

ÜBER DIE ROLLE DER WERKSTOFFPRÜFUNG BEI DER ZEITGEMÄSSEN MASCHINENBEMESSUNG

Von

L. GILLEMOT

Institut für Mechanische Technologie der Technischen Universität, Budapest

(Eingegangen am 22. August 1958)

Die Dimensionierung der Maschinenbestandteile machte in den vergangenen 50 Jahren eine weitgehende Entwicklung durch, wobei jedoch der bekannte grundlegende Zusammenhang

$$\sigma_{\text{red}} < \sigma_{\text{zul}} \quad (1)$$

durchwegs unverändert blieb.

Auf der linken Seite dieser Ungleichung steht die aus dem Kräftespiel an Hand der Beziehungen der Festigkeitslehre ermittelte reduzierte Spannung, die entweder auf Grund der MOHRschen oder in neuerer Zeit der HENCKY—HUBER—MISESSchen Theorie gemäß berechnet werden kann.

Wie bekannt, gilt nach der MOHRschen Theorie

$$\sigma_{\text{red}} = \sigma_1 - \sigma_3, \quad (2)$$

worin σ_1 die höchste und σ_3 die niedrigste Hauptspannung bedeutet.

Nach der HENCKY—HUBER—MISESSchen Theorie schreibt sich hingegen

$$\sigma_{\text{red}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2} + \frac{(\sigma_2 - \sigma_3)^2}{2} + \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2}{2}} \quad (3)$$

Unter den beiden Spannungstheorien nähert die HENCKY—HUBER—MISESSche Theorie die wirklichen Verhältnisse besser, doch ist die MOHRsche Theorie leichter zu handhaben, und für Zwecke der praktischen Berechnungen bietet sie auch eine hinreichende Genauigkeit.

Unter σ_{zul} versteht man in der Regel den Bruchteil irgendeiner Materialkonstante, es ist somit

$$\sigma_{\text{zul}} = \frac{\sigma_a}{n} \quad (4)$$

worin σ_a die Materialkonstante, n dagegen einen Sicherheitsfaktor bezeichnet.

Auf die linke Seite dieser Gleichung, die ausschließlich auf den Grundlagen der Festigkeitslehre aufgebaut ist, soll hier nicht näher eingegangen werden, es sei — zum besseren Verständnis der folgenden Ausführungen — lediglich bemerkt, daß bei der Berechnung der reduzierten Spannung hier stets vorausgesetzt wird, daß der Konstrukteur in voller Kenntnis der Kraftwirkungen ist, und somit auch seine Festigkeitsberechnungen genau sind. In Wirklichkeit trifft diese Voraussetzung selbstredend nicht zu, da die Kraftwirkungen bei vielen Maschinen lediglich geschätzt oder willkürlich unter gewissen Bedingungen mit Werten angenommen werden, die die tatsächlich zu erwartenden in der Regel übertreffen. In der Folge soll dieser Umstand außer acht bleiben, da die Ermittlung der Größe der Kraftwirkungen bei den verschiedenen Maschinen ohnehin nach besonderen Grundsätzen geschieht, und streng betrachtet auch nicht zu den Aufgaben des Werkstoffprüfers gehört.

Es muß jedoch betont werden, daß zur Berechnung der reduzierten Spannung auf der linken Seite der Ungleichung (1) jede Theorie den Werkstoff als ein homogenes Punktkontinuum betrachtet und weiter auch voraussetzt, die Spannung sei statischen Charakters. Der Umstand, daß dies nicht zutrifft, die Beanspruchung vielmehr periodisch oder stoßartig verläuft, wird in der Regel auf der rechten Seite der Gleichung bei den Werten für σ_{zul} berücksichtigt.

Die Werte von σ_{zul} wurden lange Zeit hindurch auf Grund der von C. BACH mitgeteilten Angaben gewählt, der zu seiner Zeit durch seine Sammlung praktisch bereits bewährter σ_{zul} -Werte eine äußerst wertvolle Arbeit geleistet hatte.

Mit der fortschreitenden Entwicklung der Bemessung veralteten selbstredend diese frühen Angaben von BACH in vieler Hinsicht. Im weiteren Verlauf nahm man denn auch die zulässige Spannung nicht mehr auf Grund der praktischen Erfahrungen an, sondern ermittelte sie als den Quotienten irgendeiner Materialkonstante und des Sicherheitsfaktors. In dieser Fassung wird

$$\sigma_{zul} = \frac{\sigma_a}{n}$$

worin σ_a irgendeine Materialkonstante und n den auf die betreffende Materialkonstante bezogenen Sicherheitsfaktor bezeichnet.

Bekanntlich hängt der Wert der Materialkonstante auch vom zeitlichen Verlauf der Beanspruchung ab, und bei statischen Zugversuchen erhält man andere Werte als bei wiederholten Beanspruchungen. Eben deshalb stehen dem Konstrukteur zur Ermittlung der zulässigen Spannung zwei Möglichkeiten zur Verfügung: entweder bestimmt er den Materialkennwert, auf Grund dessen die zulässige Spannung angenommen werden soll, mit Hilfe eines der tatsächlichen Beanspruchung entsprechenden Versuches, oder er gleicht die

Differenz zwischen den einzelnen Materialkennwerten durch Wahl verschiedener Sicherheitsfaktoren aus. Im ersten Fall gestalten sich die Gleichungen für die Wahl der zulässigen Spannung sowohl für Druck-, Zug-, als auch für Biegebeanspruchungen auch bei einfacher statischer Beanspruchung gemäß

$$\sigma_{\text{zul}} = \frac{\sigma_S}{n}, \quad (5)$$

wo σ_S dem jeweiligen Fall entsprechend die Fließgrenze bei der Druck-, Zug- bzw. Biegebeanspruchung bedeutet.

Für die Fließgrenze eines bildsamen Werkstoffes ergeben sich bekanntlich zahlenmäßig verschiedene Werte, je nachdem sie durch Zug-, Druck- oder Biegebeanspruchung ermittelt wird. So wird etwa die durch Biegung bestimmte Fließgrenze die durch Zugbeanspruchung festgestellte wesentlich überschreiten, es muß somit selbst im Fall einer einfachen statischen Dimensionierung entsprechend der Art der Beanspruchung diejenige Materialeigenschaft experimentell bestimmt werden, auf Grund derer die Bemessung vorgenommen wird. Naturgemäß gestaltet sich die Lage weit komplizierter, wenn es sich um eine wiederholte Beanspruchung handelt, da in diesem Fall

$$\sigma_{\text{zul}} = \frac{\sigma_e}{n}, \quad (6)$$

wo σ_e die Ermüdungsgrenze (Dauerfestigkeit) des betreffenden Stoffes bedeutet.

Wie bekannt, hängt die Dauerfestigkeit vom zeitlichen Verlauf der Beanspruchung sowie vom niedrigsten und höchsten Wert der Spannung ab, es muß also auch bei der Dimensionierung auf Ermüdung eine ganze Reihe experimenteller Daten ermittelt werden. Die Lage kompliziert sich durch den Umstand weiter, daß der Zahlenwert der Ermüdungsgrenze weitgehend auch vom Durchmesser des Prüfkörpers abhängt.

Diese hier eher nur beispielsweise angeführten Daten weisen ebenfalls darauf hin, daß die Werkstoffprüfung für die Bemessungsarbeit äußerst viele Daten beizustellen hat, oder in anderer Fassung: Der Wert der zulässigen Spannung muß nach unseren heutigen Kenntnissen stets durch eine Werkstoffprüfung ermittelt werden, bei der die Art der experimentellen Beanspruchung derjenigen ähnlich ist, der die Konstruktion in Wirklichkeit ausgesetzt sein wird. Bei dieser Bemessungsmethode kann der Sicherheitsfaktor verhältnismäßig klein bleiben, und sein Wert wird allein durch die Tatsache bestimmt, daß der Werkstoff keinen vollkommen homogenen Stoff darstellt, daß vielmehr der Wert der betreffenden Materialkenngröße aus erzeugungstechnologischen Gründen eine gewisse Streuung aufweisen wird.

