

Zur Problematik der Stähle höherer Festigkeit

Von W. Kloth, W. Bergmann und F. K. Naumann

Schon auf der ersten Tagung der Landmaschinenkonstrukteure, die im Jahre 1934 stattfand, wurde über die Verwendung von Stählen höherer Festigkeit gesprochen. Die Ergebnisse [1] wurden in **Bild 1 bis 3** zusammengefaßt und stellten eine klare Empfehlung der Baustähle höherer Festigkeit dar. Die deutsche Landmaschinenindustrie hat dann auch in weitem Umfange von diesen Stählen Gebrauch gemacht.

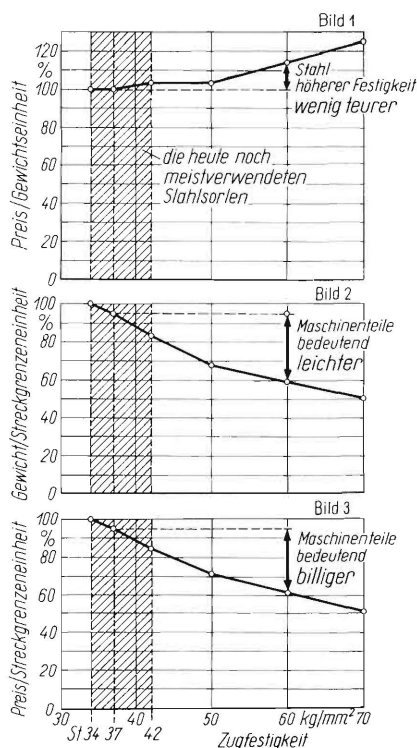


Bild 1 bis 3. Vorteile von Stählen höherer Festigkeit [1].
(bezogen auf Stahl St 37.11)

Bild 1. Stahl höherer Festigkeit kostet nur wenig mehr als z.B. Stahl St 37.11

Bild 2. Maschinenteile aus Stahl höherer Festigkeit sind bei gleichbleibender Sicherheit bedeutend leichter als z.B. aus Stahl St 37.11

Bild 3. Daher sind Maschinenteile aus Stahl höherer Festigkeit bedeutend billiger als z.B. Stahl St 37.11

Wenn heute wiederum von der Problematik der Stähle höherer Festigkeit gesprochen wird, so ist darauf hinzuweisen, daß inzwischen in großem Umfange eine Motorisierung der deutschen Landwirtschaft durchgeführt worden ist. Mit ihr sind die Kräfte in den Maschinen größer geworden, aber auch die Geschwindigkeiten, die Drehzahlen, die Stöße, die Schwingungen usw.. Es wird nun wieder die Frage gestellt, wie diesen veränderten Verhält-

nissen die Eigenschaften der Baustähle entsprechen und insbesondere, ob Stähle höherer Festigkeit unter diesen Betriebsumständen Vorteile bringen.

Diese Frage ist berechtigt, da bei den früheren ruhigeren Betriebsverhältnissen des Pferdezugesehltene und im wesentlichen zügige Spitzenkräfte die entscheidenden Beanspruchungen brachten und daher die Streckgrenze die maßgebende Werkstoffeigenschaft war. Heute treten jedoch bei den größeren Kräften und Geschwindigkeiten andere Beanspruchungsarten und demnach andere Werkstoffeigenschaften in den Vordergrund.

Natürlich sollen sich auch heute die Maschinen nicht unzulässig verformen oder gar brechen. Aber der Sprödbrech und besonders der Dauerbruch sind wichtiger geworden. Diese Beanspruchungsfälle sollen nacheinander besprochen werden.

Elastische Verformung

Bild 4 zeigt schematisch die Spannungs-Dehnungsdiagramme zweier Stähle verschiedener Festigkeit [1]. Im linken Teil liegen die Kurven übereinander, was ein Ausdruck dafür ist, daß der Elastizitätsmodul aller Stähle etwa gleichgroß ist. Bei der Streckgrenze biegen dann die Kurven nach rechts ab, bei dem Stahl niedrigerer Festigkeit früher als bei demjenigen höherer Festigkeit. Auch die Bruchfestigkeiten selbst sind verschieden groß. Für die Anwendung der Stähle im elastischen Gebiet sagt das Diagramm, daß die Verformung in Abhängigkeit von der Last bei beiden Stählen die gleiche ist,

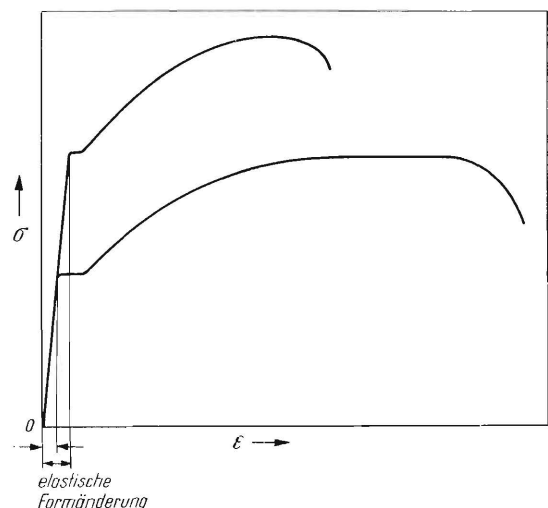


Bild 4. Formänderung von Stählen verschiedener Festigkeit im Spannungs-Dehnungs-Diagramm (schematisch).

daß es also keinen Vorteil bringt, einen Stahl höherer Festigkeit zu verwenden, wenn die elastische Verformung klein sein soll. Allerdings kann man den letzteren Stahl im Höchstbetrug stärker elastisch verformen, da die Streckgrenze höher liegt.

Plastische Verformung, Bruch, Zähigkeit

Bei Gewaltbeanspruchungen, die bei den Landmaschinen keine Seltenheit sind, sei es nun, daß der Pflug gegen einen Stein stößt, oder eine Verstopfung im Binder auftritt, wird man nur selten einen vollständigen Bruch eines Maschinenteiles feststellen. In der Regel treten in solchen Fällen Verbiegungen, Verdrehungen oder sonstige plastische Verformungen ein. Für solche Zähigkeitseigenschaften sind die Streckgrenze, die Bruchdehnung, die Einschnürung oder die Kerbschlagzähigkeit maßgebend.

Es gibt nun zwei Möglichkeiten, um zu Stählen höherer Festigkeit zu gelangen, einmal durch Erhöhen des Kohlenstoffgehaltes oder Legieren mit solchen Metallen, die im Eisen löslich sind (wie Silizium und Mangan), und zweitens durch Vergüten, wobei nötigenfalls die Härbarkeit durch Legierungszusätze, wie Mangan, Nickel, Chrom, Molybdän und andere verbessert werden kann.

Den Einfluß steigenden Kohlenstoffgehaltes auf die mechanischen Kennwerte gibt Bild 5 wieder. Die Zugfestigkeit des geglühten Stahles steigt danach ungefähr linear mit dem Kohlenstoffgehalt an. Auch die Streckgrenze steigt, aber weniger stark als die Festigkeit. Das Verhältnis von Streckgrenze:Zugfestigkeit, das sogenannte Streckgrenzenverhältnis, nimmt daher mit steigendem Kohlenstoffgehalt ab, und zwar von 60% der Zugfestigkeit bei 0,1% C, auf 50% bei 0,9% C.

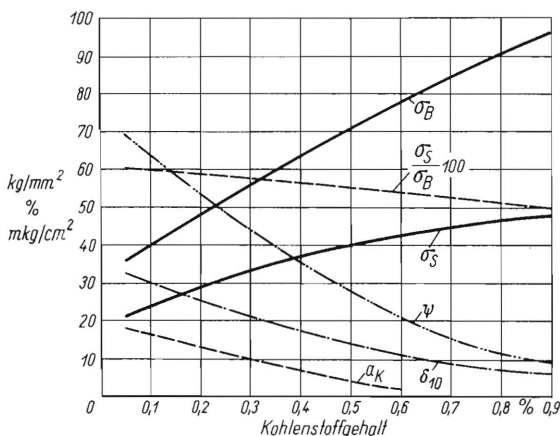


Bild 5. Festigkeitswerte gewalzter unlegierter Stähle [2].

