Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 90 (1972)
Heft: 41

Artikel: Ein Bewertungssystem der Bruchsicherheit
Autor: Varga, T.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-85330

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

In einem Kernkraftwerk sind Druckbehälter und Rohrleitungen verschiedener Betriebsbedingungen, Abmessungen und Wanddicken vorhanden. Eine Sprödbruchgefährdung dieser Bauteile kann in den meisten Fällen ausgeschlossen werden. Indessen sind einige wesentliche Komponenten wie beispielsweise die grossen Kühlmittelpumpen für bestimmte ungünstige Bedingungen auf ihre Sprödbruchsicherheit hin zu prüfen und zu bewerten. Aus diesem Grund kann die Arbeit von *T. Varga* «Ein Bewertungssystem der Sprödbruchsicherheit», mit deren Abdruck nachfolgend begonnen wird, insbesondere auch für die Nukleartechnik wertvolle Dienste leisten.

Weitere Versagensarten, welche durch die Fortpflanzung von Werkstoffehlern, durch Korrosion und Strahlenversprödung, durch plastische Instabilität, Dehnungsversprödung oder Verformungsbruch gekennzeichnet sind, müssen sowohl einzeln als auch in Zusammenhang mit der Sprödbruchgefährdung zusätzlich untersucht werden. Somit stellt die nachfolgende Arbeit nur einen – wenn auch wesentlichen – Teilbereich der Erfassung der Bruchsicherheit dar. *Red.*

Ein Bewertungssystem der Bruchsicherheit

DK 539.42.001.2

Von Dr. **T. Varga**, Zürich

1. Einleitung

Die vorgesehene Tragfähigkeit von statisch oder schlagartig belasteten Bauteilen wird bei nicht gesichert plastischem Bruchverhalten selbst nach einer geeigneten Festigkeitsrechnung erst durch die Sicherung gegen spröden Bruch gewährleistet.

Zur Beurteilung der Sprödbruchgefährdung sind – insbesondere für Baustahl – viele Prüfverfahren bekannt; es kommen jährlich neue hinzu. Alle diese Prüfungen mögen für bestimmte Werkstoff- und Anwendungsbereiche geeignet sein und damit ihre Existenzberechtigung haben – nur sind ihre Gebiete und Grenzen sehr oft unbekannt.

Es bietet sich daher eine schwer übersehbare Vielfalt an, in welcher die Wahl geeigneter Verfahren sowie die vergleichende oder absolute Bewertung im Hinblick auf die Sicherheit des Bauteils zumeist nur mühsam und mit grossen Unsicherheiten möglich ist. Die Normung kann auf diesem Gebiet, welches sich in ständigem Umbruch befindet, nur wenig Hilfe bieten, es sei denn für Bauteilgruppen, die über längere Zeit stets in gleicher Weise hergestellt werden.

Ein ganzheitliches Vorgehen, welches die Festigkeitsrechnung und die Beurteilung des Bruchverhaltens in Temperatur- und Geschwindigkeitsabhängigkeit in sich integriert, ist derzeit noch nicht möglich. Zwar erlauben die am weitesten gediehenen Erweiterungen der Versagenshypothesen vielversprechende Ausblicke, für die Anwendung sind sie derzeit jedoch noch nicht reif, wie das im nächsten Kapitel ausgeführt wird.

Es erscheint daher der systematische Ausbau der zur herkömmlichen Festigkeitsrechnung parallel durchgeführten Beurteilung der Sicherheit gegen Bruch als ein gangbarer Weg, welcher im Prinzip schon früher vorgeschlagen wurde.

Dabei ergeben sich im wesentlichen zwei Problemkreise: die Entwicklung von Denkmodellen und als Folge in Ablaufschemata fixierte Entscheidungswege sowie die Schaffung einer Systematik, welche die Aufnahme der bestehenden Prüfverfahren in eine logisch gebaute Ordnung erlaubt.

Das aus den Denkmodellen sich ergebende Bewertungssystem soll mit jeweils geringstem Aufwand die Beurteilung der Sicherheit gegen Bruch ermöglichen. Die Minimalisierung des Aufwandes wird mit der Einführung des «Rückführungsprinzips» angestrebt. Die Entscheidungswege führen über abgestufte Prüfungen. Sowohl der Aufwand als auch der Aussagewert nehmen mit der Prüfstufenzahl zu.

Werden in der ersten Prüfstufe die gesetzten Kriterien erfüllt, so erübrigt sich eine weitere Prüfung des Bruchverhaltens. Da auf diese Weise eine hinreichende Verformbarkeit nachgewiesen wurde, kann der übliche Bemessungsgang befriedigen, die Aufgabe wurde auf den gewöhnlichen Weg zurückgeführt.

Können die Kriterien nicht erfüllt oder die Prüfung nicht angewendet werden, so ist die nächste, als «Folgeprüfung» bezeichnete Prüfstufe anzuwenden. Dieser Vorgang kann bis zur Erreichung der höchsten Prüfstufe wiederholt werden.

Ist die «Rückführung» nicht möglich, so wird eine zur Festigkeitsrechnung parallel durchzuführende Ermittlung des Spannungsverlaufs und die Anwendung von quantitativen Verfahren zur Feststellung der Gefährdung durch verformungsarme Brüche notwendig. Letzteres Vorgehen wird unter dem Begriff der «Parallelbewertung» diskutiert.

Die Denkmodelle und die sich ergebenden Entscheidungswege können mit Hilfe der geschaffenen Prüfverfahren-Systematik eingesetzt werden. Als Merkmale werden die zu Hauptkriterien gewählten Einflussgrössen Temperatur und Spannung eingesetzt. Das Gewicht der Prüfverfahren-Kategorien steigt von den statistisch gestützten über die Grenzwert- und angepassten Prüfungen bis zu den quantitativen Verfahren an.

Die angegebenen Denkmodelle und Entscheidungswege sowie die Systematik der Prüfverfahren, d. h. das Bewertungssystem, entstanden nicht willkürlich, sondern beruhen auf den Charakteristiken der mit dem Bruchverhalten gekoppelten Tragfähigkeit bzw. auf den Merkmalen der Prüfverfahren.

Das Ziel, die Sicherung der Tragfähigkeit, bestimmt die Behandlung sowohl der Versagenshypothesen als auch – und vielleicht noch in vermehrtem Masse – die Bewertung der Brucharten und des Bruchverhaltens. Dies machte auch die Umdeutung einiger Begriffe notwendig.

2. Die Grundlagen der Bemessung

Anschliessend an die Schadenfälle der Liberty-Schiffe der USA sowie nach den Brüchen der Druckschachtpanzerung des Gerloskraftwerks in Österreich wurde an beiden Orten die Notwendigkeit einer von der Festigkeitsrechnung unabhängigen, zusätzlichen systematischen Beurteilung der Sprödbruchgefährdung von Bauteilen aus ferritischen Stählen, welche bei Umgebungstemperatur belastet werden, schon in den vierziger Jahren erkannt.

Zur Gewährleistung der Tragfähigkeit eines Bauteils entsprechend dem Betriebszweck werden heute bei Verwendung von ferritischen Stählen zusätzlich zur üblichen Bemessung zerstörende und zerstörungsfreie Prüfverfahren angewendet.

Mit den zerstörenden Prüfverfahren wird (neben der Ermittlung der Festigkeitseigenschaften) hauptsächlich die Sprödbruchgefahr, welche als Folge der temperaturbedingten Zähigkeitsabnahme auftritt, untersucht. Werkstoffe für Konstruktionen, welche bei Raumtemperatur und darunter, in einzelnen Fällen auch über Raumtemperatur arbeiten, werden also einer Sprödbruchprüfung unterzogen.

Die einschlägigen Vorschriften lassen allerdings erkennen, dass hier eine fast unübersehbare Vielfalt der Prüf- und Bewertungsverfahren besteht. Die selbst für denselben Verwendungszweck anzutreffenden Unterschiede in den verschiedenen

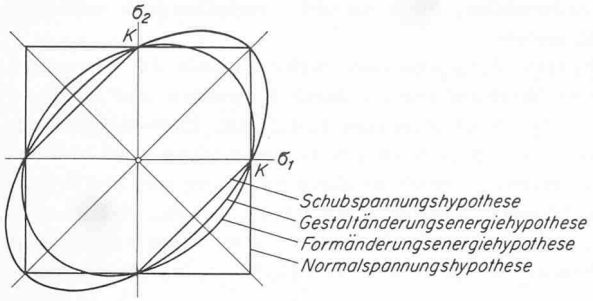


Bild 1. Darstellung der Versagensgrenzen gemäss den verschiedenen Festigkeitshypothesen bei zweiachsiger Beanspruchung, nach *H. Dietmann*

Vorschriften ergeben nicht nur verschiedene Sicherheiten für das Bauwerk, sondern auch Unterschiede im Aufwand, d.h. in den Kosten der Fertigung.

