

Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern

Berechnung der Grübchentrugfähigkeit

DIN
3990
Teil 2

Calculation of load capacity of cylindrical gears; calculation of pitting resistance

Mit DIN 3990 T 1/12.87,
DIN 3990 T 3/12.87
und DIN 3990 T 4/12.87
Ersatz für Ausgabe 12.70
und DIN 3990 T 1/12.70,
DIN 3990 T 3/12.70,
DIN 3990 T 5/12.70,
DIN 3990 T 6/12.70,
DIN 3990 T 7/12.70,
DIN 3990 T 8/12.70 und
DIN 3990 T 10/01.73

Zusammenhang mit dem von der International Organization for Standardization (ISO) herausgegebenen Internationalen Norm-Entwurf ISO/DIS 6336/2 – 1983 siehe Erläuterungen in DIN 3990 Teil 1.

Kursiv gedruckte Textteile sind Angaben, die zur unmittelbaren Berechnung nicht erforderlich sind, wohl aber zur Kenntnis des Anwendungsbereiches dieser Norm sowie der Diagramme, Formeln und Konstanten. Außerdem erleichtern sie das Verständnis der einzelnen Berechnungsschritte.

Zeichen, Benennungen und Einheiten siehe DIN 3990 Teil 1. Zeichen, die ausschließlich in Verbindung mit der Berechnung einzelner Faktoren verwendet werden, sind in den entsprechenden Abschnitten dieser Norm angegeben.

Zur Beurteilung der Grübchentrugfähigkeit von Stirnrädern wird hier grundsätzlich die **Hertzsche Pressung** benutzt, die als Grundlage für die Berechnung der Flankenpressung dient. Sie ist eine wichtige Kenngröße für die Beanspruchung beim Eingriff der Zahnflanken. Sie ist aber ebensowenig wie die entsprechende, unter der Oberfläche auftretende Schubspannung die alleinige Ursache für die Grübchenbildung.

Es gibt noch andere Einflußgrößen, wie z. B. die Reibungszahl, die Richtung und die Größe des Schlupfes und den Einfluß des Schmiermittels auf die Druckverteilung. Diese lassen sich beim derzeitigen Stand des Wissens noch nicht direkt in die Tragfähigkeitsberechnung einbeziehen, sie werden jedoch teilweise in den Einflußfaktoren für die zulässige Spannung und in der Wahl der Werkstoffkennwerte berücksichtigt.

Trotz Unzulänglichkeiten ist die Hertzsche Pressung als Arbeitshypothese brauchbar. Dies ist in erster Linie darin begründet, daß für einen gegebenen Werkstoff die Grenzwerte der Hertzschen Pressung vorzugsweise aus Laufversuchen mit Zahnradern ermittelt werden und damit die zusätzlichen Einflüsse in diesen Werten mit enthalten sind. Da somit der Bezugspunkt der Berechnung im mittleren Bereich des Anwendungsgebietes liegt, ist die Hertzsche Pressung als eine Art Modellgesetz brauchbar, mit dem man Versuchsdaten von Zahnradern auf Zahnäder anderer Abmessungen und Betriebsbedingungen übertragen kann.

Für die Berechnung der zulässigen Flankenpressung und die Bestimmung einiger Faktoren sind mehrere Methoden zugelassen, siehe DIN 3990 Teil 1.

Inhalt

	Seite		Seite
1 Anwendungsbereich und Zweck	2	7.2 Dauerfestigkeitswerte für Methode B_R	10
1.1 Allgemeines	2	8 Lebensdauerfaktor (Flanke) Z_{NT}	11
1.2 Schäden durch Grübchenbildung und Sicherheitsfaktoren	2	8.1 Lebensdauerfaktor, Methode A	11
2 Grundgleichungen	2	8.2 Lebensdauerfaktor Z_{NT} , Methode B	11
2.1 Auftretende Flankenpressung σ_H	3	9 Einfluß der Schmierfilmbildung, Faktoren Z_L, Z_v, Z_R	11
2.2 Zulässige Flankenpressung σ_{HP}	3	9.1 Einfluß der Schmierfilmbildung, Methode A	11
2.3 Rechnerischer Sicherheitsfaktor für die Flankenpressung (Grübchensicherheit) S_H	5	9.2 Einfluß der Schmierfilmbildung; Faktoren Z_L, Z_v, Z_R ; Methode B	12
3 Zonenfaktor Z_H, Einzeleingriffsfaktoren Z_B, Z_D ..	6	9.3 Einfluß der Schmierfilmbildung; Faktoren Z_L, Z_v, Z_R ; Methode C	15
3.1 Zonenfaktor Z_H	6	9.4 Einfluß der Schmierfilmbildung; Faktoren Z_L, Z_v, Z_R ; Methode D	15
3.2 Einzeleingriffsfaktoren Z_B und Z_D für $\varepsilon_\alpha \leq 2$	6	10 Werkstoffpaarungsfaktor Z_W	16
3.3 Einzeleingriffsfaktoren Z_B und Z_D für $\varepsilon_\alpha > 2$	8	10.1 Werkstoffpaarungsfaktor, Methode A	16
4 Elastizitätsfaktor Z_E	8	10.2 Werkstoffpaarungsfaktor Z_W , Methode B	16
5 Überdeckungsfaktor Z_ε	9	10.3 Werkstoffpaarungsfaktor Z_W , Methode C	16
5.1 Bestimmung des Überdeckungsfaktors	9	11 Größenfaktor (Flanke) Z_X	16
5.2 Rechnerische Bestimmung der Überdeckungen ε_α und ε_β (entsprechend DIN 3960)	9	11.1 Größeneinfluß (Flanke), Methode A	17
6 Schrägenfaktor Z_β	10	11.2 Größeneinfluß (Flanke), Methode B	17
7 Dauerfestigkeit für Flankenpressung	10	11.3 Größeneinfluß (Flanke), Methode C	17
7.1 Dauerfestigkeitswerte $\sigma_{H \lim}$ für die Methoden B, C, (D)	10		