- σ_B Zugfestigkeit in kg/mm²
- σ_S Streckgrenze in kg/mm²
- $\frac{\sigma_S}{\sigma_B}$ 100 Streckgrenzenverhältnis in %
- δ_{10} Bruchdehnung in %
- ψ Einschnürung in %
- α_K Kerbschlagzähigkeit in mkg/cm² an der Charpy-Probe 30 × 30 × 160 mm

Die Verformbarkeit oder Zähigkeit, gekennzeichnet durch die Bruchdehnung, die Einschnürung und die Kerbschlagzähigkeit, sinkt mit steigendem Kohlenstoffgehalt ab. Bei 80 kg/mm² mittlerer Festigkeit, also im Bereich des Normstahles St 70, ist die Dehnung, die bei St 34 – einem weichen Schraubenstahl – noch 25–30% beträgt, schon auf etwa 10% gesunken und die Kerbschlagzähigkeit, bestimmt an der großen Charpy-Probe, beträgt nur noch 3 kgm/cm². Eine weitere Steigerung der Festigkeit bis auf höchstens 90–100 kg/mm² ist auf diesem Wege nur noch unter Verzicht auf jede nennenswerte Schlagzähigkeit zu erreichen.

Je höher der Kohlenstoffgehalt ist, umso schlechter wird auch die Schweißbarkeit. Man kann auch Stähle mit höherem Kohlenstoffgehalt schweißen, aber die Anforderungen, welche an die Schweißer gestellt werden, können doch recht hoch werden.

Als zweite Möglichkeit der Festigkeitssteigerung wurde die Vergütung genannt. Dazu müssen die Stähle zunächst gehärtet und dann wieder angelassen werden. Das Härten muß aus einer Temperatur heraus erfolgen, die für jeden Stahl festliegt. Das Abschrecken geschieht je nach der Härbarkeit des Stahles und der Dicke des Werkstückes in Wasser, Öl oder Luft. Die Abkühlungsgeschwindigkeit sollte so hoch wie möglich gewählt und nur mit Rücksicht auf die Gefahr des Reißens und Verziehens durch Härtespannungen bei dünnen und verwickelt geformten Teilen begrenzt werden. Soweit es möglich ist, sollte man also in Wasser härten. Die Härbarkeit von Stahl kann durch Zusatz von Legierungselementen, wie Mangan, Chrom und Molybdän, verstärkt werden. Für dicke Stücke ist, wenn man volle Durchhärtung erzielen will, die Verwendung eines legierten Stahles erforderlich. Als ungefähre Grenze kann man vielleicht ein Rundmaterial von 30mm Ø annehmen. Wenn man trotzdem in der Praxis mitunter größere Querschnitte aus gewöhnlichem Kohlenstoffstahl härtet und vergütet, so nimmt man dabei in Kauf, daß der Kern von dieser Wärmebehandlung nicht mit erfaßt wird, also auch nicht die beabsichtigte Steigerung der Festigkeitseigenschaften erfährt. Mit dem Anlassen, welches auf das Härten folgt, kann man in weitem Maße die gewünschten Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften variieren. Bild 6 und 7 zeigen Schaubilder von einem Kohlenstoffstahl und einem Manganstahl mit gleichem Kohlenstoffgehalt. Der Kohlenstoffstahl ist in Wasser, der Manganstahl entsprechend seiner stärkeren Härbarkeit in Öl gehärtet. Der Vergütungsquerschnitt war in beiden Fällen 35 mm ϕ . In den Schaubildern sind die Festigkeitseigenschaften in Abhängigkeit von der Anlaßtemperatur aufgetragen. Streckgrenze und Zugfestigkeit werden mit steigender Anlaßtemperatur und -dauer herabgesetzt, die Zähigkeit entsprechend erhöht. Bemerkenswert ist

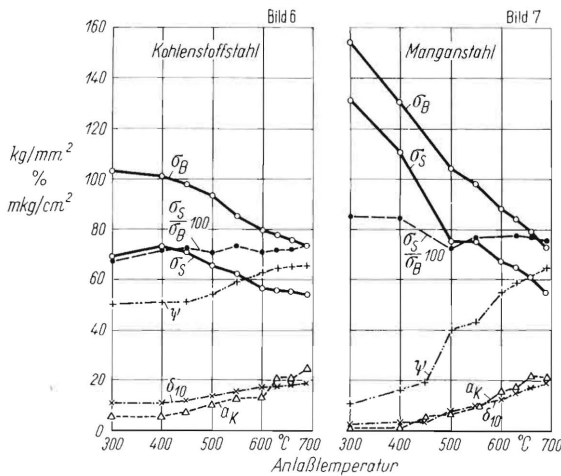


Bild 6 und 7. Vergütungsschaubilder nach E. Houdremont [3].
Bild 6. Kohlenstoffstahl mit 0,46 % C, 0,21 % Si, 0,80 % Mn, wasservergütet
Bild 7. Manganstahl mit 0,46 % C, 0,32 % Si, 1,40 % Mn, δ 1 vergütet

das gleichbleibend hohe Streckgrenzenverhältnis vergüteter Stähle. Die Streckgrenze erreicht bei dem vergüteten Kohlenstoffstahl 70% der Zugfestigkeit, bei dem stärker härtenden Manganstahl sogar 80%. Der Kohlenstoffstahl hat bei 100 kg/mm² Festigkeit und 70kg/mm² Streckgrenze noch 11 % Dehnung und 5 kgm/cm² Kerbschlagzähigkeit; bei 80 kg/mm² Festigkeit und 57 kg/mm² Streckgrenze eine Dehnung von 17% und eine Kerbschlagzähigkeit von 14 kgm/cm². Mit dem stärker härtenden Mangan-

stahl werden trotz Ölvergütung noch höhere Festigkeitswerte erreicht. Der Vorteil einer Vergütung liegt also darin, daß einmal absolut höhere Festigkeiten erzielt werden können, und dann vor allen Dingen, daß bei gleicher Festigkeit Streckgrenze und Zähigkeit höher liegen als bei hochgekohten naturharten Stählen.

Wirtschaftlichkeit

Legierte Stähle sind für die Gewichtseinheit natürlich teurer als einfache Kohlenstoffstähle. Auch die Vergütung kostet Geld. Es besteht also die Frage, ob sich die Aufwendungen wirtschaftlich vertreten lassen. In **Tafel 1** sind die Kosten einer Anzahl Stähle zusammengestellt. Für das Vergüten werden von den Werken etwa DM 140,- je t berechnet. Bestimmt man wieder, wie es früher schon geschehen ist, die Kosten pro Streckgrenzeinheit, so erhält man das in **Bild 8** gezeigte Diagramm. Es geht daraus hervor, daß die Kosten für die Streckgrenzeinheit bei legierten Stählen niedriger sind, als bei gewöhnlichen Kohlenstoffstählen. Auch die Vergütung erscheint in diesem Zusammenhang durchaus wirtschaftlich, zumal wenn man noch den Gewinn an Zähigkeit berücksichtigt. Man sollte daher sorgfältig überlegen, ob man von diesen Vorteilen nicht Gebrauch machen kann.

In der Diskussion wurde darauf hingewiesen, dass die Fabrikationsabfälle der hochwertigen Stähle in den Schrott wandern und dort nicht entsprechend ihrem höheren Kilopreis zu verwerten sind.