Die zerstörungsfreien Prüfverfahren werden mit dem Ziel durchgeführt, Fehler im Sinne von Hohlräumen und Diskontinuitäten im Bauteil zu ermitteln. In den bekannten Abnahmevorschriften sind zum Beispiel Risse jeder Grösse sowie in Schweissungen Bindefehler unzulässig.

Dies bedeutet praktisch, dass solche Fehler lediglich ausserhalb der Nachweisgrenze der jeweils verwendeten Prüfverfahren die Abnahme passieren können. Mit Verfeinerung der zerstörungsfreien Prüftechnik ist indessen die Empfindlichkeit so weit angestiegen, dass beispielsweise in UP-Stumpfschweissungen von Druckrohrleitungen an 40 mm dicken Stahlblechen feine Risse unter einem Millimeter grösster Abmessung nachgewiesen werden konnten. Die Behebung solcher Fehler ist sehr kostspielig, gemäss der bisherigen Erfahrungen bei ähnlichen Anwendungen auch unnötig. Zur Beurteilung von Diskontinuitäten mit quantitativen Verfahren wird hingegen die Bestimmung der Grösse und Gestalt vordringlich. Damit wurden neue Aufgaben und Entwicklungen in das Gebiet der zerstörungsfreien Prüfung eingeführt.

Im folgenden werden die derzeit angewendeten Bemessungsverfahren und deren Grundlagen erörtert.

2.1 Statische Auslegung (Bemessung)

Ziel der Bemessung ist die Sicherung der Tragfähigkeit der Konstruktion im vorgesehenen Ausmass. Die allgemein verwendeten Berechnungsformeln und -verfahren können auf die Festigkeitshypothesen zurückgeführt werden: auf die Normalspannungshypothese, Schubspannungshypothese, erweiterte Schubspannungshypothese (Mohrsche Hypothese), die Formänderungsenergiehypothese und die Gestaltänderungsenergiehypothese.

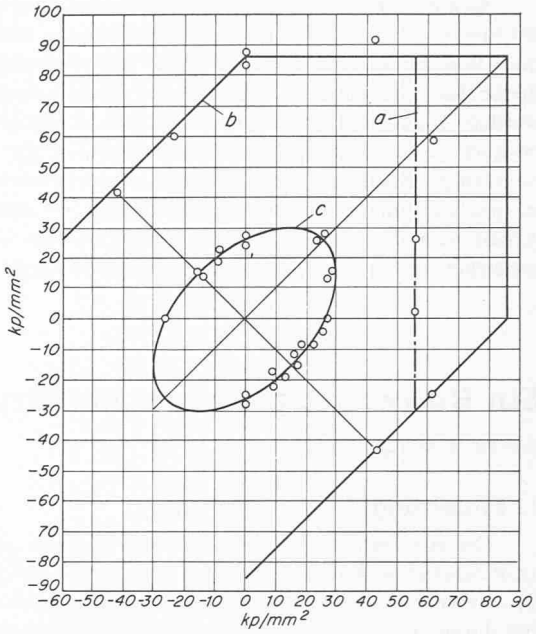


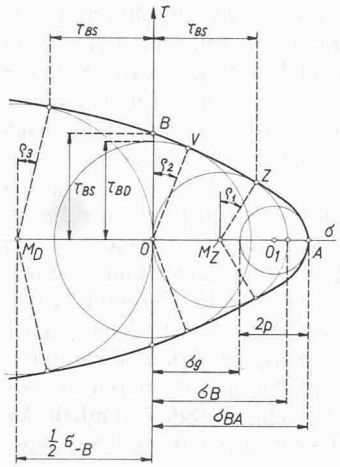
Bild 2. Fliess- und Bruchgrenzen eines Siemens-Martin-Stahles nach M. *Roš* und *A. Eichinger*
a Normalspannungshypothese
b Schubspannungshypothese
c Gestaltänderungsenergiehypothese

Die Festigkeitshypothesen erlauben bei zusammengesetzten Beanspruchungszuständen (mehrachsigen Spannungszuständen) die Berechnung einer Vergleichsspannung, welche für das Versagen massgeblich sein soll. In Bild 1 sind die mit Hilfe der verschiedenen Festigkeitshypothesen ermittelten Versagensgrenzen für den ebenen Spannungszustand ($\sigma_3 = 0$) dargestellt.

Tabelle 1 enthält die zugehörigen Berechnungsformeln der Vergleichsspannung [1]. *M. Roš* und *A. Eichinger* [2] lieferten einen experimentellen Nachweis für den Gültigkeitsbereich der verschiedenen Festigkeitshypothesen für einen Siemens-Martin-Stahl bei Fliessbeginn und Bruch. Die Gestaltänderungsenergiehypothese ergibt für das Fliessen eine sehr gute Annäherung, während für den Bruch, vom Spannungszustand abhängig, die Normalspannungs- bzw. die Schubspannungshypothese massgeblich sind, siehe Bild 2.

Tabelle 1. Die für die Bruchgefahr massgebende Vergleichsspannung σ_V nach verschiedenen Festigkeitshypothesen, zwei- und dreiachsiger Spannungszustand, $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3, \sigma_1 > 0$

Festigkeitshypothesen	Spannungszustand zweiachsig $\sigma_1; \sigma_2; \sigma_3 = 0$	zweiachsig $\sigma_x; \sigma_y; \tau_{xy}$	dreiachsig $\sigma_1; \sigma_2; \sigma_3$
Normalspannungshypothese	σ_1	$\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\,\tau_{xy}^2}$	σ_1 (Zug)
Schubspannungshypothese	$\sigma_1 > 0 > \sigma_2 : \sigma_1 - \sigma_2$	$\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\,\tau_{xy}^2}$	$\sigma_1 - \sigma_3$
	$\sigma_1 > \sigma_2 > 0 : \sigma_1$	$\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\,\tau_{xy}^2}$	
Formänderungsenergiehypothese	$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\nu\,\sigma_1\,\sigma_2}$	$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2\nu\left(\sigma_x\,\sigma_y - \frac{1+\nu}{\nu}\,\tau_{xy}^2\right)}$	$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1}$
Gestaltänderungsenergiehypothese	$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\,\sigma_2}$	$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x\,\sigma_y + 3\,\tau_{xy}^2}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$



$$(1)\quad \frac{\sigma_{-B}}{\sigma_B} = c$$

$$(2)\quad \frac{\tau_{BS}}{\sigma_B} = \frac{(c+1)}{4}$$

$$(3)\quad \frac{\tau_{BD}}{\sigma_B} = \frac{1}{2}\cdot\sqrt{c}$$

$$(4)\quad \frac{\sigma_{BA}}{\sigma_B} = \frac{(c+1)^2}{8(c-1)} = c_A$$

$$(5)\quad \operatorname{tg}\rho_1 = \frac{(c-1)}{\sqrt{(3-c)\cdot(1+c)}}$$

$$(6)\quad \operatorname{tg}\rho_2 = \frac{(c-1)}{\sqrt{(c+1)^2 - 2(c-1)^2}}$$

$$(7)\quad \operatorname{tg}\rho_3 = \frac{(c-1)}{\sqrt{(3c-1)(c+1)}}$$

Bild 3. Festigkeitsbeziehungen nach *A. Leon* für die Hüllparabeln $c < 3$. σ_B und σ_{-B} bedeuten die «lineare» Zug- bzw. die «lineare» Druckfestigkeit, σ_{BA} die Festigkeit bei allseitigem Zug, τ_{BS} die reine Schub- und τ_{BD} die Verdrehfestigkeit

$$(1)\quad \frac{\sigma_{-B}}{\sigma_B} = c$$

$$(2)\quad \frac{\tau_{BS}}{\sigma_B} = [\sqrt{(c+1)} - 1]$$

$$(3)\quad \frac{\tau_{BD}}{\sigma_B} = 1$$

$$(4)\quad \frac{\sigma_{BA}}{\sigma_B} = 1$$

$$(5)\quad \operatorname{tg}\rho_1 = \infty\ (\rho_1 = 90°)$$

$$(6)\quad \operatorname{tg}\rho_2 = \infty\ (\rho_2 = 90°)$$

$$(7)\quad \operatorname{tg}\rho_3 = \frac{\sqrt{(c+1)} - 1}{2\sqrt[4]{(c+1)}}$$

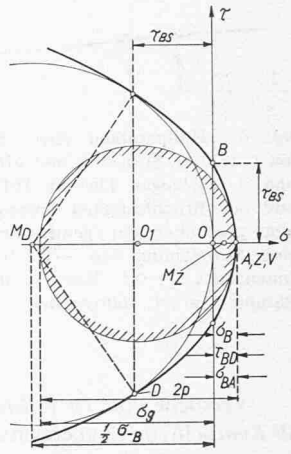


Bild 5. Festigkeitsbeziehungen nach A. Leon für die Hüllparabeln $c \geqq 4{,}83$. Bezeichnungen siehe Bild 3

Die zulässige Beanspruchung, d.h. Vergleichsspannung, wird zumeist mit 66 % der einachsigen Streckgrenze (Sicherheitsfaktor 1,5) bzw. 33 % der Zugfestigkeit (Sicherheitsfaktor 3,0) angesetzt, wobei jeweils der kleinere Wert gilt. Abweichungen in verschiedenen nationalen bzw. internationalen Vorschriften sind häufig.