Fortsetzung Seite 2 bis 18

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

1 Anwendungsbereich und Zweck

1.1 Allgemeines

Diese Norm enthält die Grundgleichungen für die Berechnung der Grübchentragfähigkeit von Evolventen-Stirnrädern mit Außen- und Innenverzahnung. Sie erfaßt alle Einflüsse auf die Grübchentragfähigkeit, soweit sie quantitativ beurteilt werden können. Sie gilt in erster Linie für ölgeschmierte Getriebe, kann näherungsweise aber auch für (langsamlaufernde) fettgeschmierte Getriebe verwendet werden, sofern im Zahneingriff zu jeder Zeit Schmierstoff in ausreichender Menge vorhanden ist.

Die Gleichungen gelten für Stirnräder mit einem Bezugsprofil nach DIN 867 oder ISO 53 – 1974. Sie können auch angewendet werden auf Stirnräder mit einem anderen Bezugsprofil bis zu einer Profilüberdeckung von $\varepsilon_{\alpha n} = 2,5$.

Diese Gleichungen sind nicht unmittelbar anwendbar für die Beurteilung von anderen Zahnflankenschäden als in Abschnitt 1.2 beschrieben, wie zum Beispiel plastische Verformung, Warmfressen, Kaltfressen usw. (vergleiche DIN 3979).

Die durch die zulässige Flankenpressung bestimmte Tragfähigkeit wird „Grübchentragfähigkeit“ genannt.

1.2 Schäden durch Grübchenbildung und Sicherheitsfaktoren

Nach Überschreiten der Grübchenfestigkeitsgrenzen der miteinander in Eingriff kommenden Zahnflanken brechen Teilchen aus den Zahnflanken heraus, so daß Grübchen entstehen.

In welchem Umfang derartige Grübchen (nach Größe und Anzahl) zulässig sind, hängt weitgehend vom Anwendungsgebiet ab und schwankt in weiten Grenzen. In einigen Anwendungsgebieten kann man Grübchen in gewissem Umfang durchaus zulassen; in anderen Gebieten muß jede merkbare Grübchenbildung vermieden werden.

Eine für **mittlere Verhältnisse** brauchbare Regel unterscheidet zwischen **Einlaufgrübchen** und **fortschreitenden Grübchen**. Nach dieser Regel ist eine lineare oder progressive Zunahme der gesamten Grübchenfläche nicht zulässig. Die effektiv tragende Fläche der Zahnflanke kann durch Einlaufgrübchen vergrößert werden, und als Folge davon kann die Grübchenbildung je Zeiteinheit abnehmen (degressive Grübchenbildung) oder aufhören (zum Stillstand gekommene Grübchenbildung). Diese Grübchen werden als zulässig betrachtet. In Streitfällen ist die folgende Regel maßgebend: Grübchen sind nicht zulässig, wenn bei unveränderten Betriebsbedingungen die Grübchenbildung mit der Zeit linear oder progressiv zunimmt (lineare oder progressive Grübchenbildung). Die Beurteilung erstreckt sich auf den gesamten aktiven Bereich der Flanken sämtlicher Zähne. Bei nichtgehärteten Zahnflanken sind Anzahl und Größe neu entstandener Grübchen zu berücksichtigen. Bei oberflächengehärteten Verzahnungen bilden sich Grübchen oft nur an einer oder wenigen Flanken. In diesen Fällen soll sich die Beurteilung auf die Zähne, bei denen sich Grübchen gebildet haben, konzentrieren. Für eine quantitative Auswertung sollten bestimmte Zähne, die vermutlich einem besonderen Risiko unterliegen, für eine kritische Untersuchung markiert werden.

In besonderen Fällen kann in erster Annäherung die Menge des Gesamtabtriebes als Merkmal dienen. Die Kontrolle des Zahnflankenzustandes sollte in kritischen Fällen mindestens dreimal erfolgen, die erste Kontrolle jedoch nicht vor 10^6 Lastwechseln. Die weiteren Kontrollen sollten nach einer Betriebszeit durchgeführt werden, die aufgrund der vorhergehenden Kontrolle als angemessen betrachtet wird.

Wenn als Folge von Grübchen ein Getriebebeschaden entstehen kann, der Menschenleben gefährden oder sonstige ernste Folgeschäden verursachen kann, ist Grübchenbildung

faktisch nicht zulässig. Aufgrund der spannungserhöhenden Wirkung kann ein einzelnes Grübchen von 1 mm Durchmesser in der Nähe der Zahnfußausrundung eines einsatzgehärteten Rades unter Umständen Ausgangspunkt für einen Riß werden, der zu Zahnbruch führen kann, und muß daher (z. B. bei Flugzeuggetrieben) als nicht zulässig angesehen werden. Ähnliche Überlegungen gelten für Turbogetriebe. Innerhalb der hier geforderten **langen Lebensdauer** (10^{10} bis 10^{11} Lastwechsel) dürfen üblicherweise weder Grübchen noch unangemessen hoher Verschleiß auftreten. Derartige Schäden könnten zu unzulässigen Schwingungen und überhöhten dynamischen Kräften führen.

