

	DIN 3991-2	
ICS 21.200	Ersatz für DIN 3991-2:1988-09	
Tragfähigkeitsberechnung von Kegelrädern – Teil 2: Berechnung der Grübchentragfähigkeit Calculation of load capacity of bevel gears – Part 2: Calculation of surface durability (macropitting) Calcul de la capacité de charge des engrenages coniques – Partie 2: Calcul de la résistance à la pression superficielle (formation des piqûres)		
		Gesamtumfang 35 Seiten
DIN-Normenausschuss Maschinenbau (NAM)		

Inhalt

	Seite
Vorwort	4
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	7
4 Symbole und Abkürzungen	8
5 Grübchenschaden — Allgemeine Aspekte	12
5.1 Akzeptable und inakzeptable Grübchen	12
5.2 Bewertungsanforderungen	12
5.3 Allgemeines Berechnungsverfahren	13
6 Gleichungen zur Grübchentragfähigkeit – Methode B	13
6.1 Auftretende Flankenpressung	13
6.2 Zulässige Flankenpressung	14
6.3 Berechneter Sicherheitsfaktor	14
6.4 Faktoren für den Nennwert der Flankenpressung	15
6.4.1 Mittelzonenfaktor Z_{M-B}	15
6.4.2 Lastverteilungsfaktor Z_{LS}	17
6.4.3 Elastizitätsfaktor Z_E	18
6.5 Faktoren für die zulässige Flankenpressung	19
6.5.1 Kegelradfaktor Z_{KP}	19
6.5.2 Größenfaktor Z_X	19
6.5.3 Hypoidfaktor Z_{Hyp}	19
6.5.4 Einflussgrößen auf die Schmierfilmbildung Z_L, Z_V, Z_R	22
6.5.5 Werkstoffpaarungsfaktor Z_W	24
6.5.6 Lebensdauerfaktor Z_{NT}	27
Anhang A (informativ) Lokalisierte Berechnungsmethode der Grübchentragfähigkeit von Kegelrädern	30
A.1 Allgemeines	30
A.2 Lokale modifizierte Flankenpressung $\sigma_{H,Y,mod}$	30
A.3 Lokal zulässige Flankenpressung $\sigma_{HP,Y}$	30
A.4 Berechneter lokaler Sicherheitsfaktor $S_{H,Y}$	31
A.5 Lokale Faktoren der zulässigen Flankenpressung	31
A.5.1 Lokaler Geschwindigkeitsfaktor $Z_{v,Y}$	31
A.5.2 Lokaler Hypoidfaktor $Z_{Hyp,Y}$	32
A.5.3 Lokaler Kegelrad-schlupffaktor $Z_{S,Y}$	32
A.6 Lokale Summengeschwindigkeit $v_{\Sigma,vert,Y}$ und lokaler Schlupf $\zeta_{vert,Y}$	33
Literaturhinweise	35

Bilder

Bild 1 — Krümmungsradien am Mittelpunkt M des Eingriffsfeldes und am inneren Einzeleingriffspunkt B des Ritzels für die Bestimmung des Mittelzonenfaktors Z_{M-B}	16
Bild 2 — Lastverteilung im Eingriffsfeld	17
Bild 3 — Tangentialgeschwindigkeiten am Auslegungspunkt P	20
Bild 4 — Gleitgeschwindigkeit senkrecht und parallel zur Berührlinie am Auslegungspunkt P	21
Bild 5 — Summe der Geschwindigkeiten senkrecht und parallel zur Eingriffslinie am Mittelpunkt P	22
Bild 6 — Lebensdauerfaktor für die Grübchentragfähigkeit Z_{NT}	28

Tabellen

Tabelle 1 — Symbole und Einheiten 8

Tabelle 2 — Allgemeine Indizes 11

Tabelle 3 — Abkürzungen 11

Tabelle 4 — Faktoren für die Berechnung des Mittelzonenfaktors Z_{M-B} 17

Tabelle 5 — Exponent e_{LS} für die Berechnung der parabolischen Verteilung der maximalen
Linienlast p^* 18

