EINE NEUE METHODE ZUR BESTIMMUNG DER SPRÖDBRUCHGEFAHR

Von

L. GILLEMOT

Lehrstuhl für Mechanische Technologie, Technische Universität, Budapest

(Eingegangen am 30. September 1963)

1. Einleitung

Nach der heute geltenden allgemeinen Auffassung wird die Sprödbruchneigung eines Materiales von drei Größen, von der Beanspruchungsgeschwindigkeit, vom mehrachsigen Spannungszustand und von der Temperatur bestimmt. Eine dieser Größen allein genügt nur selten zur Herbeiführung des Sprödbruches. Nach der Feststellung von WELLINGER und HOFFMANN [1] läßt sich bei Metallen mit kubisch raumzentriertem Gitter eine Temperatur finden, die für sich allein ausreicht, um den Sprödbruch herbeizuführen, während bei Metallen mit kubisch flächenzentriertem Gitter (Kupfer, Aluminium) keine solche Temperatur aufzufinden ist. Auch die Beanspruchungsgeschwindigkeit für sich allein reicht oft nicht aus, um den Sprödbruch auszulösen. Die kritische Zerreißgeschwindigkeit von Kupfer liegt nach KÁRMÁN, DUWEZ und CLARK [2, 3] bei etwa 50 m/s.

SIEBEL und MENGES [4] untersuchten die gemeinsame Wirkung von Temperatur und Geschwindigkeit und stellten fest, daß bei einer Beanspruchungsgeschwindigkeit von 10^7 kp/mm^2/s der Stahl C 15 bei —45° C, der Stahl C 60 bei —50° C und der Stahl St 37,11 bei —5° C spröde wird.

Bedeutend schwieriger gestaltet sich die Untersuchung der Wirkung des mehrachsigen Spannungszustandes, und dies besonders dann, wenn man gleichzeitig auch die Wirkung der Geschwindigkeit und der Temperatur berücksichtigen muß. Der mehrachsige Spannungszustand wird in der Regel durch gekerbte Probestäbe hergestellt, wobei man meist die gekerbten Schlagbiegeprobestäbe verwendet. Jeder Schlagbiegeversuch mit gekerbten Probestäben zeigt jedoch jeweils eine andere Sprödbruchtemperatur an je nachdem, wie man den Begriff des Sprödbruches definiert und welchen Probestab man benützt. Schon RÜHL [5] hat nachgewiesen, daß verschiedene Schlagbiegeprobestäbe nach Charpy die unterschiedlichsten kritischen Übergangstemperaturen aufzeigen können (Bild 1).

Obzwar der Schlagbiegeversuch nach Charpy sehr wertvolle und nützliche Aufschlüsse über die Sprödbruchneigung der verschiedenen Werkstoffe liefern kann, ist er nicht geeignet, den absoluten Wert dieser Neigung zu charakterisieren, und zwar in erster Reihe deshalb, weil das Proportionalitätsgesetz bei diesem Versuch keine Geltung hat, wie das von STANTON [6] und STRIBECK [7] längst nachgewiesen wurde. Nach ihren Versuchen zeigen nicht einmal die Ergebnisse geometrisch ähnlicher, aber unterschiedlich großer Probestäbe eine Proportionalität an. Grundsätzlich gelangt man zu ähnlichen Feststellungen auch bei den anderen, in neuerer Zeit entwickelten Sprödbruchproben.

Wir haben uns eben deshalb das Ziel gesetzt, eine Methode zur Bestimmung der Sprödbruchneigung zu entwickeln, für die das Proportionalitätsgesetz gültig ist und die zumindest für geometrisch ähnliche Probestäbe zahlenmäßig identische Meßgrößen ergibt.

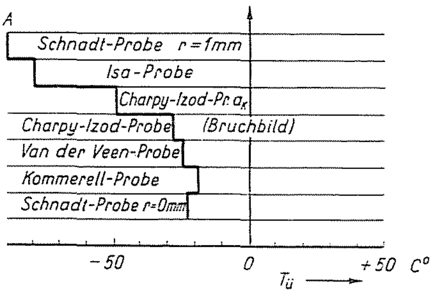

Bild 1. Die kritische Übergangstemperatur verschiedener Schlagbiegeprobestäbe (nach K. RÜHL)

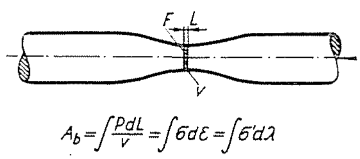

Bild 2. Ein ausgewähltes Volumenelement zur Bestimmung der spezifischen Formänderungsarbeit

Zunächst ist festzustellen, daß die Arbeit nur dem deformierten Volumen proportional sein kann, sofern die Kraft bei der Beanspruchung (auf Zug oder Druck) mit dem Probestabquerschnitt verhältnisgleich ist. Um also ein Proportionalitätsgesetz festlegen zu können, muß die Arbeit auf die Volumeneinheit bezogen werden und nicht auf die Oberfläche, wie das beim Schlagbiegeversuch nach Charpy üblich ist.