Spannungen, welche die einachsige Fliessgrenze örtlich übersteigen, werden in den USA zugelassen [3]. Bedingung ist, dass entweder tolerierbare plastische Verformungen zum Abbau führen oder, bei mehrachsigen Spannungszuständen, die übrigbleibenden örtlichen Spannungskonzentrationen keine Gefahr bedeuten. Letztere müssen, besonders bei Wechselbeanspruchungen, sorgfältig geprüft werden. Die örtlich zulässigen Spannungen dürfen in bestimmten Fällen die zweifache Fliessgrenze oder die Zugfestigkeit erreichen. Es ist offensichtlich, dass der mit dem örtlichen Verformungs- und Bruchverhalten gekoppelten Tragfähigkeit in diesen Fällen besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden muss.

2.2 Spannungsermittlung

Die einfache Spannungsberechnung ist auf bestimmte geometrische Grundformen beschränkt. Zur Ermittlung des Beanspruchungszustandes in kompliziert gestalteten Bauteilen bedient man sich gewisser Modellversuche, z.B. der Spannungsoptik; durch Einfrieren der Spannungen können auch dreidimensionale Probleme analysiert werden.

Wesentlich schneller kann die mit automatischen Rechenanlagen durchgeführte Spannungsanalyse unter Anwendung der Finiten Elemente durchgeführt werden. Die seit einigen Jahren da und dort übliche parallele Anwendung der Spannungspolitik und der Methode der Finiten Elemente zeigt, dass eine gute Übereinstimmung erreicht werden kann. Eine Teilung des Aufgabengebietes ist insofern erkennbar, als bei besonders unregelmässigen und komplizierten Formen weiterhin die Spannungsoptik angewendet wird. Wo hingegen Programme vorhanden sind, ist die Durchführung der rechnerischen Analyse – wenn auch nicht immer aus kostenmässigen, so doch aus terminlichen Gründen – vorzuziehen.

2.3 Über die Geltungsbereiche der gebräuchlichsten Festigkeitshypothesen bei duktilem und sprödem Werkstoffverhalten

Die erweiterte Schubspannungshypothese nach Mohr ist zur Beschreibung sowohl von Verformungs- als auch spröden Bruchkriterien geeignet. Wird die Hüllkurve gemäss Leon als Parabel angenommen, so kann damit die Festigkeit eines Werkstoffes für alle möglichen Spannungszustände vorausgesagt werden [4]. Zur Ermittlung der Hüllparabel genügen zwei Festigkeitswerte: man kann beispielsweise die einachsige Zug- und Druckfestigkeit, σ_B und σ_{-B} verwenden, siehe Bild 3. Gemäss den Gleichungen (2) bis (4) in Bild 3 können die anderen Festigkeitsverhältnisse ausgedrückt werden.

$$(1)\quad \frac{\sigma_{-B}}{\sigma_B} = c$$

$$(2)\quad \frac{\tau_{BS}}{\sigma_B} = [\sqrt{(c+1)} - 1]$$

$$(3)\quad \frac{\tau_{BD}}{\sigma_B} = \frac{1}{2}\sqrt{c\,[4\sqrt{c+1} - (c+4)]}$$

$$(4)\quad \frac{\sigma_{BA}}{\sigma_B} = 1$$

$$(5)\quad \operatorname{tg}\rho_1 = \infty,\ (\rho_1 = 90°)$$

$$(6)\quad \operatorname{tg}\rho_2 = \frac{[\sqrt{c+1} - 1]^2}{\sqrt{2\,[4(c+1)\sqrt{c+1} - (c+3)^2 + 5]}}$$

$$(7)\quad \operatorname{tg}\rho_3 = \frac{\sqrt{c+1} - 1}{2\sqrt[4]{c+1}}$$

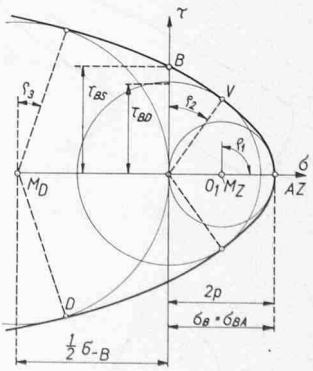


Bild 4. Festigkeitsbeziehungen nach A. Leon für die Hüllparabeln $3 \leqq c < 4{,}83$. Bezeichnungen siehe Bild 3

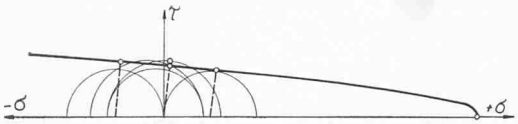


Bild 6. Hüllparabeln eines Siemens-Martin-Stahles mit C 0,22 %, Si 0,25 % und Mn 0,71 %, nach *M. Roš* und *A. Eichinger*. Die mit Hilfe der Zugfliessgrenze und der Bruchfestigkeit aufgestellte Hüllparabel ergibt gegenüber der gemessenen Verdrehfliessgrenze eine Abweichung von — 6,8 %; für den Druck mit Innendruck + 0,5 bzw. — 0,5%. Der Vergleich stammt von *A. Slattenschek*

Versuche von *Th. v. Kármán* [5] für das Druckgebiet, von *W. Kuntze* [6] im Zugbereich sowie Untersuchungen von Roš und Eichinger [2] zeigen, dass die Annahme stimmt und dass eine parabelförmige Annäherung im Zugbereich gerechtfertigt ist.

Nach der Zusammenfassung von *A. Slattenschek* [7], der eine kritische Bewertung der verschiedenen Festigkeitshypothesen durchführte, unterscheidet Leon grundsätzlich drei Bereiche im Werkstoffverhalten:

Im ersten Bereich ist die Druckfestigkeit kleiner als die driefache Zugfestigkeit, also das Verhältnis $c < 3$. Für diesen Fall zeigen der Druckversuch, der Verdrehversuch und der Zugversuch einen Schubbruch, d.h., die Bruchflächen sind zu den Hauptnormalspannungsrichtungen geneigt; sie entstehen jeweils unter Mitwirkung einer Schubspannung.

Im zweiten Bereich ist $3 \leqslant c < 4{,}83$. In Bild 4 sind die für diesen Bereich geltenden Festigkeitsbeziehungen angeschrieben. Aus der Gleichung (4) ist zu ersehen, dass für diesen Bereich die lineare Zugfestigkeit σ_B gleich der allseitigen Zugfestigkeit σ_{BA} wird, d.h., der lineare Zug ergibt einen Trennbruch. Für den Grenzfall $c = 3$ wird nach Gleichung (2) auch eine Schubfestigkeit τ_{BS} gleich der linearen Zugfestigkeit σ_B.

Für den dritten Bereich wird $c \geqslant 4{,}83$. Wie die Gleichungen (3) und (4) in Bild 5 zeigen, werden dann die Verdrehfestigkeit, die lineare Zugfestigkeit und die allseitige Zugfestigkeit gleich gross, d.h. bei allen drei Versuchen treten Trennbrüche auf.

A. Slattenschek schlägt zur Bestimmung der Hüllparabeln die Verwendung einer Verformungsgrenze, z.B. der Fliessgrenze, und die Zerreissfestigkeit nach *P. Ludwik* [8] vor, da beide einfach aus dem Zugversuch zu bestimmen sind. Die Zerreissfestigkeit, welche den Endpunkt des wirklichen Spannungs-Dehnungs-Diagramms darstellt, kann angenähert als die auf den Bruchquerschnitt bezogene Bruchlast berechnet werden.

Eine nach *M. Ros* und *A. Eichinger* [9] durchgeführte Auswertung der parabelförmigen Hüllkurvennäherung von Leon auf Grund von experimentellen Ergebnissen zeigt, wie in Bild 6 dargestellt, verhältnismässig geringe Abweichungen.

