Gedruckt mit Unterstützung aus dem Jerome und Margaret Stonborough-Fonds

Zugfestigkeit, Kohäsion und Bruchgefahr

Von

Paul Ludwik

W. M. d. Akad. d. Wiss.

(Aus der technischen Versuchsanstalt der Technischen Hochschule in Wien)

(Mit 2 Textfiguren)

(Vorgelegt in der Sitzung am 21. Oktober 1926)

Als wichtigste Wertziffer im Materialprüfungswesen gilt allgemein die Zugfestigkeit. Nach ihr wird die Sicherheit unserer Konstruktionen bemessen und alle Übernahmsvorschriften schreiben daher in erster Linie bestimmte Zugfestigkeitswerte vor.

Ihre Bestimmung geschieht im Zugversuch. Unter Zugfestigkeit K_z versteht man die auf den ursprünglichen Probestabquerschnitt f_0 bezogene Höchstbelastung, die der Stab zu ertragen vermag, ehe er reißt. Vor Erreichung dieser Höchstlast dehnt sich der Stab »gleichmäßig«, während nach deren Überschreitung dehnbare Stoffe sich örtlich mehr oder weniger einschnüren, worauf dann in der Einschnürungsstelle bei immer rascher abfallender Belastung der Bruch eintritt.

Da derart bei Bestimmung der Zugfestigkeit der Werkstoff auch wirklich zerrissen wird, so wurden die Begriffe Zugfestigkeit und Kohäsion nicht recht auseinandergehalten und auch heute noch glaubt man fast allgemein mit der Zugfestigkeit stets einen Reiß- oder Trennungswiderstand zu messen, was wohl auch die Ursache ist, warum sich das Bedürfnis nach Kohäsionsproben noch gar nicht geltend gemacht hat und unser hochentwickeltes Metallprüfungswesen solche Proben gar nicht kennt.[1]

Dies ist um so verwunderlicher als bei dehnbaren Metallen die meisten Brüche,[2] so z. B. Anrisse zufolge Kerbwirkungen, Wärme-,

---

[1] Obwohl ich seit 1909 (Elemente der Technologischen Mechanik) immer und immer wieder auf die grundsätzliche Verschiedenheit von Zug- und Reißfestigkeit (»effektive Zugfestigkeit«) und auf deren Bedeutung für die Materialprüfung hingewiesen habe. Vgl. auch: Zeitschr. f. Metallkunde, *14* (1922), 101 und *6* (1924) 207; Stahl und Eisen, *45* (1925), 373; Zeitschr. d. Vereines deutscher Ingenieure, *63* (1919), 142, *68* (1924), 212 und *70* (1926), 379.

Erfreulicherweise scheint sich — wie auch das eben erschienene Buch von G. Sachs u. G. Fiek »Der Zugversuch« (Leipzig, 1926, Akademische Verlagsges.) erkennen läßt — in letzter Zeit die Auffassung der Zugfestigkeit einschnürender Stoffe als Verformungswiderstand doch endlich durchzusetzen, wodurch der Unterschied zwischen Zugfestigkeit und Kohäsion und hiermit das Bedürfnis nach Kohäsionsproben immer fühlbarer wird, um so mehr als besonders durch die Arbeiten E. Schmid's und seiner Mitarbeiter (vgl. u. a. Zeitschr. f. Physik, *32* [1925], 197 und *36* [1926], 759) die Bedeutung von Grenznormal- und Grenzschubspannung nun auch bei Einkrystallen erkannt worden ist.

Hier sind nur wirkliche Brüche gemeint. Die mittelbare Erhöhung der Bruchgefahr infolge bleibender Deformationen der Konstruktion bei Überschreitung

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Schwind- oder Reckspannungen, aber auch alle Ermüdungsbrüche nach den bisherigen Anschauungen eigentlich schwer zu verstehen sind, da solche Brüche meist plötzlich ohne vorhergegangene Verformung eintreten. Ebenso unverständlich ist auch, warum z. B. durch unrichtige Wärmebehandlung (Überhitzung) oder chemische Einwirkungen (Beizbrüchigkeit), Metalle trotz unveränderter Härte und Festigkeit spröde werden oder warum z. B. durch entsprechende Vergütung die Sprödigkeit abnimmt.

Dagegen lassen sich bei Einführung eines von der Zugfestigkeit grundsätzlich verschiedenen Reißwiderstandes alle diese Erscheinungen zwanglos und einheitlich auf Änderungen des Gleit- und Reißwiderstandes zurückführen, wobei der Gleitwiderstand einen von der Größe der Fließgrenze, Zugfestigkeit und Härte abhängigen Schubwiderstand (Formänderungswiderstand) und der Reißwiderstand einen von der Größe der Kohäsion abhängigen Trennungswiderstand vorstellt.