Bemerkt sei hier, daß KICK und BARBA [8] das Proportionalitätsgesetz beim Zerreißen glatter Probestäbe bereitst in den achtziger Jahren des vergangenen Jahrhundertes folgendermaßen formuliert haben: »... daß die zur geometrisch ähnlichen Verformung geometrisch ähnlicher Körper von gleichem Stoff erforderliche Arbeit ihrem Volumen proportional ist«. Obzwar diese Formulierung nicht exakt ist, kommt sie den tatsächlichen Verhältnissen recht nahe. Man wird deshalb zweckmäßig den Begriff der spezifischen Formänderungsarbeit einführen, der gemäß *Bild 2* auf folgende Weise definiert werden kann: in dem einschnürenden Querschnitt des Zerreißprobestabes wird ein differentiell kleiner Querschnitt gewählt, dessen Länge zu Beginn des Versuches L_0, dessen Querschnitt hingegen F_0 sei. Auf Grund des Gesetzes der Unveränderlichkeit des Volumens wird im Laufe der Zerreißprobe

$$F_0 \cdot L_0 = F \cdot L, \tag{1}$$

wenn F den Querschnitt und L die Länge eines ausgewählten Volumens in einem beliebigen Augenblick bedeutet. Die spezifische Formänderungsarbeit schreibt sich zu

$$A_p = \int_0^L \frac{P \cdot dL}{F_0 \cdot L_0} = \int_0^L \frac{P \cdot dL}{F \cdot L} . \tag{2}$$

Da $\sigma = P/F_0$ die auf den Anfangsquerschnitt, $\sigma' = P/F$ die auf den veränderten Querschnitt bezogene wahre Spannung darstellt und da weiter $d\varepsilon = dL/L_0$ und $d\lambda = dL/L$, wird

$$A_p = \int_0^\varepsilon \sigma \cdot d\varepsilon = \int_0^\lambda \sigma' \cdot d\lambda, \tag{3}$$

wenn ε die örtliche Dehnung, λ hingegen die logarithmische Dehnung nach Ludwik bezeichnet. Aus dem Gesetz der Unveränderlichkeit des Volumens gemäß (1) folgt, daß

$$1 + \varepsilon = \frac{1}{1 - \psi}, \tag{4}$$

beziehungsweise

$$\varepsilon = \ln (1 + \lambda). \tag{5}$$

Jede der verschiedenen Dehnungen läßt sich also einfach aus der Einschnürung, diese selbst aber bekanntlich einfach durch Messen der Durchmessen ermitteln.

Der Begriff der spezifischen Formänderungsarbeit ist in der Fachliteratur nicht unbekannt. Er wurde von LUDWIK bereits vor etlichen Jahrzehnten verwendet. Neuerdings hat MATTHAES [9, 10] einige Fragen der spezifischen Formänderungsarbeit ausführlicher behandelt. Eine Verbreitung dieses Begriffes in der Werkstoffprüfung verhinderte vor allem die Tatsache, daß zu seiner Bestimmung nur graphische Methoden zur Verfügung standen. Die einfache numerische Methode zur Lösung der Integrale in (3) wurde von uns schon früher mitgeteilt [11, 12], weshalb es sich erübrigt, auf die Ableitung hier näher einzugehen.

Im weiteren soll als Meßgröße der Sprödbrüchigkeit die spezifische plastische Formänderungsarbeit benützt werden.

2. Die Veränderung der Geschwindigkeit im Laufe des Zerreißversuches

Da die Sprödbruchneigung besonders im mehrachsigen Spannungszustand von der Geschwindigkeit stark beeinflußt wird, muß zunächst untersucht werden, wie sich die Formänderungsgeschwindigkeit im Laufe der Zerreißversuche an einfachen zylindrischen Probestäben bzw. an gekerbten Zerreißprobestäben ändert. Zur Kennzeichnung der Formänderungsgeschwindigkeit soll im weiteren die spezifische Dehngeschwindigkeit dienen, es wird also

$$v = \frac{d\varepsilon}{dt} \tag{6}$$

gelten. Beim Zerreißen glatter, zylindrischer Probestäben ist die spezifische Dehngeschwindigkeit — wenn die Fortbewegungsgeschwindigkeit der Einspannköpfe mit U_0 (mm/min) bezeichnet wird — bis zur Grenze der gleichmäßigen Dehnung in jedem beliebigen Querschnitt des Probestabes

$$v = \frac{U_0}{L_0}. \tag{7}$$

Der Einfluß der Dehngeschwindigkeit auf die Festigkeit ist bekannt. Er wurde bis zur Grenze der gleichmäßigen Dehnung bereits von NÁDAI und MANJOINE [13] sowie von mehreren anderen Autoren bestimmt.

