

Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern

Dauerfestigkeitswerte und Werkstoffqualitäten

DIN
3990
Teil 5

Calculation of load capacity of cylindrical gears; endurance limits and material qualities

Kursivgedruckte Textteile sind Angaben, die zur unmittelbaren Berechnung nicht erforderlich sind, wohl aber zur Kenntnis des Anwendungsbereiches dieser Norm sowie der Diagramme und Tabellen.

Zusammenhang mit den vom ISO/TC 60, Verzahnungen, verabschiedeten Fassungen für ISO/DIS 6336/1 bis ISO/DIS 6336/5 siehe Erläuterungen in DIN 3990 Teil 1.

Die Dauerfestigkeitswerte nach dieser Norm können sehr stark schwanken. Die Gründe hierfür sind Unregelmäßigkeiten und Schwankungen der chemischen Zusammensetzung (Charge), des Gefüges, der Wärmebehandlung, des Werkstoff-Ausgangszustandes (zum Beispiel Stangenmaterial oder Schmiedeteil, Verschmiedungsgrad), Höhe der Restspannungen usw.

Die wichtigsten Einflußgrößen und die Anforderungen an verschiedene Qualitätsstufen der Werkstoffe sind in Tabellen in Abschnitt 5.2 zusammengefaßt. Ihr Einfluß auf die Grübchen- und Zahnfußtragfähigkeit wird durch die Schaubilder in Abschnitt 4.4 dargestellt.

Grenzwerte der Freßbeanspruchung siehe DIN 3990 Teil 4.

In allen Berechnungen sind die Einheiten nach Abschnitt 2 einzusetzen.

In der vorliegenden Norm sind die derzeit überwiegend verwendeten Zahnradstähle und angewandten Wärmebehandlungsverfahren berücksichtigt. Diese Norm enthält keine Empfehlungen für die Auswahl bestimmter Werkstoffe, Wärmebehandlungsverfahren oder Herstellungsverfahren. Auch die Eignung der Werkstoffe hinsichtlich der Herstellung und Wärmebehandlung ist nicht Bestandteil dieser Norm.

Inhalt

	Seite		Seite
1 Anwendungsbereich und Zweck	1	4.3 Zahnfuß-Dauerfestigkeit $\sigma_{F \lim}$, σ_{FE}	3
2 Zeichen, Benennungen und Einheiten	2	4.4 Schaubilder für $\sigma_{H \lim}$ und $\sigma_{F \lim}$ bzw. σ_{FE}	4
3 Verfahren zur Ermittlung von Dauerfestigkeitswerten	2	5 Anforderungen an Werkstoffqualität und Wärmebehandlung	11
4 Richtwerte für die Dauerfestigkeit, Methode B ...	3	5.1 Allgemeines	11
4.1 Allgemeines	3	5.2 Anforderungen an die Qualität von üblichen Zahnradwerkstoffen und Wärmebehandlungen ...	11
4.2 Grübchen-Dauerfestigkeit $\sigma_{H \lim}$	3		

1 Anwendungsbereich und Zweck

In der vorliegenden Norm werden Verfahren zur Ermittlung der dauernd ertragbaren Flankenpressungen (Grübchen-Dauerfestigkeiten) und Zahnfußbeanspruchungen (Zahnfuß-Dauerfestigkeiten) sowie numerische Werte für beide Tragfähigkeiten angegeben. Darüber hinaus sind Anforderungen an Werkstoffqualität und Wärmebehandlung sowie Angaben über den Einfluß der Werkstoffqualität auf Grübchen- und Zahnfuß-Dauerfestigkeit enthalten.