In Bild 1 und 2 sind einige statistische Daten dargestellt, die erkennen lassen, welche Streuungsgrenzen sich für eine beliebig ausgewählte Material-

kenngröße — so z. B. für die Zugfestigkeit — bei einem Werkstoff ergeben können. Bild 1 zeigt die Schwankung der Zugfestigkeit eines ungarischen genormten Walzstahls (Normblatt A 34.22). Auf die Abszissenachse sind die bei den Versuchen ermittelten Zugfestigkeitswerte aufgetragen, während auf der Ordinatenachse die Häufigkeit der einzelnen Meßwerte erscheint. Wie aus dem Schaubild ersichtlich, kommt innerhalb der Grenzen von 28 und 62 kg/mm² jeder Wert vor, wobei sich die Werte zwischen 36 und 46 kg/mm² am stärksten

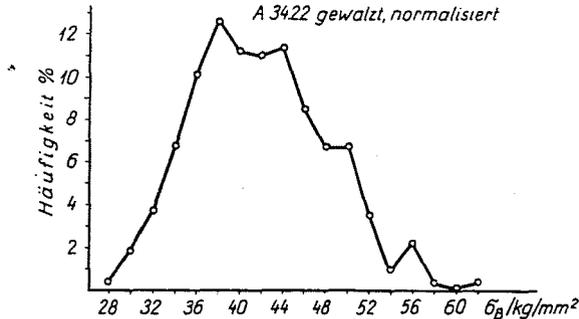


Bild 1. Häufigkeitskurve der Zugfestigkeit des Stahles 34.22

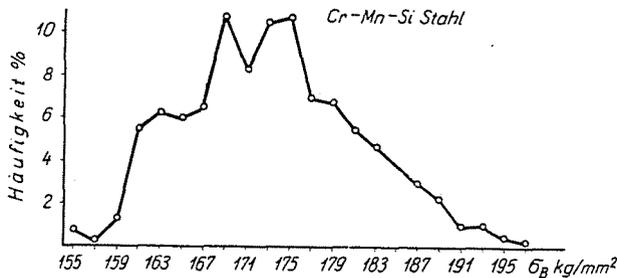


Bild 2. Häufigkeitskurve der Zugfestigkeit eines Chrom-Mangan-Siliziumstahles

häufen. Bild 2 zeigt dagegen, daß ein Cr-Mn-Si-Stahl eine Streuung innerhalb noch weiterer Grenzen aufweist.

Will man bei einem beliebigen Stahl als Zugfestigkeit der untersuchten mehreren hundert Prüfkörper den häufigst vorkommenden Wert annehmen, so darf der Konstrukteur offenbar nur mit einem im Verhältnis zu diesem niedrigeren Wert rechnen, da doch in einem bedeutenden Teil der Fälle auch Werte unterhalb des häufigsten vorkommen können.

Der eine Weg für die Konstruktion besteht somit darin, für jeden Werkstoff diejenige Werkstoffkenngröße zu bestimmen, die der wirklichen Beanspruchung des betreffenden Maschinenteils entspricht. In diesem Fall hängt der Wert des Sicherheitsfaktors grundsätzlich allein vom Ausmaß der

Streuung der gewählten Materialkenngröße ab. Um aber den Sicherheitsfaktor in der Tat auf diese Weise mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung bestimmen zu können, bedürfte es einer ausgedehnten Sammlung statistischer Daten. Fraglos darf jedoch gegenwärtig dieses Verfahren als die zeitgemäße Methode der Bemessung angesehen werden.

Früher war der andere Weg gebräuchlich, indem irgendeine Materialkenngröße — etwa die Zugfestigkeit — bestimmt wurde, wobei der Umstand, ob die Konstruktion statisch oder auf Ermüdung belastet wird, durch die unterschiedliche Wahl des Sicherheitsfaktors in Betracht gezogen wurde. Bei dieser Dimensionierungsmethode ist z. B.

$$\sigma_{zul} = \frac{\sigma_B}{n_1}, \quad (7)$$

wenn das Material statisch belastet, und

$$\sigma_{zul} = \frac{\sigma_B}{n_2}, \quad (8)$$

wenn es auf Ermüdung belastet wird.

Offenbar ist n_2 größer als n_1 . Diese zweite Methode wird heute nicht mehr angewendet, denn, obzwar hier nur wenige Materialkennwerte zu bestimmen sind, gestaltet sich die Dimensionierung unsicher, weil die durch die Art der Beanspruchung bedingten Änderungen hier lediglich in der Wahl des Sicherheitsfaktors berücksichtigt werden.

Letzten Endes erfordert somit die zeitgemäße Dimensionierung eine äußerst große Anzahl von Werkstoffprüfungsdaten, und um dem Konstrukteur alle nötigen Daten zur Verfügung stellen zu können, muß man für jeden Werkstoff sämtliche Kennwerte sowohl für statische, als auch für Ermüdungsbeanspruchungen ermitteln.

Bei jeder Art Festigkeitsberechnungen werden jedoch lediglich die Festigkeitswerte des Werkstoffes in Rechnung gezogen. Obschon die Werkstoffprüfung auch eine Reihe von Daten liefert, die für die Plastizität des Stoffes kennzeichnend sind, können diese in den Berechnungen nicht unmittelbar verwertet werden. So charakterisieren z. B. die Werte der Dehnung oder der Kontraktion in einem gewissen Grade die Plastizität des Stoffes, doch kann der Konstrukteur diese in seinen Berechnungen nicht unmittelbar verwenden. Die Auswertung dieser Zahlenwerte bei der Beurteilung eines Stoffes kann allein auf der Grundlage erfolgen, daß zur Beurteilung der Güte irgendeines Werkstoffes sehr viele statistische Daten zur Verfügung stehen. Wenn z. B. die Fließgrenze, Zugfestigkeit, Dehnung und Kontraktion eines Werkstoffes bestimmt werden, läßt sich seine Beschaffenheit bereits mehr oder minder

entscheiden, jedoch nur deshalb, weil sich im Laufe der Jahrzehnte eine große Anzahl von Vergleichsdaten angesammelt hat, der Konstrukteur weiß also, welchen Anforderungen der gegenständliche Werkstoff gerechtzuwerden hat. Von diesem Gesichtspunkte aus stellt somit die Werkstoffprüfung eine auf experimentellen Grundlagen beruhende Wissenschaft dar, deren einzelne Begriffe (wie etwa die Dehnung des Stoffes) in der Festigkeitsbemessung nicht unmittelbar angewendet werden können.

Auch vom Gesichtspunkt der zeitgemäßen Dimensionierung aus wirkt es sich als äußerst großer Mangel aus, daß sich der plastische oder spröde Zustand des Werkstoffes, obschon er durch die üblichen Proben beurteilt werden kann, nicht unmittelbar in die Berechnungen einführen läßt. Es gibt jedoch auch Vorschriften und Vorschläge, die irgendeine Kennzahl der Plastizität des Werkstoffes mit dem Sicherheitsfaktor in Beziehung bringen. So wird z. B. in Hütte [1] für die Wahl des Sicherheitsfaktors die Formel

$$n = 2 - \sqrt{\frac{\psi}{100}} \quad (9)$$

vorgeschlagen, in der n den Sicherheitsfaktor und ψ die Kontraktion bedeutet. Abgesehen von diesen völlig empirischen — obgleich sehr wertvollen — Beziehungen, werden gegenwärtig bei der Dimensionierung Charakter und Art der Beanspruchung bereits berücksichtigt, doch wird hierbei der plastische bzw. spröde Zustand des Werkstoffes, ferner die Faktoren, die ihn aus seinem ursprünglich plastischen Zustand in den spröden Zustand überführen, nur äußerst wenig beachtet. Es kann nicht als Zufall betrachtet werden, daß bei sonst richtig dimensionierten Maschinen der Großteil der Brüche Sprödbrüche darstellt, und ebensowenig läßt es sich dem Zufall zuschreiben, daß zur Zeit auf dem Gebiete der Werkstoffprüfung eben die Untersuchung der Neigung zum Sprödbbruch im Vordergrund der Forschungsarbeiten steht.

Auf der heutigen Entwicklungsstufe der Werkstoffprüfung besteht somit eine der wichtigsten Aufgaben darin, Begriff und Umstände des Sprödbrechens möglichst derart zu klären, daß die hierbei erhaltenen Zahlenwerte unmittelbar in die Formel der Dimensionierung eingesetzt werden können.

Die derzeit üblichen Kennzahlen der Werkstoffprüfung können indessen auch von dem Gesichtspunkt aus kritisiert werden, daß die meisten üblichen Kennzahlen, so z. B. die im Laufe des Zugversuches bestimmte Dehnung oder die CHARPYSche Schlagarbeit, physikalisch nicht richtig definierte Begriffe darstellen, daß sie also mit den tatsächlichen physikalischen Kennzahlen nicht in Korrelation gebracht werden können.