Die Wirkung der Geschwindigkeit wurde auf Grund eines gedachten Modells von PRANDTL [14] auch theoretisch abgeleitet, wobei er fand, daß

$$P_2 = P_1 + a \cdot F_m \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}, \tag{8}$$

wenn P_1 die zur Formänderung bei einer Dehngeschwindigkeit v_1 erforderliche, P_2 hingegen die bei einer Dehngeschwindigkeit v_2 benötigte Kraft, F_m den Querschnitt bei der maximalen Kraft bezeichnet, während a eine Materialkonstante ist, deren zahlenmäßige Werte auf Grund der Versuche von NÁDAI und MANJOINE ermittelt werden können.

Wird die Gleichung (8) durch den Querschnitt F_m dividiert, so wird

$$\sigma'_{m_2} = \sigma'_{m_1} + a \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}, \tag{9}$$

wobei σ'_m die wahre Spannung bei der maximalen Kraft ist. Setzt man in dieser Formel an die Stelle des natürlichen den Briggschen Logarithmus, findet man für Kupfer auf Grund der Versuche von NÁDAI und MANJOINE einen a-Wert von 1,2 kp/mm^2.

Bekanntlich entsteht im Laufe der Zerreißprobe, sobald die gleichmäßige Dehnung beendet ist, ein mehrachsiger Spannungszustand. Den mehrachsigen Spannungszustand an der Einschnürungsstelle untersuchten BRIDGEMAN, SIEBEL und SCHWAIGERER [15, 16] auf Grund verschiedener Annahmen, wobei sie zu mehr oder weniger übereinstimmenden Ergebnissen gelangten. Die nach Aufhören der gleichmäßigen Dehnung eintretende Einschnürung ist zwangsläufig mit dem Entstehen eines mehrachsigen Spannungszustandes verbunden. Die anfänglich gerade Kontur des Probestabes erfährt an der Einschnürungsstelle deshalb eine Krümmung, weil der Spannungszustand mehrachsig ist, und aus dem gleichen Grunde ändert sich an der Kontraktionsstelle auch die Geschwindigkeit der Formveränderung. Entsprechend kann man sich statt der Beschreibung des mehrachsigen Spannungszustandes auf die Untersuchung der Geschwindigkeitsveränderung beschränken. Erreicht die Änderung der Probestablänge infolge der Einschnürung den Wert x, läßt sich

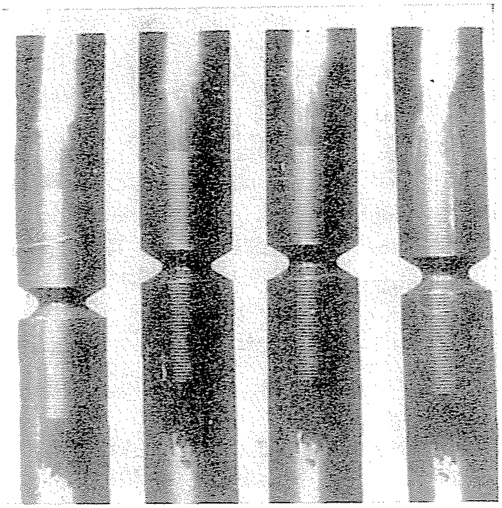

Bild 3. Schattenbild eines Zerreißprobestabes

durch äußerst genaue Messungen feststellen, daß für glatte zylindrische Probestäbe

$$x = k_1 \cdot d_0 \cdot \frac{\psi - \psi_m}{1 - \psi_m}, \tag{10}$$

wenn k_1 eine Konstante, d_0 den Durchmesser des Anfangsquerschnitts, ψ die jeweilige Einschnürung und ψ_m die Einschnürung an der Grenze der gleichmäßigen Dehnung bedeutet [17, 18].

Zur Bestimmung der Zusammenhänge nach Formel (10) hat CZOBOLY eine photographische Methode ausgearbeitet. Während der Versuche werden von den Probestäben kontinuierlich photographische Aufnahmen angefertigt, aus denen die der jeweiligen Einschnürung zugehörige Dehnung stets eindeutig bestimmt werden kann. *Bild 3* zeigt eine solche Aufnahme.

Die Konstante k_1 hat bei Weichstählen den runden Wert von 0,8. Um die Besprechung einfacher zu gestalten, sei in Formel (10)

$$\frac{\psi - \psi_m}{1 - \psi_m} = q = \frac{F_m - F}{F_m}, \tag{11}$$

wobei q die örtliche Einschnürung bedeutet, u. zw. bezogen auf den Querschnitt F_m, der unter der Einwirkung der maximalen Kraft entsteht.