In die Berechnung sind entsprechend hohe **Sicherheitsfaktoren** einzuführen, d. h. nur eine kleine Schadenswahrscheinlichkeit ist zuzulassen.

Als Gegenstück hierzu kann für langsamlaufernde Industriegetriebe mit großen Zähnen (z. B. Modul 25) aus Stahl niedriger Härte hingenommen werden, daß die Gesamtheit der tragenden Flanken Grübchen aufweist, wobei derartige Getriebe trotzdem die Konstruktionsleistung für 10 bis 20 Jahre sicher übertragen. Einzelne Grübchen können hierbei bis zu 20 mm im Durchmesser und bis zu 8 mm tief sein. Eine in den ersten zwei oder drei Betriebsjahren beobachtete „fortschreitende“ Grübchenbildung nimmt hierbei üblicherweise ab, die Zahnflanken glätten und verfestigen sich im Betrieb, so daß die Brinellhärte der Oberfläche um 50 % oder mehr erhöht wird.

Bei derartigen Bedingungen können relativ niedrige **Sicherheitsfaktoren** (in einigen Fällen unter 1) gewählt werden, was einer höheren Schadenswahrscheinlichkeit entspricht. Ein ausreichend hoher Sicherheitsfaktor gegen Zahnbruch ist dabei notwendig.

Allgemeine Gesichtspunkte, die bei der Wahl des Mindest-Sicherheitsfaktors zu beachten sind, siehe DIN 3990 Teil 1, Ausgabe 12.87, Abschnitt 1.2. In den Anwendungsnormen der Reihe DIN 3990 sind hierfür Zahlenwerte angegeben. Es wird empfohlen, den Mindest-Sicherheitsfaktor zwischen Hersteller und Anwender zu vereinbaren.

2 Grundgleichungen

Die Berechnung der Grübchentragfähigkeit basiert auf der Flankenpressung σ_H im Wälzpunkt oder im inneren Einzeleingriffspunkt, wobei der höhere der beiden Werte maßgebend ist. σ_H und die zulässige Flankenpressung σ_{HP} werden getrennt für Ritzel und Rad berechnet. σ_H muß kleiner sein als σ_{HP} . Bei der Berechnung von σ_H werden drei Bereiche unterschieden:

– Geradverzahnung

Ritzel: Hierfür wird im allgemeinen σ_H im inneren Einzeleingriffspunkt B des Ritzels berechnet. In Sonderfällen ist σ_H im Wälzpunkt größer und damit maßgebend.

Rad: Bei Außenverzahnung wird im allgemeinen σ_H im Wälzpunkt berechnet. In Sonderfällen – insbesondere bei kleinen Übersetzungen (siehe Abschnitt 3.2) – ist σ_H im inneren Einzeleingriffspunkt D des Rades größer und damit maßgebend. Bei Innenverzahnung wird σ_H stets im Wälzpunkt berechnet.

– Schrägverzahnung mit Sprungüberdeckung $\varepsilon_\beta \geq 1$

Für Ritzel und Rad wird hierbei stets σ_H im Wälzpunkt berechnet.

– Schrägverzahnung mit Sprungüberdeckung $\varepsilon_\beta < 1$

Hierbei wird σ_H zwischen den beiden Grenzwerten, nämlich σ_H für Geradverzahnung und σ_H für Schrägverzahnung mit $\varepsilon_\beta = 1$ linear interpoliert. Für die Grenzwerte wird dieselbe Stirnschnittverzahnung wie bei dem aktuellen Radpaar zugrunde gelegt.

2.1 Auftretende Flankenpressung σ_H

Hierbei wird grundsätzlich die Flankenpressung auf der Basis der Hertzschen Pressung berechnet (siehe Vorbemerkung).

2.1.1 Bestimmung der Flankenpressung für das Ritzel

$$\sigma_H = Z_B \cdot \sigma_{H0} \cdot \sqrt{K_A \cdot K_v \cdot K_{H\beta} \cdot K_{H\alpha}} \leq \sigma_{HP} \quad (2.01) \quad 1)$$

Hierin ist

σ_{H0} **Nominelle Flankenpressung** im Wälzpunkt: Die bei Belastung einer fehlerfreien Verzahnung durch das statische Nennmoment auftretende Pressung

$$\sigma_{H0} = Z_H \cdot Z_E \cdot Z_\epsilon \cdot Z_\beta \cdot \sqrt{\frac{F_t}{d_1 \cdot b} \cdot \frac{u+1}{u}} \quad (2.02)$$

Z_B **Ritzel-Einzeleingriffsfaktor** (siehe Abschnitt 3.2) (berücksichtigt die Umrechnung der Flankenpressung im Wälzpunkt auf die Flankenpressung im maßgebenden Eingriffspunkt des Ritzels)

K_A **Anwendungsfaktor** (siehe DIN 3990 Teil 1) (berücksichtigt die Krafterhöhung durch äußere Einwirkungen von der Ein- oder Ausgangsseite)

K_v **Dynamikfaktor** (siehe DIN 3990 Teil 1) (berücksichtigt die Krafterhöhung durch innere dynamische Einwirkungen)

$K_{H\beta}$ **Breitenfaktor für Flankenpressung** (siehe DIN 3990 Teil 1) (berücksichtigt ungleichmäßige Kraftverteilung über die Zahnbreite, z. B. infolge von Herstellabweichungen und elastischen Verformungen)

$K_{H\alpha}$ **Stirnfaktor für Flankenpressung** (siehe DIN 3990 Teil 1) (berücksichtigt ungleichmäßige Kraftaufteilung in Umfangsrichtung, z. B. durch Teilungsabweichungen)

Reihenfolge der Faktoren K_A , K_v , $K_{H\beta}$, $K_{H\alpha}$ im Verlauf der Berechnung siehe DIN 3990 Teil 1, Ausgabe 12.87, Abschnitt 1.5.