In erhöhtem Maße trifft dies für die technologischen Proben zu, bei denen die Werkstoffprüfung in der Regel nichts anderes zu leisten vermag als einen Zustand herzustellen, der ungünstiger ist als der zu erwartende Betriebs-

zustand, und zu versuchen, daraus auf das Verhalten des Werkstoffes Schlüsse zu ziehen. Am deutlichsten tritt dies beispielsweise bei den Schweißbarkeitsprüfungen in Erscheinung, bei denen die verschiedenartigsten Proben vorgenommen werden, ohne daß man aus diesen einen zahlenmäßigen Wert gewinnen könnte, der sich zur objektiven Beurteilung der Schweißbarkeit eines Stahles eignete. Es liegt außer Zweifel, daß die Schweißbarkeitsproben einen äußerst wertvollen Beitrag zur Beurteilung eines Werkstoffes leisten, doch bedeutet dies keineswegs, daß die Schweißbarkeit heute bereits ganz objektiv bewertet werden könnte, und dies eben deshalb, weil die meisten Schweißbarkeitsproben physikalisch nicht genügend untermauert sind. Auch ein einheitliches System der Werkstoffprüfung läßt sich derzeit schwerlich aufstellen, da doch der Einfluß einer Anzahl von Faktoren auf eine Anzahl von Kennzahlen zu untersuchen ist.

Zusammenfassend kann die heutige Lage der Werkstoffprüfung folgendermaßen gekennzeichnet werden: Unter den gebräuchlichen Kennzahlen sind die Festigkeitszahlen im allgemeinen physikalisch richtig definiert, den Begriff der Zugfestigkeit ausgenommen. Die meisten Kennzahlen, wie die Dehnung, Kontraktion, Schlagarbeit oder unter den technologischen Proben die Kennzahlen der Schweißbarkeit, sind physikalisch nicht begründet und ihre Verwendbarkeit sichert bloß die große Anzahl der heute bereits zur Verfügung stehenden statistische Daten sowie die Erfahrung.

Der zweite heute noch bestehende Mangel besteht darin, daß die Werkstoffprüfung über keine physikalisch richtig definierte Kennzahl verfügt, die die Plastizität oder Sprödigkeit des Werkstoffes für sich und allein eindeutig bestimmen würde. Wohl ist es heutzutage üblich, die Plastizität oder Sprödigkeit des Werkstoffes durch die zusammengefaßten Dehnungs- und Kontraktionswerte zu charakterisieren, doch bietet weder die Dehnung noch die Kontraktion für sich allein eine Handhabe zur Beurteilung der Plastizität. Insbesondere gilt dies, wenn man bedenkt, daß die Werkstoffprüfung diese Kennzahlen durch einen Versuch bestimmt, der an einem in einachsigen Spannungszustand befindlichen Probekörper durchgeführt wird, während der Werkstoff in Wirklichkeit einem mehrachsigen Spannungszustand ausgesetzt ist, daß also die beim einachsigen Spannungszustand ermittelten Kennzahlen der Plastizität nicht unbedingt auch für die tatsächlich auftretenden mehrachsigen Spannungszustände gelten müssen.

Zustandsgrößen

Es ist seit langem bekannt, daß sich der Wert der üblichen Werkstoffkennzahlen unter dem Einfluß des mehrachsigen Spannungszustandes verändert. Obwohl der Großteil der Forschungsarbeiten die Bedingungen des Fließbeginns im mehrachsigen Spannungszustand untersucht, so z. B. FÖPPL

[2], GUEST [3], KÁRMÁN [4], LODE [5], ROŠ und EICHINGER [6] und andere, wurden daneben auch zahlreiche Versuche durchgeführt, die feststellen sollten, wie sich die die Plastizität des Werkstoffes charakterisierenden Kennzahlen in Abhängigkeit vom mehrachsigen Spannungszustand ändern. Derartige Versuche stellten SIEBEL und MAYER [7] sowie LUDWIK [8] und in letzterer Zeit BRIDGEMAN an. Diese Versuche wurden beinahe ausschließlich mit Hilfe der in Bild 3 dargestellten Vorrichtung durchgeführt. Bei der einen

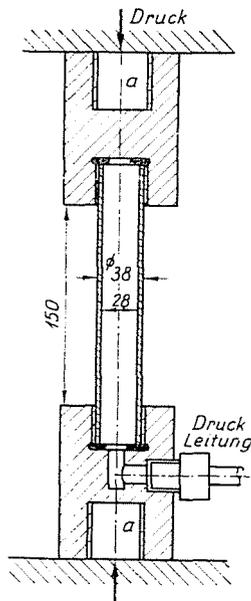


Bild 3. Versuchsanordnung zur Messung des mehrachsigen Spannungszustandes nach SIEBEL und MAYER

Art von Versuchen stellte der Prüfkörper ein mit innerem Flüssigkeitsdruck belastetes Rohr dar, das außerdem noch auf Zug oder Druck beansprucht wurde. Bei der anderen Versuchsart wurde ein Stab mit kreisförmigem Querschnitt als Prüfkörper verwendet, wobei der Prüfkörper außer der in seiner Längsachse wirkenden Zug- oder Druckkraft auch noch einem radial wirkendem Flüssigkeitsdruck ausgesetzt wurde. Auch mit diesen beiden Arten der Versuchsanordnung konnte nachgewiesen werden, daß sich unter dem Einfluß des mehrachsigen Spannungszustandes nicht allein die Fließgrenze des Werkstoffes, sondern auch sein plastischer oder spröder Zustand verändert. Es ließ sich auf diese Weise nachweisen, daß der in Richtung seiner Längsachse gezogene Prüfkörper, wenn er infolge des in seinem Inneren herrschenden Druckes auch einer Zugspannung in radialer Richtung ausgesetzt ist, stets spröder wird, was nach LUDWIK in Bild 4 veranschaulicht ist. Auf die Abszisse im

Schaubild ist die Dehnung, auf die Ordinate die Spannung aufgetragen. Die vier Kurven lassen den Einfluß der verschieden großen radialen Zugspannungen erkennen. Obwohl das Schaubild lediglich eine Prinzipskizze darstellt, geht aus ihm dennoch deutlich hervor, daß die Dehnung mit zunehmender radial gerichteter Zugspannung (im Schaubild mit σ_x bezeichnet) beständig abnimmt, während die Fließgrenze stets anwächst. Im umgekehrten Fall hingegen, wenn also radial eine Druckspannung wirkt, gestaltet sich der Werkstoff immer plastischer.

Zahlreiche Versuchsergebnisse beweisen somit die Tatsache, daß der Zustand des Werkstoffes durch den mehrachsigen Spannungszustand beeinflusst wird, daß sich ferner der spröde Stoff bei einer bestimmten Temperatur

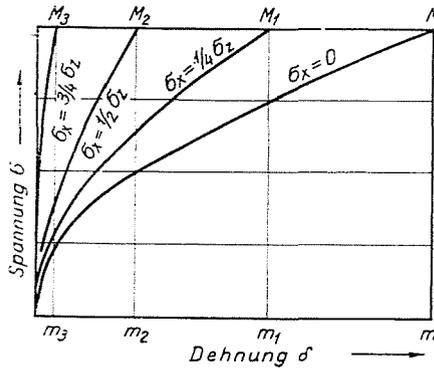


Bild 4. Wirkung der radialgerichteten Spannungen auf die Dehnung (LUDWIK)

und bei gegebener Verformungsgeschwindigkeit nur unter der Wirkung des mehrachsigen Spannungszustandes plastisch verhalten kann oder umgekehrt. Demgemäß kann also der durch die äußeren Kräfte bedingte mehrachsige Spannungszustand zugleich eine der Ursachen der Versprödung oder des Plastischwerdens eines Werkstoffes darstellen.

Zur Kennzeichnung des mehrachsigen Spannungszustandes wurde bis jetzt die Einführung verschiedener Kennzahlen vorgeschlagen. KOCHEN-DÖRFER und SCHOLL [9] kennzeichnen den Spannungszustand durch den Faktor \varkappa wobei

$$\varkappa = 1 - \frac{\sigma_{red}}{\sigma_1} \tag{10}$$

Der Wert von σ_{red} kann entweder nach der MOHRschen oder der HENCKY-HUBER-MISESSchen Theorie berechnet werden. Setzt man für σ_{red} den Wert nach der MOHRschen Theorie ein, erhält man

$$\varkappa = 1 - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1} = \frac{\sigma_3}{\sigma_1} \tag{11}$$

Der Wert von \varkappa ist somit Null, wenn der Spannungszustand einachsrig ist ($\sigma_3 = 0$), und $\varkappa = 1$, wenn die höchste und niedrigste Hauptspannung einander gleich sind ($\sigma_3 = \sigma_1$).