Tabelle 6 — Lebensdauerfaktor Z_{NT} für die statische Festigkeit und die Dauerfestigkeit 29

Vorwort

Dieses Dokument wurde vom Arbeitsausschuss NA 060-34-13 AA „Kegelradverzahnungen (SpA ISO/TC 60/SC 2/WG 13)“ im Fachbereich „Antriebstechnik“ des DIN-Normenausschusses Maschinenbau (NAM) erarbeitet. Vertreter der Hersteller und Anwender von Kegelradverzahnungen und der Hochschulen waren an der Erarbeitung beteiligt.

Die Normenreihe DIN 3991 besteht seit 1998 in unveränderter Form. Im Rahmen der internationalen Normung wurden bereits zwei Ausgaben der Normenreihe ISO 10300, *Calculation of load capacity of bevel gears* erarbeitet und veröffentlicht. Die aktuelle Ausgabe unterliegt zum Zeitpunkt der Erarbeitung dieses Dokuments einer weiteren Überarbeitung.

Dieses Dokument ersetzt die erste Ausgabe (DIN 3991-2:1988-09), die technisch vollumfänglich überarbeitet wurde und die Elemente der ISO 10300-2 übernimmt, die auf Betreiben des DIN-Ausschusses in die internationale Norm übernommen wurden. Zudem wurden in dieses Dokument die neuesten Erkenntnisse und Forschungsergebnisse eingearbeitet.

Die Normenreihe DIN 3991 besteht aus den folgenden Teilen unter dem Haupttitel *Tragfähigkeitsberechnung von Kegelrädern*:

- Teil 1: Einführung und allgemeine Einflussfaktoren
- Teil 2: Berechnung der Grübchentragfähigkeit
- Teil 3: Berechnung der Zahnfußtragfähigkeit

Ein weiterer Teil für die Berechnung der Fresstragfähigkeit befindet sich zum Zeitpunkt der Veröffentlichung der Normenreihe DIN 3991 in der Vorbereitung.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. DIN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Änderungen

Gegenüber DIN 3991-2:1988-09 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) der Anwendungsbereich wurde um achsversetzte Kegelräder (Hypoidräder) erweitert, hierfür wurde das Berechnungsverfahren überarbeitet;
- b) für die Verwendung von Werkstoffkennwerten wird in diesem Dokument auf die aktuellere ISO 6336-5 verwiesen, was nicht ausschließt, dass in einer späteren Ausgabe auf eine überarbeitete DIN 3990-5 verwiesen werden kann;
- c) es wurde ein Werkstoffpaarungsfaktor Z_W eingeführt;
- d) es wurde ein Lebensdauerfaktor Z_{NT} aufgenommen;
- e) die grafischen Methoden zur Bestimmung von Berechnungsfaktoren wurden entfernt;

- f) Aufnahme einer lokalisierten Berechnungsmethode der Grübchentragfähigkeit von Kegelrädern in einem informativen Anhang A.

Frühere Ausgaben

DIN 3991-2: 1988-09

Einleitung

Diese Ausgabe der Normenreihe DIN 3991 stellt eine umfassende Überarbeitung der Berechnungsmethoden zur Kegelradtragfähigkeit dar und bezieht achsversetzte Kegelräder (Hypoidräder) ein. Diese Überarbeitung berücksichtigt die nationalen und internationalen Forschungsergebnisse seit Veröffentlichung der Erstausgabe der Normenreihe DIN 3991 von 1988 und übernimmt wesentliche Neuerungen aus der internationalen Normenreihe ISO 10300 (Ausgabe 2023). Eine Abweichung der Berechnungsergebnisse zu vorhergehenden Berechnungsverfahren ist daher nicht auszuschließen. Die einzelnen Teile der Normenreihe DIN 3991 gelten zusammen mit den Werkstoffangaben nach ISO 6336-5, die als Manuskriptübersetzung auch in deutscher Sprache verfügbar ist.