Tafel 1. Stahlpreise und Vergütungskosten *)

Werkstoff	Grundpreis DM/t**)	Aufpreis DM/t	Leg. Zuschlag DM/t	Preis DM/t	Vergütung DM/t	Preis vergütet DM/t	Anlass-temperatur °C	Streckgrenze σ_S kg/mm ²	Ein-schnü- rung ψ %	Kosten der Streckgrenze- einheit DM/t u. kg/mm ²
St 37.11	400,-	3,-		403,-				25,0	62	16,3
St 42.11	400,-	21,-		421,-				31,0	49	13,6
St 50.11	400,-	31,-		431,-				35,0	39	12,3
St 60.11	400,-	34,-		434,-				38,0	31	11,4
St 70.11	400,-	39,-		439,-				42,0	22	10,5
C 35	400,-	41,-		441,-	140,-	581,-	450	47,0	42	12,4
C 35	400,-	41,-		441,-	140,-	581,-	550	40,0	49	14,5
C 45	400,-	45,-		445,-	140,-	585,-	450	50,0	40	11,7
C 45	400,-	45,-		445,-	140,-	585,-	550	41,0	46	14,3
C 60	400,-	50,-		450,-	140,-	590,-	450	60,0	35	9,8
C 60	400,-	50,-		450,-	140,-	590,-	550	53,0	41	11,1
40 Mn 4	599,50			599,50	140,-	739,50	500	61,0	47	12,1
40 Mn 4	599,50			599,50	140,-	739,50	550	56,0	50	13,2
30 Mn 5	635,-			635,-	140,-	775,-	500	57,0	46	13,6
37 Mn Si 5	655,50		17,50	673,-	140,-	813,-	500	76,0	40	10,7
37 Mn Si 5	655,50		17,50	673,-	140,-	813,-	550	69,0	44	11,8
42 Mn V 7	726,-		26,-	752,-	140,-	892,-	500	100,0	38	8,9
42 Mn V 7	726,-		26,-	752,-	140,-	892,-	550	90,0	42	9,9
41 Cr 4	695,50			695,50	140,-	835,50	500	81,0	57	10,3
41 Cr 4	695,50			695,50	140,-	835,50	550	77,0	62	10,9
42 Cr Mn 4	796,50		12,80	809,30	140,-	949,30	500	96,0	50	9,9
42 Cr Mn 4	796,50		12,80	809,30	140,-	949,30	550	86,0	54	11,1
42 Cr V 6	817,-		26,-	843,-	140,-	983,-	500	110,0	45	8,9
42 Cr V 6	817,-		26,-	843,-	140,-	983,-	550	97,0	50	10,2
50 Cr V 4	746,-		26,-	772,-	140,-	912,-	500	120,0	40	7,6
50 Cr V 4	746,-		26,-	772,-	140,-	912,-	550	105,0	45	8,7

*) Preise für St 37.11 bis St 60.11 sowie C 35 bis C 60 nach Angaben der Stabstahlvereinigung (Februar 1954).
Preise für 40 M 4 bis 50 Cr V 4 nach Angaben der Edlstahlvereinigung (Februar 1954).

***) Der Grundpreis enthält den Zuschlag für SM-Qualität (St 37.11 bis C 60).

Weiter wurde darauf hingewiesen, dass man das Gewicht nicht im umgekehrten Verhältnis zu den Festigkeitseigenschaften verkleinern könne, da die Widerstandsmomente ähnlicher Querschnitte sich stärker ändern, als die Querschnitte selbst, die das Gewicht bedingen. Dem kann man dann nur durch Wahl anderer Querschnittsformen entgegenarbeiten.

Die Beschaffung legierter Stähle, wie überhaupt aller Stähle mit besonderen Eigenschaften, sei natürlich schwieriger als die von gewöhnlichen Baustählen.

Sprödbbruch

Die bisher behandelten Belastungsfälle betreffen im wesentlichen ruhende oder zügige Krafteinwirkungen. Unter gewissen Betriebsverhältnissen, nämlich hoher Verformungsgeschwindigkeit, niedriger Temperatur und mehrachsigen Spannungszustand, können jedoch spröde, verformungslose Brüche eintreten, die besonderen Gesetzen gehorchen.

Eine hohe Verformungsgeschwindigkeit tritt bei harten Stößen auf. Sie kann herabgemildert werden durch nachgiebige Bauweise, durch elastische Zwischenglieder und dergl.. Eine niedrige Temperatur kann in der Landwirtschaft durchaus auftreten und dürfte kaum zu beeinflussen sein.

Anders ist es mit dem mehrachsigen Spannungszustand. Das Formänderungsvermögen eines Werkstoffes wird im großen Maße vom Spannungszustand beeinflusst, der durch die Gestalt des Bauteils bedingt ist. Er ist von der Werkstoffart unabhängig und kann durch konstruktive oder herstellungstechnische Maßnahmen weitgehend beeinflusst werden. Während der Verformungszustand in einem Bauteil immer dreiaxig ist, kann der Spannungszustand ein-, zwei- oder dreiaxig sein. Für das Auftreten eines spröden Bruches ist der dreiaxige Zugspannungszustand, gekennzeichnet durch die Beziehung

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > 0,$$

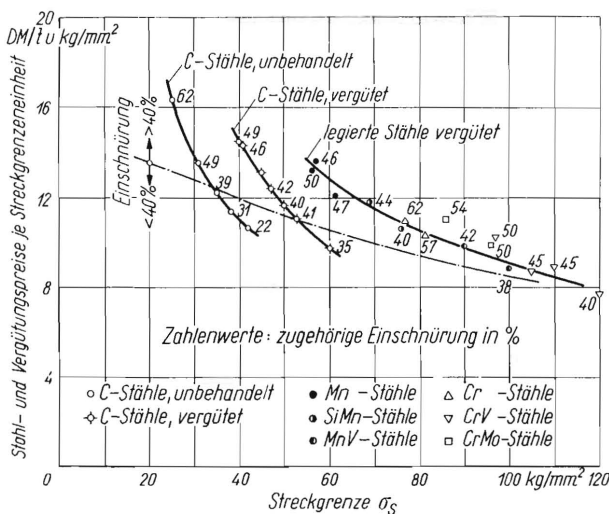


Bild 8. Preise für Streckgrenzeinheit vergüteter und legierter Stähle (nach dem Stand vom Februar 1954). Streckgrenze und Einschnürung der unbehandelten Kohlenstoffstähle nach Grosszahlwerten von *Daevés* [4], die der vergüteten Stähle nach DIN 17200.

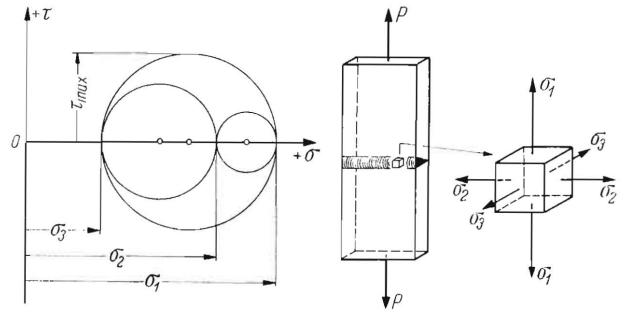


Bild 9. Der dreiaxige Zugspannungszustand in der Darstellung nach *Mohr*, betrachtet an einem Werkstoffteilchen einer zugbeanspruchten Quernaht.

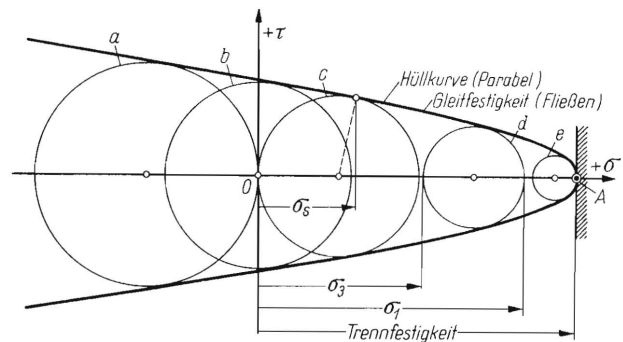


Bild 10. Kritische Spannungszustände $\tau_{krit} = f(\sigma)$ nach *Mohr*. Die *Leonsche* Hüllparabel [5] kennzeichnet die Grenze der Gleitfestigkeit des Werkstoffes.