Für den dreiachsigen Spannungszustand sind in Bild 7 nach Slattenschek [7] die Festigkeitskörper verschiedener Festigkeitshypothesen dargestellt, welche eine Beschreibung des spröden Bruches erlauben. Teilbild 7a entspricht der Formänderungs- und Gestaltänderungsenergiehypothese mit der Annahme einer Beeinflussung der Vergleichsspannung durch die hydrostatische Spannung. Ebenfalls dem Teilbild 7a entsprechen die Hypothesen nach *R. v. Mises* und *H. Hencky* [10].

Teilbild 7b enthält die sechsseitige parabolische Pyramide, welche dem Festigkeitskörper der Mohrschen Hypothese mit der Hüllparabel nach Leon entspricht. Teilbild 7c enthält den von Roš vorgeschlagenen Festigkeitskörper, der auf der Hypothese der resultierenden Verschiebungen beruht. Der Festigkeitskörper ist, wie auch im Querschnitt ersichtlich, kein Rotationskörper.

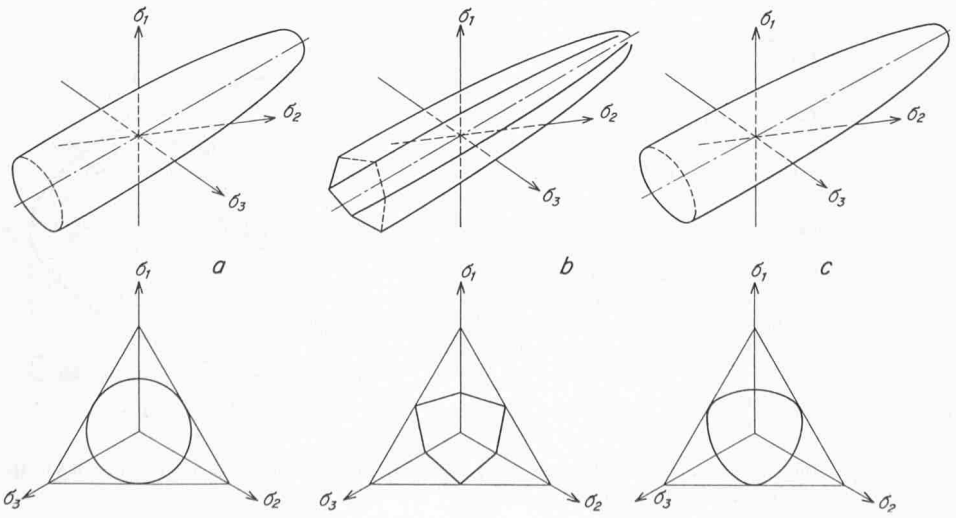
Die beste Übereinstimmung mit dem Versuch ergab der Festigkeitskörper nach Roš; ihm folgt jener nach Mohr-Leon, während die Abweichungen des rotationssymmetrischen Festigkeitskörpers grösser werden.

Als wesentlichen Vorteil weist die Darstellung der Bruchfestigkeit nach Mohr und Leon eine leichte Bestimmbarkeit der Hüllparabel mit Hilfe des Zugversuchs auf sowie eine abschätzbare bzw. verhältnismässig einfach nachkontrollierbare Abweichung gegenüber dem Verhalten im Versuch. Die so erhaltenen Kurven gelten für einen Werkstoff in einem bestimmten Zustand; der Werkstoff wird als homogen und isotrop (bzw. quasi-isotrop) und in seinen Eigenschaften während der Beanspruchung als konstant betrachtet. Ebenso sind Temperatur und Verformungsgeschwindigkeit als konstant vorauszusetzen.

Abschliessend zwei Zitate: Roš und Eichinger [2]:

«Die Mohrsche Theorie dürfte von allen Bruchtheorien, welche dem Aufbau eines Stoffes keine Rechnung tragen, die zutreffendsten Mittelwerte geben.»

Slattenschek [7]: «Die Mohrsche Theorie mit der parabolischen Hüllkurve nach Leon umfasst das gesamte Gebiet der Schub- und Trennbrüche, sie kennzeichnet die Ebenen, in denen kritische Spannungszustände auftreten, sie unterscheidet zwischen Scherfestigkeit und Verdrehfestigkeit, sie enthält den Satz von der Konstanz der Reissfestigkeit. Sie vernachlässigt allerdings den Einfluss der mittleren Hauptnormalspannung σ_2... Die Hypothese der resultierenden Verschiebungen der EMPA ist den Versuchsergebnissen besonders beim



a Darstellung gemäss den Hypothesen nach *R. v. Mises* und *H. Hencky* sowie *Schleicher*. Der Festigkeitskörper ist ein Rotationsparaboloid

b Festigkeitskörper der Mohrschen Hypothese mit der Leon-Hüllparabel

c Darstellung nach der Hypothese der resultierenden Verschiebungen der EMPA, *M. Roš* und *A. Eichinger*. Der Körper ist nicht rotationssymmetrisch; er wurde mit Versuchen am besten bestätigt

Bild 7. Schematische Darstellung der Festigkeitskörper im dreiachsigen orthogonalen Koordinatennetz, nach *A. Slattenscheck*. Alle drei Festigkeitskörper erlauben die Beschreibung des Trenn- bzw. spröden Bruches

Eintritt des Fliessens wesentlich besser angepasst. Sie stellt gewissermassen eine Erweiterung der Mohrschen Theorie unter Berücksichtigung der mittleren Hauptnormalspannung σ_2 dar.»

Die Darstellung der Spannungsversprödung nach Schnadt:

Mit Anwendung der Gestaltänderungsenergiehypothese konnte *H. Schnadt* [11] eine graphische Darstellung des Zusammenhanges zwischen der grössten Hauptspannung und der Vergleichsspannung einerseits sowie dem Fliess- und Bruchverhalten anderseits geben.

Zur Darstellung des Verformungsverhaltens wird die Vergleichsspannung umgeschrieben: die Hauptspannungen σ_1, σ_2 und σ_3 werden durch Verhältniszahlen ersetzt:

(1) $\eta_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}, \quad \eta_3 = \frac{\sigma_3}{\sigma_1}$ und damit

(2) $\pi = \sqrt{1 + \eta_2^2 + \eta_3^2 - \eta_2 \eta_3 - \eta_2 - \eta_3}$, weiterhin ist

(3) $\varphi = \frac{1}{\pi}$

wobei π eine Art «Spannungsduktilität» und φ die Spannungsversprödung bedeuten.

Bei Darstellung der Fliess- und Bruchlinie in einem Koordinatennetz σ_1/π werden die Fliess- bzw. Bruchhyperbel erhalten. Bei Anwendung des reziproken Wertes $\varphi = 1/\pi$ erhält man im Koordinatennetz σ_1/φ Gerade, siehe Bild 8. Links der Fliesslinie erfolgt lediglich elastische Verformung; zwischen der Fliess- und Bruchlinie die plastische Verformung und bei Erreichung der Bruchlinie Trennung. Bei konstantem Spannungszustand, d.h. konstanter Spannungsversprödung φ, wird bei zunehmender Belastung proportional zu σ_1 zuerst eine elastische, dann dazukommend eine plastische Verformung stattfinden, denen bei Erreichen der Bruchlinie die Trennung folgt.

Bild 8 entsprechend wird eine Zunahme der Spannungsversprödung, d.h. der Mehrachsigkeit des Spannungszustandes zu einem Ansteigen der Streckgrenze und der Zugfestigkeit führen. Der Spannungsversprödung bei hohen Mehrachsigkeiten trägt Schnadt mit Abgrenzung des plastischen Bereichs Rechnung: oberhalb eines Grenzwertes von φ nähert sich die Bruchlinie der Fliesslinie an. Beim Zusammenfall der Bruch- und Fliesslinie und damit Verschwinden der plastischen Verformung ist der spröde Bruchbereich erreicht.

Die Spannungsversprödung soll für genietete Konstruktionen weniger als 1,25, für geschweisste bis zu 2,31 betragen.

