $\varepsilon_\beta$ ); Bezugsprofil der Verzahnung.

Geometriedaten: siehe DIN 3960.

Daten für Konstruktion und Herstellung: Werkstoff, Härte, Wärmebehandlung, Kugelstrahlen, Radkörpermaße (Massenträgheitsmoment von Ritzel und Rad), Verzahnungsqualität, Oberflächenrauheit, Flankenlinienkorrektur (Breitenballigkeit, Endrücknahme); Profilkorrektur (Kopfrücknahme); Schmierstoff.

Lage der Zahnräder zu den Lagern, Durchmesser  $d_{sh}$  der Ritzelwelle.

Leistungsdaten:  $P$  bzw.  $T$  bzw.  $F_t$ ,  $n_1$ ,  $v$ ; An- und Abtriebsmaschine, möglichst Lastkollektiv.

<sup>1)</sup> Bei Verzahnungen ohne Kopfkantenbruch; andernfalls ist anstelle von  $d_a$  der Kopf-Nutkreisdurchmesser  $d_{Na}$  einzusetzen.

## 2 Zeichen, Benennungen und Einheiten

Gesamtübersicht siehe DIN 3990 Teil 1.

$a$	Achsabstand <sup>2)</sup>	mm	$v_p$	Geschwindigkeitsparameter	—
$b$	Zahnbreite (bei Doppelschrägverzahnung = $2 b_B$ ) <sup>3)</sup>	mm	$x_1, x_2$	Profilverschiebungsfaktor des Ritzels, Rades	—
$b_B$	Zahnbreite einer Pfeilhälfte <sup>3)</sup>	mm	$y_\alpha$	Einlaufbetrag (Teilungsabweichung)	$\mu\text{m}$
$b_S$	Stegbreite	mm	$y_\beta$	Einlaufbetrag (Flankenlinienabweichung)	$\mu\text{m}$
$c_Y$	Mittlere Gesamt-Zahnfedersteifigkeit je Einheit Zahnbreite (kurz: Eingriffsfedersteifigkeit)	$\text{N}/(\text{mm} \cdot \mu\text{m})$	$z_n$	Ersatzzähnezahl einer Schrägverzahnung	—
$c'$	Größtwert der Einzel-Zahnfedersteifigkeit (eines Zahnpaars) je Einheit Zahnbreite (kurz: Einzelfedersteifigkeit)	$\text{N}/(\text{mm} \cdot \mu\text{m})$	$z_1, z_2$	Zähnezahl des Ritzels, Rades <sup>2)</sup>	—
$d_{a1,2}$	Kopfkreisradius von Ritzel, Rad	mm	$B$	Gesamtbreite bei Doppelschrägverzahnung (= $b + \text{Spaltbreite}$ )	mm
$d_{b1,2}$	Grundkreisradius von Ritzel, Rad (= $2 \cdot r_{b1,2}$ )	mm	$B_f$	Faktor für Profil-Formabweichung	—
$d_{f1,2}$	Fußkreisradius von Ritzel, Rad	mm	$B_k$	Faktor für Profilkorrektur	—
$d_{i1,2}$	Zahnkranz-Innendurchmesser von Ritzel, Rad	mm	$B_p$	Faktor für Eingriffsteilungsabweichung	—
$d_{sh}$	Wellendurchmesser	mm	$C_a$	Kopfrücknahme	$\mu\text{m}$
$d_{shi}$	Hohlwellen-Innendurchmesser	mm	$C_{ay}$	Durch Einlaufen erzeugte Kopfrücknahme	$\mu\text{m}$
$d_{Na}$	Kopf-Nutkreisradius	mm	$C_{BS}$	Bezugsprofilfaktor	—
$d_{1,2}$	Teilkreisradius von Ritzel, Rad	mm	$C_R$	Radkörperfaktor	—
$f_{t\alpha}$	Profil-Formabweichung	$\mu\text{m}$	$E$	Elastizitätsmodul, Young's Modul	$\text{N}/\text{mm}^2$
$f_{ma}$	(Flankenlinien-)Herstellabweichung	$\mu\text{m}$	$F_{bt}$	Zahnnormalkraft im Stirnschnitt	N
$f_{pe}$	Eingriffsteilungs-Abweichung	$\mu\text{m}$	$F_m/b$	für $K_{H\beta}$ maßgebende mittlere Linienlast	$\text{N}/\text{mm}$