- a einachsiger Druck
- b reiner Schub (Torsion)
- c einachsiger Zug
- d und e dreiaxiger Zug

entscheidend. Unter vielen Darstellungsmöglichkeiten erscheint die des *Mohrschen* Spannungskreises, **Bild 9** und die der *Leonschen* Hüllparabel, **Bild 10**, für beliebige Spannungszustände am anschaulichsten. **Bild 9** zeigt das σ, τ -Schaubild eines Werkstoffteilchens im dreiaxigen Zugspannungszustand, wie er beispielsweise für die Schrupfspannungen in einer Schweißnaht charakteristisch ist. Vernachlässigt man nach der *Mohrschen* Anstrengungshypothese den Einfluß der mittleren Hauptspannung σ_2 , was aus zahlreichen Versuchen von *Roß* und *Eichinger* als zulässig bestätigt wird, so hat die größte Schubspannung den Wert

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

Für die folgenden Überlegungen ist also nur der größte Spannungskreis in **Bild 9** von Bedeutung. Werden in einem Werkstoffteilchen die Grenzen der elastischen Verformung überschritten, so verursachen entweder die Schubspannungen Gleitungen (der Werkstoff fließt) oder die Normalspannungen Trennungen (der Werkstoff bricht). Den Schubspannungen wirkt der Gleitwiderstand und den Normalspannungen der Trennwiderstand des Werkstoffes entgegen. Solange jedoch die Beanspruchungen kleiner sind, als diese Widerstandsgrößen, treten

nur elastische Veränderungen, also nur Schiebungen oder Dehnungen, im Bauteil auf.

Die Frage, durch welchen Spannungszustand ein Bruch ausgelöst wird, versuchen verschiedene Anstrengungshypothesen zu beantworten. Unter ihnen kommt die Theorie von *O. Mohr* den praktischen Belangen am nächsten. Der Fehler durch Vernachlässigung der zweiten Hauptspannung beträgt gegenüber der genaueren Gestaltänderungsenergie-Hypothese von *Hencky* im Höchsthalle nur 15%. Bei der *Mohrschen* Hypothese wird angenommen, daß die Gleitfestigkeit von der gleichzeitig in der betrachteten Ebene wirkenden Normalspannung abhängig ist:

$$\tau_{\text{knt}} = f(\sigma)$$

Hiernach erhöht eine Druckspannung die Gleitfestigkeit, während eine Zugspannung sie erniedrigt. Bild 10 zeigt dies an einigen kritischen Spannungszuständen. Man erkennt, daß die kritische Schubspannung vom einachsigen Druck über den reinen Schub (bzw. Torsion) zum einachsigen und weiter rechts zum mehrachsigen Zug entsprechend der zugeordneten Normalspannung immer kleiner wird. Die Spannungskreise lassen sich durch eine Hüllkurve umgeben, welche nach *A. Leon* mit ausreichender Genauigkeit durch eine Parabel ersetzt werden kann. Im Scheitelpunkt der Hüllparabel (Punkt *A* in Bild 10) ist die Schubspannung zu Null geworden; der Spannungskreis ist zum Punkt zusammengeschrumpft. Der hier herrschende dreiachsige Zugspannungszustand ist gekennzeichnet durch

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$$

Beim Überschreiten dieses Normalspannungsbetrages (Trennfestigkeit)¹⁾ tritt der verformungslose Bruch (Trennungsbruch oder Sprödbbruch) ein. Alle anderen Spannungszustände führen bei Überwindung des Gleitwiderstandes (Überschreiten der Parabeläste) zu Brüchen mit vorangehender mehr oder weniger großer Verformung.

Das zähe oder spröde Verhalten eines Werkstoffes ist also weitgehend von dem Spannungszustand abhängig. Der Spannungszustand wird wiederum durch die Gestalt des Bauteils (Kerben), durch den Herstellungsprozeß (Kaltverformung, Wärmebehandlung usw.) und durch die Art der Beanspruchung beeinflusst. Besondere Aufmerksamkeit aber verlangen alle diejenigen dreiachsigen Zugspannungszustände, welche als von der Art des Werkstoffes unabhängige Eigenspannungen den Ausgangsspannungszustand darstellen und durch Überlagerung der Betriebsbeanspruchungen in den gefährdeten

1) Der Wert der Trennfestigkeit kann nach *Ludwik* näherungsweise aus der Reißfestigkeit σ_R des Werkstoffes errechnet werden, wobei σ_R als die auf den Bruchquerschnitt beim Zerreißversuch bezogene Bruchfestigkeit definiert ist. Ein zweiter Festigkeitswert für die Ermittlung der *Leonschen* Hüllparabel ist durch die im statischen Zugversuch ermittelte Streckgrenze σ_s (vergl. Bild 10) gegeben.

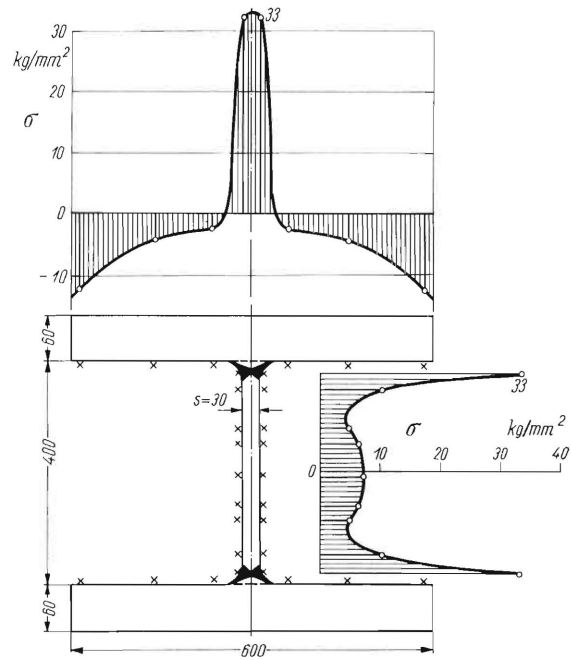


Bild 11. Eigenspannung durch Schweißung eines I-Trägers nach *Bierett* [6].

Bereich der Trennfestigkeit gelangen. Dies kann bei Schweißkonstruktionen entscheidend für ihre Haltbarkeit sein, **Bild 11 und 12**. Auch bei gekerbten Konstruktionen (Bohrungen, plötzliche Querschnittsänderungen) bildet sich durch Belastung ein dreiachsiger Spannungszustand aus, welcher die statischen Festigkeitswerte, wie Streckgrenze und Zugfestigkeit, umso mehr erhöht, je schärfer die Kerbe ist (vergl. Bild 26). Dafür sinkt jedoch die plastische Verformbarkeit. Schon bei verhältnismäßig kleinen Beanspruchungen des Bauteils kann sich im Kerbgrund ein dreiachsiger Zugspannungszustand ausbilden, der mit seiner Hauptspannung σ_1 die Trennfestigkeitsgrenze erreicht. Die Praxis beweist, daß Konstruktionen mit scharfen Kerben spröde brechen können.

Es haben aber auch manche Werkstoffe eine besondere Neigung zu Trennungsbrüchen. Sie wird durch den Kerbschlagversuch gemessen. Bild 5 bis 7

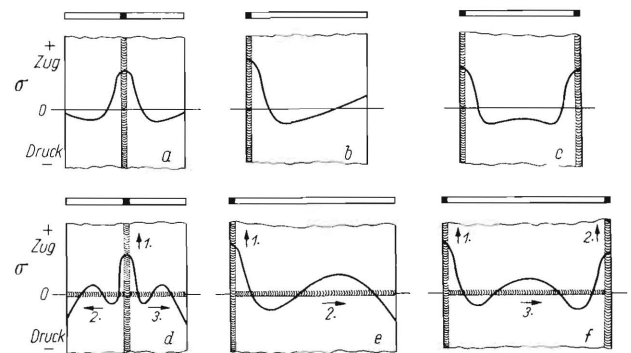
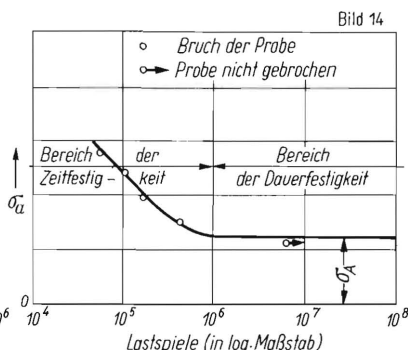
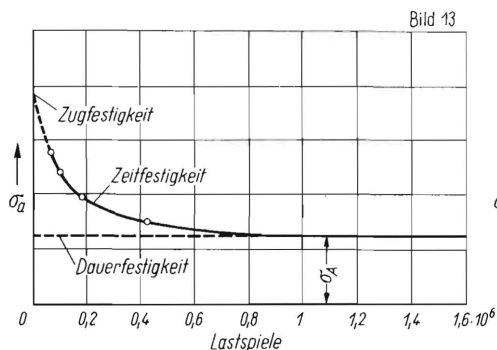


Bild 12. Eigenspannungen nach dem Schweißen nach *Bierett* [6].

a bis c Längsschweißspannungen infolge von Längsnähten
d bis f Schweißspannungen bei sich kreuzenden Nähten
(Die Ziffern 1 bis 3 kennzeichnen die Schweißfolge)



σ_a Spannungsausschlag
 σ_A Dauerfestigkeit

Bild 13 und 14. Wöhler Kurven [7]; in Bild 13 im linearen, in Bild 14 im halblogarithmischen Maßstab.

enthalten auch Angaben über die Kerbschlagzähigkeit. Legierte und vergütete Stähle haben eine wesentlich höhere Zähigkeit als gewöhnliche Baustähle von gleicher Festigkeit. Man kann sie daher auch in den Fällen vorteilhaft einsetzen, wo eine besondere Spröbruchgefahr vorliegt.