Ist die bei den Versuchen verwendete Zerreißmaschine sehr hart und die zur Kraftmessung benötigte Bewegung praktisch vernachlässigbar — eine Bedingung, die nur von Zerreißmaschinen bestimmter Systeme erfüllt wird [17] — so wird die Dehngeschwindigkeit im Verlauf der Einschnürung der Bewegungsgeschwindigkeit U_0 der Einspannköpfe gleich sein. Aus den Gleichungen (10) bzw. (11) folgt also, daß

$$\frac{dx}{dt} = k \cdot d_0 \cdot \frac{dq}{dt} = U_0. \tag{12}$$

Der Zusammenhang zwischen der örtlichen Einschnürungsgeschwindigkeit und der spezifischen Dehngeschwindigkeit läßt sich unter Berücksichtigung der Formel (11) durch Differenzieren der Gleichung (4) nach der Zeit bestimmen. Die Dehngeschwindigkeit wird also

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{k \cdot d_0}{(1-\psi_m)(1-q)^2}, \tag{13}$$

wobei bei Beginn der Einschnürung, also im Punkte $q = 0$,

$$\left[\frac{d\varepsilon}{dt}\right]_{q=0} = \frac{k \cdot d_0}{1-\psi_m}. \tag{14}$$

Für einen beliebigen Punkt ergibt sich also auf Grund der PRANDTLschen Gleichung (8) — wenn man die Geschwindigkeit in diesem Punkt auf die Geschwindigkeit im Punkt $q = 0$ bezieht — der Zusammenhang

$$P_2 = P_1 + a \cdot F_m \cdot \ln \frac{1}{(1-q)^2}, \tag{15}$$

wobei P_1 jene Kraft bedeutet, die zur Formänderung nötig wäre, wenn die Geschwindigkeit im Laufe der Einschnürung unverändert bliebe, während P_2 die den tatsächlich auftretenden Geschwindigkeiten entsprechende, an der Zerreißmaschine gemessene Kraft bezeichnet.

Durch Division dieser Gleichung mit dem jeweiligen Querschnitt erhält man die Gleichung, die die wahren Spannungen beschreibt. Die Gleichung (15) und der aus ihr abgeleitete Zusammenhang für die mittleren wahren Spannungen ergibt innerhalb der durch die Meßgenauigkeit bestimmten Grenzen eine gute Übereinstimmung mit den Meßergebnissen für die verschiedensten Versuchswerkstoffe (Cu, Al, Fe usw.), sofern die Werte der Konstante a nach den Versuchen von NÁDAI und MANJOINE ermittelt und eingesetzt werden. Hieraus folgt, daß die Wirkung des mehrachsigen Spannungszustandes, wie er im glatten Zerreißprobestab während der Einschnürung ensteht, sowie die Wirkung der Geschwindigkeit auf die wahre Spannungskurve gleichbedeutende Begriffe darstellen, und daß die wahre Spannungskurve unter Berücksichtigung der Wirkung der veränderlichen Dehngeschwindigkeit mathematisch einfach beschrieben werden kann. Es muß betont werden, daß die Konstante a der Gleichung eine für den einachsigen Spannungszustand bestimmte Größe ist, mit deren Hilfe der mehrachsige, während der Einschnürung entstandene Spannungszustand unter Berücksichtigung der Geschwindigkeitsveränderung exakt beschrieben werden kann.

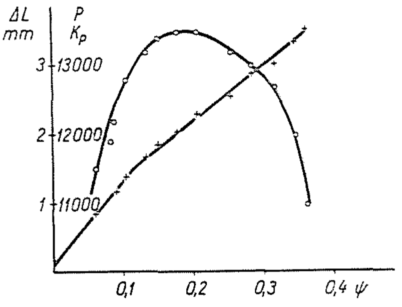

Bild 4. Einschnürungsabhängige Längenveränderung an einem gekerbten Probestab

Die an glatten Zerreißprobestäben ermittelten Ergebnisse lassen sich äußerst einfach auch für gekerbte Probestäbe verallgemeinern. Die Gesamtdehnung des Probestabes haben wir in Abhängigkeit von der Einschnürung nach der schon erwähnten photographischen Methode auch an gekerbten Probestäben bestimmt. Die Gleichung (10) hat auch in diesem Falle Geltung, mit dem Unterschied allerdings, daß hier keine gleichmäßige Dehnung vorliegt, weshalb $\psi_m \cong 0$, also $x = k_2 \cdot d_0 \cdot \psi$. Der Proportionalitätsfaktor k_2 ist hier kleiner als bei glatten Zerreißprobestäben. Er hat einen Wert von ungefähr 0,45 und ist praktisch unabhängig von der Mehrachsigkeit des Spannungszustandes. Für gekerbte Probestäbe gilt demnach die gleiche Gesetzmäßigkeit wie für glatte Probestäbe, mit dem Unterschied, daß die Konstante der Gleichung (15) einen anderen Zahlenwert annimmt und an Stelle von q ein ψ zu setzen ist, da $\psi_m = 0$. Als Beispiel zeigt *Bild 4* das Ergebnis einer solchen Versuchsreihe.