I. Gleit- und Reißwiderstand.

In Fig. 1 zeigt Kurve $o\ a\ b_1\ c_1$ das Zugdiagramm von z. B. Flußstahl (mit 0·03% C) in der üblichen Darstellung. Dieses Diagramm wird meist so gedeutet, als ob der Ordinate $b\,b_1$, also der Zugfestigkeit K_z, die wirkliche Zerreißfestigkeit des betreffenden Stoffes entspräche, mit deren Erreichung dessen Widerstandsfähigkeit und Dehnbarkeit nahezu erschöpft ist. Daß bei dehnbaren (einschnürenden) Metallen dies auch nicht annähernd zutrifft, läßt die Kurve $o\ a\ b_2\ c_2$ der »effektiven Spannungen« $\sigma = \frac{P}{f}$ erkennen, die erhalten wird, wenn die auf die jeweiligen Querschnitte f bezogenen Belastungen P als Ordinaten und die zugehörigen aus der Querschnittsverminderung der Einschnürungsstelle ermittelten »effektiven Dehnungen« $100\left(\frac{f_0}{f} - 1\right)$ als Abszissen aufgetragen werden. Die Punkte $b_2\ c_2$ der σ-Kurve entsprechen dann den Punkten $b_1\ c_1$ des Zugdiagramms.

In dieser Darstellung tritt deutlich hervor, daß auch nach Erreichung der Höchstlast der spezifische Verformungswiderstand und hiermit auch der Gleitwiderstand, noch weiter sehr beträchtlich (von b_2 bis c_2) ansteigt, wobei sich das Metall noch um ein Vielfaches (von b bis c') streckt.

---

der Elastizitäts- und Fließgrenze und die Bedeutung dieser Wertziffern für den Konstrukteur habe ich andernorts erörtert. Vgl. Zeitschr. f. Metallkunde, *16* (1924), 207; Maschinenbau, *6* (1924) und Zeitschr. d. österr. Ingenieur- u. Archit.-Vereines, *76* (1924), 440. Über die Fließgrenze von Flußeisen vgl. Zeitschr. d. Vereines deutscher Ingenieure, *70* (1926), 379.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Der der gleichmäßigen Dehnung $o\,b$, beziehungsweise Zugfestigkeit $b\,b_1$ entsprechende Formänderungswiderstand $b\,b_2$ ist also nur ein Mittelwert, dessen Höhe von der Zunahme der Verfestigung, aber auch von der Größe der Einschnürung abhängt, da mit abnehmender Einschnürung c_2 immer mehr gegen b_2 rückt. Die physikalische Bedeutung der Zugfestigkeit einschnürender Stoffe ist also, ähnlich wie die Eindruckhärte, die eines mittleren Formänderungswiderstandes, der mit der wirklichen Zerreißfestigkeit oder der Kohäsion in keinem unmittelbaren Zusammenhang steht,[1] was ja auch schon daraus hervorgeht, daß man die Zugfestigkeit K_z solcher Stoffe bestimmen kann (bei Abbruch des Versuches bei

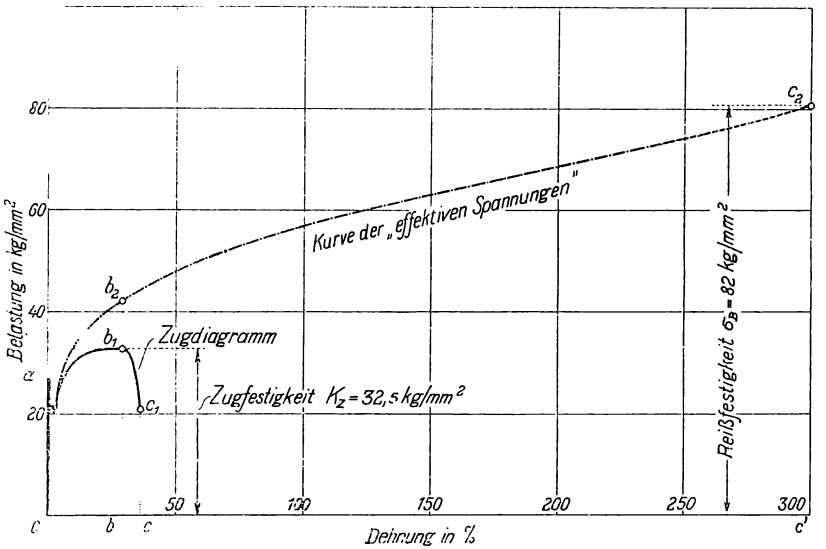

Fig. 1.

beginnender Einschnürung), ohne den Stab überhaupt zu zerreissen, ohne also die Kohäsion überwinden zu müssen.

Während sich aber die Zugfestigkeit einfach und sicher bestimmen läßt, ist die Spannung $c_2\,c'$, also die »Reißfestigkeit« nur schwierig und unsicher zu ermitteln und überdies auch keine physikalisch bestimmte Größe.

Denn mit wachsender Einschnürung wird der Spannungszustand ein mehrachsiger, die Spannungs- und Dehnungsverteilung über die einschnürenden Stabquerschnitte auch durch die gleichzeitig einsetzende Kerbwirkung eine ungleichmäßige und der ganze Fließ- und Bruchvorgang ein recht verwickelter. Was schließlich als Reißfestigkeit gemessen wird, ist daher ein Mittelwert, dem un-

[1] Ludwik, Elemente der Technologischen Mechanik. Berlin, 1909, J. Springer und Zeitschr. d. Vereines deutscher Ingenieure, *68* (1924), 212.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

mittelbar eigentlich gar keine physikalische Bedeutung zukommt. Doch kann wenigstens mittelbar aus einer größeren Reißfestigkeit (bei gleicher oder größerer Einschnürung) auf eine größere »technische Kohäsion«[1] geschlossen werden.