Dauerfestigkeit

Bisher wurden nur einmalige Kraftwirkungen betrachtet. Wenn jedoch häufigere Kräfteinwirkungen vorliegen, dann ist die Festigkeit wesentlich niedriger. Diese Verhältnisse werden durch die Wöhler-Kurvendargestellt, Bild 13. Zeichnet man die Festigkeit in Abhängigkeit von den Lastspielen auf, so beginnt die Kurve zunächst bei der statischen Festigkeit. Je kleiner der Spannungsausschlag σ_a ist, um so mehr Lastspiele hält der Werkstoff aus, bis ein Bruch eintritt. Der Spannungsausschlag strebt einem Grenzwert σ_A zu, der sich mit weiterer Lastspielzahl nicht mehr ändert. Dies ist dann die sogenannte Dauerfestigkeit, die bei etwa 10^6 Lastspielen erreicht wird und beliebig lange ertragen werden kann. Um den Übergang vom Zeitfestigkeitsbereich zum Dauerfestigkeitsbereich besser erkennen zu können, trägt man auch die Anzahl der Lastspiele im logarithmischen Maßstab auf, Bild 14. Man sieht, daß bei derartigen Lastspielzahlen die Dauerfestigkeit nur einen Teil der statischen Festigkeit ausmacht.

Es sei zunächst die Frage erörtert, ob bei Landmaschinen so hohe Lastspielzahlen auftreten, daß Dauerbrüche zu erwarten sind. An Hand aufgenommener Diagramme sind zu erwarten:

	Lastspiele je Sek.	10^6 Lastspiele erreicht nach
Pflüge	3 – 10	100 – 30 h
Ackerwagenachsen	3 – 6	100 – 50 h
Heuwenderzinken	3 – 30	100 – 10 h
Schlepper-Getriebewellen	10 – 20	30 – 15 h

Bei Überschreiten der Dauerfestigkeit können demnach schon nach verhältnismäßig kurzer Betriebszeit Dauerbrüche eintreten, was durch praktische Erfahrungen bestätigt wird.

Im allgemeinen stellt man die Dauerfestigkeit nicht in der Form von Wöhler-Kurven dar, sondern in den etwas anderen Dauerfestigkeits-Schaubildern (nach Smith), wovon Bild 15 ein Beispiel zeigt. Die Spannungen in den Landmaschinenteilen sind in der Regel nicht gleichbleibend, sondern sie schwanken hin und her. Diese Schwankungen können vom Zug zu Druck erfolgen, aber auch bei höheren Mittelspannungen (Vorspannungen) in gewissen Grenzen um diese herum schwingen. Stellt man diese Schwankungen in Abhängigkeit von dieser Mittelspannung dar, so bekommt man bei der Mittelspannung Null zunächst die sogenannte Dauerwechselfestigkeit (z.B. $\sigma_w = \pm 24 \text{ kg/mm}^2$), die also zwischen positiven und negativen Beträgen schwankt. Die Spannungsausschläge müssen sich in bestimmten Grenzen halten, die durch die Dauerfestigkeitslinien (stark ausgezogen) angedeutet sind. Mit zunehmender Mittelspannung werden die zulässigen Spannungsausschläge immer kleiner. Auf keinen Fall dürfen sie die Streckgrenze (σ_s) überschreiten. In Bild 16 ist dasselbe für einen anderen Stahl dargestellt mit dem Unterschied, daß zwischen den Schwingungsausschlägen plötzlich

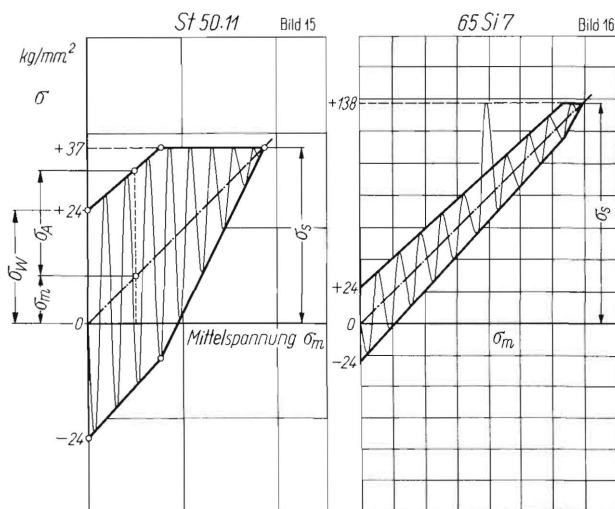


Bild 15 und 16. Dauerfestigkeit zweier Stähle, Einfluss von Oberflächengüte (St 50.11 poliert, 65 Si mit Walzhaut) und Störbeanspruchung (schematisch). Die im Höchstoffall dauernd ertragbaren Schwingungen sind eingezeichnet.

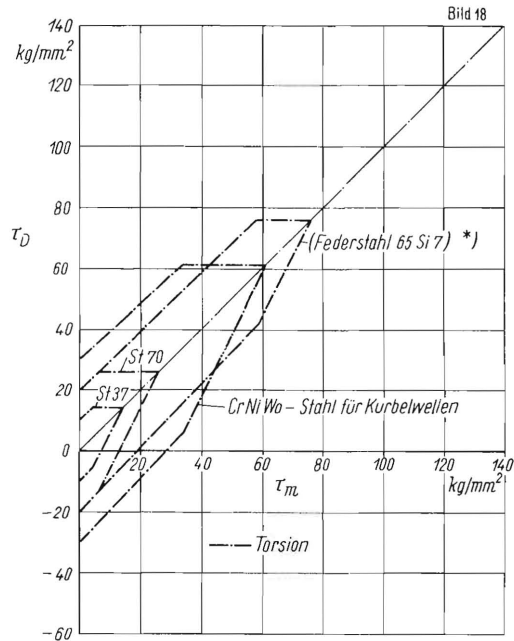
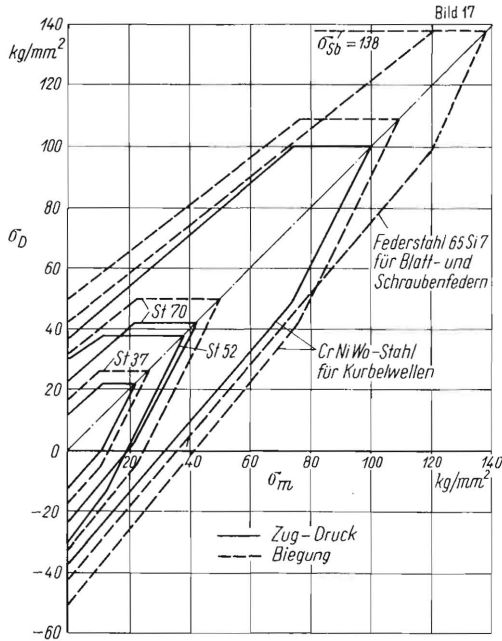


Bild 17 und 18. Dauerfestigkeit verschiedener Stähle [8, 9].
Gerechnet nach Verhältniszahlen von Niemann [18], nur zum Vergleich zu den Dauerfestigkeitswerten für Biegung

Stahlart (Mittelwerte)	σ_S	σ_B	δ_{10}	C	Si	Mn
St 37	22	37	23	0,12	0,1	0,4
St 52	—	52–64	—			
St 70	42	75	10	0,6	0,4	0,7
Cr Ni Wo	100	120	10	0,4	0,25	0,4 4,0 Ni, 1,0 Cr, 0,6 Wo
65 Si 7	110	158	6	0,65	1,60	0,7

eine Gewaltbeanspruchung herausragt, die natürlich unter der Streckgrenze bleiben muß.