σ_{HP} **Zulässige Flankenpressung** (siehe Abschnitt 2.2)

Z_H **Zonenfaktor** (siehe Abschnitt 3) (berücksichtigt die Krümmungsradien der Flanken im Wälzpunkt und die Umrechnung der Umfangskraft am Teilzylinder auf die am Wälzzyylinder)

Z_E **Elastizitätsfaktor** (siehe Abschnitt 4) (berücksichtigt die spezifischen Werkstoffgrößen Elastizitätsmoduln E_1 , E_2 und Poisson-Konstanten ν_1 , ν_2)

Z_ϵ **Überdeckungsfaktor** (siehe Abschnitt 5) (berücksichtigt den Einfluß der effektiven Länge der Berührlinien)

Z_β **Schrägenfaktor** (siehe Abschnitt 6) (berücksichtigt den Einfluß des Schrägungswinkels wie z. B. die Kraftschwankungen entlang der Berührlinien)

F_t **Nenn-Umfangskraft** am Teilzylinder im Stirnschnitt 2) (siehe DIN 3990 Teil 1)

b **Zahnbreite** (bei Doppel-Schrägverzahnung $= 2 \cdot b_B$): Kleinerer Wert von Ritzel oder Rad, und zwar Breite im Fußkreis ohne Berücksichtigung sinnvoll ausgeführter Stirnkantenbrüche oder Stirnkantenabrundungen. Bei randschichtgehärteten Zahnrädern bleiben ungehärtete Bereiche der Zahnbreite einschließlich der Übergangszone unberücksichtigt.

d_1 **Teilkreisdurchmesser des Ritzels**

u **Zähnezahlverhältnis** $= z_2/z_1$ (für Außenverzahnung ist u positiv, für Innenverzahnung ist u negativ)

2.1.2 Bestimmung der Flankenpressung für das Rad

$$\sigma_H = Z_D \cdot \sigma_{H0} \cdot \sqrt{K_A \cdot K_v \cdot K_{H\beta} \cdot K_{H\alpha}} \leq \sigma_{HP} \quad (2.03) \quad 1)$$

Hierin ist

Z_D **Rad-Einzeleingriffsfaktor** (siehe Abschnitt 3.2) (berücksichtigt die Umrechnung der Flankenpressung im Wälzpunkt auf die Flankenpressung im maßgebenden Eingriffspunkt des Rades).

Die übrigen Einflußfaktoren sind bei den Gleichungen (2.01) und (2.02) erläutert.

2.2 Zulässige Flankenpressung σ_{HP}

Die Grenzwerte der Flankenpressung (siehe Abschnitt 7) sollen vorzugsweise unmittelbar an Zahnrädern ermittelt werden, siehe auch Vorbemerkung. Ungenauigkeiten des Berechnungsansatzes wirken sich um so geringer aus, je ähnlicher die für die Versuche benutzte Referenz-Verzahnung der aktuellen Verzahnung ist und je ähnlicher die Versuchsbedingungen den Betriebsbedingungen sind.

2.2.1 Methoden zur Bestimmung der zulässigen Flankenpressung σ_{HP} : Grundlagen, Annahmen, Anwendung

a) Methode A

Die zulässige Flankenpressung σ_{HP} (oder die Grübchen-Grenzfestigkeit σ_{HG}) für die Dauerfestigkeit, die Zeitfestigkeit und die statische Festigkeit wird hierbei aus der Wöhlerlinie oder Schadenslinie des aktuellen Radpaares für die betreffenden Betriebsbedingungen mit Gleichung (2.02) oder (2.03) berechnet. Die Laufversuche werden also unmittelbar mit den aktuellen Radpaaren bei wirklichkeitsgetreuen Betriebsbedingungen durchgeführt.

Der hierfür erforderliche Aufwand ist im allgemeinen nur gerechtfertigt bei Neuentwicklungen mit einem Schadensrisiko großer Tragweite (z. B. für die bemannte Raumfahrt).

Sinngemäß kann man nach dieser Methode die zulässige Spannung aus den Abmessungen und Betriebsbedingungen bewährter Referenz-Getriebe ermitteln. Die Anwendung dieser Werte auf andere Getriebe (für Entwurf oder Nachrechnung) ist um so treffsicherer, je genauer die Maße, Werkstoffe, usw. sowie die Betriebsbedingungen mit denen der Referenz-Getriebe übereinstimmen.

b) Methode B

Aus Laufversuchen mit Standard-Referenz-Prüfrädern ermittelt man für eine Reihe von üblichen Werkstoffen und Wärmebehandlungsverfahren Schadenslinien, gekennzeichnet durch den Dauerfestigkeitswert $\sigma_{H \lim}$ und den Lebensdauerfaktor Z_{NT} . Diese Prüfwerte werden mit den (relativen) Einflußfaktoren für Schmierstoff (Z_L), Umfangsgeschwindigkeit (Z_v), Flankenrauheit (Z_R), eventuell Gegenwerkstoff (Z_W) und Baugröße (Z_X) auf die Abmessungen und Betriebsbedingungen des aktuellen Radpaares umgerechnet.