Eine Bestimmung der Reißfestigkeit im Zugversuch aus der Bruchlast und dem zugehörigen Bruchquerschnitt ist wegen der immer rascher abfallenden Belastung und des starken Nachfließens nur bei sehr langsamer und vorsichtiger Entlastung möglich. Doch läßt sich auch, wie kürzlich gezeigt,[2] unter Zugrundelegung der von Czochralski und Moellendorff[3] beobachteten einfachen Näherungsbeziehung zwischen Zugspannung und Querschnittsverminderung, die Reißfestigkeit näherungsweise ermitteln, ohne abfallende Belastungen oder die Belastung im Momente des Bruches messen zu müssen. Der einzige Unterschied gegenüber dem üblichen Zugversuch besteht darin, daß neben der Zugfestigkeit und Brucheinschnürung nachträglich (an den Bruchstücken) noch die gleichmäßige Dehnung, also die Dehnung des zylindrischen nicht eingeschnürten Stabteiles bestimmt wird.

Da dies einfach und rasch durchzuführen ist, so wäre es sehr erwünscht, wenn bei Zugversuchen neben der Zugfestigkeit und Einschnürung tunlichst auch noch die gleichmäßige Dehnung (im Mittel) gemessen würde. Um so mehr als die auch von der Meßlänge unabhängige gleichmäßige Dehnung und Brucheinschnürung zusammen, ein vollständigeres Bild über Art und Größe der Dehnbarkeit geben, als die von der Meßlänge abhängige Bruchdehnung. Überdies bietet die Kenntnis der gleichmäßigen Dehnung die Möglichkeit, die bei der Höchstbelastung erreichte wirkliche Spannung und hiermit (bei bekannter Fließgrenze) auch die Verfestigungsfähigkeit festzustellen. In den Tabellen 1 und 2 wurde die aus der gleichmäßigen Dehnung berechnete Reißfestigkeit der beobachteten (aus Bruchlast und Brucheinschnürung ermittelten) gegenübergestellt.

II. Fließbeginn vor Brucheintritt und Brucheintritt vor Fließbeginn.

Wie aus Fig. 1 zu ersehen ist, treten bei gewöhnlicher (einachsiger) Zugbeanspruchung stärkere bleibende Formänderungen auf, sobald die Zugspannung die Fließgrenze $\sigma_s = o\,a$ übersteigt.

---

[1] Über molekulare und technische Kohäsion, vgl. A. Smekal, Zeitschr. d. österr. Ingenieur- u. Archit.-Vereines, *74* (1922), 217 und Physikalische Zeitschr., *26* (1925) 707.

»Bestimmung der Reißfestigkeit aus der gleichmäßigen Dehnung« Zeitschr. f. Metallkunde, *18* (1926), 269.

[3] Zeitschr. des Vereines deutscher Ingenieure, *57* (1913), 1018. Vgl. auch: J. Czochralski, Zeitschr. f. Metallkunde, *15* (1923), 7; Fr. Körber, Mitt. d. Kaiser-Wilhelm-Inst. für Eisenforschung, *3* (1922), 1 u. *5* (1924), 55; G. Sachs, Werkstoffausschußbericht Nr. 58 des Vereines deutscher Eisenhüttenleute (März 1925) und »Der Zugversuch«, Leipzig, 1926, Akadem. Verlagsges.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Dagegen werden bei mehrachsiger Zugbeanspruchung die Fließgrenze weit überragende Zugspannungen noch ertragen, ohne daß merkliche bleibende Formänderungen auftreten und auch schmeidige Stoffe können dann ohne vorhergegangene Verformung plötzlich brechen.[1]

Denn wenn die größte auftretende Zugspannung σ_z die Kohäsion σ_0 (Reißspannung des ursprünglichen Materials) schon überschreitet, solange die größte Schubspannung $\tau_{max.}$ noch kleiner ist als die Schubgrenze τ_0, so wird das Metall schon reißen bevor es fließt. Bei einer mehrachsigen Zugbeanspruchung mit den Hauptspannungen $\sigma_x < \sigma_y < \sigma_z$ wird daher ein Trennungsbruch vor Fließbeginn einsetzen, wenn $\sigma_z > \sigma_0$ und $\tau_{max.} = {}^1/_2\,(\sigma_z - \sigma_x) < \tau_0$.

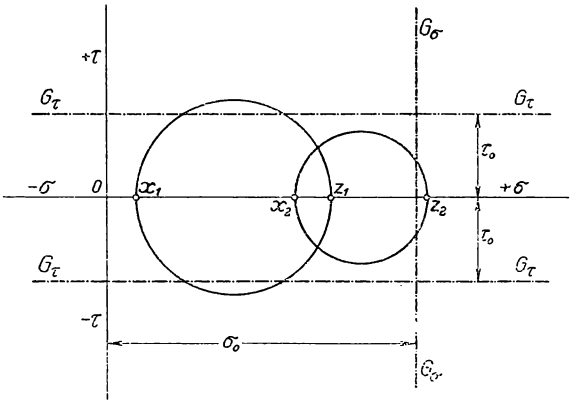

Fig. 2.