Alle bisher dargelegten Zusammenhänge haben also unverändert auch für gekerbte Probestäbe Geltung, mit dem einzigen Unterschied, daß der Wert der Konstante a beim Zerreißen der glatten Probestäbe aus dem einachsigen Anfangsspannungszustand bestimmt wurde. Im gekerbten Probestab herrscht jedoch von Anfang an ein mehrachsiger Spannungszustand, der für die technische Praxis am einfachsten mit dem Formfaktor α_k charakterisiert werden kann. Wenn mann berücksichtigt, daß beim gekerbten Probestab bereits anfangs ein mehrachsiger Spannungszustand vorliegt, ist es klar, daß hier der Wert der Konstante a von der Mehrachsigkeit des Spannungszustandes abhängig sein muß. Das Verhalten des gekerbten Probestabes kann also eindeutig durch den am Anfang des Versuches bestehenden Spannungzsustandes charakterisiert werden, wenn die Geschwindigkeitsveränderung während des Versuches bekannt ist.

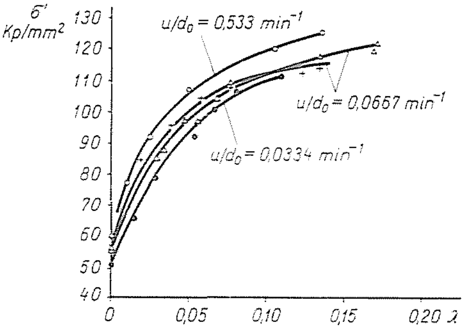

Bild 5. Wahre Spannungskurve geometrisch ähnlicher Probestäbe in Abhängigkeit von der logarithmischen Dehnung

3. Das Proportionalitätsgesetz

Das einfachste Proportionalitätsgesetz zwischen zwei gekerbten Probestäben muß selbstverständlich dann Geltung haben, wenn jede Dimension des einen Probestabes linear zu jenen des anderen vergrößert ist. Die Fließkurven zweier gekerbter, in allen Abmessungen einander proportionaler Probestäbe müssen also Punkt für Punkt übereinstimmen, wenn die beiden einander proportionalen Probestäbe mit der gleichen spezifischen Geschwindigkeit gedehnt werden. Aus Gleichung (13) folgt, das die spezifische Dehngeschwindigkeit bei gekerbten Probestäben dem Durchmesser der Probestäbe einfach proportional ist. Erfolgt also in dem einen Fall das Zerreißen eines Probestabes mit dem Dürchmesser d_0 mit der Geschwindigkeit U_0, das Zerreißen eines Probestabes mit dem Durchmesser d_1 mit der Geschwindigkeit U_1 und wird dabei die Bedingung $U_0/d_0 = U_1/d_1$ erfüllt, müssen die beiden Zerreißdiagramme einander genau decken.

In *Bild 5* sind die Ergebnisse von Versuchen dargestellt, die an einander proportionalen, in ihren Abmessungen jedoch voneinander im Verhältnis von 1 : 2 abweichenden Probestäben mit unterschiedlichen Zerreißgeschwindigkeiten vorgenommen wurden. Bei gleichen U/d-Quotienten decken sich die Kurven der wahren Spannung innerhalb der durch die Meßgenauigkeit bestimmten Grenzen. In diesem Bilde ist die mittlere wahre Spannung σ' in Abhängigkeit der Ludwikschen logarithmischen Dehnung λ dargestellt.

In diesem Falle ist nämlich die Diagrammfläche im Sinne der Gleichung (3) genau gleich der spezifischen Formänderungsarbeit. Daraus folgt die erste Formulierung des Proportionalitätsgesetzes, daß nämlich die Formänderungsarbeiten einander geometrisch ähnlicher gekerbter Probestäbe einander gleich sind, sofern auch die spezifische Dehngeschwindigkeiten einander gleich sind. In diesem Falle gibt ferner die Feststellung, daß die Fließkurven einander geometrisch ähnlicher Probestäbe miteinander genau übereinstimmen. Diese mit höchster Genauigkeit nachweisbare Gesetzmäßigkeit kann weiter verallgemei-

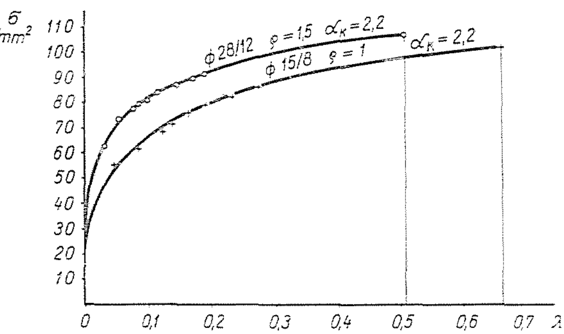

Bild 6. Mittlere wahre Spannung zweier geometrisch unähnlicher Probestäbe mit gleichem Formfaktor in Abhängigkeit von der logarithmischen Dehnung

nert werden, doch ergibt sich in der verallgemeinerten Formulierung eher eine für die technische Praxis gut verwendbare Korrelation als eine strenge Gesetzmäßigkeit.