Methode B ist für genauere Berechnungen zu bevorzugen, wenn Festigkeitswerte von Standard-Referenz-Prüfrädern aus speziellen Untersuchungen oder nach DIN 3990 Teil 5 zur Verfügung stehen. (Vergleiche hierzu Vorbemerkung.)

1) Bei Getrieben mit Leistungsverzweigung (Mehrweggetriebe, Planetengetriebe, Verzweigungsgetriebe) verteilt sich die Gesamt-Umfangskraft nicht ganz gleichmäßig auf die einzelnen Zahneingriffe (abhängig von Konstruktion, Umfangsgeschwindigkeit und Fertigungsgenauigkeit). Dies muß beim Ansatz der je Eingriff zu übertragenden Umfangskraft, z. B. durch einen zusätzlichen Aufteilungsfaktor K_γ , berücksichtigt werden, der hinter K_A einzufügen ist. Siehe auch [4], [5].

2) Für F_t muß in jedem Fall (auch bei $\varepsilon_{\alpha n} > 2$ die Gesamt-Umfangskraft eingeführt werden.

Definition von F_t und Besonderheiten der Doppel-Schrägverzahnung siehe DIN 3990 Teil 1, Ausgabe 12.87, Abschnitt 3.

c) Methoden C, D

Diese Methoden sind von Methode B abgeleitet. Die Einflußfaktoren Z_L , Z_v , Z_R , Z_W , Z_X werden dabei nach vereinfachten Ansätzen bestimmt.

d) Methode B_R

Die Werkstoffkennwerte werden durch Versuche mit Rollen ermittelt. Dabei sollen Größe und Richtung der Gleitgeschwindigkeit den Betriebsverhältnissen der Zahnflanken in den durch Grübchen gefährdeten Bereichen angepaßt sein.

Methode B_R kann man anwenden, wenn keine Festigkeitswerte aus Zahnradversuchen zur Verfügung stehen. Sie eignet sich insbesondere für die Ermittlung der Grübchentragsfähigkeit unterschiedlicher Werkstoffe relativ zueinander.

2.2.2 Bestimmung der zulässigen Flankenpressung σ_{HP} für die Dauerfestigkeit und die statische Festigkeit nach Methode B

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{H \text{ lim}} \cdot Z_{NT}}{S_{H \text{ min}}} \cdot Z_L \cdot Z_v \cdot Z_R \cdot Z_W \cdot Z_X$$

$$= \frac{\sigma_{HG}}{S_{H \text{ min}}} \quad (2.04)$$

Hierin ist

$\sigma_{H \text{ lim}}$ **Dauerfestigkeitswert für Flankenpressung** (siehe Abschnitt 7 und DIN 3990 Teil 5)
(Einfluß von Werkstoff, Wärmebehandlung und Oberfläche des Standard-Referenz-Prüfrades)

Z_{NT} **Lebensdauerfaktor für Flankenpressung** (siehe Abschnitt 8)
(berücksichtigt die höhere Tragfähigkeit für eine begrenzte Anzahl von Lastwechseln)

σ_{HG} **Grübchen-Grenzfestigkeit** = $\sigma_{HP} \cdot S_{H \text{ min}}$

$S_{H \text{ min}}$ **Geforderter Mindest-Sicherheitsfaktor für Flankenpressung**

Die Faktoren Z_L , Z_R , Z_v erfassen gemeinsam den Einfluß des Ölfilmes auf die Flankenfestigkeit.

Z_L **Schmierstofffaktor** (siehe Abschnitt 9)
(Einfluß des Schmierstoffes – Viskosität)

Z_R **Rauheitsfaktor** (siehe Abschnitt 9)
(Einfluß der Oberflächenrauheit)

Z_v **Geschwindigkeitsfaktor** (siehe Abschnitt 9)
(Einfluß der Umfangsgeschwindigkeit)

Z_W **Werkstoffpaarungsfaktor** (siehe Abschnitt 10)
(berücksichtigt die Wirkung eines oberflächengehärteten o. ä. Gegenrades)

Z_X **Größenfaktor für Flankenpressung** (siehe Abschnitt 11)
(Einfluß der Zahnabmessungen auf die zulässige Flankenpressung)

a) σ_{HP} für die Dauerfestigkeit

Hierfür gilt Gleichung (2.04) mit $Z_{NT} = 1$ sowie $S_{H \text{ min}}$, Z_L , Z_v , Z_R , Z_X und Z_W für die Dauerfestigkeit nach Methode B.

b) σ_{HP} für die statische Festigkeit

Hierfür gilt Gleichung (2.04) mit Z_{NT} , $S_{H \text{ min}}$, Z_L , Z_v , Z_R , Z_X und Z_W für die statische Festigkeit nach Methode B.