Da bei Metallen (wenigstens innerhalb der üblichen Beanspruchungsgrenzen) die Schubgrenze nahezu unabhängig vom Normaldruck ist, so kann $2\,\tau_0 = \sigma_s$ der Fließgrenze gesetzt werden.[2] Bei mehrachsiger Zugbeanspruchung wird sich sonach selbst ein sonst (beim gewöhnlichen Zugversuch) sehr dehnbares Metall wie ein ganz sprödes verhalten, wenn $\sigma_z > \sigma_0$ und $\sigma_x > \sigma_0 - \sigma_s$.

Je größer also z. B. bei gegebener Zugspannung σ_z die Zugspannung σ_x wird, je mehr sich also der Spannungszustand einer allseitigen Zugbeanspruchung nähert, um so mehr muß die Kohäsion σ_0 die Fließgrenze σ_s, also auch der Reißwiderstand den Gleitwiderstand, überragen, damit kein Bruch vor Fließbeginn eintritt.[3]

In Fig. 2 wurde dies noch graphisch in der Mohr'schen Darstellungsweise veranschaulicht.[4]

---

[1] Ludwik, Zeitschr. f. Metallkunde, *16* (1924), 207.

[2] Derselbe und Scheu, Stahl und Eisen, *45* (1925), 373. Vgl. auch: M. Polanyi und E. Schmid, Zeitschr. f. Physik, *16* (1923), 336.

[3] Ludwik, Zeitschr. d. Vereines deutscher Ingenieure, *70* (1926), 382.

[4] Derselbe, Zeitschr. d. österr. Ingenieur- u. Archit.-Vereines, *76* (1924), 440.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Die den Fließ- und Bruchbeginn kennzeichnenden Grenzzustände seien durch zwei Gerade G_σ und G_τ gegeben.[1] Schneidet der Hauptkreis die Gerade G_τ, wird also $oz_1 - ox_1 = \sigma_z - \sigma_x > 2\,\tau_0$ (Fig. 2), so treten bleibende Formänderungen zufolge Schiebungen unter 45° zur Richtung der Hauptzugspannung σ_x und σ_z ein. Wird aber vorher die Gerade G_σ geschnitten, wird also $oz_2 = \sigma_z > \sigma_0$ (Fig. 2), so erfolgt zufolge Kohäsionsüberschreitung ein Trennungsbruch senkrecht zur Richtung der größten Zugspannung σ_z. Je nach der Art des Spannungszustandes und dem Verhältnis von Reiß- und Gleitwiderstand kann sich also dasselbe Metall schmeidig oder spröde verhalten.

III. Abhängigkeit der Bruchgefahr von der Art des Spannungszustandes.

Beispiele:

Wärme-, Schwind- und Reckspannungen. Kerbwirkungen.

Eine häufige Bruchursache sind Wärmespannungen, Gußspannungen, Schwindspannungen u. dgl. zufolge ungleichmäßiger Erwärmung, Abkühlung, Ausdehnung oder Schwindung. Auch bei dehnbaren Metallen, wie z. B. bei Stahlguß treten in solchen Fällen »Kaltrisse« und »Warmrisse« auf, ohne daß an der Bruchstelle merkliche bleibende Formänderungen zu beobachten wären. Nach obigen Darlegungen werden wegen des durch die Wärme- oder Schwindspannungen hervorgerufenen mehrachsigen Spannungszustandes solche Brüche um so leichter eintreten, je kleiner der Reißwiderstand und je größer der Gleitwiderstand ist. In diesem Sinne kann also eine (im Verhältnis zur Reißfestigkeit) zu hohe Fließgrenze sogar die Brüchigkeit erhöhen.

Von gleicher Wirkung sind Reckspannungen,[2] die nach ungleichmäßiger Kaltreckung im Metall zurückbleiben und zu »Spannungsrissen« führen, ohne daß selbst dehnbare Metalle, wie z. B. Messing, sich vorher an der Bruchstelle merklich deformieren.

Aber auch Kerbwirkungen (zu scharfe Übergänge, innere Unhomogenitäten u. dgl.) können gefährliche mehrachsige Spannungszustände hervorrufen. Denn je schärfer der Kerb, um so mehr wirkt das angrenzende, viel schwächer beanspruchte Material versteifend, wodurch das Nachfließen und die Querverzerrung gehindert und ein räumlicher Spannungszustand hervorgerufen werden kann.[3]

---

[1] Unter der vereinfachenden Voraussetzung eines vollkommen homogenen und isotropen Körpers, dessen Kohäsion (wenigstens für unterhalb der Schubgrenze liegende Schubspannungen) unabhängig von der Schubspannung und dessen Schubgrenze (wenigstens für unterhalb der Kohäsion liegende Normalspannungen) unabhängig von der Normalspannung sei.

[2] Vgl. u. a.: E. Heyn und O. Bauer, Internat. Zeitschr. f. Metallographie, *1* (1911), 16; G. Masing, Zeitschr. f. Metallkunde, *16* (1924), 257 u. 301, *17* (1925), 17 u. 183; M. Polanyi und G. Sachs, Zeitschr. f. Metallkunde, *17* (1925), 227.