In der verallgemeinerten Formulierung besagt dieses Gesetz, daß die Formänderungsarbeiten von Probestäben mit gleichen Formfaktoren, die einander jedoch geometrisch nicht ähnlich sind, praktisch identisch sind, daß jedoch ihre Fließkurven voneinander grundlegend abweichen. Das eine Ergebnis der diesbezüglichen Versuchsreihe ist in *Bild 6* dargestellt. Der Versuch wurde an zwei verschiedenen Probestabserien durchgeführt. Der Außendurchmesser betrug bei einer Serie 28 mm, der Innendurchmesser der Kerbe 12 mm, während die Stäbe der anderen Serie einen Außendurchmesser von 15 mm und einen Kerbendurchmesser von 8 mm hatte. Der Quotient der beiden Außendurchmesser betrug also 1,86, der der Kerbendurchmesser dagegen 1,5. Der Abrundungsradius ϱ wurde so gewählt, daß sich in beiden Fällen ein Formfaktor von $\alpha_k = 2{,}2$ ergab.

In Bild 6 ist wieder die mittlere wahre Spannung in Abhängigkeit von der Ludwikschen spezifischen Dehnung λ dargestellt. Die beiden Diagramme weichen voneinander grundlegend ab, wogegen sie in ihrem Flächeninhalt — der eben der spezifischen Formänderungsarbeit gleich ist — praktisch übereinstimmen. Diesen letzteren, eher bloß korrelationsmäßigen Zusammenhang haben wir bereits früher beschrieben.

Die Gültigkeit des Proportionalitätsgesetzes wurde von uns für einander geometrisch ähnliche Probestäbe auch in Abhängigkeit von der Temperatur kontrolliert. Die Ergebnisse der an einem Stahl C 45 bei drei verschiedenen

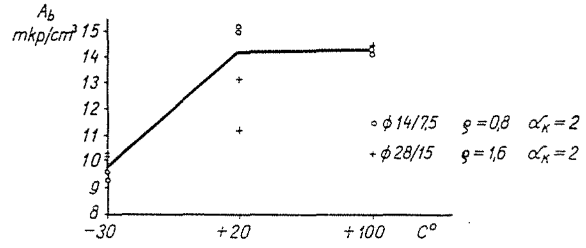

Bild 7. Die spezifische Formänderungsarbeit geometrisch ähnlicher Probestäbe mit gleichem Formfaktor in Abhängigkeit von der Versuchstemperatur. (Stahl C 45, vergütet)

Temperaturen durchgeführten Versuche zeigt *Bild 7*. Wie zu erwarten war, ist das Proportionalitätsgesetz auch unabhängig von der Versuchstemperatur gültig, folglich eignet es sich auch zur exakten Bestimmung der kritischen Temperatur.

4. Die Berechnung der Formänderungsarbeit gekerbter Probestäbe

Der Wert der Formänderungsarbeit wurde bei den hier kurz umrissenen Versuchen sowohl graphisch als auch rechnerisch ermittelt. Die rechnerische Bestimmung erfolgt auf der Grundlage, daß die mittlere wahre Spannung in Abhängigkeit von der Einschnürung durch eine gerade Linie dargestellt werden kann. Diese Tatsache wurde an glatten Probestäben bereits von KÖRBER und ROHLAND [19] festgestellt. Versuche an einer sehr großen Zahl gekerbter Probestäbe haben es erkennen lassen, daß diese lineare Gesetzmäßigkeit auch für gekerbte Probestäbe gültig ist *(Bild 8)* [20]. Auf Grund dieses Zusammenhanges haben wir die Formel für die Berechnung der plastischen Formveränderungsarbeit schon früher mitgeteilt.

Wie aus Bild 8 ersichtlich, weicht die Fließkurve in einigen Fällen ein wenig von der Geraden ab und zeigt eine Krümmung nach oben. Die Erklärung und die Methode der Berechnung dieser — hier vernachlässigten — Erscheinung werde ich in Kürze veröffentlichen [21].

Bei gekerbten Probestäben — besonders bei tiefen Kerben — ist die Abweichung von der Geraden so gering, daß die rechnerische Ermittlung praktisch zu denselben Ergebnissen führt wie die graphische. Zur Berechnung der spezifischen Formänderungsarbeit kann man sich also auch bei gekerbten Probestäben der Formel

$$A_b = \frac{\sigma_s + 2\sigma_B}{3} \varepsilon_m + 4{,}6 \cdot \sigma_B (1 + \varepsilon_m) \log \left(\frac{1 - \psi_m}{1 - \psi_c}\right) + \\ + \sigma_B (1 + \varepsilon_m)^2 \left[\frac{1}{1 - \psi_m} - \frac{1}{1 - \psi_c}\right] \tag{16}$$

bedienen.