Dieses Dokument behandelt den Ausfall durch Grübchen als Ermüdungsphänomen. Einlauf- und fortschreitende Grübchen werden als zwei Formen der Grübchen anerkannt.

In Anwendungen, in denen Stahl mit geringer Härte oder Vergütungsstähle verwendet werden, treten Einlaufgrübchen häufig während der frühen Phase des Betriebs auf und gelten nicht als bedenklich, wenn ihr Wachstum degressiv verläuft. Einlaufgrübchen sind durch kleine Ausbrüche, welche sich nicht über die gesamte Zahnbreite oder -höhe des betroffenen Zahns ausdehnen, gekennzeichnet. Der Akzeptanzgrad von Einlaufgrübchen variiert erheblich je nach Anwendung. Einlaufgrübchen treten in lokal überbeanspruchten Bereichen auf und führen tendenziell zu einer (positiven) Änderung der Lastverteilung, indem sie zu einem gleichmäßigeren Tragbild führen. Die Grübchenbildung endet meist, sobald sich eine gleichmäßigere Lastverteilung eingestellt hat und Pressungsspitzen reduziert wurden.

Bei Stahl-Anwendungen mit hoher Härte oder Vergütungsstählen hoher Festigkeit sind die auftretenden Grübchen üblicherweise fortschreitend. Die in diesem Dokument enthaltenen Gleichungen für die Grübchentragfähigkeit dienen dazu, die Gestaltung von Kegel- und Hypoidrädern, die während ihrer Berechnungslebensdauer frei von fortschreitenden Grübchen bleiben, zu unterstützen (für weitere Informationen siehe ISO/TR 22849 [1]).

Die von Hertz zunächst für den Kontaktdruck zwischen zwei gekrümmten Oberflächen entwickelten grundlegenden Gleichungen wurden modifiziert, um die folgenden vier Punkte zu berücksichtigen: die Lastaufteilung zwischen zwei benachbarten Zähnen, die Position der Druckmitte auf dem Zahn, die Form der tatsächlichen Kontaktfläche und Pressungsüberhöhungen durch Herstellabweichungen. Die Hertz'sche Pressung dient als Grundlage für die Bewertung der Flankentragfähigkeit im Hinblick auf Grübchen. Auch wenn die Voraussetzungen zur Anwendbarkeit der Hertz'schen Theorie strenggenommen für einen Zahneingriff nicht erfüllt werden, kann ihre Anwendung durch die Tatsache gerechtfertigt werden, dass die Grenzen der Hertz'schen Pressung für einen Werkstoff auf der Grundlage von Komponententests bestimmt werden, bei denen die zusätzlichen Einflüsse berücksichtigt werden. Im Rahmen des festgelegten Anwendungsbereichs kann die Hertz'sche Pressung daher als maßgebliche Kenngröße zur Bewertung der Grübchentragfähigkeit genutzt werden.

ANMERKUNG Im Gegensatz zu Stirnrädern werden Kegelräder praktisch immer mit Profil- und Längsballigkeit hergestellt. Dies wird bei der Bestimmung der Lastfaktoren durch die Tatsache berücksichtigt, dass das rechtwinklige Eingriffsfeld (im Fall von gerad- und schrägverzahnten Stirnrädern) durch ein einbeschriebenes Parallelogramm ersetzt wird. Die besonderen Bedingungen an Kegelrädern, die sich von Stirnrädern vor allem im Hinblick auf die Ausbildung der Tragbilder unterscheiden, werden somit durch die Stirn- und Breitenfaktoren berücksichtigt.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt die grundlegenden Gleichungen für die Bestimmung der Grübchentragfähigkeit von gerad- und schrägverzahnten Kegelrädern, Zerol-, Spiralkegel- und Hypoidrädern fest und umfasst alle Einflüsse auf die Grübchentragfähigkeit, die quantitativ beurteilt werden können. Dieses Dokument ist anwendbar für ölgeschmierte Kegelräder, solange jederzeit ausreichend Schmierstoff im Eingriff vorhanden ist.