Von SCHNADT wurde zur Kennzeichnung des Spannungszustandes der Faktor π eingeführt :

$$\pi = \frac{\sigma_{\text{red}}}{\sigma_1} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1} \quad (12)$$

Der Wert von π wird offenbar gleich 1 sein, wenn der Spannungszustand einachsrig ist ($\sigma_3 = 0$) und Null, wenn $\sigma_3 = \sigma_1$, das heißt, wenn die höchste und niedrigste Hauptspannung einander gleich sind.

Zwischen den beiden vorgeschlagenen Kennzahlen besteht kein prinzipieller Unterschied, als bequemer kann jedoch der KOCHENDÖRFERSCHE \varkappa -Faktor bezeichnet werden. Im Sinne der Definitionen besteht zwischen den beiden Faktoren der Zusammenhang

$$\varkappa = 1 - \pi$$

Zur Zeit mag es dahingestellt sein, ob die Faktoren \varkappa oder π zur vollständigen und eindeutigen Beschreibung des Spannungszustandes in der Tat genügen, oder ob an ihrer Statt andere Faktoren zu verwenden sind. Die Benützung des \varkappa -Faktors in der Werkstoffprüfung ist allerdings sehr bequem und entspricht den praktischen Zwecken vollkommen.

In der Folge soll mithin als die eine Zustandsgröße, durch die der spröde oder plastische Zustand des Werkstoffes beeinflusst wird, der mehrachsige Spannungszustand bzw. der diesen Zustand beschreibende Faktor \varkappa angesehen werden.

Es ist weiters wohl bekannt, daß der spröde oder plastische Zustand des Werkstoffes auch durch die Geschwindigkeit der Formveränderung beeinflusst wird. An Stelle einer ausführlichen Erörterung sei hier bloß darauf hingewiesen, daß sich die die Plastizität des Werkstoffes kennzeichnenden Kennzahlen im allgemeinen mit der Erhöhung der Deformationsgeschwindigkeit verringern.

Die dritte Zustandsgröße, durch die der spröde oder plastische Zustand des Werkstoffes bedingt wird, ist die Temperatur.

Im Endergebnis stellt somit der spröde oder plastische Zustand des Stoffes eine Funktion der drei Zustandsgrößen \varkappa , v und T dar. Bild 5 zeigt den Gesamteinfluß dieser drei Zustandsgrößen an Hand der Versuche von H. C. MANN [10]. In diesem Schaubild ist auf die vertikale Achse die beim Schlagzugversuch gemessene Arbeit in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und Temperatur aufgetragen. Die Versuche wurden an zwei verschiedenen Prüfkörpern vorgenommen. Der obere Teil des Bildes bezieht sich auf einen Schlagzug-Prüfkörper von 25,4 mm Meßlänge, der also in diesem Sinne nicht als ein

eingekerbter Prüfkörper betrachtet werden kann. Der untere Teil des Schaubildes zeigt das Verhalten eines Prüfkörpers mit 0,8 mm freier Länge, also eines scharf eingekerbten Prüfkörpers. Aus dem Bild ist gut ersichtlich, daß die Schlagarbeit mit zunehmender Geschwindigkeit des Schlages oder mit sinkender Temperatur immer geringer wird. Auch wird die Schlagarbeit durch die scharfe Einkerbung herabgesetzt, die, wie bereits gezeigt, gleichzeitig auch einen mehrachsigen Spannungszustand bedeutet.

In verallgemeinerter Fassung muß man somit zu der Schlußfolgerung gelangen, daß die Kennzahlen stets in Abhängigkeit von den Zustandsgrößen

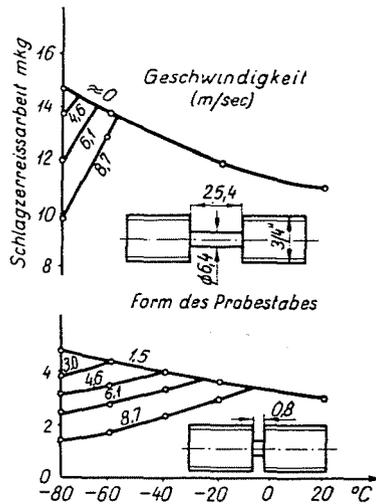


Bild 5. Änderung der beim Schlagzugversuch gemessenen Arbeit in Abhängigkeit von Temperatur, Geschwindigkeit und mehrachsigem Spannungszustand (H. C. MANN)

bestimmt werden müssen. In der heutigen Praxis der Werkstoffprüfung werden aber die Kennzahlen systematisch stets nur für einen Sonderfall bestimmt. In den meist angewandten Zugfestigkeitsversuchen wird in einem einachsigen Spannungszustand ($\nu = 0$), bei konstanter Zuggeschwindigkeit ($v = \text{konstant}$) und in der Regel bei Zimmertemperatur ($T = \text{konstant}$) irgendein Festigkeits- oder Plastizitätsindex ermittelt. Nach einer allgemein eingebürgerten Praxis werden Werkstoffe, die bei über oder unter Zimmertemperatur liegenden Temperaturen beansprucht werden, unter Verhältnissen geprüft, die der Betriebstemperatur entsprechen, doch pflegt auch in diesen Fällen nur der Einfluß der einen Zustandsgröße untersucht zu werden.

Die Werkstoffprüfung, wie sie sich bislang entwickelte, könnte somit in der Weise charakterisiert werden, daß auf die Prüfung zweier der drei Zustandsgrößen, namentlich der Geschwindigkeit und Temperatur, sehr großes Gewicht gelegt wurde, während man die dritte Zustandsgröße, das

heißt den Einfluß des mehrachsigen Spannungszustandes auf die Werkstoffe, bei weitem nicht mit der gleichen Gründlichkeit untersucht.

Es gibt verhältnismäßig wenige Werkstoffe, über die Daten in einem Umfang zur Verfügung stehen, der sämtliche Kennzahlen des Werkstoffes als Funktion aller drei Zustandsgrößen erkennen ließe. In der zitierten Arbeit von KOCHENDÖRFER und SCHOLL [9] wurden bei Berücksichtigung aller drei Zustandsgrößen die Bedingungen des spröden bzw. plastischen Zustandes einiger Stahlsorten ermittelt. Hierbei wurde ein Werkstoff als spröde betrachtet, wenn seine Fließgrenze mit seiner Reißfestigkeit übereinstimmte. Diese Fassung des Begriffes des spröden Zustandes ist offenbar richtig, da bei $\sigma_R - \sigma_S = 0$, offenbar auch die Dehnung und Kontraktion des Werkstoffes identisch gleich Null sein wird.

In den Versuchen von KOCHENDÖRFER und SCHOLL wird mithin bereits eine physikalisch richtig definierte Kennzahl, die Differenz $\sigma_R - \sigma_S$ in Abhängigkeit von den drei Zustandsgrößen α , v und T verwendet. Die volle Kenntnis der Eigenschaften eines Werkstoffes bedürfte prinzipiell der Bestimmung solcher Diagramme. Offensichtlich wäre es jedoch nicht zweckdienlich, dieses Diagramm, das äußerst viele Messungen erfordert, für jeden Werkstoff zu ermitteln. Unbedingt richtig und notwendig ist es aber, den Werkstoff unter den nämlichen Bedingungen, das heißt im gleichen mehrachsigen Spannungszustand, mit derselben Deformationsgeschwindigkeit und bei derselben Temperatur zu prüfen, wie er sie im Betrieb vorfinden wird.