In Bild 17 und 18 sind derartige Dauerfestigkeits-Schaubilder für verschiedene Stähle dargestellt. Man sieht, daß auch hier die legierten Stähle bzw. die vergüteten Stähle besondere Vorteile bringen, d.h. wesentlich höhere Wechselfestigkeiten, Schwellfestigkeiten usw. aufnehmen können.

Auch die Streckgrenzen liegen – wie schon früher erwähnt – erheblich höher. Bild 19 zeigt diese Verhältnisse noch einmal in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit. Die Kurven steigen, wenigstens im ersten Teil, linear mit der Zugfestigkeit an.

Diese Überlegenheit der Stähle höherer Zugfestigkeit gilt jedoch nur unter bestimmten wichtigen Einschränkungen, nämlich für polierte und korrosionsfreie Oberflächen ohne Kerbe. Sind diese Voraussetzungen nicht erfüllt, so fällt die Dauerfestigkeit erheblich ab, wie Bild 20 zeigt. Letzten Endes bleibt

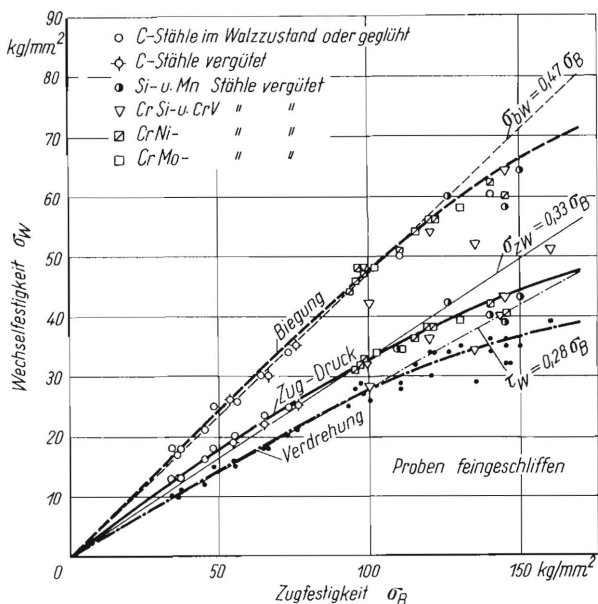


Bild 19. Abhängigkeit der Wechselfestigkeit von der Zugfestigkeit nach Werten von E. Lehr [10].

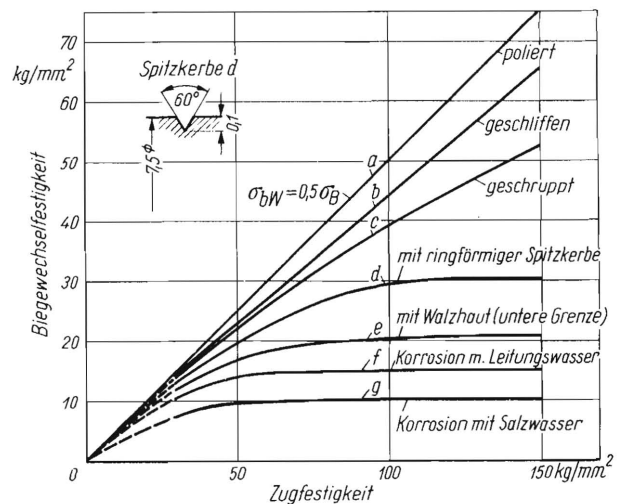


Bild 20. Oberflächeneinfluss auf die Dauerfestigkeit [8].

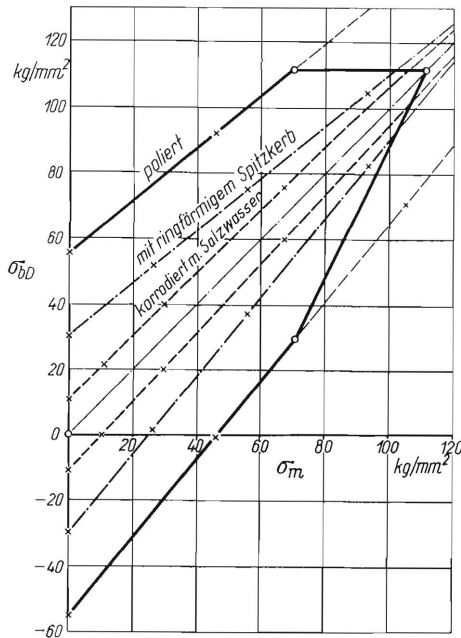


Bild 21. Dauerfestigkeit bei Kerbwirkung und Korrosion [8].
CrNi-Stahl $\sigma_B = 130 \text{ kg/mm}^2$

dann von der höheren Zugfestigkeit derartiger Stähle nicht viel übrig, so daß kein Vorteil gegenüber anderen Stählen mehr vorhanden ist. Dies ist für einen Chromnickel-Stahl noch einmal in **Bild 21** dargestellt. Die Fläche des Dauerfestigkeits-Schaubildes schrumpft vom polierten über den gekerbten zum korrodierten Zustand immer mehr zusammen, so daß schließlich nur noch recht geringe Spannungsausschläge übertragen werden können. Die Streckgrenze bleibt jedoch durch diese Verhältnisse unberührt. Hohe Gewaltbeanspruchungen können also immer noch gut von diesen Stählen aufgenommen werden. In vereinfachter Form zeigt dies noch einmal **Bild 22**. Die Wechselfestigkeit σ_w (ganz links im Diagramm) hat bei allen Stählen unter den erwähnten extrem ungünstigen Verhältnissen etwa die gleiche Größe. Es ist also kein Unterschied,

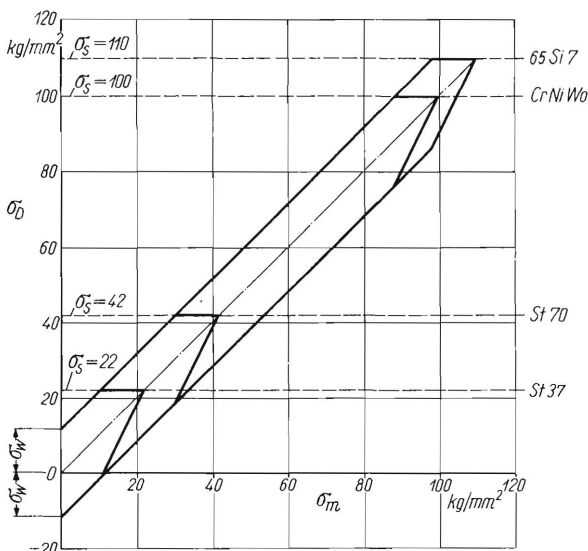


Bild 22. Vereinfachte Darstellung der Dauerfestigkeit bei ungünstigen Verhältnissen (Kerbwirkung, Korrosion, Oberflächenegüte).

ob man einengewöhnlichen Baustahl St 37 oder einen Chromnickel-bzw. einen Silizium-Federstahl verwendet. Die letztgenannten Stähle können jedoch gewisse Spannungsausschläge auch noch bei höheren Mittelspannungen übertragen. Die Streckgrenze, die ja durch ungünstige Oberflächenzustände nicht beeinflusst wird, ist nach wie vor bei den letztgenannten Stählen erheblich größer.

Es ist nun interessant, unter diesen Gesichtspunkten einige Kraftdiagramme für Landmaschinen zu betrachten.