Die Gleichungen in diesem Dokument basieren auf Ersatzstirnradverzahnungen und sind beschränkt auf Kegelräder, deren Ersatzstirnradverzahnungen eine Profilüberdeckung von $\varepsilon_{v\alpha} < 2$ haben. Sofern nicht explizit erwähnt, sind die Aussagen für alle Arten von Kegelrädern anwendbar. Die Ergebnisse sind gültig, wenn sich die verwendeten Faktoren nach DIN 3991-1 innerhalb ihrer zulässigen Bereiche befinden (siehe ISO 6336-2 [2]). Darüber hinaus sind die angegebenen Beziehungen für Kegelräder anwendbar, bei denen die Summe der Profilverschiebungsfaktoren von Ritzel und Rad null beträgt (siehe ISO 23509).

Die Gleichungen in diesem Dokument sind nicht direkt auf die Beurteilung anderer Flankenschäden, wie z. B. plastische Verformung, Kratzer und Fressen, anwendbar.

Wenn die Gleichungen für große mittlere Spiralwinkel $(\beta_{m1} + \beta_{m2})/2 > 45^\circ$, für effektive Eingriffswinkel $\alpha_e > 30^\circ$ und/oder für große Zahnbreiten $b > 13 m_{mn}$ verwendet werden, ist es sinnvoll die mit dieser Normenreihe berechneten Ergebnisse durch Erfahrungswerte zu bestätigen.

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).

DIN 3965, *Toleranzen von Kegelradverzahnungen*

DIN 3991-1:2024-06, *Tragfähigkeitsberechnung von Kegelrädern — Teil 1: Einführung und allgemeine Einflussfaktoren*

ISO 701, *International gear notation — Symbols for geometrical data*

ISO 1122-1, *Vocabulary of gear terms — Part 1: Definitions related to geometry*

ISO 6336-5, *Calculation of load capacity of spur and helical gears — Part 5: Strength and quality of materials*

ISO 23509, *Bevel and hypoid gear geometry*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach ISO 1122-1 und ISO 23509 und die folgenden Begriffe.

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

— DIN-TERMinologieportal: verfügbar unter <https://www.din.de/go/din-term>

— DKE-IEV: verfügbar unter <https://www.dke.de/DKE-IEV>

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

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

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

3.1
Grübchen

Materialermüdungsphänomen zweier miteinander in Eingriff befindlicher Flanken unter Last

3.2
Nenn-Flankenpressung

σ_{H0}
Flankenpressung, berechnet auf der Grundlage der Hertz’schen Theorie am kritischen Punkt des Lastangriffs für mit konstantem Nennmoment belastete fehlerfreie Räder

3.3
Flankenpressung

σ_H
Flankenpressung am kritischen Punkt der Lastanwendung einschließlich der Lastfaktoren, die statische und dynamische Lasten sowie die Lastverteilung berücksichtigen

3.4
Zulässige Beanspruchung

σ_{Hlim}
maximal ertragbare Flankenpressung genormter Prüfräder nach ISO 6336-5 unter genormten Betriebsbedingungen

3.5
Zulässige Flankenpressung

σ_{HP}
maximal ertragbare Flankenpressung des bewerteten Radsatzes einschließlich aller Einflussfaktoren

4 Symbole und Abkürzungen

Für dieses Dokument gelten die in ISO 701, DIN 3965, ISO 23509 und die in den Tabelle 1 bis Tabelle 3 angegebenen Symbole, Einheiten, allgemeine Indizes und Abkürzungen (siehe ISO 6336-5).