Diese Norm gilt für die in DIN 3990 Teil 2 (Grübchentragfähigkeit) und DIN 3990 Teil 3 (Zahnfußtragfähigkeit) angegebenen Berechnungsverfahren sowie für die hiervon abgeleiteten Berechnungsverfahren für bestimmte Anwendungsgebiete (für Industriegetriebe, für Schnellaufgetriebe und Getriebe ähnlicher Anforderungen und für Schiffsgetriebe). Sie kann ebenfalls in Berechnungsverfahren für Kegelräder DIN 3991 Teil 2, z. Z. Entwurf (Grübchentragfähigkeit), und DIN 3991 Teil 3, z. Z. Entwurf (Zahnfußtragfähigkeit), angewandt werden.

Die in der vorliegenden Norm aufgeführten Angaben sind auf alle Arten von Zahnradern, Bezugsprofilen, Profilabmessungen, Ausführungen usw. anwendbar, die in den genannten Normen enthalten sind.

Fortsetzung Seite 2 bis 19

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

2 Zeichen, Benennungen und Einheiten

$f_{t\alpha}$	Profil-Formabweichung	μm
m	Modul	mm
$q_{sT} = s_{Fn}/(2 \cdot q_F)$	Kerbparameter des Standard-Referenz-Prüfades	–
s_{Fn}	Zahnfußsehne im Berechnungsquerschnitt	mm
Eht	Einsatzhärtungtiefe	mm
HB	Brinellhärte	–
HRC	Rockwellhärte (C-Skala)	–
HR 30 N	Rockwellhärte (Verfahren 30 N)	–
HV	Vickershärte	–
HV 1	Vickershärte bei einer Belastung $F = 9,81 \text{ N}$	–
HV 10	Vickershärte bei einer Belastung $F = 98,10 \text{ N}$	–
K_v	Dynamikfaktor	–
K_A	Anwendungsfaktor	–
$K_{F\alpha}$	Stirnfaktor (Fuß); berücksichtigt die Kraftaufteilung auf mehrere Zähne	–
$K_{F\beta}$	Breitenfaktor (Fuß); berücksichtigt die Kraftverteilung über die Zahnbreite	–
$K_{H\alpha}$	Stirnfaktor (Flanke); berücksichtigt die Kraftaufteilung auf mehrere Zähne	–
$K_{H\beta}$	Breitenfaktor (Flanke); berücksichtigt die Kraftverteilung über die Zahnbreite	–
ME } MQ } ML }	Symbole, die die Anforderungen an Werkstoff und Wärmebehandlung kennzeichnen	–
R_z	Gemittelte Rauhtiefe	μm
$Y_{R \text{ rel } T}$	Relativer Oberflächenfaktor (bezogen auf das Standard-Referenz-Prüfrad)	–
Y_{ST}	Spannungskorrekturfaktor des Standard-Referenz-Prüfades	–
Y_X	Größenfaktor (Fuß)	–
Y_β	Schrägenfaktor (Fuß)	–
$Y_{\delta \text{ rel } T}$	Relative Stützziffer (bezogen auf das Standard-Referenz-Prüfrad)	–
Z_v	Geschwindigkeitsfaktor	–
Z_L	Schmierstofffaktor	–
Z_R	Rauheitsfaktor für Grübchentragsfähigkeit	–
Z_W	Werkstoffpaarungsfaktor	–
Z_X	Größenfaktor (Flanke)	–
Z_β	Schrägenfaktor (Flanke)	–
δ_S	Bruchdehnung	%
q_F	Fußrundungsradius im Berechnungsquerschnitt	mm
σ_B	Zugfestigkeit	N/mm^2
$\sigma_{F \text{ lim}}$	Zahnfuß-Dauerfestigkeit (Dauerfestigkeitswert für Zahnfuß-Biegeennspannung)	N/mm^2
σ_{FE}	Zahnfuß-Grundfestigkeit	N/mm^2
$\sigma_{H \text{ lim}}$	Grübchen-Dauerfestigkeit (Dauerfestigkeit für Flankenpressung)	N/mm^2
σ_S	Streckgrenze	N/mm^2
$\sigma_{0,2}$	Spannung bei 0,2% bleibender Dehnung	N/mm^2
ψ	Brucheinschnürung	%

3 Verfahren zur Ermittlung von Dauerfestigkeitswerten

Die Dauerfestigkeitswerte sollen für jeden Werkstoff und Werkstoffzustand möglichst durch Laufversuche mit Zahnradern ermittelt werden. Die Prüfbedingungen und Prüfradabmessungen sollen den Abmessungen und Betriebsbedingungen der zu berechnenden Zahnradgetriebe möglichst nahe kommen.