2.2.3 Bestimmung der zulässigen Flankenpressung σ_{HP} für die Zeitfestigkeit nach Methode B

Man bestimmt σ_{HP} – nach Methode B – durch grafische oder rechnerische Interpolation zwischen dem Wert für die Dauerfestigkeit nach Unterabschnitt 2.2.2 a) und dem Wert für die statische Festigkeit nach Unterabschnitt 2.2.2 b) für die betreffende Lastwechselzahl N_L aus dem Verlauf der Wöhlerlinie. Siehe hierzu Lebensdauerfaktor, Abschnitt 8.

a) Grafische Bestimmung

Man berechnet σ_{HP} für die Dauerfestigkeit und die statische Festigkeit nach Abschnitt 2.2.2 und zeichnet die Wöhlerlinie entsprechend dem Lebensdauerfaktor Z_{NT} . Prinzip siehe Bild 2.1. Hieraus kann man σ_{HP} für die betreffende Anzahl der Lastwechsel ablesen.

b) Rechnerische Bestimmung

Man berechnet $\sigma_{HP \text{ dauer}}$ für die Dauerfestigkeit und $\sigma_{HP \text{ statisch}}$ für die statische Festigkeit nach Abschnitt 2.2.2 und bestimmt damit σ_{HP} – nach Methode B – für die Lastwechselzahl N_L im Zeitfestigkeitsbereich wie folgt:

– Bau- und Vergütungsstahl, perlitisches oder bainitisches Gußeisen mit Kugelgraphit, perlitischer Temperguß, ein- oder randschichtgehärteter Stahl, wenn eine gewisse Anzahl von Grübchen zulässig ist:

Zeitfestigkeitsbereich nach Bild 8.1: $6 \cdot 10^5 < N_L \leq 10^7$

$$\sigma_{HP} = \sigma_{HP \text{ dauer}} \cdot Z_N = \sigma_{HP \text{ dauer}} \cdot \left(\frac{3 \cdot 10^8}{N_L} \right)^{\exp} \quad (2.05)$$

$$\exp = 0,3705 \cdot \log \frac{\sigma_{HP \text{ statisch}}}{\sigma_{HP \text{ dauer}}} \quad (2.06)$$

Zeitfestigkeitsbereich nach Bild 8.1: $10^7 < N_L \leq 10^9$

$$\sigma_{HP} = \sigma_{HP \text{ dauer}} \cdot Z_N = \sigma_{HP \text{ dauer}} \cdot \left(\frac{10^9}{N_L} \right)^{\exp} \quad (2.07)$$

$$\exp = 0,2791 \cdot \log \frac{\sigma_{HP \text{ statisch}}}{\sigma_{HP \text{ dauer}}} \quad (2.08)$$

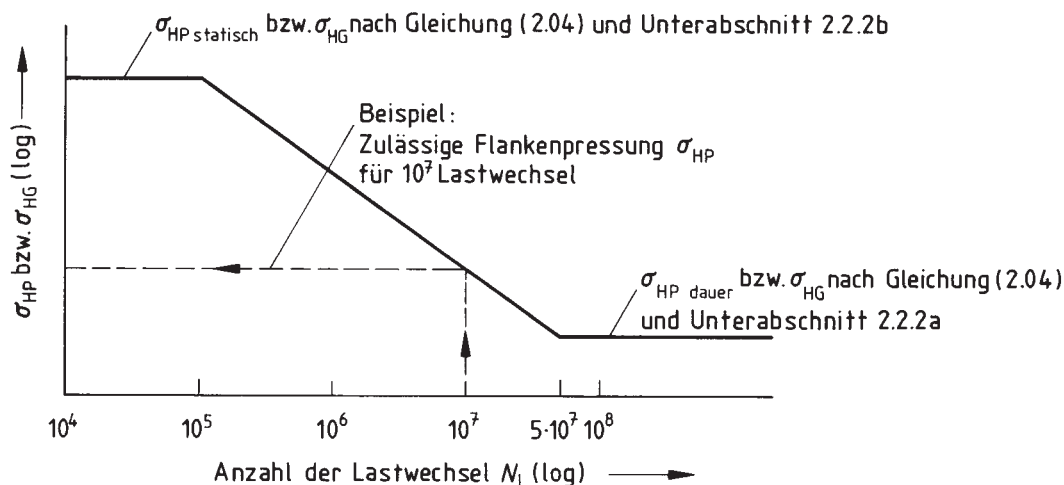


Bild 2.1. Grafische Bestimmung der zulässigen Flankenpressung für die Zeitfestigkeit (Prinzip) nach Methode B

- Bau- und Vergütungsstahl, perlitisches oder bainitisches Gußeisen mit Kugelgraphit, perlitischer Temperguß, ein-satz- oder randschichtgehärteter Stahl:
Zeitfestigkeitsbereich nach Bild 8.1: $10^5 < N_L \leq 5 \cdot 10^7$

$$\sigma_{HP} = \sigma_{HP \text{ dauer}} \cdot Z_N = \sigma_{HP \text{ dauer}} \cdot \left(\frac{5 \cdot 10^7}{N_L} \right)^{\text{exp}} \quad (2.09)$$

exp nach Gleichung (2.06)

- Vergütungsstahl oder Nitrierstahl, gasnitriert; Vergütungsstahl, nitrokarburiert; ferritisches Gußeisen mit Kugelgraphit, Grauguß:

Zeitfestigkeitsbereich nach Bild 8.1: $10^5 < N_L \leq 2 \cdot 10^6$

$$\sigma_{HP} = \sigma_{HP \text{ dauer}} \cdot Z_N = \sigma_{HP \text{ dauer}} \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^6}{N_L} \right)^{\text{exp}} \quad (2.10)$$

$$\text{exp} = 0,7686 \cdot \log \frac{\sigma_{HP \text{ statisch}}}{\sigma_{HP \text{ dauer}}} \quad (2.11)$$

2.2.4 Bestimmung der zulässigen Flankenpressung σ_{HP} nach den Methoden C, D

Hierfür gelten die Abschnitte 2.2.2 und 2.2.3 sinngemäß, wobei die Einflußfaktoren Z_L , Z_v , Z_R , Z_X und Z_W nach Methode C (bzw. D) bestimmt werden.