Bemerkenswerterweise war man sich bei den Ermüdungsversuchen bald dessen bewußt, daß die Ermüdungsgrenze (Dauerfestigkeit) von den Versuchsbedingungen, von der Art der Beanspruchung, der Oberflächengüte des Prüfkörpers in hohem Maße abhängig ist, wogegen bei den statischen bzw. dynamischen Untersuchungen der Gesamteffekt aller drei Zustandsgrößen im allgemeinen bisher nicht untersucht wurde. Die in der Praxis weit verbreitete CHARPYSche Schlagarbeit ist von diesem Gesichtspunkte aus nichts anderes als eine Kerbbiegeprobe, bei der die Einkerbung offenbar einen mehrachsigen Spannungszustand hervorruft. Diese Probe pflegt in der Regel mit einer bestimmten Geschwindigkeit ($v = \text{konstant}$) durchgeführt zu werden. Es sind zahlreiche Unterlagen über die Temperaturabhängigkeit der Schlagarbeit einzelner Werkstoffe vorzufinden, und auch die Grenztemperatur der Versprödung pflegt in der Regel angegeben zu werden. Obschon diese Diagramme eine gewisse Orientierung ermöglichen, können aus ihnen nicht gut allgemeine Schlußfolgerungen gezogen werden, geben doch diese Diagramme die Schlagarbeit nur in Abhängigkeit von der einen Zustandsgröße, der Temperatur, bei gleichzeitiger Konstanthaltung von v und α an.

Der CHARPYSche Schlagversuch wurde auf Grund korrekter prinzipieller Überlegungen von SCHNADT [11] weiterentwickelt. Die SCHNADT'schen Atopieproben stellen im Wesen Schlagbiegeversuche dar, die den CHARPYSchen

Schlagversuchen nahestehen. Die CHARPYSche Probe wurde von Schnadt insofern vervollkommenet, als er in der gedrückten Zone des Prüfkörpers eine Bohrung anbrachte, in die er einen genau passenden Hartmetallbolzen einführte, so daß im Prüfkörper beim Biegen nur Zugspannungen auftreten konnten. In der gezogenen Zone hingegen wurden verschieden geartete Einkerbungen ausgebildet, womit die SCHNADTSchen Atopieproben die Prüfung des Werkstoffes in den verschiedensten Spannungszuständen ermöglichten. Die Prinzipskizze der SCHNADTSchen Proben ist in Bild 6 dargestellt, während einige Proben mit verschiedenen Einkerbungen in Bild 7 veranschaulicht sind. Die SCHNADTSchen Atopieproben erfassen somit die verschiedensten mehrachsigen Spannungszustände.

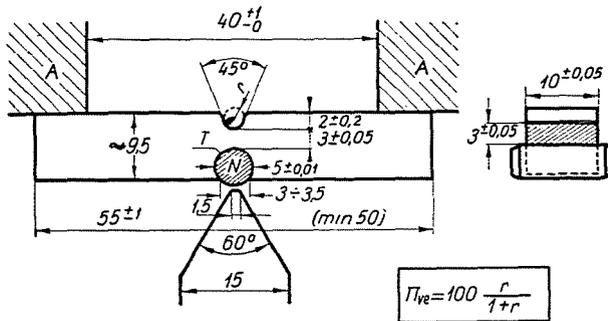


Bild 6. Prinzipskizze der SCHNADTSchen Atopieprobe

An den SCHNADTSchen Schlagmaschinen läßt sich auch die Geschwindigkeit des Schlages variieren, wogegen die Temperatur des Prüfkörpers nach den bekannten Methoden eingestellt werden kann. Demgemäß vermag man mit Hilfe der SCHNADTSchen Atopieproben die Schlagarbeit des Stoffes in Abhängigkeit von den drei Zustandsgrößen anzunehmen. Bei den SCHNADTSchen Proben wird die zum Bruch erforderliche Arbeit, wie bei den CHARPYSchen Proben, in mkg/cm^2 ausgedrückt. Die SCHNADTSche Probe ist mithin auch insofern äußerst interessant, als mit ihrer Hilfe der spröde oder plastische Zustand eines Stoffes bzw. der Grenzübergang zwischen den beiden Zuständen in Abhängigkeit von den Zustandsgrößen einfach und schnell gemessen werden kann. Der einzige Nachteil der SCHNADTSchen Probe besteht darin, daß die Kennzahl, mit deren Hilfe die Bestimmung vollzogen wird, eine physikalisch ebensowenig richtige Dimension, das mkg/cm^2 hat wie die der CHARPYSchen Probe. Eben aus diesem Grunde können auch die Zahlenwerte der SCHNADTSchen Probe mit den sonstigen Festigkeitskennwerten des Werkstoffes in keine Korrelation gebracht werden.

Es soll hier nicht auf die Einzelheiten der zeitgemäßen Entwicklungsrichtungen der Werkstoffprüfung näher eingegangen werden, doch dürfte es

heute keinem Zweifel mehr unterliegen, daß der zur restlosen Beurteilung des Werkstoffes erforderliche Kennwert, oder dessen mehrere, die die Eigenschaften des Werkstoffes beschreiben sollen, stets als Funktionen von ν , v und T bestimmt werden müssen. Jeder Versuch, der irgendeine Kennzahl des Werkstoffes nicht unter den gleichen Bedingungen ermittelt, wie er sie in Wirklichkeit vorfinden wird, kann notwendigerweise nur eine gewisse Annäherung und Orientierung ergeben. Dementsprechend lassen sich die weiteren Zielsetzungen der Werkstoffprüfung so determinieren, daß physika-

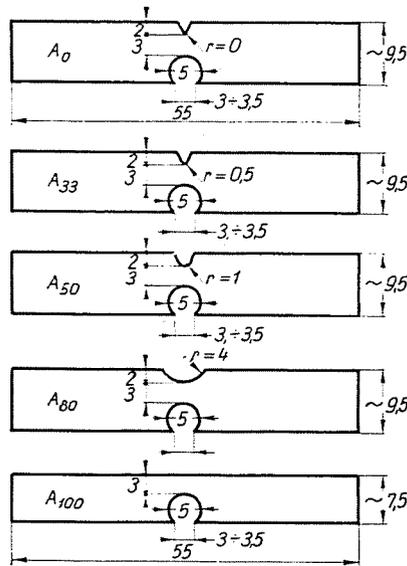


Bild 7. SCHNADTSche Schlagproben zur Kennzeichnung der verschiedenen Spannungszustände

lisch richtig definierte Kennzahlen stets in Abhängigkeit von den drei Zustandsgrößen zu ermitteln sind, und zwar sollten die Versuche tunlichts mit denselben Zustandsgrößen durchgeführt werden, wie sie der Werkstoff im Betrieb vorfinden wird.

Wie bereits erwähnt, zog die Werkstoffprüfung von den drei Zustandsgrößen den Einfluß der Temperatur und der Geschwindigkeit mehr oder minder auch bisher in Betracht. Nicht in jedem Fall wird jedoch der Einfluß des mehrachsigen Spannungszustandes auf die Werkstoffe mit berücksichtigt.

Die Deformationsarbeit als Materialkennzahl

Unter den üblichen Kennzahlen der Werkstoffprüfung sind die technologischen im allgemeinen nur Kennzahlen empirischen Charakters, doch auch der Großteil der im Laufe der Festigkeitsprüfungen ermittelten Kennzahlen

ist bloß konventionell und entbehrt jeglichen physikalischen Inhalts. Aus diesem Grunde trachtet man in der Werkstoffprüfung seit langem, neben den Kennzahlen mit der Dimension der Spannung auch Kennzahlen mit der Dimension der Arbeit einzuführen.

Bereits vor Jahrzehnten wurde von S. REJTŐ [12] der Vorschlag gemacht, die sogenannte Zähigkeitsarbeit einzuführen, worunter er die bis zur Grenze der gleichmäßigen Dehnung geleistete und die Volumeinheit bezogene Arbeit verstand. Die Zähigkeitsarbeit hat sich in der Praxis nicht durchgesetzt, und heute lohnt es wohl nicht mehr, die Gründe hierfür zu analysieren, vielmehr mag die Feststellung genügen, daß die Zähigkeitsarbeit in diesem Sinne keine allgemeingültige Stoffkenngröße darstellt.