Bei der Auswertung von Versuchsergebnissen oder Betriebserfahrungen ist stets zu prüfen, ob gewisse Einflußfaktoren für die zulässigen Spannungen bereits in den Dauerfestigkeitswerten enthalten sind (bei der Grübchen-Dauerfestigkeit zum Beispiel Schmierstoffeinfluß, Flankenrauheit; bei der Zahnfuß-Dauerfestigkeit zum Beispiel Fußausrundungsradius, Rauheit in der Fußausrundung). In diesen Fällen sind die betreffenden Einflußfaktoren bei der zulässigen Spannung gleich eins zu setzen.

a) Methode A

Die Dauerfestigkeitswerte für die Grübchen- und Zahnfußtragsfähigkeit werden in Laufversuchen mit Zahnradern ermittelt, deren Abmessungen den ausgeführten Rädern gleich oder ähnlich sind; die Prüfbedingungen sind gleich oder annähernd gleich den Betriebsbedingungen.

b) Methode B

Die Dauerfestigkeitswerte für die Grübchen- und Zahnfußtragsfähigkeit werden aufgrund von Versuchen mit Standard-Referenz-Prüfrädern unter Standard-Prüfbedingungen ermittelt. Zur Ermittlung der Biegespannung werden auch Pulsatorversuche mit Zahnradern herangezogen. Praktische Erfahrungen sind zu berücksichtigen. Die Richtwerte für die Dauerfestigkeit in den Abschnitten 4.2 und 4.3 beruhen auf solchen Versuchen und Erfahrungen.

In die Felder der Dauerfestigkeitswerte sind drei verschiedene Stufen ME, MQ und ML eingetragen. Die Auswahl der Stufe hängt von Herstellung und Qualitätskontrolle, wie in Abschnitt 5 beschrieben, ab.

c) Methode B_R

Die Dauerfestigkeitswerte für die Grübchentragsfähigkeit werden in Versuchen mit Prüfrollen an Rollenprüfständen ermittelt. Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse muß der Einfluß des Schlupfes nach Betrag und Richtung (positiv oder negativ) berücksichtigt werden. Diese Versuchsergebnisse sind hauptsächlich für eine vergleichende Beurteilung der Grübchentragsfähigkeit von Werkstoffen geeignet. – Angaben über die verschiedenen Werkstoffe müssen aus eigener Erfahrung gewonnen oder dem Schrifttum, siehe zum Beispiel Verzeichnis Zitierte Normen und andere Unterlagen, entnommen werden.

d) Methode B_K

Die Dauerfestigkeitswerte für Biegebeanspruchung werden anhand von Versuchen mit gekerbten Proben ermittelt. Die Kerbradien sollen möglichst (bezogen auf die Probendicke) im Bezug zu den Verhältnissen an üblichen Zahnfußausrundungen stehen. Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse muß berücksichtigt werden, daß die Proben gewöhnlich mit reiner Wechsellast beaufschlagt werden, während in der Fußausrundung eines Zahnes eine Kombination aus schwerelnder Biegebeanspruchung, Druck und Schub auftritt. – Angaben über die verschiedenen Werkstoffe müssen aus eigener Erfahrung gewonnen oder dem Schrifttum, siehe zum Beispiel Verzeichnis Zitierte Normen und andere Unterlagen, entnommen werden.

e) Methode B_P

Die Dauerfestigkeitswerte für Biegebeanspruchung werden anhand von Versuchen mit ungekerbten Proben ermittelt. Zur Auswertung der Versuchsergebnisse siehe Unterabschnitt d). Um den Einfluß der Kerbempfindlichkeit zu berücksichtigen, müssen tatsächliche Kerbform und Kerbfaktoren in die Rechnung eingehen. Die Ergebnisse der Berechnung werden daher von der starken Unsicherheit dieser Faktoren beeinflusst. – Angaben über die verschiedenen Werkstoffe müssen aus eigener Erfahrung gewonnen oder dem Schrifttum, siehe zum Beispiel Verzeichnis Zitierte Normen und andere Unterlagen, entnommen werden.