2.3 Rechnerischer Sicherheitsfaktor für die Flankenpressung (Grübschensicherheit) S_H

S_H wird **getrennt** für Ritzel und Rad berechnet.

$$S_H = \frac{\sigma_{HG}}{\sigma_H} \geq S_{H \text{ min}} \quad (2.12)$$

a) Methode B: Für Dauerfestigkeit und statische Festigkeit σ_{HG} nach Gleichung (2.04) und Unterabschnitt 2.2.2 a) und b). Für Zeitfestigkeit σ_{HG} nach Gleichung (2.04) und Abschnitt 2.2.3. – σ_H für das Ritzel nach Gleichung (2.01), für das Rad nach Gleichung (2.03); (siehe Einleitung zu Abschnitt 2.1).

b) Methoden C, D: σ_{HG} nach Gleichung (2.04) und Abschnitt 2.2.4. – σ_H wie in Unterabschnitt 2.3 a).

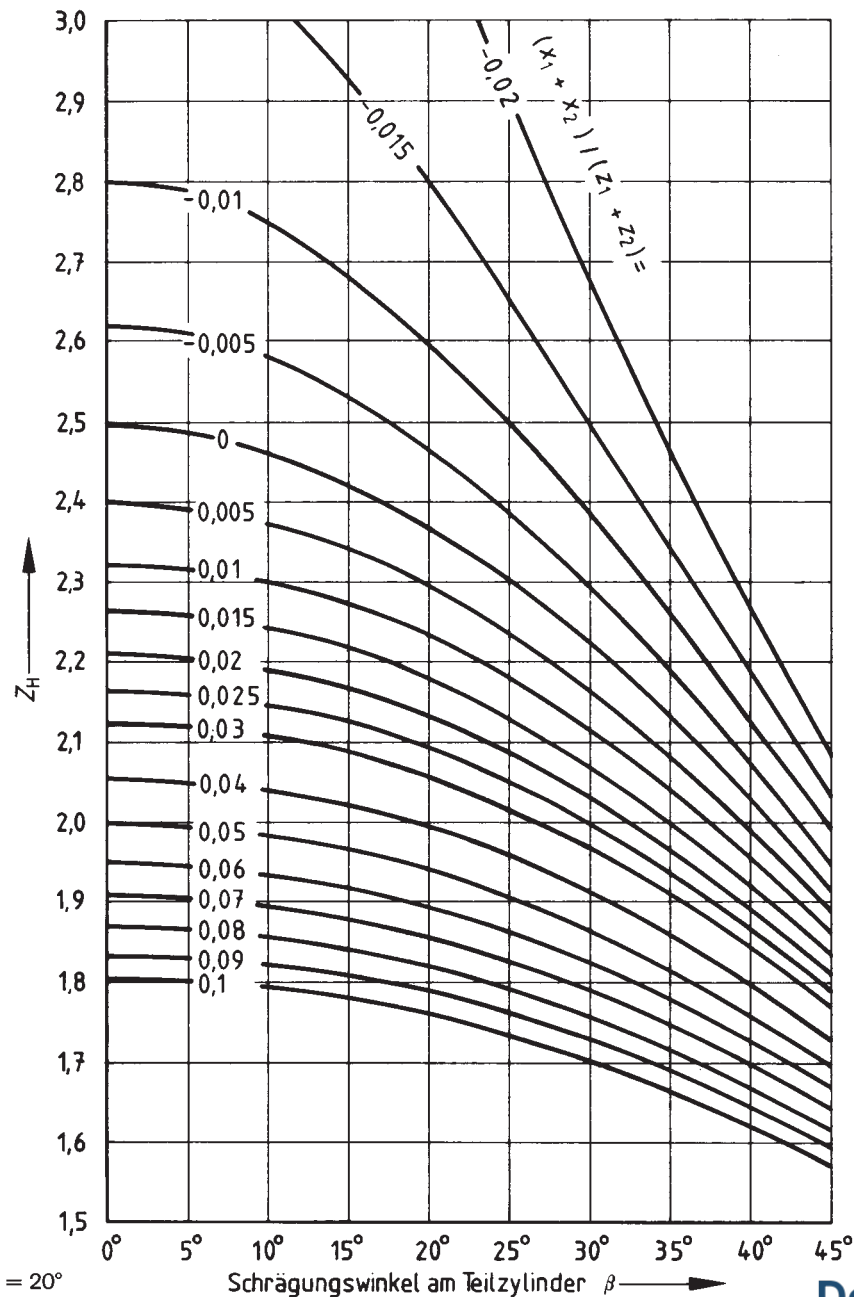


Bild 3.1.
Zonenfaktor Z_H für $\alpha_n = 20^\circ$

Anmerkung: Dies ist die rechnerische Sicherheit hinsichtlich der Flankenpressung (Hertzsche Pressung). Die Sicherheit bezüglich des übertragbaren Momentes ist gleich dem Quadrat von S_H .

Hinweise auf Zahlenwerte für den Mindest-Sicherheitsfaktor oder das Schadensrisiko (Schadenswahrscheinlichkeit) siehe Abschnitt 1 und DIN 3990 Teil 1, Ausgabe 12.87, Abschnitt 1.2.