[3] Ludwik und Scheu, Stahl und Eisen, *43* (1923), 999.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

IV. Abhängigkeit der Bruchgefahr von der Größe des Gleit- und Reißwiderstandes.

1. Erhöhte Bruchgefahr zufolge Zunahme des Gleitwiderstandes bei etwa gleichbleibendem Reißwiderstand.

Beispiele:

Einfluß der Formänderungsgeschwindigkeit. Altern von Flußstahl. Abhängigkeit der Kerbzähigkeit von der Temperatur. Kalthärtung.

So wie bei Flüssigkeiten ist auch bei festen Körpern die innere Reibung, beziehungsweise der Gleitwiderstand (den der Körper der Verformung entgegensetzt) abhängig von der Fließgeschwindigkeit. Während aber dort beide Größen (bei gleicher Temperatur) einander proportional sind, ist bei Metallen diese Beziehung logarithmisch.[1] Mit zunehmender Formänderungsgeschwindigkeit müssen daher auch die Formänderungswiderstände mehr oder weniger zunehmen. Ist der Reißwiderstand im Verhältnis zum Gleitwiderstand genügend groß, so wird kein Bruch eintreten, der Stoff erscheint schmeidig. Überwiegen jedoch bei größeren Geschwindigkeiten die mit diesen wachsenden Gleitwiderstände, so erfolgt, zufolge örtlicher Kohäsionsüberschreitung, ein vorzeitiger Trennungsbruch.

Recht anschaulich zeigen dies z. B. Biegeversuche mit Zink, das sich ganz langsam beliebig biegen ließ, bei rascher Biegung aber sofort glatt abbricht.[2]

Aus gleichem Grunde verhält sich auch z. B. Pech bei statischer Beanspruchung wie eine zähe Flüssigkeit, bei dynamischer aber wie ein spröder fester Körper.[3]

Eine oft beträchtliche Zunahme des Gleitwiderstandes (bei wenig verändertem Reißwiderstand) erfolgt auch beim Altern von Flußstahl bei längerer Lagerung im kaltgereckten Zustand oder bei »künstlicher Alterung« nach kurzer Erwärmung auf mäßige Temperaturen. So erhöhte z. B. schon ein halbstündiges Kochen in Wasser die Fließgrenze eines um 5% vorgestreckten Flußstahls (mit 0·13% C) um rund 20% und die eines um 1% vorgestreckten Elektrolyteisens sogar um 50%.[4]

Diese Zunahme des Gleitwiderstandes (ohne entsprechende Erhöhung des Reißwiderstandes) dürfte auch mit Ursache sein, warum gealtertes Eisen häufig viel kerbspröder ist als nicht gealtertes. Da die Zunahme des Gleitwiderstandes beim Altern und

---

[1] Ludwik, Physikalische Zeitschr., 10 (1909), 411.
Derselbe, Stahl und Eisen, *43* (1923), 1427.

[3] Elemente der Technologischen Mechanik, p. 50. Berlin, 1909, J. Springer.

[4] Derselbe und Scheu, Werkstoffausschußbericht Nr. 70 des Vereines deutscher Eisenhüttenleute (Nov. 1925).

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Tabelle 1

Werkstoff	Gleichmäßige Dehnung δ_g %	Bruchdehnung δ %	Bruch-einschnürung ψ %	Fließgrenze s kg/mm²	Zugfestigkeit K_z kg/	Reißfestigkeit σ_B kg/mm² beobachtet	Reißfestigkeit σ_B kg/mm² berechnet
Kupfer, geglüht	32	41	69·6	4·2	23·5	54·8	54·7
	31	40·6	66·2	4·2	24	51·1	51·7
Gelbtombak Ms 72, geglüht	45	52·9	74·8	14·5	36·9	107·5	99·7
	49	53·8	76·3	13·1	35·3	104·5	99·3
Druckmessing Ms 63, geglüht	46	49·7	48·9	14·5	36·4	69·5	66·6
	51	54	51·7	14·0	36·3	70·9	69·7
0·08% C-Flußstahl, geglüht	27	34·9	73	22·1	35·4	85·9	86·2
	30	36·4	74·4	21·1	35·6	88	90
Derselbe um 20% vorgestreckt	5·8	15	67·6	42·2	42·5	85·9	86·2
0·13% C-Flußstahl, geglüht	20	34·6	72·9	26·1	37·3	92·5	88·2
	20	33·4	73·3	26·2	37·4	93·7	89
Derselbe 10 Stunden in H_2SO_4 (1 40) gebeizt	16	19·7	28	27·5	38	51·8	51·4
	16	18	28	27·5	37·9	51·9	51·2
0·15% C-Flußstahl, geglüht	26	32	70·3	26·6	38·9	88·3	89·6
	26	34·3	71·3	27	38·6	90·9	90·7
Derselbe 1 Stunde bei 1200° C. überhitzt	4·5	28·7	57·7	19·9	38·4	69·3	70·4
	21	28	60·3	21·4	38·2	72·2	71·6
0·45% C-Flußstahl, gewalzt	12·5	19·2	46	40·4	65·5	103·2	102·4
	12·5	19·7	45·7	41·6	67	104·7	105·2
0·45% C-Stahlguß	7	7	6·8	29·1	54·4	58·3	58·4
	7	8	9·2	28·1	52·3	57·6	57·6
Derselbe 1/2 Stunde bei 800° C. geglüht	12·5	13	14·8	39·6	65·5	76·1	76·8
	12·0	13·5	17·2	38·7	61·2	72·9	73·6

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

in der »Blauhitze« auf dieselbe Ursache zurückzuführen ist, so wird derart auch die »Blaubrüchigkeit« verständlich.[1]

Aber auch der oft plötzliche Abfall der Kerbzähigkeit in gewissen Temperaturbereichen[2] beruht wohl nur darauf, daß mit sinkender Temperatur der Gleitwiderstand mehr zunimmt als der Reißwiderstand.