4 Richtwerte für die Dauerfestigkeit, Methode B

4.1 Allgemeines

Die in den Bildern 1 bis 5 dargestellten Dauerfestigkeitswerte beruhen auf der Annahme, daß Werkstoffzusammensetzung und Wärmebehandlung der Baugröße der Zahnräder angepaßt sind.

Die Angaben sind durch Versuche und durch praktische Erfahrung gut belegt. Abhängig von der Ausrüstung des Herstellers und von seiner Erfahrung sind höhere oder niedrigere Werte möglich.

Die Werte gelten für eine Schadenswahrscheinlichkeit von 1%. Man kann sie nach statistischen Auswertungen von Versuchsergebnissen [2], [3] auf andere Schadenswahrscheinlichkeiten umrechnen (zum Beispiel bei Fahrzeuggetrieben ist 10% üblich).

Die für die Konturhärteverfahren (außer Nitrieren und Nitrokarburieren) angegebenen Dauerfestigkeitswerte gelten für Einhärtungstiefen von $0,15 \cdot m_n$ oder etwas mehr am fertigen bearbeiteten Rad. Eine zu hohe Einhärtungstiefe kann die Dauerfestigkeit herabsetzen. Zur Definition einer „optimalen Einhärtungstiefe“ siehe Fußnote 11), Tabelle 5.

Die für die nitrierten Prüfräder angegebenen Dauerfestigkeitswerte gelten für Nitrierhärte-tiefen von 0,4 bis 0,6 mm.

Für konturgehärtete, nitrierte und nitrokarburierte Zahnräder läßt sich kaum ein Einfluß der Oberflächenhärte auf die Dauerfestigkeit angeben. Für die Dauerfestigkeit hat vielmehr die Werkstoffbeschaffenheit an der Oberfläche einen wesentlichen Einfluß. Herstellungsmängel wie Randentkohlung, Randoxidation und örtliche Anlaßwirkung durch Schleifen, Schleifkerben (im Zahnfuß) sowie starke Riefen, Härterisse, Schleifrisse können die Dauerfestigkeit aller Werkstoffe erheblich mindern.

Für die Stufen der Werkstoffqualität MQ und ME darf man teilweise nicht den gesamten Härtebereich der Felder zulassen. Die eingeengten Bereiche sind durch die Länge der Balken (MQ) und durch Haken an der Obergrenze der Felder (ME) gekennzeichnet.

Für randschichtgehärtete Stähle wurde die HV1-Skala als Haupt-Bezugsachse gewählt. Die HRC-Skala dient zum Vergleich. Zwischen Vickers- und Rockwellhärte besteht kein fester Zusammenhang; für die Darstellungen wurden die Umwertungstabellen nach DIN 50 150 verwendet.

4.2 Grübchen-Dauerfestigkeit $\sigma_{H \lim}$

$\sigma_{H \lim}$ ist der Grenzwert der dauernd ertragbaren Flankenpressung. Für die meisten Werkstoffe wird die Mindest-Lastwechselzahl von $5 \cdot 10^7$ als Beginn des Dauerfestigkeitsgebietes betrachtet (siehe Lebensdauerfaktor in DIN 3990 Teil 2).