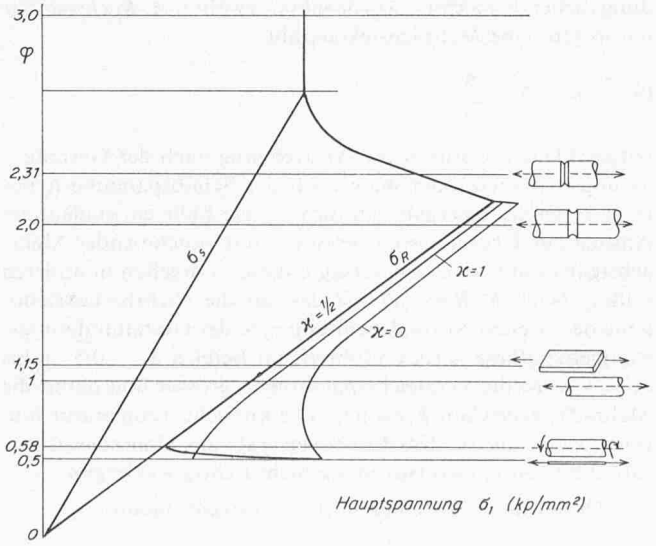


Bild 8. Fliess- und Bruchlinien im elastischen, teilplastischen und plastischen Bereich, «Grunddiagramm eines Stahles», nach *H. Schnadt*

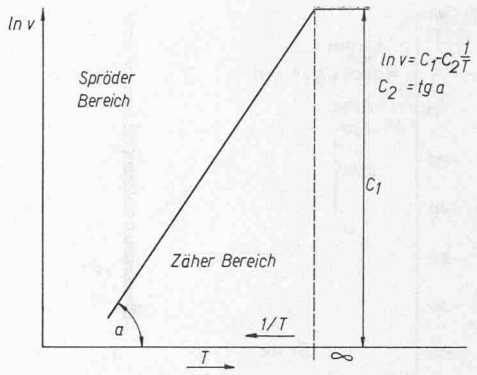


Bild 9. Die Trennung der Bruchbereiche in Abhängigkeit von der Verformungsgeschwindigkeit nach *Becker, Orowan* und *Kochendörfer*

In Bild 8 sind die Werte für typische Beanspruchungsfälle angegeben: im dünnen Draht ist die Spannungsversprödung $\varphi = 0{,}5$; bei reiner Torsion, wo $\sigma_1 = \sigma_2$ und $\sigma_3 = 0$ ist, erhalten wir 0,58; beim gezogenen Rundstab vor der Einschnürung 1,0 und im Blech einachsig gezogen 1,15. Rundkerbproben ordnet Schnadt $\varphi = 2{,}0$, Scharfkerbproben $\varphi = 2{,}31$ zu.

Der Verlauf der Bruchlinie ist mit der Vergleichsspannung nicht eindeutig definiert: entsprechend dem Verhältnis

(4) $\varkappa = \frac{\eta_2 - \eta_3}{1 - \eta_3}$

erhält man für die Bruchlinie nach einer plastischen Verformung (vermutlich auch im teilplastischen Bereich) eine Kurvenschar.

Die Bereiche der elastischen und plastischen Verformung, der zähen, der spröden bzw. der Mischbruchbereiche sind klar zu unterscheiden. Indessen ist die Ermittlung des Überganges vom zähen zum spröden Bruch mit experimentellen Schwierigkeiten verbunden, wie das die Arbeit von *H. Dietmann* [1] zeigt. Die Aufnahme des Grunddiagrammes für die ferritischen Stähle wäre an sich möglich, indessen ist keine gleichzeitige Ausdehnung der Darstellung auf den Einfluss der Temperatur und der Verformungsgeschwindigkeit bekannt. Ein Grunddiagramm nach Schnadt gilt demnach für einen Werkstoff in einem bestimmten Ausgangszustand bei konstanter Temperatur und Verformungsgeschwindigkeit.

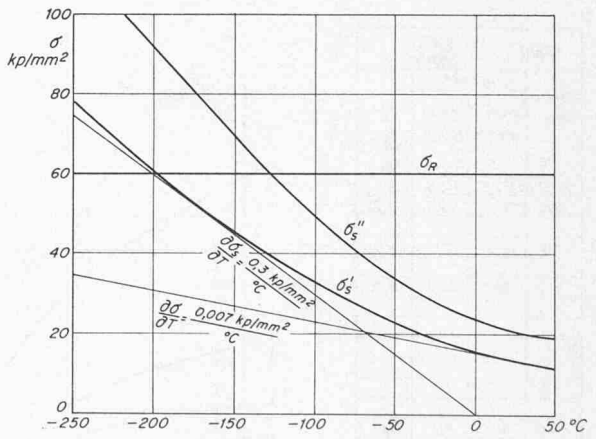


Bild 10. Fliessgrenze eines ferritischen Stahls in Abhängigkeit von der Temperatur. Die Kurve σ_s' gilt unter den genormten Prüfbedingungen, die Kurve σ_s'' für $d' \sim d/4$ oder für $\dot{\varepsilon} \sim 10^5 \cdot \dot{\varepsilon}_1$. Die Gerade $\sigma = \sigma_R$ für die Reissfestigkeit dient zur herkömmlichen Deutung des Sprödbruches nach *A. Kochendörfer*

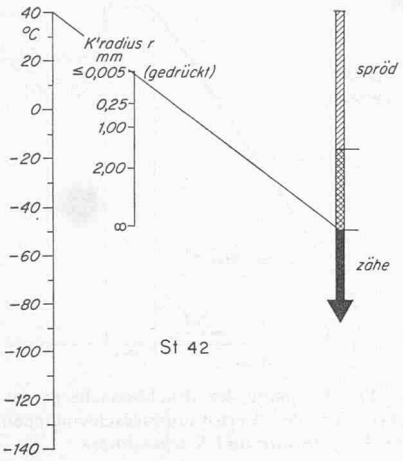


Bild 11. Nomogramm Temperatur — Kerbradius. Darstellung des im Kerbschlagversuch auftretenden Bruchverhaltens eines Baustahles St 42

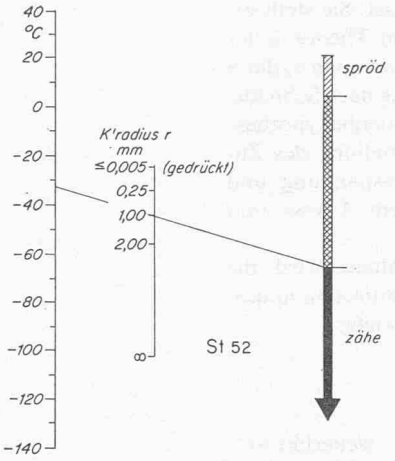


Bild 12. Nomogramm Temperatur — Kerbradius. Darstellung des Bruchverhaltens von einem Feinkornbaustahl St 52

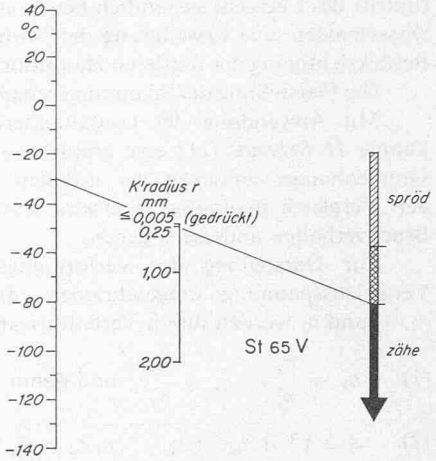


Bild 13. Nomogramm Temperatur — Kerbradius. Darstellung des Bruchverhaltens eines vergüteten Feinkornbaustahls St 65

Bilder 11 bis 13. In Kenntnis der Prüftemperatur und des Kerbradius kann der Anteil des Verformungsbruchs bzw. der Kristallinität an der Bruchfläche abgelesen werden. Versuche des Verfassers bei der Elektrodenfabrik Oerlikon; verwendet wurden Proben mit eingesetzten Hartmetallbolzen nach *H. Schnadt*

2.4 Zur Wirkung der «äusseren» Einflussgrössen

Aufbauend auf die Theorie der Kristallplastizität und entsprechend den Arbeiten von Becker, Orowan und Kochendörfer [12] ergibt sich eine kritische Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Gleitungen, die von der Gaskonstante, der Temperatur und der Aktivierungswärme abhängt und zur kritischen Verformungsgeschwindigkeit v_{krit} im Verhältnis steht:

$$\ln v_{krit} = c_1 - c_2/T \tag{5}$$

worin c_1 und c_2 werkstoffabhängige Konstanten und T die absolute Temperatur bedeuten.

Die schematische Darstellung der «Versprödungsgeraden» ist in Bild 9 gegeben [12].

Ein experimenteller Nachweis für zweiachsige Spannungszustände wurde von *C. W. Mc Gregor* und *N. Grossmann* [13] gegeben. Die konstanten c_1 und c_2 sind nach Untersuchungen von *A. W. Magnussen* und *W. M. Baldwin* [14] für Baustähle $c_1 = 29$ bis 31 und $c_2 = 2300$ bis 3200.