Auch die große Sprödigkeit des Ferrits bei tiefen Temperaturen rührt daher, daß — wie Versuche in flüssiger Luft zeigten — mit abnehmender Temperatur die Fließgrenze um ein Vielfaches zunahm, wogegen sich die Reißfestigkeit nur wenig änderte.[3]

Ebenso sinkt z. B. bei der Kalthärtung die Dehnbarkeit, weil hierbei der Gleitwiderstand weit mehr zunimmt als der Reißwiderstand. Aus dem gleichen Grunde wird z. B. Eisen mit zunehmendem Kohlenstoffgehalt spröder und auch die »Kaltbrüchigkeit« von phosphorhältigem Eisen dürfte hierauf zurückzuführen sein, wogegen die größere Brüchigkeit gegossener Metalle (gegenüber gewalzten oder geschmiedeten) hauptsächlich durch den geringeren Reißwiderstand des Gußgefüges hervorgerufen wird. Vgl. auch Tabelle 1.

2. Erhöhte Bruchgefahr zufolge Abnahme des Reißwiderstandes bei etwa gleichbleibendem Gleitwiderstand.

Beispiele:

Beizbrüchigkeit. Überhitzung. Legierung. Ermüdung.

Ein schönes Beispiel wie trotz unveränderter Fließgrenze und Zugfestigkeit die Brüchigkeit mit abnehmender Reißfestigkeit zunimmt bietet die Beizbrüchigkeit.

Flußeisenstäbe von 6 *mm* Durchmesser wurden teils verschieden lange in verdünnte Schwefelsäure (1 40) eingelegt und dann sofort zerrissen, teils 10 Stunden (in Schwefelsäure 1:40) gebeizt und vor dem Zerreissen verschieden hoch und lange angelassen. Mit zunehmender Beizdauer fiel die Reißfestigkeit erst rasch, dann immer langsamer. Schon nach einer halben Stunde betrug der Abfall 25%, nach einer Stunde fast 35% und nach 5 Stunden über 40%, während Fließgrenze und Zugfestigkeit gleich bleiben.

Diese Abnahme der Reißfestigkeit bei unveränderter Fließgrenze und Zugfestigkeit ist wohl darauf zurückzuführen, daß der eintretende Wasserstoff das Krystallgitter örtlich etwas aufweitet, was innere Spannungen hervorruft.

---

1 Vgl. auch: Zeitschr. d. Vereines deutscher Ingenieure, *70* (1926), 379.

2 Vgl. u. a.: F. Körber u. A. Pomp, Mitt. Kaiser-Wilhelm-Inst. für Eisenforschung, *6* (1925), 21 u. 33; E. Maurer u. R. Mailänder, Stahl und Eisen, *45* (1925), 409 und Zeitschr. d. Vereines deutscher Ingenieure, *69* (1925), 1479.

3 Ludwik, Zeitschr. d. Vereines deutscher Ingenieure, *70* (1926), 382.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Gleichzeitig mit der Reißfestigkeit nehmen auch Bruchdehnung und Brucheinschnürung ab, was aber bloß eine notwendige Folge der Kohäsionsverminderung bei unverändertem Verformungswiderstande ist. Vgl. auch Tabelle 1.

Beim Anlassen entweicht der beim Beizen aufgenommene Wasserstoff erst rasch, dann immer langsamer, womit (bei unveränderter Fließgrenze und Zugfestigkeit) auch der Reißwiderstand wieder zunimmt bis der ursprüngliche Zustand hergestellt ist.[1]

Chemische Einwirkungen vermögen also bei gleichbleibendem Gleitwiderstand den Reißwiderstand stark herabzusetzen, was wieder recht anschaulich zeigt, daß Zug- und Reißfestigkeit einschnürender Stoffe in keinem unmittelbaren Zusammenhang stehen.

Eine Erhöhung der Brüchigkeit zufolge Abnahme der Reißfestigkeit kann auch z. B. durch Überhitzung entstehen. So verminderte schon einstündiges Glühen bei 1200° C. die Reißfestigkeit eines 0·15% C-Flußstahls von rund 90 auf 70 *kg/mm²* und die Kerbzähigkeit von rund 12 auf 6 *mkg/cm²*, während die Zugfestigkeit gleich blieb. Vgl. auch Tabelle 1. Bei kohlenstoffreicherem Eisen wird diese Abnahme der Reißfestigkeit leicht durch die gegensätzliche Wirkung der Abschreckung (bei der Abkühlung) überdeckt.