Die in den Bildern 1a bis 5a angegebenen $\sigma_{H \lim}$ -Werte gelten für folgende Maße des Standard-Referenz-Prüfrades und Standard-Betriebsbedingungen:¹⁾

Achsabstand $a = 100$ mm,

Schrägungswinkel $\beta = 0^\circ$ ($Z_\beta = 1$),

Modul $m = 3$ bis 5 mm ($Z_X = 1$),

Rautiefe an den Zahnflanken $R_z = 3$ μ m ($Z_R = 1$),

Umfangsgeschwindigkeit $v = 10$ m/s ($Z_v = 1$),

Ölviskosität $\nu_{50} = 100$ mm²/s ($Z_L = 1$),

gleicher Gegenradwerkstoff ($Z_W = 1$),

Verzahnungsqualität: 4 bis 6 nach DIN 3962

Kraftfaktoren $K_A = K_V = K_{H\beta} = K_{H\alpha} = 1$.

Ein Grübchenschaden ist unter den genannten Versuchsbedingungen²⁾ definiert, wenn

- bei ungehärteten Zahnrädern 2% der gesamten aktiven Flankenfläche
- bei oberflächengehärteten Zahnrädern 0,5% der gesamten aktiven Flankenfläche oder 4% der Flankenfläche eines Zahnes

durch Grübchen ausgefallen sind.

4.3 Zahnfuß-Dauerfestigkeit $\sigma_{F \lim}$, σ_{FE}

$\sigma_{F \lim}$ ist der Grenzwert der dauernd ertragbaren, örtlich schnellend auftretenden Biegeennspannung im Zahnfuß.

σ_{FE} ist der Grenzwert der dauernd ertragbaren Grundspannung (Nenn-Biegeschwell-Dauerfestigkeit einer ungekerbten Probe bei voller Elastizität des Werkstoffes: $\sigma_{FE} = \sigma_{F \lim} \cdot Y_{ST}$. Spannungskorrekturfaktor am Standard-Referenz-Prüfrad: $Y_{ST} = 2,0$).

Die Mindest-Lastwechselzahl von $3 \cdot 10^6$ wird als Beginn des Dauerfestigkeitsgebietes betrachtet (siehe Lebensdauerfaktor in DIN 3990 Teil 3).

Die in den Bildern 1b bis 5b angegebenen $\sigma_{F \lim}$ - und σ_{FE} -Werte gelten für folgende Maße des Standard-Referenz-Prüfrades und Standard-Betriebsbedingungen:¹⁾

Modul $m = 3$ bis 5 mm ($Y_X = 1$),

Schrägungswinkel $\beta = 0^\circ$ ($Y_\beta = 1$),

Spannungskorrekturfaktor $Y_{ST} = 2,0$,

Kerbparameter $q_{sT} = 2,5$ ($Y_{\delta \text{ rel } T} = 1$),

Rautiefe im Zahnfuß $R_z = 10$ μ m ($Y_{R \text{ rel } T} = 1$),

Verzahnungsqualität: 4 bis 7 nach DIN 3962

Bezugsprofil nach DIN 867,

Zahnbreite $b = 10$ bis 50 mm,

Kraftfaktoren $K_A = K_V = K_{F\beta} = K_{F\alpha} = 1$.

Die in den Bildern 1b bis 5b angegebenen Dauerfestigkeitswerte gelten für Zahnräder mit gleichbleibender Belastungsrichtung (Schwellbeanspruchung). Bei wechselnder Zahnfußbeanspruchung (Zwischenräder, Planetenräder, kann $0,7 \cdot \sigma_{F \lim}$ oder $0,7 \cdot \sigma_{FE}$ eingesetzt werden. In jedem Fall ist es ratsam, kleinere Werte zu verwenden, wenn der Fußrundungsradius klein bezogen auf den Modul ist.

Bei Wechsel der Kraftrichtung in längeren Perioden sind höhere Werte als für Zwischenräder zulässig [4].

1) Bei abweichenden Verhältnissen wurden die Versuchsergebnisse auf die Standardbedingungen umgerechnet. Es ist zu beachten, daß $\sigma_{H \lim}$ nicht die Hertzsche Pressung bei Dauerbelastung, sondern die dauernd ertragbare Flankenpressung ist, die nach DIN 3990 Teil 2 hergeleitet wird.