Stahl	0,12 % C geglüht		
Prüf-temp. °C	kg/mm² Fliess-grenze σ_s	Reiss-festigk. σ_R	$c_s = \frac{\sigma_R}{\tau_{as}}$
-270	172,6	172,6	1
-200	100,0	142,5	2,22
-100	45,5	111,5	4,33
0	30,3	102,5	6,20
+400	12,1	81,8	12,97
+600	9,1	17,6	5,40

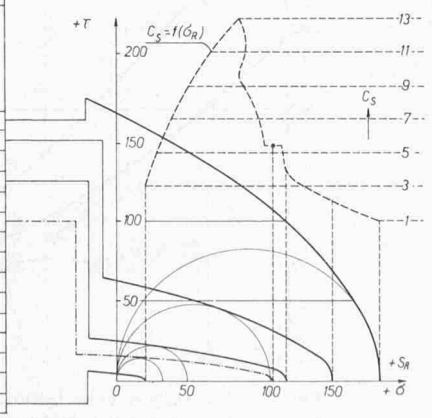


Bild 14. Nach Versuchen von *Goerens* und *Mailänder* ist der Temperatureinfluss auf den Festigkeitsstand eines Baustahles mit 0,12 % Kohlenstoff in der Auswertung von *A. Slattenschek* auszugsweise dargestellt

Die vorherige Betrachtung erlaubt die Trennung der spröden und zähen Bruchbereiche. Über die Tragfähigkeit sagt sie nichts aus. Auf den Zusammenhang zwischen der Festigkeit und den äusseren Einflussgrössen (Temperatur und Verformungsgeschwindigkeit) soll im nachfolgenden eingegangen werden.

In Bild 10 ist nach *A. Kochendörfer* [15] der Verlauf der Fliessgrenze und der Reissfestigkeit über der Temperatur dargestellt. Entsprechend dem Ludwikschen Prinzip der Schnittpunkte des Streckgrenzenverlaufes mit der Reissfestigkeit wird der Übergang zwischen dem zähen zum spröden Bruch bei sinkender Temperatur dargestellt. Mit höherer Verformungsgeschwindigkeit ist die Kurve σ''_s immer über σ'_s anzutreffen.

Der Zusammenhang zwischen dem Spannungszustand und der Versprödungstemperatur kann mittels abgestufter Kerbradien an Kerbschlagbiegeproben zumindest tendenzmässig untersucht werden. In den Bildern 11, 12 und 13 sind aus eigenen Untersuchungen abgeleitete Nomogramme für drei Baustähle dargestellt.

Der zur quantitativen Erfassung der Spannungsversprödung dienende Faktor φ wurde schon erwähnt. *A. Kochendörfer* hat in [16] eine Mehrachsigkeitszahl

$$K = 1 - \frac{\sigma_v}{\sigma_1} \tag{6}$$

vorgeschlagen, worin σ_v die Anstrengung nach der Gestaltänderungshypothese oder auch nach der Schubspannungshypothese bedeutet. Es ergab sich für mehrere Fälle ein eindeutiger Anstieg der Übergangstemperaturen mit zunehmender Mehrachsigkeitszahl; indessen versagte dieses Vorgehen in anderen Fällen. Nach *K. Rühl* [12] ist das auf die Nichtberücksichtigung der zweiten Normalspannung σ_2 in der Gestaltänderungsenergiehypothese zurückzuführen; im Bereich $\sigma_2 = 0{,}5 \cdot \sigma_1$ bis $\sigma_2 = \sigma_1$ wird die Vergleichsspannung σ_v grösser und damit die Mehrachsigkeitszahl K kleiner. Die kritische Temperatur hingegen steigt an, so dass für diesen Fall die Mehrachsigkeitszahl die Spannungsversprödung nicht richtig wiedergibt.

Der in den USA eingeführte «constraint factor»

$$c = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3\,\sigma_1} \tag{7}$$

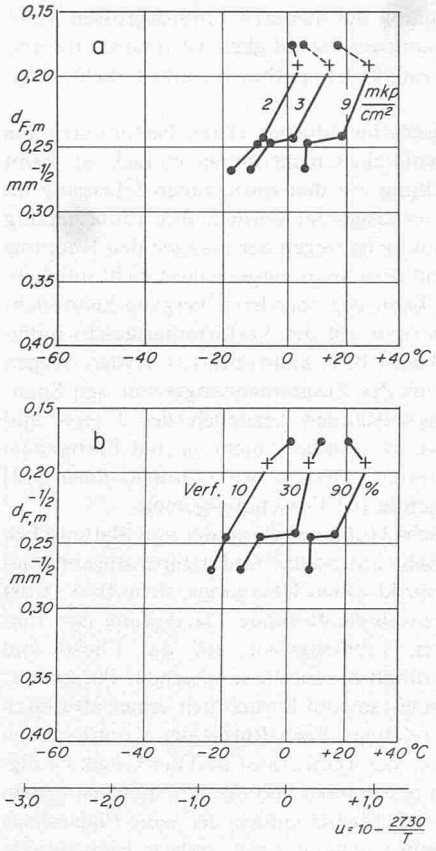


Bild 15. Zusammenhang Korngrösse – Übergangstemperatur an einem Stahl St 42. Die zur Einstellung der Korngrössen angewendeten Glühtemperaturen betrugen 900, 950, 1000, 1050 °C, die Haltezeit rund 90 min. Probenform: Schnadt-K-O

a Übergangstemperaturen $t_{ü}$ für 2, 3 und 9 mkp/cm²

b Übergangstemperaturen $t_{ü}$ für 10, 30 und 90 % Verformungsbruchanteil der Bruchfläche

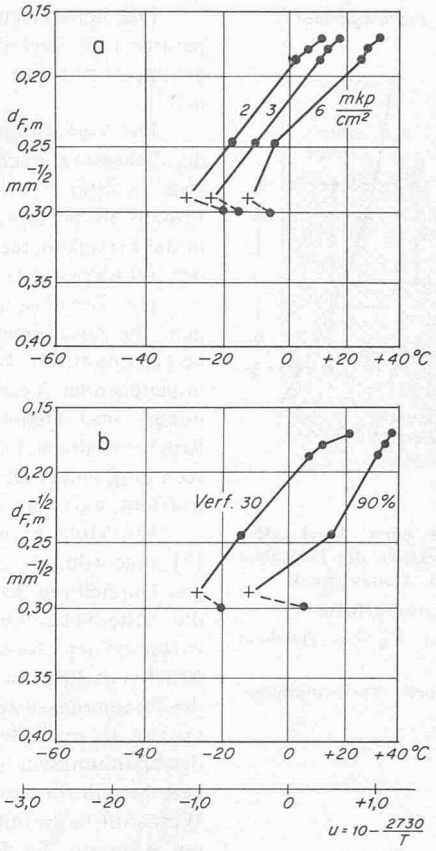


Bild 16. Zusammenhang Korngrösse – Übergangstemperatur, ermittelt an einem Feinkornbaustahl St 52

a Übergangstemperaturen $t_{ü}$ für 2, 3 und 6 mkp/cm²

b Übergangstemperaturen $t_{ü}$ für 30 und 90 % Verformungsbruchanteil

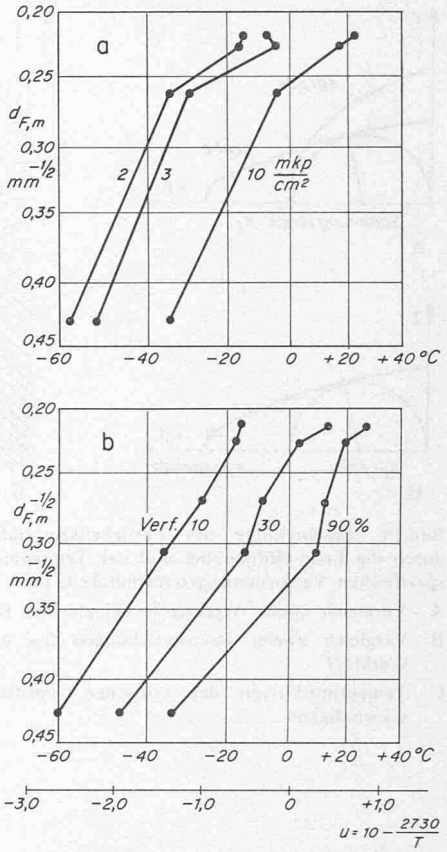


Bild 17. Zusammenhang Korngrösse – Übergangstemperatur, ermittelt an einem vergüteten Feinkornbaustahl St 65

a Übergangstemperaturen $t_{ü}$ für 2, 3 und 10 mkp cm²

b Übergangstemperaturen $t_{ü}$ für 10, 30 und 90 % Verformungsbruchanteil

steigt in dem oben beschriebenen Bereich an, gibt also qualitativ die Wirkung der Spannungsversprödung richtig wieder. Hier ist aber definitionsbedingt auch keine Unterscheidung zwischen dem Fall $\sigma_2 = \sigma_1$ bzw. $\sigma_3 = 0$ einerseits und $\sigma_2 = \sigma_3 = 0{,}5 \cdot \sigma_1$ anderseits möglich.