$f_{H\beta}$	Flankenlinien-Winkelabweichung	$\mu\text{m}$	$F_t$	(Nenn-)Umfangskraft am Teilkreis (gesamte von der Verzahnung übertragene Nenn-Umfangskraft)	N
$h_{aP}$	Kopfhöhe des Bezugsprofils der Verzahnung	mm	$F_{\beta x}$	Ursprünglich (vor dem Einlaufen) wirksame Flankenlinienabweichung	$\mu\text{m}$
$h_{fP}$	Fußhöhe des Bezugsprofils der Verzahnung	mm	$F_{\beta y}$	Nach dem Einlaufen wirksame Flankenlinienabweichung	$\mu\text{m}$
$h_{Fe}$	Biegehebelarm für Zahnfußbeanspruchung bei Kraftangriff im äußeren Einzeleingriffspunkt	mm	$G$	Gleitmodul	$\text{N}/\text{mm}^2$
$h_{1,2}$	Zahnhöhe des Ritzels, Rades	mm	HB	Brinellhärte	—
$i$	Übersetzung	—	HRC	Rockwellhärte (C-Skala)	—
$l$	Lagerstützweite	mm	HV 1	Vickershärte bei Belastung $F=9,81\text{ N}$	—
$m$	Modul	mm	HV 10	Vickershärte bei Belastung $F=98,10\text{ N}$	—
$m_n$	Normalmodul	mm	$K_v$	Dynamikfaktor	—
$m_{red}$	Auf die Eingriffslinie reduzierte Masse des Zahnradpaars je Einheit Zahnbreite	$\text{kg}/\text{mm}$	$K_A$	Anwendungsfaktor	—
$m_t$	Stirnmodul	mm	$K_{F\alpha}$	Stirnfaktor (Fuß); berücksichtigt die Kraftaufteilung auf mehrere Zähne	—
$n_{E1}$	Resonanzdrehzahl des Ritzels	$\text{min}^{-1}$	$K_{F\beta}$	Breitenfaktor (Fuß); berücksichtigt die Kraftverteilung über die Zahnbreite	—
$n_{1,2}$	Drehzahl des Ritzels, Rades	$\text{min}^{-1}$	$K_{H\alpha}$	Stirnfaktor (Flanke); berücksichtigt die Kraftaufteilung auf mehrere Zähne	—
$p$	Anzahl der Planeten	—	$K_{H\beta}$	Breitenfaktor (Flanke); berücksichtigt die Kraftverteilung über die Zahnbreite	—
$pr$	Protuberanzbetrag am Werkzeug	mm	$K_\gamma$	Aufteilungsfaktor; berücksichtigt die Aufteilung der Gesamt-Umfangskraft auf mehrere Zahnengriffe bei Leistungsverzweigung	—
$q$	Fertigbearbeitungszugabe	mm	$N$	Anzahl; Exponent, Bezugsdrehzahl	—
$q_s$	Kerbparameter (= $s_{Fn}/2Q_F$ )	—	$P$	Übertragene Leistung	kW
$r_{b1,2}$	Grundkreisradius von Ritzel, Rad	mm	$P_R$	Rauheitsparameter	—
$s_{pr}$	Fußfreischnitt am Bezugsprofil (= $pr - q$ )	mm	$R_a$	Arithmetischer Mittenrauhwert	$\mu\text{m}$
$s_{Fn}$	Zahnfußsehne im Berechnungsquerschnitt	mm	$R_z$	Gemittelte Rauhtiefe	$\mu\text{m}$
$s_R$	Dicke des Zahnkranzes unter dem Zahnfuß	mm	$S_F$	Sicherheitsfaktor für Zahnfußbeanspruchung (Zahnbruchsicherheit)	—
$u$	Zähnezahlverhältnis $z_2/z_1$ <sup>2)</sup>	—			
$v$	Umfangsgeschwindigkeit (ohne Index: am Teilkreis)	m/s			

2) Für Außenradpaare sind  $a, u$  und  $z_2$  positiv, für Innenradpaare sind  $a, u$  und  $z_2$  negativ,  $z_1$  positiv.

3) Zahnbreite für die Berechnung von  $K_{F\beta}$  siehe Abschnitt 3.4.4 c), der Grübchentragsfähigkeit siehe Abschnitt 4.1.1, der Zahnfußtragsfähigkeit siehe Abschnitt 5.1.1.