2) Die Prozentangaben beziehen sich auf die Auswertung der Versuche. Sie sind nicht als Schadenskriterium für ausgeführte Zahnräder zu betrachten. Siehe DIN 3990 Teil 1, Ausgabe 12.87, Abschnitt 1.

4.4 Schaubilder für $\sigma_{H \text{ lim}}$ und $\sigma_{F \text{ lim}}$ bzw. σ_{FE} ³⁾

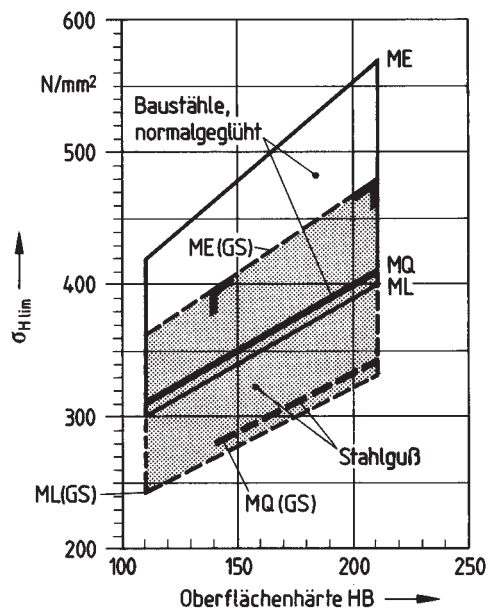


Bild 1 a. Baustähle, normalgeglüht und Stahlguß, Grübchen-Dauerfestigkeit (siehe Hinweis in Tabelle 1)

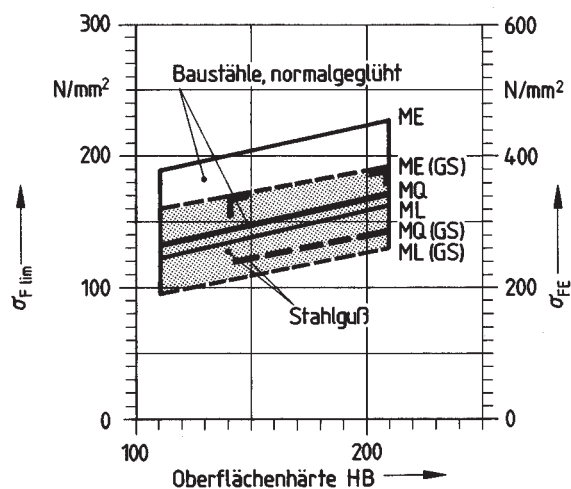
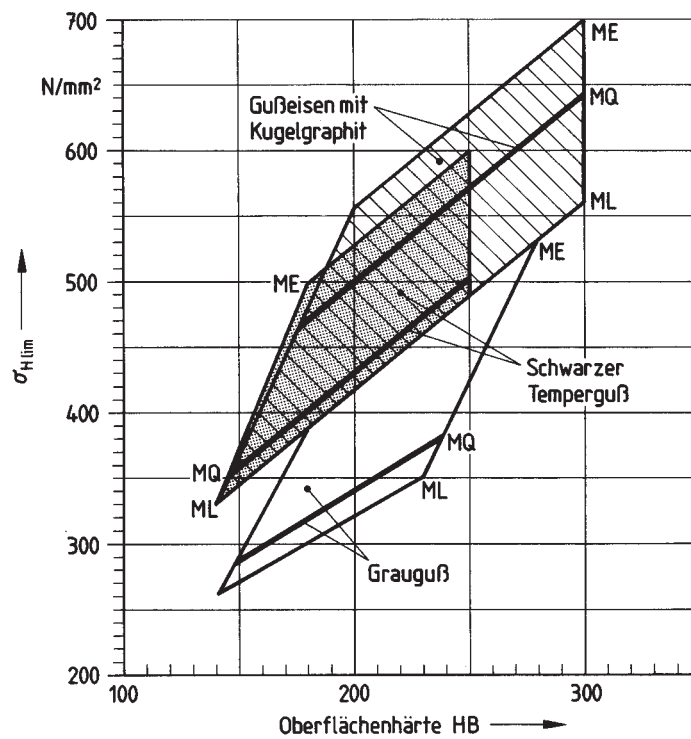
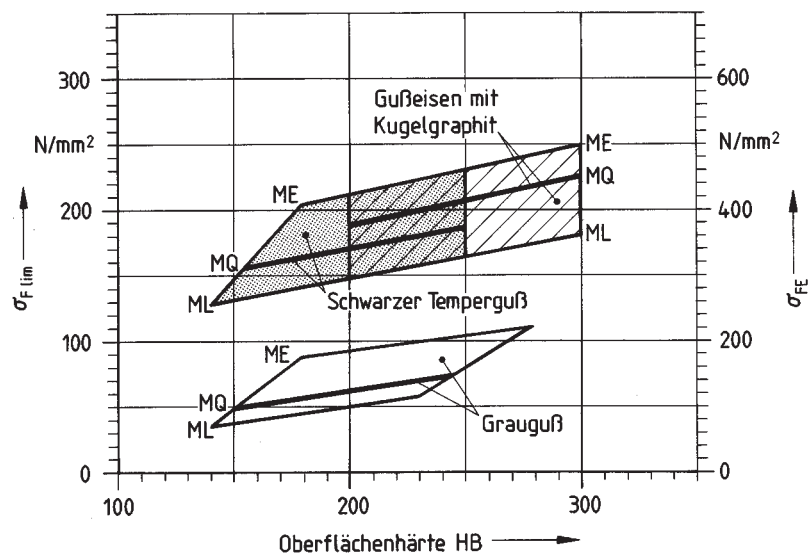