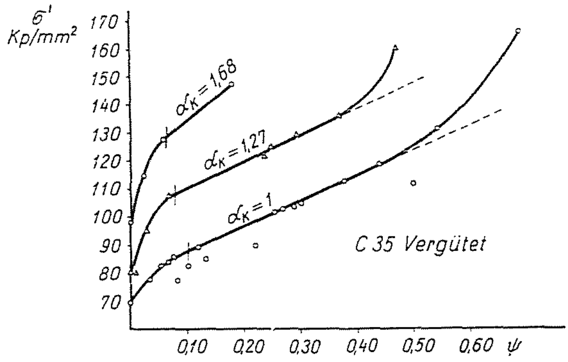

Bild 8. Wahre Spannungskurven für Proben mit verschiedenen Formfaktoren

5. Die Bestimmung der kritischen Übergangstemperatur

Auf Grund des hier gezeigten Proportionalitätsgesetzes ergeben sich an allen geometrisch ähnlichen, gekerbten Probestäben oder zumindest an allen Probestäben mit demselben Formfaktor dieselben Übergangstemperaturen. Offenbar kommt es dann zum Sprödbruch des Probestabes, wenn die Arbeit der plastischen Formänderung Null wird. Streng genommen, läßt sich die Gesamtarbeit, die zum Bruch des Probestabes notwendig ist, in drei Teile, in die elastiche, in die plastische Formänderungsarbeit bis zum Erscheinen des ersten makroskopischen Risses und in die Arbeit der Ausweitung des Risses zerlegen, es gilt somit

$$A_b = A_e + A_p + A_r, \tag{17}$$

wobei A_e die elastische Formänderungsarbeit, A_p die plastische Formänderungsarbeit, und A_r die Rißausweitungsarbeit bedeutet.

Während der Zerreißprobe ist die plastische Formänderungsarbeit weit größer als die Summe der beiden anderen Glieder. Demzufolge schreibt sich die Bedingungsgleichung des Sprödbruches streng genommen zu $A_b = A_e + A_r$. Näherungsweise ist jedoch die Bedingung $A_p = 0$ bei Zerreißversuchen praktisch gleichbedeutend mit der Bedingung $A_5 = 0$.

Auf Grund dieser Zusammenhänge läßt sich die Temperatur, bei der ein Sprödbruch auftritt, in Abhängigkeit vom mehrachsigen Spannungszustand, wie er durch die Kerbe entsteht, und in Abhängigkeit von der Zerreißgeschwindigkeit eindeutig bestimmen. Im Sinne des Proportionalitätsgesetzes ergeben sich an geometrisch ähnlichen Probestäben identische Übergangstemperaturen.

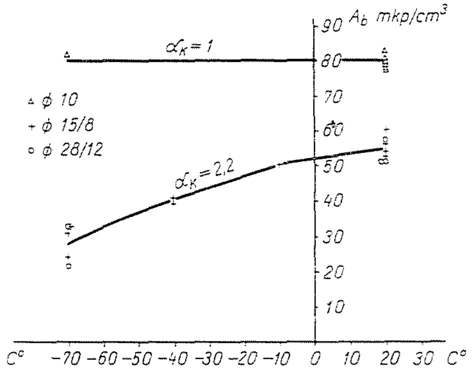

Bild 9. Temperaturabhängige Veränderung der Brucharbeit von C-10-Stählen

Von den verschiedenen Versuchsreihen sollen hier nur einige Beispiele erwähnt werden. Die eine Versuchsreihe wurde an Stahl C 10 durchgeführt, u.zw. teilweise an glatten Probestäben und teilweise an Probestäben verschiedener Abmessungen, wobei jedoch die Formfaktoren stets die gleichen waren. Die Ergebnisse dieser Versuche zeigt *Bild 9.* Die spezifische Formänderungsarbeit der glatten Probestäbe war im ganzen untersuchten Temperaturbereich praktisch konstant, die Brucharbeit der gekerbten Probestäbe mit dem Formfaktor 2,2 nähert sich zwar dem Nullwert, doch ließ sich bei —70° C mit dieser Kerbe noch kein Sprödbruch herbeiführen. Wie aus dem Bilde ersichtlich, ist die Streuung der Brucharbeit der gekerbten Probestäbe im allgemeinen nicht größer als ± 5 mkp/cm³.

In den weiteren Bildern wurde die verhältnismäßig geringe Streuung der Meßwerte nicht eingezeichnet, vielmehr wurden der besseren Übersichtlichkeit wegen nur die Mittelwerte der Meßergebnisse angegeben. Die spezifische Formänderungsarbeit eines Stahles *A* 37,21 erwies sich in weichem Zustand als praktisch unabhängig von der Versuchstemperatur, obzwar sie in Abhängigkeit vom Formfaktor stark sinkend war *(Bild 10)*. Im grobkörnigen Zustand zeigte derselbe Stahl eine äußerst große Sprödbruchempfindlichkeit *(Bild 11)*. Aus diesem geht hervor, daß die Formänderungsarbeit, obzwar die temperaturabhängige Bruchgarbeit der glatten Probestäbe bis zu —70° C praktisch konstant ist, bei Kerben mit dem Formfaktor $\alpha_k = 3$ bereits bei —70° C und be Kerben mit dem Formfaktor $\alpha_k = 6$ bereits bei —40° C praktisch den Nullwert erreicht.