Tabelle 1 — Symbole und Einheiten

Symbol	Bezeichnung	Einheit
A	Hilfsgröße für den Werkstoffpaarungsfaktor Z_W	—
A^*	Hilfswert: Fläche über der Berührlinie für die Berechnung des Lastaufteilungsfaktors Z_{LS}	mm
B	Qualitätsstufe nach DIN 3965	—
b	Zahnbreite	mm
C_{ZL}, C_{ZR}, C_{ZV}	Faktoren für die Bestimmung der Einflussgrößen auf die Schmierfilmbildung	—
d_e	äußerer Teilkegeldurchmesser	mm
d_v	Teilkreisdurchmesser der Ersatzstirnradverzahnung	mm
d_{va}	Kopfkreisdurchmesser der Ersatzstirnradverzahnung	mm
d_{vb}	Grundkreisdurchmesser der Ersatzstirnradverzahnung	mm
E	Elastizitätsmodul, Young-Modul	N/mm ²
e_{LS}	Lastverteilungsexponent	—
F	Hilfsgrößen für den Mittelzonenfaktor	—

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Symbol	Bezeichnung	Einheit
F_{mt}	Nenn-Umfangskraft am Teilkegel	N
F_n	Nenn-Normalkraft	N
f	Abstand der Berührlinie vom Mittelpunkt M	mm
f_{max}	maximaler Abstand zur mittleren Berührlinie	mm
$g_{va,max}$	maximale Länge der Kopfeingriffsstrecke der Ersatzstirnradsverzahnung	mm
g_Y	Koordinate entlang der Eingriffsstrecke	mm
HBW	Brinell-Härte	—
$H_{1,2}$	Hilfsfaktor für den Mittelzonenfaktor	—
K_A	Anwendungsfaktor	—
$K_{H\alpha}$	Stirnfaktor für die Zahnflankenbeanspruchung	—
$K_{H\beta}$	Breitenfaktor für die Zahnflankenbeanspruchung	—
K_v	Dynamikfaktor	—
l_b	Länge der Berührlinie	mm
m_{mn}	mittlerer Normalmodul	mm
N_L	Lastwechselzahl	—
p	Spitzenlast	N/mm
p_{max}	maximale Spitzenlast	N/mm
p^*	relative Spitzenlast zur Berechnung des Lastaufteilungsfaktors (Methode B)	—
Ra	Arithmetischer Mittelrauhwert	μm
R_e	äußere Teilkegellänge	mm
Rz	gemittelte Rautiefe	μm
Rz_H	äquivalente Rauheit	μm
Rz_{10}	gemittelte Rautiefe für Radpaare mit relativem Krümmungsradius $\rho_{rel} = 10 \text{ mm}$	μm
S_H	Sicherheitsfaktor für die Flankenpressung (gegen Grübchen)	—
$S_{H,min}$	Mindestsicherheitsfaktor für Flankenpressung	—
$S_{H,Y}$	rechnerischer lokaler Sicherheitsfaktor gegen Grübchenbildung	—
u	Zähnezahlverhältnis	—
V	Verhältnis zwischen maximaler Last über der mittleren Berührlinie und Gesamtlast	—
v_g	Gleitgeschwindigkeit	m/s
$v_{g,par}$	Gleitgeschwindigkeit parallel zur Berührlinie	m/s
$v_{g,vert}$	Gleitgeschwindigkeit senkrecht zur Berührlinie	m/s
v_{mt}	Umfangsgeschwindigkeit am Teilkegel in Zahnmitte	m/s
v_{Σ}	Summengeschwindigkeit am Auslegungspunkt P	m/s
$v_{\Sigma h}$	Summengeschwindigkeit in Zahnhöhenrichtung	m/s
$v_{\Sigma s}$	Summengeschwindigkeit in Zahnbreitenrichtung	m/s
$v_{\Sigma,vert}$	Summengeschwindigkeit senkrecht zur Berührlinie	m/s