Einen gangbaren Weg zeigte für die Erfassung des Temperatureinflusses auf den Festigkeitszustand *A. Slattenschek* [7] durch die Auswertung von Versuchen von Goerens und Mailänder mit Ermittlung der Hüllparablen nach Leon, Bild 14. Die Verhältniszahl C_s, welche die Abhängigkeit Reissfestigkeit durch Gleitfestigkeit über der Reissfestigkeit (in Bild 14 gestrichelt) darstellt, zeigt, dass der duktilste Zustand bei 400 °C erreicht wird. Sowohl bei niedrigeren als auch bei höheren Temperaturen war der Werkstoff weniger verformbar. Es wäre zu prüfen, wieweit der spröde Bruch sich an einer scharfkantigen Diskontinuität erfassen liesse.

2.5 Über die Wirkung und die Wandelbarkeit der «inneren» Einflussgrössen

Die physikalischen und morphologischen Eigenschaften üben einen grossen Einfluss auf das Bruchverhalten aus: Der Aufbau und die Eigenschaften des Atomgitters sowie die Art und Anzahl der Gitterfehler bestimmen das Bruchverhalten. Die Abhängigkeit von der Temperatur, dem Beanspruchungszustand und der Verformungsgeschwindigkeit spiegelt die physikalischen Phänomene in diesem Bereich wider. Die Korngrenzen und deren Beschaffenheit sowie die damit verbundenen mittleren freien Ferritweglängen sowie die doppelte Rolle der Ausscheidungen, die sich in der Erhöhung der inneren Reibung bei nicht vollständiger oder sehr feiner Ausscheidung bis zur Gleitbahnbegrenzung bei gröberen Ausscheidungen zeigt, ist neben einer Vielzahl von Faktoren zu berücksichtigen.

Eigene Untersuchungen wurden zur Bestimmung des Korngrösseneinflusses durchgeführt [17]: in den Bildern 15, 16 und 17 sind die für drei Baustähle ermittelten Übergangstemperaturverschiebungen dargestellt.

An Verarbeitungseinflüssen wurde insbesondere von *A. Slattenschek* [7, 18, 19] die Auswirkung einer Überhitzung, der künstlichen Alterung, der Rekristallisation, von Eigenspannungen und der Anlassversprödung mit Ermittlung der Hüllparabelverschiebung und -formänderung dargestellt.

Unter den betrieblichen Veränderungen des Bruchverhaltens ist jene unter Korpuskularstrahlen Gegenstand vieler Untersuchungen an Reaktorbaustählen.

2.6 Zusammenwirken der Einflussgrössen auf das Bruchverhalten

Die bekannten Festigkeitshypothesen ermöglichen die quantitative Beurteilung, d.h. Berechnung des Fliess- und Bruchverhaltens mit verhältnismässig guter Näherung. Numerische Zusammenhänge werden somit für die Fliess- und Bruchgrenze in Spannungs- bzw. Dehnungsabhängigkeit gegeben.

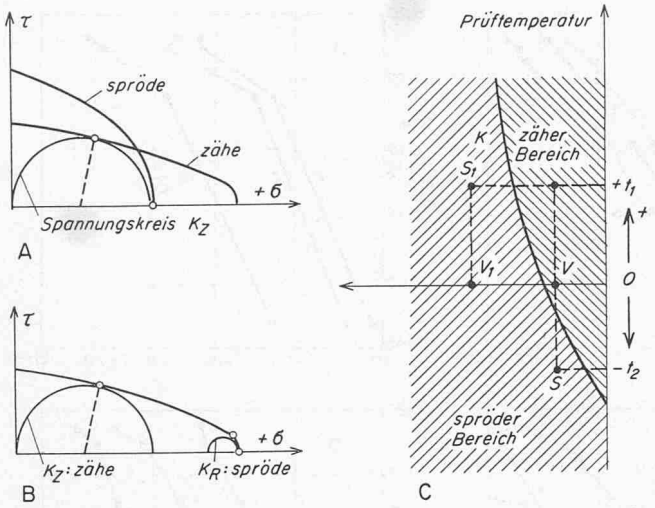


Bild 18. Beschreibung des Festigkeitszustandes eines Werkstoffes durch die Leon-Hüllparabel und der Temperaturkurve der kritischen spezifischen Verformungsgeschwindigkeit, nach *A. Slattenscheck*

A Vergleich zweier Werkstoffe bei gleicher Beanspruchung K_Z

B Vergleich zweier Beanspruchungen K_Z und K_R bei gleichem Werktoff

C Temperaturkurven der kritischen spezifischen Verformungsgeschwindigkeit

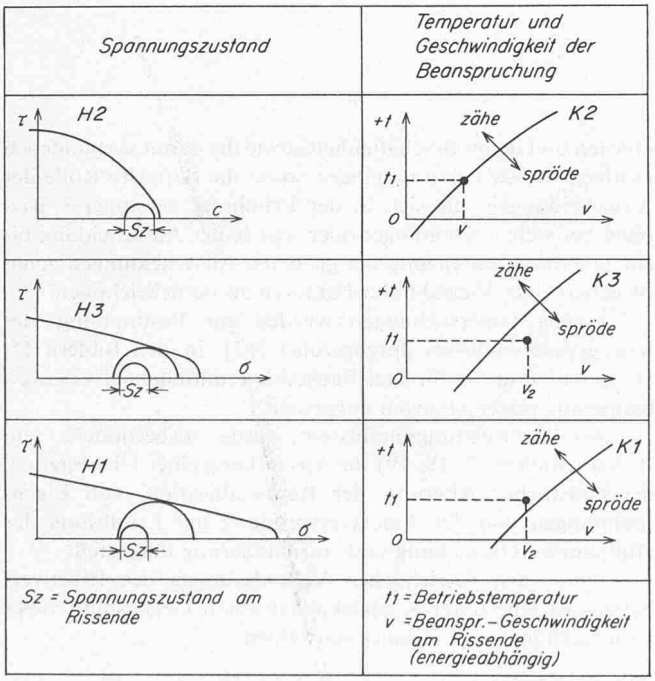


Bild 19. Bestimmung des Bruchverhaltens aus einem Spannungskriterium (Hüllparabel) und den äusseren Einflussgrössen Temperatur und Beanspruchungsgeschwindigkeit nach *A. Slattenscheck*. Im Falle eines Anrisses in einer Schweissnaht ergeben sich für die Fortpflanzung in den Grundwerkstoff folgende Möglichkeiten: Unter den Bedingungen H2 und K2 ist der Gleichgewichtszustand vorhanden. Bei H3 und K3 läuft der Riss im Grundmaterial weiter. Im Zustand H1 und K1 wird der Riss aufgefangen

Die Berücksichtigung der äusseren Einflussgrössen Temperatur und Verformungsgeschwindigkeit ist quantitativ und gekoppelt mit den Festigkeitshypothesen zurzeit nicht möglich.

Die Verformungsgeschwindigkeit, deren Bestimmung aus der Belastungsgeschwindigkeit nicht immer einfach ist, kann zwar in ihrer Auswirkung auf den spröd-zähen Übergang im Prinzip als bekannt vorausgesetzt werden, ihre Einbeziehung in die Festigkeitsrechnung ist wegen der mangelnden Kenntnis der Interdependenz mit dem Spannungszustand nicht möglich.

Die Temperatur kann den spröden Übergang kennzeichnen. Ihr Zusammenwirken mit der Verformungsgeschwindigkeit ist quantitativ bekannt bzw. kann ermittelt werden. Wegen ungenügender Kenntnis des Zusammenhanges mit den Spannungs- und Dehnungszuständen bezüglich des Fliess- und Bruchverhaltens kann sie ebenfalls nicht in die Festigkeitsrechnung eingefügt werden. Dies ist, wie schon *K. Ruehl* [12] feststellt, eines der wichtigsten Forschungsgebiete.

Die Mohr-Leonsche Hüllparabel mit der von Slattenschek [7] zugeordneten geschwindigkeits- und temperaturabhängigen Darstellung des spröd-zähen Übergangs, siehe Bild 18, ist die beste bekannte zusammenfassende Darstellung der Einwirkung der äusseren Einflussgrösse auf das Fliess- und Bruchverhalten. Sie enthält die Einflüsse folgender Parameter: des Spannungszustandes (sowohl hinsichtlich seiner absoluten Grösse als auch der relativen Verhältnisse der Komponenten des Spannungsvektors), der Temperatur und der Geschwindigkeit. Sie gilt für einen bestimmten homogenen, quasi-isotropen Werkstoff bestimmten Gefügezustandes, der seine Eigenschaften während der Beanspruchung nicht ändert. Eine direkte quantitative Verbindung der beiden Teilbilder B und C in Bild 18 ist aber bis heute nicht ermittelt worden.