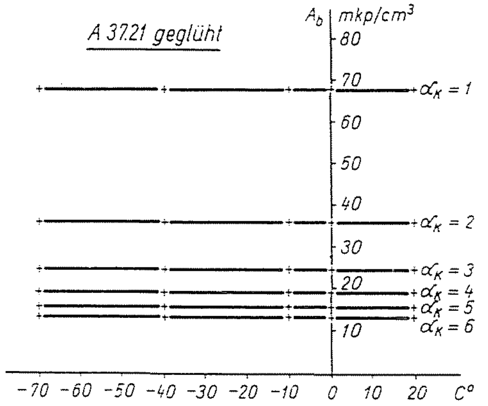

Bild 10. Die temperaturabhängige spezifische Formänderungsarbeit von Stahl A 37,21 in normalisiertem Zustand

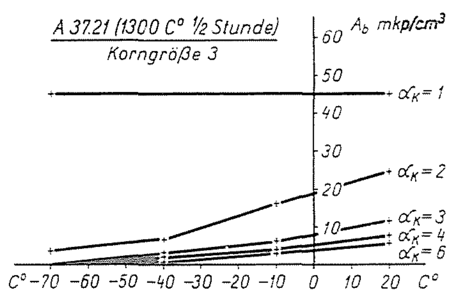

Bild 11. Die temperaturabhängige spezifische Formänderungsarbeit von Stahl A 37,21 in grobkörnigem Zustand

6. Zusammenfassung

Auf Grund von Untersuchungen der Geschwindigkeitsverhältnisse beim Zerreißen gekerbter Probestäbe läßt sich ein — auch im mehrachsigen Spannungszustand gültiges — Proportionalitätsgesetz aufstellen, nach welchem sich beim Zerreißen geometrisch ähnlicher Probestäbe mit gleichbleibender spezifischer Dehngeschwindigkeit stets dieselben Materialkenngrößen ergeben.

Dieses Gesetz kann so verallgemeinert werden, daß die spezifische Formänderungsarbeit beim Zerreißen geometrisch unähnlicher, jedoch denselben Formfaktor aufweisender Probestäbe praktisch gleich bleibt, trotzdem die anderen Materialkenngrößen voneinander abweichen. Mit Hilfe der beiden Proportionalitätsgesetze läßt sich die kritische Übergangstemperatur, die zum Sprödbruch führt, bei jedem beliebigen Spannungszustand bestimmen.

Literatur

1. WELLINGER K. und Z. HOFFMANN: Zeitschrift für Metallkunde, **39**, 233 (1948).
2. KÁRMÁN, TH. und P. E. DUWEZ: Journ. Appl. Phys. **21**, 987 (1950).
3. DUWEZ, P. E., CLARK, D. S.: Proc. American Soc. Testing Materials **47**, 502 (1947).
4. SIEBEL, E., MENGES, G.: Archiv f. d. Eisenhüttenwesen **28**, 31 (1957).
5. RÜHL, K.: Stahlbau, **24**, 145 (1955).
6. STANTON, T. E., BATSON, R. C. G.: Proc. Inst. Civ. Engineers **211**, 67 (1920/21).
7. STRIBECK, R.: Z. VDI **50**, 57 (1915).
8. SACHS, G. FIEK, G.: Der Zugversuch, Leipzig, 1926. 8.
9. MATTHAES, K.: Zeitschrift f. Metallkunde **43**, 14 (1952).
10. MATTHAES, K.: Zeitschrift f. Metallkunde **53**, 265—271 (1962).
11. GILLEMOT, L., SINAY, G.: Acta Technica Hung. T. **XXII**, 150.
12. GILLEMOT, L.: Materialprüfung, **3**, 330—336 (1961).
13. NÁDAI, A., MANJOINE, M.: Journal Appl. Mech. **8**, A77 (1941).
14. PRANDTL, L.: Zeitschrift f. Angew. Math. Mech. **8**, 85 (1928).
15. BRIDGEMAN: Large Plastic Flow and Pressure, New-York, London 1952.
16. SIEBEL, E., SCHWAIGERER S.: Archiv f. Eisenhüttenwesen **19**, 145 (1948).
17. GILLEMOT, L.: Archiv f. d. Eisenhüttenwesen (unter Druck).
18. CZOBOLY, E.: Dokt. Diss. Techn. Univ. Budapest.
19. KÖRBER, F., ROHLAND, W.: Mitt. K. W. I. Eisenforschung **5**, 37 (1924).
20. GILLEMOT, L.: Acta Technica Hung. **XXXV—XXXVI**, 105 (1961).
21. GILLEMOT, L.: Archiv f. d. Eisenhüttenwesen (unter Druck).

Prof. Dr. László GILLEMOT, Budapest, XI. Bertalan L. u. 7. Ungarn.