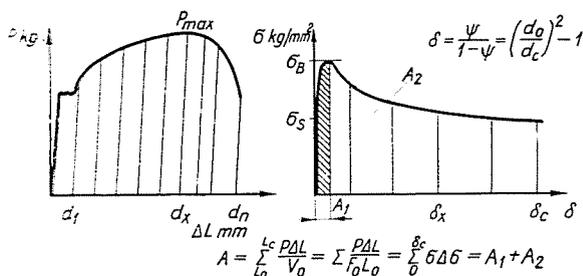


Bild 8. Prinzipskizze für die experimentelle Bestimmung der Kontraktionsarbeit
 a) Bestimmung der zusammengehörenden Wertpaare von Durchmesser (d) und Kraft (P) aus dem Zugdiagramm
 b) Änderung der Spannung in Abhängigkeit von der effektiven Dehnung

Der Begriff der Kontraktionsarbeit war der Werkstoffprüfung bereits vor Jahrzehnten bekannt, bloß bediente man sich dieses Begriffes nur in beschränktem Maße. An Stelle der Kontraktionsarbeit käme eine allgemeinere Gültigkeit dem Begriff »Deformationsarbeit« zu, unter der die zum Bruch notwendige und auf die Volumeinheit bezogene Arbeit zu verstehen ist. Im Falle eines Zugversuches kann selbstredend die zum Bruch erforderliche Deformationsarbeit sinngemäß auch als Kontraktionsarbeit bezeichnet werden. Die Kontraktionsarbeit läßt sich folgendermaßen definieren :

$$A_c = \int_0^L \frac{PdL}{V_0} = \int_0^L \frac{PdL}{F_0L_0} = \int_0^{\delta_c} \sigma d\delta \tag{13}$$

Eines der Haupthindernisse für die praktische Anwendung der Kontraktionsarbeit bestand eben darin, daß die definitionsgemäße Bestimmung des Begriffes eine äußerst langwierige experimentelle Arbeit erforderte. Experimentell kann nämlich die Kontraktionsarbeit folgendermaßen bestimmt werden : Bei den im Laufe des Zugversuches bestimmten Kräften P_1, P_2, P_n

muß der Versuch abgebrochen werden und es sind die Durchmesser d_1, d_2, d_n des Prüfkörpers zu messen (Bild 8a). Aus den zusammengehörigen Wertpaaren der Kräfte und Durchmesser (P und d) läßt sich einerseits der unter dem Integral stehende Ausdruck

$$\sigma = \frac{P}{F_0}, \quad (14)$$

andererseits die effektive Dehnung

$$\delta_i = \frac{\psi_i}{1 - \psi_i} \quad (15)$$

stets ermitteln, wobei

$$\psi_i = \frac{d_0^2 - d_i^2}{d_0^2}.$$

Werden nun die zusammengehörigen Werte von δ und σ in ein Diagramm aufgetragen (Bild 8b), ergibt sich eine Kurve $\sigma = f(\delta)$, wobei die Fläche unter der Kurve die Kontraktionsarbeit darstellt. Diese experimentelle Bestimmung der Kontraktionsarbeit ist, wie gesagt, äußerst langwierig, weshalb es denn auch leicht verständlich ist, daß sich der Gebrauch dieses Begriffes nicht in weiten Kreisen verbreiten konnte. Wahrscheinlich aus demselben Grunde wurden auch die wesentlichsten Charakteristika dieser Kennzahl bisher nicht gehörig geklärt.

Die bequemste Art der praktischen Anwendung der Kontraktionsarbeit würde unbedingt eine Formel bilden, in der nur die heute üblichen Stoffkenngrößen vorkommen. Das in der Gleichung (13) vorkommende Integral kann als Funktion von $\sigma_B, \sigma_S, \delta_g$ und δ_c berechnet werden. Als Ergebnis der Berechnung erhält man nachstehende Formel [13]:

$$A_c = \frac{\delta_g}{3} (\sigma_S + 2\sigma_B) + 4,6 \cdot \sigma_B (1 + \delta_g) \log \frac{1 + \delta_c}{1 + \delta_g} + \sigma_B (1 + \delta_g)^2 \cdot \left[\frac{1}{1 + \delta_c} - \frac{1}{1 + \delta_g} \right] \quad (16)$$

Hier bezeichnet σ_S die Fließgrenze, σ_B die Zugfestigkeit, δ_g die gleichmäßige Dehnung, δ_c hingegen die sich an der Stelle der Kontraktion ergebende sogenannte effektive Dehnung, die aus der Beziehung

$$\delta_c = \frac{\psi_c}{1 - \psi_c} \quad (17)$$

ermittelt werden kann, wenn ψ_c die beim Bruch auftretende Kontraktion bedeutet.

Die auf die Kontraktion bezüglichen bisherigen Kenntnisse können in den nachstehenden wichtigeren Sätzen zusammengefaßt werden :

1. Die Kontraktionsarbeit eines Werkstoffes ist unabhängig von der Methode, nach der die Ermittlung der Kontraktionsarbeit vorgenommen wird. Ihr Wert bleibt also unverändert, ob er nun durch einen Zug- oder Druckversuch bestimmt wird.

2. Setzt sich die Beanspruchung aus mehreren Einzelheiten zusammen, so ist die den Bruch herbeiführende Arbeit, d. h. die Summe der Teilarbeiten stets der Kontraktionsarbeit gleich. Wird also irgendein Werkstoff im Laufe des Reißversuches nacheinander den mit den Arbeiten A_1, A_2, \dots, A_n verbundenen Beanspruchungen ausgesetzt, und die Beanspruchung bis zum Bruch fortgesetzt, so wird

$$A_1 + A_2 + \dots + A_n = A_c. \quad (18)$$

Dieser Satz ist jedoch nur gültig, sofern es sich um eine streng einachsige Beanspruchung handelt, andererseits ist er unabhängig davon, welches Vorzeichen den Kräften zukommt, unter deren Wirkung die einzelnen Teilarbeiten entstehen [14].

3. Unter dem Einfluß der in einem mehrachsigen Spannungszustand vorgenommenen Verformung stellt die Kontraktionsarbeit eine Funktion der zurückbleibenden inneren Spannungen dar.

4. Für die Kontraktionsarbeit von Legierungen gelten folgende Regeln :

a) Wenn sich zwei Metalle lösen, ist die Kontraktionsarbeit der aus der festen Lösung bestehenden Legierung eine Funktion der Gitterkonstante.

b) Sind die Komponenten der Legierung ineinander unlöslich, kann die Kontraktionsarbeit auf Grund des quantitativen Verhältnisses der einzelnen Gefügebestandteile nach der Mischungsregel berechnet werden.

Im allgemeinen ist die Kontraktionsarbeit der Kohlenstoffstähle unabhängig von der Zusammensetzung, da die Kontraktionsarbeit der perlitischen Kohlenstoffstähle ungefähr mit derjenigen der ferritischen übereinstimmt, die Kontraktionsarbeit aller mit der gleichen Technologie verfertigten Kohlenstoffstähle ist somit eine von der chemischen Zusammensetzung unabhängige Konstante. K. MATTHAES [15] setzte voraus, daß die Kontraktionsarbeit von der Art der Legierung völlig unabhängig sei, doch gilt dies in diesem Sinne nur für die Kohlenstoffstähle, u. zw. aus den soeben ausgeführten Gründen. Sonst gelten die Regeln unter 4/a und 4/b.

5. Die Kontraktionsarbeit hängt weitgehend von der Reinheit des Werkstoffes ab, es läßt sich somit, ohne daß einstweilen eine quantitative Beziehung aufgestellt werden könnte, die Feststellung machen, daß eine Legie-

rung um so weniger Einschlüsse enthält, je größer bei sonst gleicher Zusammensetzung ihre Kontraktionsarbeit ist.

6. Die Kontraktionsarbeit ist vom mehrachsigen Spannungszustand in hohem Maße abhängig.

Im Laufe der bisher durchgeführten Untersuchungen wurde ein bedeutender Teil der den ungarischen Normen entsprechenden Werkstoffe geprüft, wobei für die Kontraktionsarbeit folgende Werte gefunden wurden :

A-Stähle in weichem Zustande (unabhängig von der Zusammensetzung)	50—60	mkg/cm ³
C-Stähle in weichem Zustande, C10—C60	70—80	mkg/cm ³
Veredelte Kohlenstoffstähle	110—120	mkg/cm ³
*Austenitischer Stahl 18/8	140	mkg/cm ³
*In Vakuum zweimal umgeschmolzener Kohlenstoffstahl in weichem Zustand	120	mkg/cm ³
Hüttenaluminium, 99,5%iges	35—44	mkg/cm ³
Reinstaluminium, 99,99%iges	54	mkg/cm ³
Elektrolytkupfer	80	mkg/cm ³
Nickel	110	mkg/cm ³

* »A« Stähle sind gleichwertig mit den deutschen St-Stählen.