Bild 1 b. Baustähle, normalgeglüht und Stahlguß, Zahnfuß-Dauerfestigkeit (siehe Hinweis in Tabelle 1)

³⁾ Bei Härtewerten oberhalb der in den Bildern 1 bis 5 angegebenen Grenzen der Felder sind aufgrund jeweiliger Erfahrungen besondere Vereinbarungen zu treffen.

Bild 2a. Gußeisenwerkstoffe⁴⁾, Grubchen-DauerfestigkeitBild 2b. Gußeisenwerkstoffe⁴⁾, Zahnfuß-Dauerfestigkeit

⁴⁾ Bei Brinellhärte < 180 liegt ein großer Anteil Ferrit im Gefügebau vor. Dieser Bereich soll für Zahnräder vermieden werden.

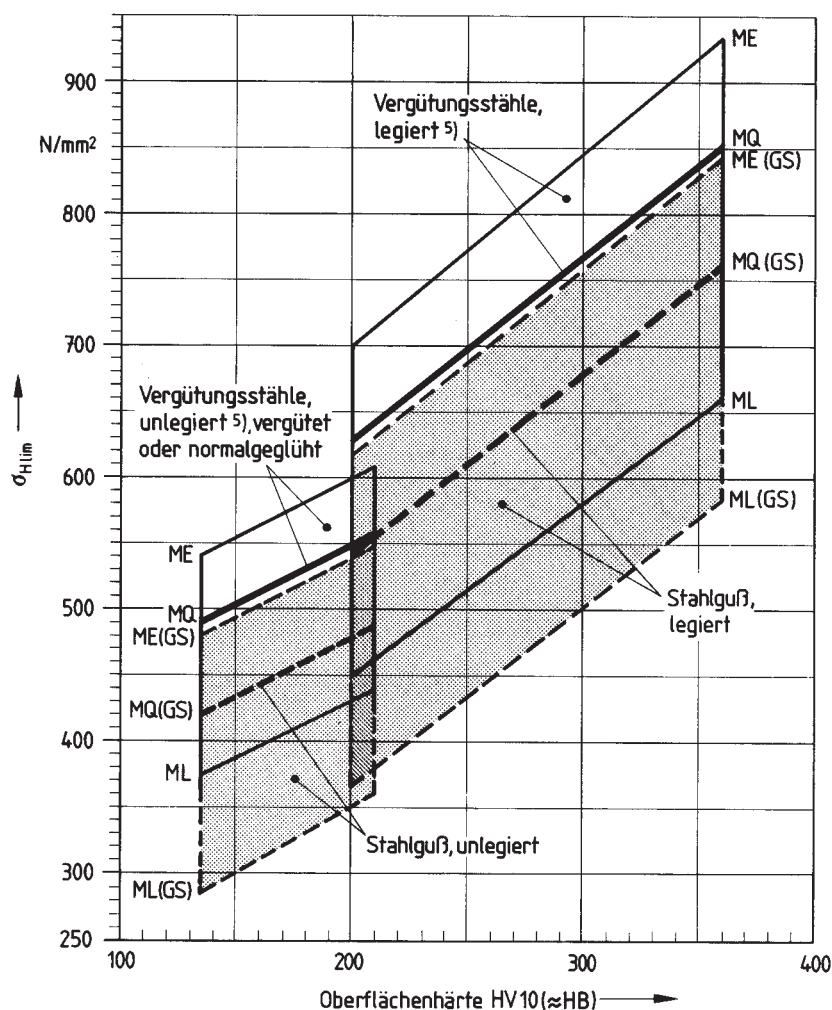


Bild 3a. Vergütungsstähle und Stahlguß, Grübchen-Dauerfestigkeit

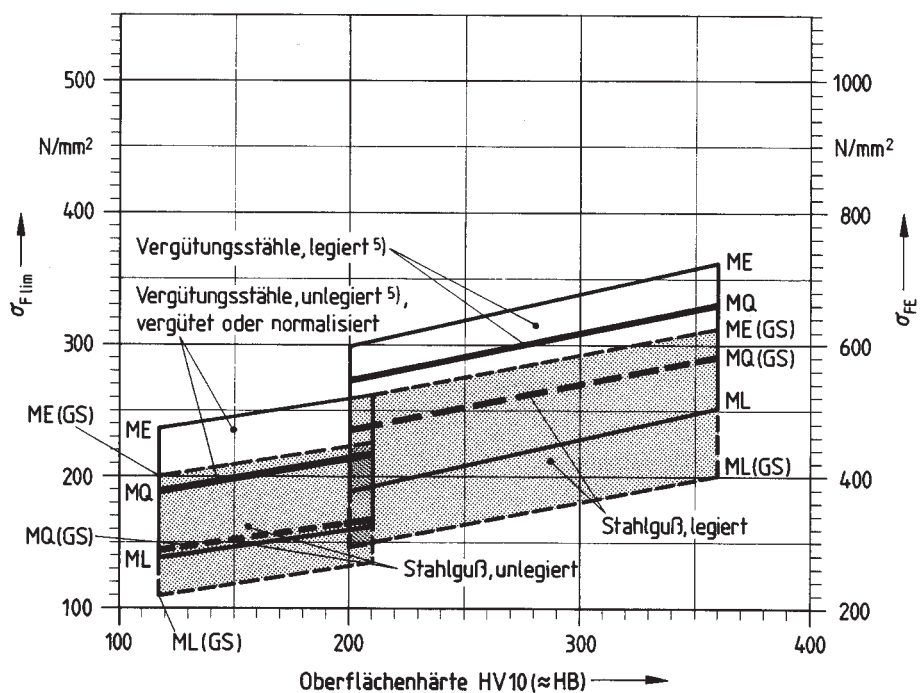


Bild 3b. Vergütungsstähle und Stahlguß, Zahnfuß-Dauerfestigkeit

⁵⁾ Kohlenstoffgehalt > 0,32 %