Recht anschaulich läßt sich auch die Abnahme der Reißfestigkeit durch Überhitzung z. B. bei Zink im Torsionsversuch zeigen. Schon eine kurze Erwärmung auf 400° C. setzt die Reißfestigkeit derart herab, daß bei Verdrehung (bei Zimmertemperatur) ein schraubenförmiger Trennungsbruch (wie bei spröden Stoffen) erfolgte, wogegen nach schwächerer Erwärmung (z. B. auf 350° C.) stets Abschiebung (wie bei schmeidigen Stoffen) eintrat.[2]

Viel durchgreifender als durch bloße Wärmebehandlung lassen sich die Festigkeitseigenschaften der Metalle durch entsprechende Legierung verändern. Durch in fester Lösung aufgenommene Zusätze wird im allgemeinen die Sprödigkeit erhöht, wohl weil der Gleitwiderstand hierbei mehr zunimmt als der Reißwiderstand.

Eine Erhöhung der Dehnbarkeit durch Legierung wäre unserer Auffassung nach nur möglich, wenn mit dem Gleitwiderstand auch der Reißwiderstand entsprechend gehoben würde. Ein solcher Ausnahmsfall ist bei Kupfer-Zink-Legierungen zu beobachten, wo z. B. ein 28prozentiger Zinkzusatz (Ms 72) nicht nur die Fließgrenze und Zugfestigkeit, sondern auch die Reißfestigkeit bedeutend erhöhte. Vgl. Tabelle 1.

Doch kann auch durch Legierung bei gleichbleibendem Gleitwiderstand der Reißwiderstand abnehmen. So haben z. B. die beiden Messingsorten Ms 72 und Ms 63 (mit 28, beziehungsweise 37% Zink) nahezu gleiche Dehnung, Fließgrenze und Zugfestigkeit, jedoch verschiedene Reißfestigkeit und Einschnürung. Vgl. Tabelle 1.

---

[1] Vgl. auch: Zeitschr. d. Vereines deutscher Ingenieure, *70* (1926), 385.

[2] Ludwik, Zeitschr. d. österr. Ingenieur- Archit.-Vereines, *76* (1924), 440.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Die Ursache der geringeren Einschnürung der zinkreicheren Legierung dürfte daher nur in ihrer geringeren Reißfestigkeit liegen.

Aber nicht nur durch unrichtige Wärmebehandlung oder durch Legierung können dehnbare Metalle spröde werden, sondern auch durch Ermüdung nach oftmals wiederholtem Spannungswechsel.

In unserer Versuchsanstalt durchgeführte Dauerversuche[1] ergaben, daß die heute noch vorherrschende Anschauung, wonach bei jedem Spannungswechsel das Metall sich ein wenig bleibend deformiert, so lange, bis das Arbeitsvermögen des Stoffes völlig erschöpft ist, nicht zutrifft, denn das ermüdete Metall zeigte ganz unabhängig von der Zahl der Spannungswechsel und der Höhe der Grenzbelastung oberhalb dieser das gleiche Deformationsdiagramm (Torsionsdiagramm) wie das ursprüngliche Metall, nur bricht das Diagramm um so früher ab, je mehr Wechsel vorangingen.

Die jeden Belastungswechsel begleitenden, oft (besonders bei hohen Grenzbelastungen) sehr beträchtlichen bleibenden Formänderungen bewirken also keine Verfestigung, sondern eine allmählich fortschreitende Gefügelockerung. Sobald nämlich die »Ermüdungsgrenze« überschritten wird, finden an den höchstbeanspruchten Stellen bei jedem Spannungswechsel — vermutlich zufolge der inneren Spannungen und unsymmetrischer »Gleitflächenblockierung«[2] — Hin- und Herschiebungen statt, wie auch metallographisch nachgewiesen werden konnte. Hierbei werden erst wohl nur ganz wenige, später aber immer mehr Bindungen überanstrengt und gelöst, wodurch sich bei fortschreitender Auflockerung des Krystallgitters allmählich »innere Trennungsflächen« ausbilden, die sich schließlich zu einem Riß vereinigen.

Solange demnach die Beanspruchung überall (besonders an den durch Kerbwirkungen viel höher beanspruchten Stellen) unterhalb der Ermüdungsgrenze liegt, wird überhaupt keine Ermüdung (auch bei beliebig oft wiederholtem Lastwechsel) eintreten und die Dauerfestigkeit ist dann ebenso unabhängig von der Schmeidigkeit wie von der Kohäsion. Dagegen wird bei Überschreitung der Ermüdungsgrenze die Lebensdauer des Werkstoffes unter sonst gleichen Umständen um so größer sein, je mehr die Kohäsion die Ermüdungsgrenze überragt.

3. Verminderte Bruchgefahr zufolge Zunahme des Reißwiderstandes.

Beispiele:

Vergütung von Flußstahl.

Da bei der Vergütung von Flußstahl die Fließgrenze stärker zunimmt als die Zugfestigkeit, so wäre es, wenn nur die

---

[1] Ludwik und Scheu, Zeitschr. d. Vereines deutscher Ingenieure, *67* (1923), 122; Ludwik, Zeitschr. f. Metallkunde, *15* (1923), 68.

[2] Ludwik, Zeitschrift. d. Vereines deutscher Ingenieure, *63* (1919), 142 und *69* (1925), 349.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Änderungen von Fließgrenze und Zugfestigkeit in Betracht gezogen werden, eigentlich unverständlich, warum durch Vergütung nicht nur der Formänderungswiderstand, sondern auch das Formänderungsvermögen oft so bedeutend erhöht werden kann.