3 Zonenfaktor Z_H , Einzeleingriffsfaktoren Z_B , Z_D

Diese Faktoren berücksichtigen den Einfluß der Zahnflankenkrümmung auf die Flankenpressung.

3.1 Zonenfaktor Z_H

Der Zonenfaktor Z_H berücksichtigt den Einfluß der Zahnflankenkrümmung im Wälzpunkt auf die Flankenpressung und die Umrechnung der Umfangskraft am Teilzylinder auf die Normalkraft am Wälzzylinder.

a) Grafische Bestimmung

Für Außen- und Innenverzahnungen mit Normaleingriffswinkeln $\alpha_n = 20^\circ$, $22,5^\circ$ oder 25° kann Z_H in Abhängigkeit von $(x_1 + x_2)/(z_1 + z_2)$ und β den Bildern 3.1 bis 3.3 entnommen werden.

b) Rechnerische Bestimmung

$$Z_H = \sqrt{\frac{2 \cdot \cos \beta_b \cdot \cos \alpha_{wt}}{\cos^2 \alpha_t \cdot \sin \alpha_{wt}}} \quad (3.01)$$

3.2 Einzeleingriffsfaktoren Z_B und Z_D für $\varepsilon_\alpha \leq 2$

Die Einzeleingriffsfaktoren Z_B und Z_D dienen bei Geradverzahnung zur Umrechnung der Flankenpressung im Wälzpunkt C auf die Flankenpressung im inneren Einzeleingriffspunkt B des Ritzels bzw. im inneren Einzeleingriffspunkt D des Rades, wenn $Z_B > 1$ bzw. $Z_D > 1$ ist. Siehe Bild 3.4 und Einleitung zu Abschnitt 2.

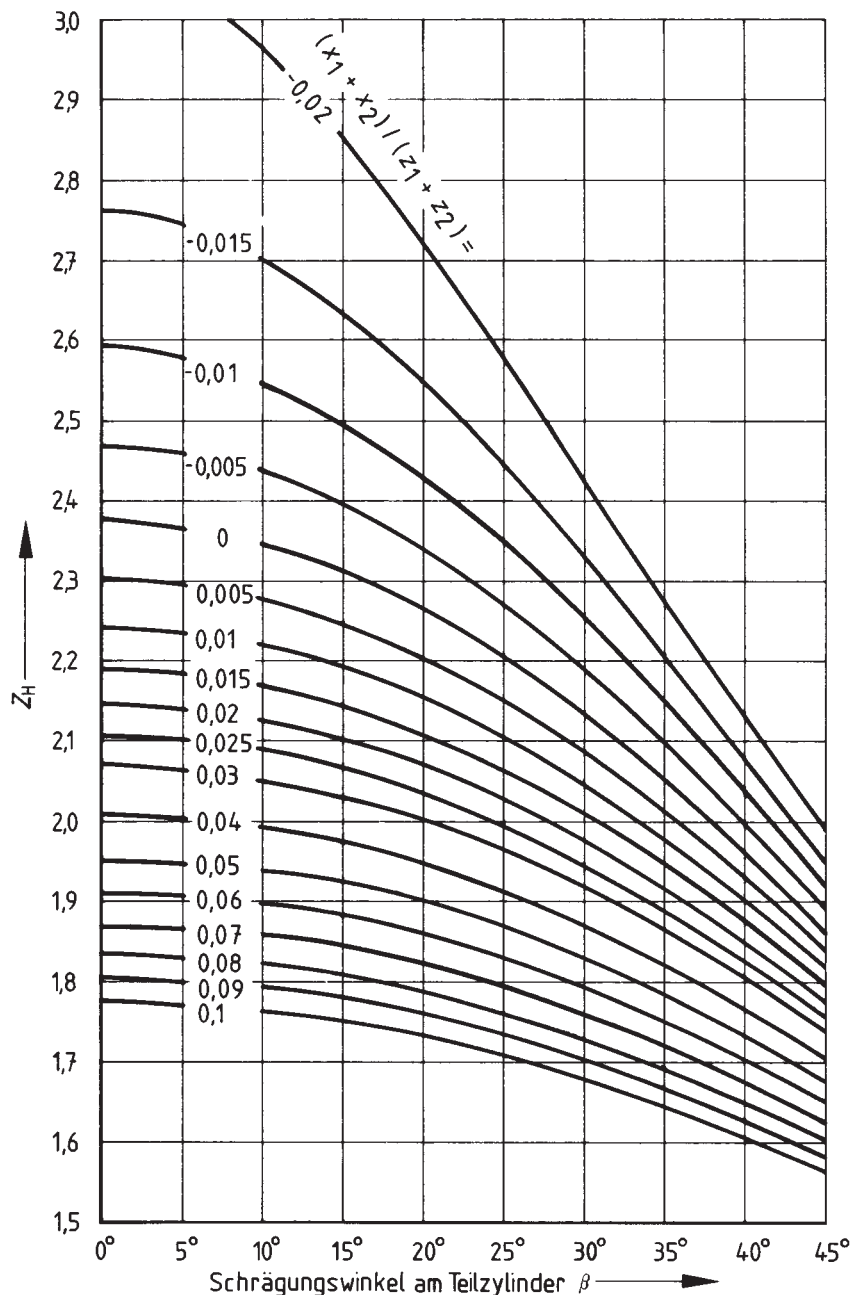


Bild 3.2. Zonenfaktor Z_H für $\alpha_n = 22,5^\circ$