Bild 23 zeigt Stör- und Betriebskräfte an einem Pflug. Beim Auftreffen auf einen Stein entsteht eine Stoßspitze von 2000 kg. Dabei soll die Streckgrenze nicht überschritten werden. Die mittlere Kraft beträgt etwa 400 kg, d.i. etwa 1/5 der Streckgrenze. Betrachtet man **Bild 22**, so erkennt man, daß bei

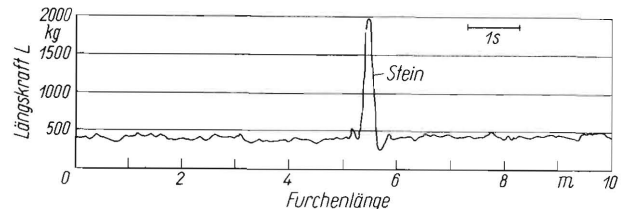


Bild 23. Stör- und Betriebskräfte in Fahrtrichtung am Pflug [11].

einem Werkstoff St 70 ($\sigma_s = 42 \text{ kg/mm}^2$; Betriebspunkt in diesem Fall $\sigma_m = 42/5 = 8,4 \text{ kg/mm}^2$) noch größere Spannungsausschläge zulässig wären, als die Umgrenzungslinien des Dauerfestigkeitsschaubildes für diesen Stahl zuläßt. Es ist also in diesem Fall nur die Streckgrenze entscheidend. Man kann sie durch Vergüten hochtreiben. Eine noch höhere Streckgrenze könnte man durch legierte Stähle erreichen. Verbessern der Oberfläche ist dagegen wenig ergiebig, da in diesem Fall die Dauerfestigkeit nicht entscheidend ist.

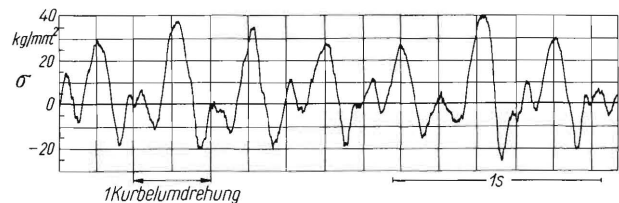


Bild 24. Spannungen in einem Heuwenderzinken [12].

Bild 24 zeigt Spannungen in Heuwenderzinken, die zwischen positiven und negativen Werten schwanken. Es wird also die Wechselfestigkeit entscheidend sein. Der Betriebspunkt liegt also ganz links in **Bild 22**. Da bei Rost- und Kerbwirkung die Wechselfestigkeit aller Stähle etwa gleich groß ist, hat die Verwendung von legiertem Federstahl allein zur Erhöhung der Dauerfestigkeit wenig Sinn. Er bildet – wegen der hohen Streckgrenze – wohl eine Reserve für seltene Stöße. Man muß jedoch, um hohe Wechselfestigkeit zu erreichen, für eine gute Oberfläche (Blankziehen, Rostschutz usw.) Sorge tragen.

Bild 25 zeigt die Drehmomente in der Welle eines Schleppergetriebes und zwar des Mähmesserantriebes. Die Ausschläge wechseln zwischen Zug und Druck und sind mit starken Oberschwingungen überlagert. Der Betriebspunkt liegt also in Bild 22 wieder ganz links. Bei einer Getriebewelle besteht keine Rostgefahr. Auch Kerben sollten bei guter Konstruktion nicht vorhanden sein. Es ist also die Wechselfestigkeit entscheidend, die bei hochfesten Stählen größer ist als bei gewöhnlichen Baustählen. Sie sind also hier der gegebene Werkstoff.

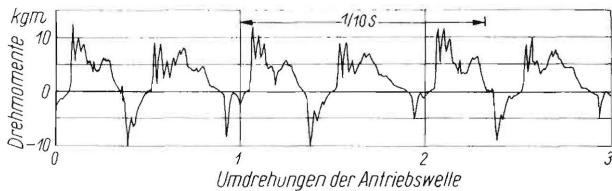


Bild 25. Antriebsdrehmomente in der Welle eines Schleppergetriebes [13].

Aus den gezeigten drei Beispielen erkennt man, daß je nach den für bestimmte Maschinen charakteristischen Kraftdiagrammen die maßgebenden und entscheidenden Eigenschaften der Stähle andere sind. Es wird also jeweils auch ein anderer Stahl der am besten geeignete sein. Die Maßnahmen zur Steigerung der Dauerfestigkeit liegen durchaus nicht immer auf dem Gebiet der Werkstoffe, sondern andere sind unter Umständen wesentlich ergiebiger oder sogar die einzig möglichen.

Wie man Kerben vermeidet, ist schon häufig dargelegt worden. Dabei ist unter Kerben nicht nur eine Querschnittsänderung im landläufigen Sinne zu verstehen, sondern überhaupt ein ungleichmäßi-

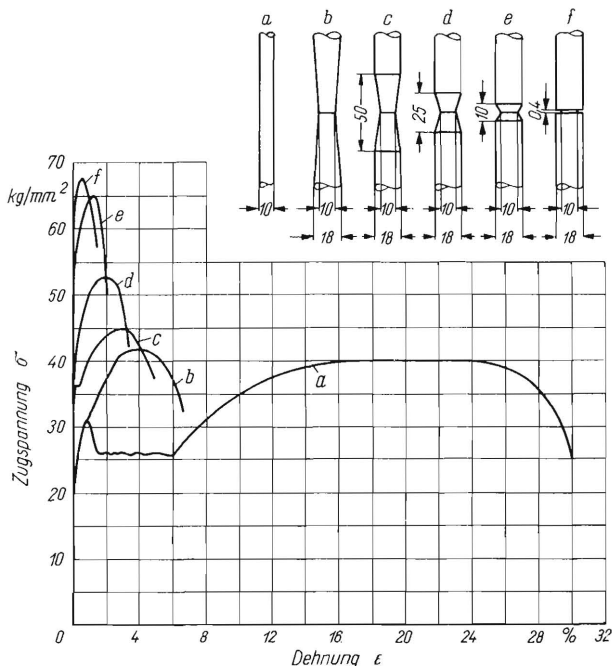


Bild 26. Statische Zugfestigkeit bei Kerbwirkung nach P. Ludwik [14].

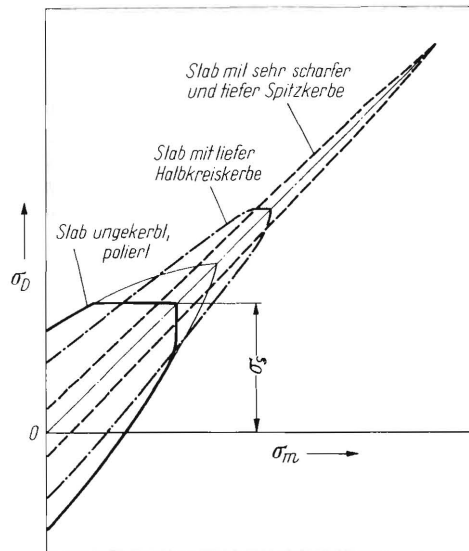


Bild 27. Dauerfestigkeit bei Kerbwirkung nach Thum und Wunderlich [15].

ger Spannungszustand. Die Spannungsfelder auf der Oberfläche eines Maschinenteils haben ja leider eine recht unterschiedliche Spannungshöhe. Sie lassen sich aber durch Ändern der Gestalt des Teiles beeinflussen. Wenn Rost bei gutgehaltenen Maschinen ausscheidet, ist ein gleichmäßiges Spannungsfeld das wichtigste Mittel zur Steigerung der Dauerfestigkeit. Die Kerbempfindlichkeit hochfester Stähle ist besonders groß, sie setzen also eine gute, spannungsgerechte Konstruktion voraus.

Bild 26 behandelt noch einmal die Spannungen bei Kerbwirkung. Das Bild zeigt, daß bei statischer Belastung die Zugfestigkeit durch Kerben erhöht wird; d.h., wenn man durch schlechte Konstruktion im Spannungsfeld hohe Spitzen hat, wirken sie sich bei statischer Beanspruchung nicht entsprechend ungünstig aus. **Bild 27** zeigt die Dauerfestigkeits-Schaubilder für gekerbte Stäbe. Danach wird bei Dauerbeanspruchung das Dauerfestigkeits-Schaubild zwar höher (da die Streckgrenze höher liegt), aber schmaler. Bei Wechselbeanspruchung ist also nicht die Höhe des Diagrammes entscheidend, sondern die Schwingweite.