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Symbol	Bezeichnung	Einheit
w_t	Oberflächengeschwindigkeit	m/s
w_{th}	Oberflächengeschwindigkeit in Zahnhöhenrichtung	m/s
w_{ts}	Oberflächengeschwindigkeit in Zahnbreitenrichtung	m/s
w_{tvert}	Oberflächengeschwindigkeit senkrecht zur Berührlinie	m/s
Z_E	Elastizitätsfaktor	$(N/mm^2)^{1/2}$
Z_{Hyp}	Hypoidfaktor	—
Z_{KP}	Kegelradfaktor	—
Z_L	Schmierstofffaktor	—
Z_{LS}	Lastverteilungsfaktor (Flanke)	—
Z_{M-B}	Mittelzonenfaktor	—
Z_{NT}	Lebensdauerfaktor (Flanke)	—
Z_R	Rauheitsfaktor für die Flankenbeanspruchung	—
Z_S	Kegelradschlupffaktor	—
Z_{S0}	Berechnungsfaktor für den lokalen Kegelradschlupffaktor	—
Z_v	Geschwindigkeitsfaktor	—
Z_W	Werkstoffpaarungsfaktor	—
Z_X	Größenfaktor	—
z_v	Zähnezahl der Ersatzstirnradverzahnung	—
α_e	effektiver Eingriffswinkel	°
$\alpha_{nD,C}$	Erzeugungsrad-Flankenwinkel an der Zugflanke/Schubflanke	°
α_{vet}	Stirneingriffswinkel der Ersatzstirnradverzahnung	°
β_B	Winkel zwischen Flanken- und Berührlinie	°
β_m	mittlerer Spiralwinkel	°
$\varepsilon_{v\alpha}$	Profilüberdeckung der Ersatzstirnradverzahnung	—
$\varepsilon_{v\beta}$	Sprungüberdeckung der Ersatzstirnradverzahnung	—
ζ_{vert}	Schlupf senkrecht zur Berührlinie	—
ν	Poissonzahl	—
ν_{40}	kinematische Nennviskosität des Öls bei 40 °C	Mm^2/s
ρ_{rel}	relativer Krümmungsradius vertikal zur Berührlinie an der Ersatzstirnradverzahnung	mm
Σ	Achswinkel	°
σ_H	auf tretende Flankenpressung	N/mm^2
σ_{HP}	zulässige Flankenpressung	N/mm^2
σ_{H0}	Nenn-Flankenpressung	N/mm^2
$\sigma_{H,lim}$	Grübchen-Dauerfestigkeit	N/mm^2
$\sigma_{H,Y}$	lokalisierte Flankenpressung	N/mm^2

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Symbol	Bezeichnung	Einheit
ω_{wt}	Winkel zwischen Oberflächengeschwindigkeit in Zahnhöhen- und Zahnbreitenrichtung	°
ω_{Σ}	Winkel zwischen dem Summenvektor der Geschwindigkeit und der Spur des Wälzkegels	°

Tabelle 2 — Allgemeine Indizes

Indizes	Beschreibung
0	erzeugendes Werkzeug
1	Ritzel
2	Rad
A, B, C	Wert nach Methode A, B oder C
D	Zugsflanke
C	Schubflanke
T	relativ zu den Abmessungen des genormten Prüfrads
m, r, t	Index für Differenzierung der Berührlinien in Kopf- („t“) und Fußberührlinie („r“) sowie mittlere Berührlinie („m“)
Y	Berührungspunkt entlang der Eingriffsstrecke

Tabelle 3 — Abkürzungen

Abkürzung	Werkstoff	Typ
St	Baustähle, normalgeglüht, kohlenstoffarm	Baustähle, normalgeglüht, kohlenstoffarm
ST (Guss)	Stahlguss	Stahlguss
GTS (perl.)	Gusseisenwerkstoffe	Schwarzer Temperguss
GGG (perl., bain., ferr.)		Sphäroguss Gusseisen mit Kugelgraphit
GG		Grauguss Gusseisen mit Lamellengraphit
V	Vergütungsstähle	Unlegierte und legierte Stähle
V (Guss)	Vergüteter Stahlguss	Unlegierte und legierte Stähle
Eh	Einsatzstähle	
IF	Flam- oder induktionsgehärtete Vergütungsstähle und Stahlguss	
NT (nitr.)	Nitrierstähle	Nitrierstähle
NV (nitr.)	Vergütungsstähle, nitriert	Vergütungsstähle
NV (nitrocarb.)	Nitrocarburierte Stähle	Vergütungsstähle