»C« „ „ „ „ „ „ „ St C- „

Wie aus diesen Daten ersichtlich, nimmt die Kontraktionsarbeit mit der Reinheit des Werkstoffes stark zu, was aus dem Unterschied zwischen den Kontraktionsarbeiten der A- und C-Stähle sowie der im Vakuum gegossenen Weichstähle deutlich erhellt. Ein weiterer Beweis hierfür ist auch die Tatsache, daß die Kontraktionsarbeit des 99,99%igen Reinstaluminiums die des 99,50%igen Aluminiums wesentlich übertrifft, während die Kontraktionsarbeit des aus 99,99%igem Aluminium durch Legierung hergestellten 99,5%igen Aluminiums unverändert 54 mkg/cm² beträgt. Der Unterschied in der Kontraktionsarbeit der beiden Aluminiumsorten ist somit keineswegs dem Einfluß der analytisch bestimmbareren Legierungselemente zuzuschreiben.

Die angeführten Daten stellen — mit Ausnahme der mit * bezeichneten — das Ergebnis von mindestens 50—100 Messungen dar. Aus den statistischen Untersuchungen geht hervor, daß z. B. die Kontraktionsarbeitswerte des 99,99%igen Aluminiums eine äußerst geringe Streuung aufweisen. Die Streuung um den wahrscheinlichsten Wert beträgt kaum $\pm 2\%$, während diejenige des Hüttenaluminiums um den wahrscheinlichsten Wert rund $\pm 10\%$ beträgt.

Bei den Stählen der A-Serie, die nach dem Siemens — Martin-Verfahren hergestellt werden, beträgt die Streuung der Kontraktionsarbeit je Probe aus den verschiedenen Chargen $\pm 15\%$, während die Streuung der Kontraktionsarbeit bei den im Elektroofen erzeugten legierten Edeltählen unter 10% bleibt.

Die statistischen Messungen lassen somit zwei Schlußfolgerungen zu. Die eine besagt, daß der Zahlenwert der Kontraktionsarbeit um so höher liegt, je reiner der Werkstoff ist, die andere hingegen, daß die Streuung der Messungen um so geringer ist, je weniger Verunreinigungen der zu prüfende Werkstoff enthält.

Eine interessante, von K. MATTHAES bereits nachgewiesene Eigentümlichkeit der Kontraktionsarbeit besteht darin, daß die Kontraktionsarbeit veredelter Stähle von der Temperatur der Vergütung praktisch unabhängig ist, was durch die hier an Kohlenstoffstählen, Chrom-Vanadium-Stählen bzw. Chrom-Mangan-Stählen vorgenommenen Messungen weitgehend bestätigt wurde.

Aus den angeführten zusammenfassenden Daten scheint somit hervorzugehen, daß die Kontraktionsarbeit eine zur Qualitätsbestimmung eines Werkstoffes geeignete Kennzahl darstellt, die für sich allein die Werkstoffgüte entscheidet. Ihre Bestimmung bedarf keiner besonderen Meßmethoden, vielmehr läßt sie sich aus den Ergebnissen des Reißversuches errechnen. Nach weiteren zahlreichen statistischen Untersuchungen wäre somit zu erwägen, ob die Güte eines Werkstoffes nicht durch die Kontraktionsarbeit gekennzeichnet werden sollte, wobei selbstredend auch die Festigkeitswerte (Fließgrenze oder die der gegebenen Beanspruchung entsprechende Ermüdungsgrenze) angegeben werden müßte, die dem Konstrukteur zur Dimensionierung bekannt sein müssen. Eine weitere Frage wäre es, ob die Kontraktionsarbeit nicht etwa auch zur Beurteilung der Neigung zum Spröbruch verwendet werden könnte.

Die Kontraktionsarbeit als Kennzahl der Versprödung des Stoffes

Wie aus den vorangegangenen Ausführungen ersichtlich, unterliegt die Kontraktionsarbeit in Abhängigkeit von dem mehrachsigen Spannungszustand einer starken Änderung, wie dies offenbar auch theoretisch nicht anders sein kann, da doch die Kontraktionsarbeit im einachsigen Spannungszustand gemessen wird. Ein Maschinenbestandteil kann sich im Betrieb grundsätzlich aus drei Gründen in einem mehrachsigen Spannungszustand befinden:

- a) unter dem Einfluß äußerer Kräfte,
- b) infolge der Form des Maschinenteils,
- c) infolge der durch die Erzeugungstechnologie geweckten inneren Spannungen.

Größe und Richtung der äußeren Kräfte, d. h. den durch diese hervorgerufenen Spannungszustand vermag der Konstrukteur stets zu bestimmen. In diesem Falle ist somit Größe und Richtung der Hauptspannungen bekannt. Im Falle b) beispielsweise kann der infolge einer Einkerbung oder eines Überganges auftretende mehrachsige Spannungszustand auch rechnerisch ermittelt

werden, handelt es sich doch in den meisten Fällen um eine ziemlich komplizierte Rechenarbeit, weshalb man den Spannungszustand zweckdienlicher durch spannungsoptische Modellversuche oder durch unmittelbare Dehnungsmessung bestimmen wird.

Am schwierigsten gestaltet sich die Bestimmung des Spannungszustandes im dritten Fall. Die durch die Erzeugungstechnologien hervorgerufenen inneren Spannungen können nämlich höchstens geschätzt, keineswegs aber zuverlässig berechnet werden. Nahezu sämtliche Erzeugungstechnologien (Gießen, Schwei-

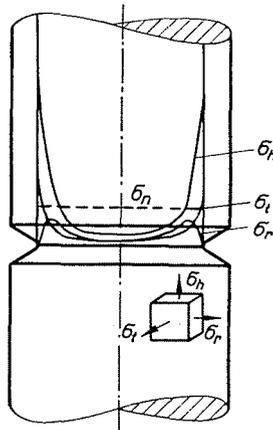


Bild 9. Die Verteilung der Spannungen im eingekerbten Prüfkörper (SIEBEL)

ßen, Zementieren, Nitrieren) wecken innere Spannungen, deren Größe und Richtung zur Zeit allein durch Röntgen-Reflexuntersuchungen oder durch Messungen ermittelt werden, die die Zerstörung des Werkstoffes zur Folge haben. Diese letzteren können an fertigen Konstruktionen nur selten vorgenommen werden, weshalb für die Praxis nur die Röntgen-Reflexmessungen in Frage kommen können.

Die infolge der Einkerbungen entstehende Spannungsverteilung im Falle eines eingekerbten Stabes ist gemäß SIEBEL in Bild 9 dargestellt. Durch die Erzeugungstechnologie hervorgerufene Spannungsverteilung in einer Schweißverbindung zeigt Bild 10 [16]. Aus welchem Grunde auch immer der mehrachsige Spannungszustand zustandekommen möge, seine Gegenwart kann somit durch irgendeine Meßmethode bzw. durch Berechnung stets nachgewiesen und Röntgenreflexe sogar zerstörungsfrei bestimmt werden. Es folgt hieraus, daß auch die Neigung zum Sprödbbruch in Abhängigkeit vom mehrachsigen Spannungszustande bestimmt werden kann.

Das einfachste experimentelle Verfahren zur Feststellung des mehrachsigen Spannungszustandes stellt die Prüfung eingekerbter Prüfkörper dar.

Die Änderung der Werkstoffkenngrößen eingekerbter Prüfkörper wurde bereits von mehreren Forschern, so von LUDWIK und SCHEU [17], ferner von W. KUNTZE [18], ausführlich untersucht. Im Laufe der hier durchgeführten Tests wurden ebenfalls eingekerbte Prüfkörper untersucht, und der Einfluß der Einkerbung auf die Kontraktionsarbeit ermittelt. Die in unseren Versuchen verwendeten Prüfkörper hatten einen Durchmesser von 20 mm, und es wurden an ihnen halbkreisförmige Einkerbungen angebracht. Der kleinste Durchmesser des eingekerbten Prüfkörpers betrug stets 10 mm, der Radius der Einkerbung änderte sich jedoch bei jedem Prüfkörper zwischen $\rho = 140$ mm und $\rho = 0,2$ mm. Der Einfluß der Einkerbung wurde durch die Kennzahl $b = d/\rho$ ausgedrückt. Der Nachteil dieser Kennzahl besteht darin, daß bei