Dagegen ist die Wirkung der Vergütung gut zu verstehen, wenn die Begriffe Zugfestigkeit und Reißfestigkeit strenge auseinandergehalten werden und erstere als ein Formänderungswiderstand, letztere aber als ein Trennungswiderstand aufgefaßt wird.

Aus den in Tabelle 2 zusammengestellten Ergebnissen von Zug- und Kerbschlagproben mit ausgeglühtem, weich- und hartvergütetem Nickelstahl geht hervor, daß der weich vergütete Stahl

Tabelle 2.

Einfluß der Vergütung auf die Festigkeitseigenschaften von Nickelstahl.

Nickelstahl mit 0·36% C und 2·95% Ni			1 Stunde bei 900° C. geglüht	Von 900° C. abgeschreckt und auf 650° C. angelassen	Von 900° C. abgeschreckt und auf 350° C. angelassen
Zugprobe	Gleichmäßige Dehnung δ_g%		21·5 18	13 13	2·5 2·5
	Bruchdehnung δ%.. ...		25·1 24·2	19 20	7·0 7·1
	Brucheinschnürung ψ% ..		46 51	66 68·1	48·2 52·4
	Fließgrenze σ_S kg/mm^2.. ..		46·5 46·1	60·2 64·3	128·8 135
	Zugfestigkeit K_Z kg/mm^2		63·7 64·3	70·8 70·9	139 143·9
	Reißfestigkeit σ_B kg/mm^2	beobachtet	99 102·6	138·3 141·6	196·3 206
		berechnet..	104 108	144·3 150	210 225
Kerbschlagprobe	Kerbzähigkeit in mkg/cm^2...		8·1 8·1 8·3	18·7 18·4 18·6	7·6 6·3 6·7

trotz höherer Fließgrenze und Zugfestigkeit viel weniger spröde ist als ausgeglühter, weil bei nicht zu harter Vergütung die Reißfestigkeit stärker zunimmt als der durch die Zugfestigkeit gemessene mittlere Gleitwiderstand.[1]

[1] Vgl. auch: Zeitschr. d. Vereines deutscher Ingenieure, *70* (1926), 384.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Die geringere Sprödigkeit entsprechend vergüteter Stähle kommt sehr deutlich in der Einschnürung und Kerbzähigkeit zum Ausdruck, dagegen gar nicht in der Bruchdehnung, die sogar bei den weich vergüteten Stählen kleiner war als bei den ausgeglühten.

Sämtliche Versuche wurden gemeinsam mit R. Scheu durchgeführt.

Zusammenfassung.

Es wird gezeigt, daß das Wesen jeder Brüchigkeit auf einem im Verhältnis zum Gleitwiderstand (Verformungswiderstand) zu geringen Reißwiderstand (Trennungswiderstand) beruht.

Die übliche Bewertung unserer Werkstoffe bloß nach der Zugfestigkeit ohne Berücksichtigung der Reißfestigkeit kann bei dehnbaren Metallen bei Beurteilung der Bruchgefahr zu Fehlschlüssen führen, da durch die Zugfestigkeit (ähnlich wie z. B. durch die Eindruckhärte) nur ein mittlerer Gleitwiderstand, nicht aber ein Reißwiderstand gemessen wird.

Je nach der Art des Spannungszustandes und nach dem Verhältnis von Reiß- und Gleitwiderstand kann derselbe Stoff schmeidig oder spröde erscheinen. Je größer z. B. bei gegebener größter Hauptzugspannung die kleinste Hauptzugspannung ist, je mehr sich also der Spannungszustand einer allseitigen Zugbeanspruchung nähert, um so mehr muß der Reißwiderstand die Fließgrenze überragen, damit kein Bruch vor Fließbeginn erfolgt.

Das Auftreten solcher mehrachsiger Spannungszustände bei Wärme-, Schwind- und Reckspannungen sowie bei Kerbwirkungen ist bei im Verhältnis zum Gleitwiderstand ungenügendem Reißwiderstand die Ursache, daß auch sehr dehnbare Stoffe oft ohne vorhergegangene Verformung plötzlich brechen.

Die Brüchigkeit nimmt zu z. B. mit wachsender Formänderungsgeschwindigkeit, bei sinkender Temperatur, durch Kaltreckung oder Legierung, wenn hiebei der Gleitwiderstand mehr zunimmt als der Reißwiderstand. Aber auch z. B. durch Überhitzung oder beim Beizen sowie infolge Ermüdung, weil dann der Reißwiderstand mehr abnimmt als der Gleitwiderstand. Dagegen wird die Brüchigkeit vermindert z. B. durch eine entsprechende Vergütung, da hiedurch der Reißwiderstand mehr zunimmt als der Gleitwiderstand.

Einen gewissen Anhalt für die Größe des Reißwiderstandes von Metallen und Legierungen gibt die »Reißfestigkeit«. Sie läßt sich näherungsweise auch im gewöhnlichen Zugversuch (also ohne Messung der Bruchlast) ermitteln, wenn neben der Zugfestigkeit und Einschnürung noch die »gleichmäßige Dehnung« gemessen wird.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse

Jahr/Year: 1926

Band/Volume: 135_2a

Autor(en)/Author(s): Ludwik Paul

Artikel/Article: Zugfestigkeit, Kohäsion und Bruchgefahr. 587-599