Da auch bei Schrauben Kerbwirkungen auftreten, ist auch bei ihnen die Dauerfestigkeit kleiner, als bei dem glatten Werkstoff, wie **Bild 28** zeigt.

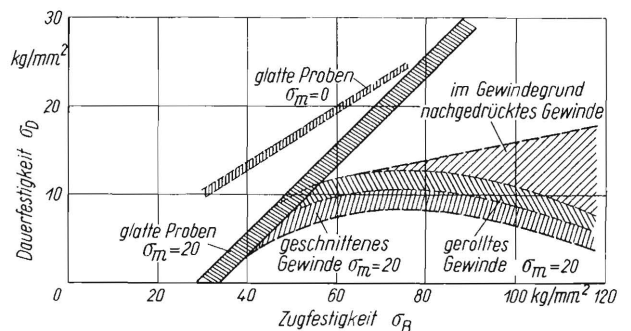


Bild 28. Dauerfestigkeit von Stahlschrauben nach E. Amedick [16].

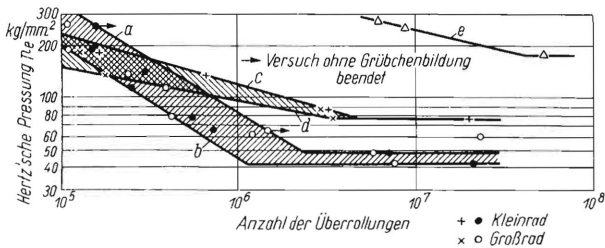


Bild 29. Wöhlerkurven für den Beginn der Grübchenbildung an Stirnräderpaaren aus verschiedenen Werkstoffen (nach Niemann und Glaubitz [17]).

Zahnradabmessungen: $m = 3$; $\alpha = 20^\circ$; $b = 10$ mm; $z_1/z_2 = 27/34$; $n = 1450$ U/min

- a, b Werkstoff: St 50.11; HB ≈ 155 kg/mm²
- c, d Werkstoff: V C Mo 140; HB ≈ 310 kg/mm²
- e Werkstoff: E C 100, einsetzgehärtet; HB ≈ 690 kg/mm²; Grossrad

Besonders deutlich wird die Festigkeitsminderung bei Dauerbeanspruchung von Zahnrädern. Bild 29 zeigt das Ergebnis von Zahnradlaufversuchen in Form von Wöhlerlinien für die Wälzfestigkeit der Zahnflanken, d. i. die Festigkeit von Zahnflanken gegenüber Grübchenbildung [17]. Die Kurven stellen die Laufdauer bis zum Beginn der Grübchenbildung in Abhängigkeit von der Höhe der Belastung, die hier als Hertz'sche Pressung aufgetragen ist, dar. Man erkennt außerdem, daß mit steigender Oberflächenhärte der Zahnflanke höhere Belastungen ertragen werden, d. h. daß damit der Rollverschleiß abnimmt.

Zusammenfassung

Bei statischer Belastung geben Stähle höherer Festigkeit wohl immer eine größere Haltbarkeit der Maschinenteile. Sie läßt sich durch Wärmebehandlung wesentlich steigern.

Bei dynamischer (Stoß-)Belastung bestehen ebenfalls Vorteile von Stählen höherer Festigkeit, die aber an Voraussetzungen gebunden sind. In der Hauptsache sind es Voraussetzungen konstruktiver Art, d. h. Vermeiden dreiachsiger Spannungszustände.

Bei Dauerbeanspruchung kommt die höhere Dauerfestigkeit von Stählen höherer Zugfestigkeit nur dann zur Geltung, wenn kein Rost und keine Kerben vorhanden sind. Dies bezieht sich also auf die Pflege und die Konstruktion. Ganz besonders

gilt dies für die Wechselfestigkeit. Bei übergelagerter Gewaltbeanspruchung bringen Stähle höherer Zugfestigkeit immer Vorteile.

Schrifttum

- [1] Kloth, W.: Die Vorteile von Stählen höherer Festigkeit. RKTL-Schriften Heft 56 (1. Konstrukteurheft). Berlin 1934. S. 7/20.
- [2] Daeves, Karl: Werkstoff-Handbuch, Stahl und Eisen. 3. Auflage. Düsseldorf 1953.
- [3] Houdremont, Ed.: Handbuch der Sonderstahlkunde. Berlin 1943.
- [4] Daeves, Karl: Beziehung der Festigkeitseigenschaften untereinander bei unlegierten Stählen. Werkstoff-Handbuch. Stahl und Eisen. Düsseldorf 1953.
- [5] Leon, A. und A. Slattenschek: Festigkeitsversuche und deren Auswertung mittels Mohrscher Theorie mit Hüllparabel. Giesserei 21 (1934) H. 51/52.
- [6] Bierett, G.: Schrumpfung und Spannung. In: Schweisstechnik im Stahlbau. Herausg. von K. Klöppel und C. Stieler. 1. Bd., Berlin 1939, S. 161/162.
- [7] Mailänder, R.: Dauerschwingfestigkeit. Festigkeitsprüfung bei schwingender Beanspruchung. In: Handbuch der Werkstoffprüfung. 2. Bd. Die Prüfung der metallischen Werkstoffe. Herausg. E. Siebel, Berlin 1939. In: Werkstoffhandbuch der Sonderstahlkunde, Stahl und Eisen. 3. Auflage. Düsseldorf 1953.
- [8] – Dauerfestigkeits-Schaubilder. Arbeitsblätter I bis 4 des Fachausschusses für Maschinenelemente beim VDI (s. a. Z. VDI 77 (1933) Nr. 42).
- [9] Ammareller, S.: Die Federstähle, ihre Entwicklung, Eigenschaften und Anwendungsgebiete. Stahl und Eisen 72 (1952) S. 475/489.
- [10] Lehr, E.: Wie lassen sich die bisherigen Ergebnisse der Schwingungsprüfung für den Konstrukteur nutzbar machen? Sparwirtschaft 9 (1931) S. 271 und 313. (s. a. W. Herold, Wechselfestigkeit metallischer Werkstoffe. Wien 1933. S. 45/47).
- [11] Getzlaff, G.: Kräfte beim Pflügen von steinigem Acker. Grundlg. d. Landtechn. Heft 5. Düsseldorf 1953. S. 7/15.
- [12] Thiel, R. und W. Bergmann: Ein Beitrag zur Haltbarkeit der Heuwendergabeln. Grundlg. d. Landtechn. Heft 4. Düsseldorf 1953. S. 34/45.
- [13] Stoppel, Th. und R. Thiel: Kräfte in Schleppermähwerken. (Erscheint demnächst).
- [14] Ludwik, P.: Streckgrenze, Kalt- und Warmsprödigkeit. Z. VDI 70 (1926) 379/386; ferner M. Pfender, Arch. Eisenhüttenwes. 1933, S. 595.
- [15] Thum, A. und F. Wunderlich: Die Fliessgrenze bei behinderter Formänderung. Ihre Bedeutung für das Dauerfestigkeitsschaubild. Forschg. a. d. Geb. d. Ing. wes. 3 (1932) S. 269.
- [16] Amedick, E.: Dauerfestigkeitsverhalten von Schrauben. Konstruktion 5 (1953) S. 121.
- [17] Niemann, G. und H. Glaubitz: Zahnflankenfestigkeit geradzahnter Stirnräder aus Stahl. Z. VDI 93 (1951) 121/126.
- [18] Niemann, G.: Maschinenelemente, 1. Bd. Berlin-Göttingen-Heidelberg 1950. S. 54, Tafel 3/4.

Institut für Landtechnische Grundlagenforschung
der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode

Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Kloth

Mitverfasser: Dr.-Ing. Walter Bergmann, (20 b) Braunschweig, Bundesallee 50
Dr.-Ing. F. K. Naumann, (20 b) Braunschweig, Bundesallee 50