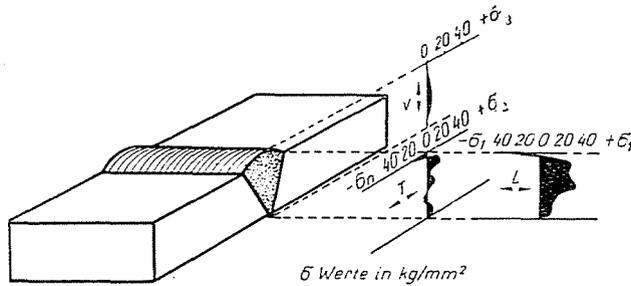


Bild 10. Die Verteilung der Schweißspannungen in einer V-Naht

einem Prüfkörper ohne Einkerbung ($\rho = \infty$) $b = 0$, und im Falle einer unendlich scharfen Einkerbung ($\rho \approx 0$) $b = \infty$ wird. Da hierbei eine von Null bis Unendlich reichende Skale verwendet werden müßte, führten wir nach KOCHENDÖRFER und SCHOLL die Kennzahl $z = \frac{b}{b + 1}$ ein, die den Vorzug hat, daß der Wert von z bei einem $\rho = \infty$ auf Null absinkt, während er bei $\rho = 0$ zu 1 wird, was die zeichnerische Darstellung erleichtert. Die Änderung der Kontraktionsarbeit in Abhängigkeit von der Kennzahl z für Weichstahl mit 0,1% und für Edelstahl mit 0,35% Kohlenstoffgehalt veranschaulicht Bild 11. Obgleich im Schaubild lediglich die Daten zweier Stoffe dargestellt sind, kann aus hier nicht näher detaillierten Versuchen festgestellt werden, daß der Charakter der beiden Kurven im allgemeinen mit den Kurven aller weichen bzw. veredelten (vergüteten) Stähle übereinstimmt. Aus Bild 11 geht hervor, daß die Kontraktionsarbeit der Weichstähle unter dem Einfluß der Einkerbung weniger abnimmt als die der vergüteten Stähle. Die gleichen Daten in Abhängigkeit vom KOCHENDÖRFERSCHEN Faktor z ergeben die in Bild 12 dargestellten Kennlinien. Diesen zufolge ist Weichstahl mit niedrigem Kohlenstoffgehalt gegenüber dem mehrachsigen Spannungszustand recht wenig empfindlich, während vergüteter Kohlenstoffstahl mit einem Kohlenstoff-

gehalt von 0,35% bereits um $\alpha = 0,65$ praktisch Kontraktionsarbeit gleich Null ergibt. Zu bemerken ist hier, daß sich der zahlenmäßige Wert der Kontraktionsarbeit selbst beim vollständig spröden Werkstoff wenig von Null unterscheidet, da theoretisch auch der spröde Werkstoff eine Kontraktions-

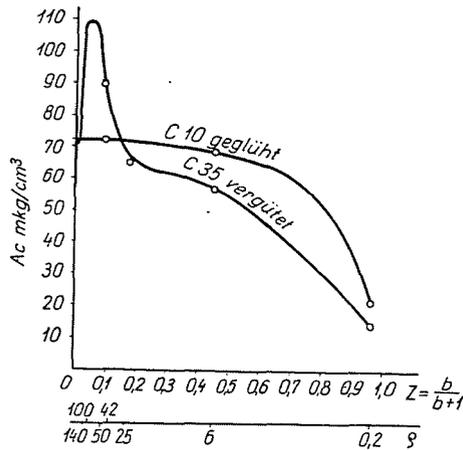


Bild 11. Die Änderung der Kontraktionsarbeit in Abhängigkeit von der Einkerbung (die untere Abszissenachse gibt den Radius der Einkerbungen an)

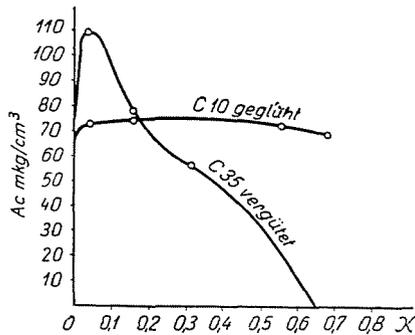


Bild 12. Die Änderung der Kontraktionsarbeit in Abhängigkeit vom mehrachsigen Spannungszustand

arbeit hat, die grundsätzlich der Arbeit der elastischen Formänderung gleich ist. Diese Arbeit macht indessen nur noch einige mkg/cm^3 aus, sie weicht also von Null nur wenig ab.

Letzten Endes stellt somit die Kontraktionsarbeit — wie dies aus den weniger hier gezeigten Daten hervorgeht — eine Funktion des mehrachsigen Spannungszustandes (α) dar, eignet sich mithin zur unmittelbaren Kennzeichnung des spröden Zustandes des Materials. Ist für irgendeinen Stoff die in Bild 12 aufgetragene Funktion $A_{\alpha} = f(\alpha)$ bekannt, und läßt sich der Spannungs-

zustand an der fertigen Konstruktion etwa röntgenographisch bestimmen, so kann offenbar noch die Arbeit bestimmt werden, die der Stoff in dem betreffenden Spannungszustand bis zum Bruch verträgt. Für die Dimensionierung auf Sprödbruch bzw. zum Schutz gegen diesen wäre somit die Ergänzung der Dimensionierungsgrundgleichung durch eine weitere Gleichung zu erwägen, derzufolge die im bestimmten Spannungszustand noch zur Verfügung stehende Deformationsarbeit A_z größer oder gleich A_{zul} sein muß. Demgemäß ist also die ursprüngliche Grundgleichung der Dimensionierung

$$\sigma_{red} \leq \sigma_{zul}$$

noch durch die Beziehung

$$A_z \geq A_{zul} \quad (19)$$

zu ergänzen.

Die Werte von A_{zul} sollten in enger Zusammenarbeit von Maschinenkonstruktoren und Werkstoffprüfern ebenso ausgearbeitet werden, wie die Werte von σ_{zul} , die heute in der Praxis bereits konkrete Formen angenommen haben.

Zusammenfassung

Die Qualität eines Werkstoffes kann durch die Kontraktionsarbeit als Kennzahl charakterisiert werden. Die Kontraktionsarbeit läßt sich aus einfachen Zerreißversuchen leicht berechnen und kennzeichnet die Güte des betreffenden Werkstoffes in erster Linie hinsichtlich seiner Reinheit. Die Kontraktionsarbeit ändert sich in Abhängigkeit vom mehrachsigen Spannungszustand und kann aus diesem Grunde zu dessen Kennzeichnung verwendet werden. Die Kontraktionsarbeit kann auch in der Dimensionierung zur unmittelbaren Beurteilung der Sprödbruchgefahr verwendet werden.

Schrifttum

1. Hütte I. (28. Aufl.) 843.
2. FÖPPL: Mitt. Mech. Techn. Labor. München, 27 (1900).
3. GUEST: Phil. Mag. 50, 69 (1900).
4. KÁRMÁN, TH.: VDI Forschungs-Heft 118, 37 (1912).
5. LODE, W.: VDI Forschungs-Heft 303 (1928).
6. ROS, M.—EICHINGER, A.: Ber. der Eidgen. Mat.-Prüf.-Anst. Zürich, Disk. Ber. 54 (1929), Bericht 172 (1949).
7. SIEBEL, E.—MAIER, A.: Z. VDI, 77, 1345 (1933).
8. LUDWIK, P.: Z. VDI, 71, 1532 (1927).
9. KOCHENDÖRFER, A.—SCHOLL, H.: Stahl und Eisen 77, 1006 (1957).
10. MANN, H. C.: Proc. Amer. Soc. Test. Mater. 37 II, 102 (1937).
11. SCHNADT, H. M.: Oerlikon Schweißmitteilungen 31, 14—28 (1958).
12. REJTÓ SÁNDOR: Az elméleti mechanikai technológia és a fémek technológiája, 1919.
13. GILLEMOT, L.—SINAY, G.: MTA Műsz. Tud. Oszt. Közl. XXII., 343—366 (1958).
14. LJUNGBERG, K.: Erste Mitteilungen des Neuen Internationalen Verbandes für Materialprüfungen, Zürich, 1931. Gruppe A. 149—154.
15. MATTHAES, K.: Zeitschr. f. Metallkunde 43, Heft 1, 14—16 (1952).
16. KREBS, J.—HÄNSCH, H.: Schweißtechnik 7, 298—306 (1957).
17. LUDWIK, P.—SCHEU, R.: Stahl und Eisen 43, 999—1001 (1923).
18. KUNTZE, W.: Archiv f. Eisenhüttenwesen 2, 109 (1928).

Prof. Dr. LÁSZLÓ GILLEMOT, Budapest XI., Budafoki út 4—6. Ungarn