Die mit Hilfe der statischen Bemessung ermittelte Vergleichsspannung und die zulässige Beanspruchung bzw. die Verhältniszahl beider definiert die Sicherheit eines Bauteiles demnach nicht ausreichend. *A. Leon* und *E. Uhlir* schlugen nach 1945 [19] eine Zweiteilung der Sicherheitsbetrachtung für Druckrohrleitungen vor:

«1. Die Bemessung der Rohrleitung erfolgt auf Grund einer statischen Berechnung, wobei alle rechnerisch erfassbaren Umstände selbstverständlich Berücksichtigung finden. Als Sicherheitsgrad dient der Quotient aus der Streckgrenze durch die rechnungsmässige Vergleichsspannung.

2. Alle Herstellungs- und Betriebseinflüsse des jeweiligen Bauwerkes, die durch die statischen Berechnungen nicht erfassbar sind, werden durch besondere Anforderungen an den Werkstoff, seine Herstellung und Weiterverarbeitung berücksichtigt.

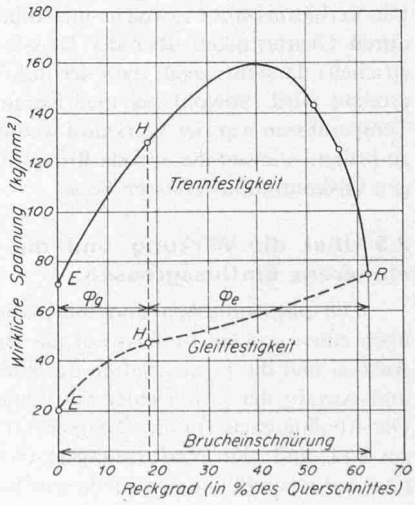


Bild 20. Änderung des Gleit- und Trennwiderstandes mit dem Reckgrad nach *W. Kuntze*. Die Kurve der Gleitfestigkeit steigt vom Punkt E über den der maximalen Last entsprechenden H bis zum Bruch bei R an (Verfestigung). Die Trennfestigkeit durchschreitet im Gegensatz dazu einen Maximalwert (Summenkurve der Verfestigung und Zerrüttung). φ_g ist die Gleichmass-, φ_e die Einschnürungsverformung

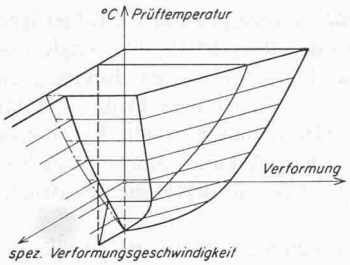


Bild 21. «Zähigkeitskörper nach *A. Slattenscheck* mit Berücksichtigung des bei Baustählen auftretenden schroffen Abfalls der Zähigkeit (Steilabfall)

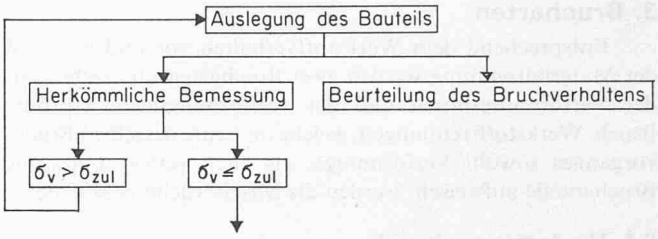


Bild 22. Prinzipschema des zweigleisigen Vorgehens gemäss der von der Festigkeitsrechnung und Bemessung unabhängigen, zusätzlichen Beurteilung des Bruchverhaltens

Die Erfüllung dieser Anforderungen wird durch Versuche mit dem Werkstoff, durch Überprüfung der Werk- und Baustellenfertigung und durch Kontrollen am fertig montierten Bauwerk laufend nachgeprüft.»

K. Wellinger und *H. Dietmann* fordern in ähnlicher Art eine «zusätzlich zur eigentlichen Festigkeitsberechnung» durchgeführte Sicherung gegen Sprödbruch [20].

Unter diesen Gesichtspunkten ist auch die in Bild 19 gegebene Darstellung für den Fall eines Anrisses zu verstehen: links die Darstellung der Spannungszustände, rechts der sprödzähe Übergang.

Interessant ist eine von Slattenschek [7] gegebene Darstellung des gemeinsamen Einflusses der Temperatur, der Verformungsgeschwindigkeit und der Verformung des Werkstoffes auf das Bruchverhalten, die ihrerseits auf der von *W. Kuntze* [21, 22] angegebenen Abhängigkeit der Gleitfestigkeit und der Trennfestigkeit von dem Reckgrad beruht, siehe Bild 20. Mit Einbezug des temperaturbedingten sprödzähen Übergangs, d.h. des Steilabfalls, erhält man die in Bild 21 gegebene Darstellung, die als eine Art «Zähigkeitskörper» im Verformungs-Temperatur-Verformungsgeschwindigkeits-Koordinatennetz aufgefasst werden kann.

2.7 Bewertung und Folgerungen

Die äusseren Einflussgrössen des Fliess- und Bruchverhaltens ferritischer Stähle, d.h. der Beanspruchungszustand, die Verformungsgeschwindigkeit und die Temperatur, können, obwohl verschiedene Zusammenhänge bekannt sind, nicht in einer gemeinsamen Einflussgrösse zusammengefasst werden. Aus diesem Grund wird ein zweigleisiges Vorgehen empfohlen, wobei für die Sicherung der Tragfähigkeit eines Bauwerkes sowohl die statische Bemessung als auch eine Beurteilung des Bruchverhaltens notwendig erscheint, vgl. Bild 22. Eine einwandfreie Lösung in diesem Sinne wäre die jeweilige Ermittlung und Anwendung der gültigen Vergleichsspannung bzw. der Hüllparabel einerseits und des Bruchverhaltens in Abhängigkeit von der Verformungsgeschwindigkeit, der Prüftemperatur und den verschiedenen Spannungszuständen anderseits. Diese Charakteristika wären für die angewendeten Werkstoffe und vorkommenden Werkstoffzustände zu ermitteln. Im Falle von wesentlichen Eigenschaftsänderungen während der Beanspruchung müsste diesen ebenfalls Rechnung getragen werden.

In der Anwendung beschränkt man sich derzeit auf die systematische Anwendung der statischen Bemessung: Die Beurteilung des Bruchverhaltens ist, wie schon einleitend angeführt, einer Vielzahl von Prüf- und Bewertungsverfahren ausgeliefert, deren Aussagefähigkeit sehr unterschiedlich ist.

Literaturverzeichnis

[1] *C.F. Kollbrunner* und *M. Meister:* Anstrengungshypothesen. Zürich–Leipzig 1944, Gebr. Leemann.

H. Dietmann: Spannungszustand und Festigkeitsverhalten. Stuttgart, Techn. Wiss. Ber. der staatlichen Materialprüfungsanstalt (1968), Nr. 68–04.

K. Wellinger und *H. Dietmann:* Festigkeitsberechnung. Grundlagen und technische Anwendung. Stuttgart 1969, Alfred Kröner Verlag, zweite Auflage.

[2] *M. Roš* und *A. Eichinger:* Die Bruchgefahr fester Körper bei ruhender Beanspruchung. Diskussionsber. Nr. 172 der Eidg. Materialprüfungsanstalt Zürich. Zürich 1949.

[3] Criteria of Section III of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code for Nuclear Vessels. New York 1964, ASME.

[4] *A. Leon:* Über die Verbindung von Trenn- und Schubbruch. Vierter Internat. Kongress für angew. Mechanik. Cambridge 1934.

A. Leon und *A. Slattenschek:* Festigkeitsversuche und deren Auswertung mittels der Mohrschen Theorie mit der Hüllparabel. «Giess.» *21* (1934) S. 542/548.

[5] *Th. Kármán:* Festigkeitsversuche unter allseitigem Druck. «Z. VDI» (1911) S. 1749/1757. VDI-Forsch.-Heft Nr. 118 (1912) S. 37/68.

[6] *W. Kuntze:* Kohäsionsfestigkeit. Berlin 1932. Mitt. Dtsch. Mat. Prüf. Anst. Sonderheft 20 (1932).

[7] *A. Slattenschek:* Grundsätzliches zur Theorie des Sprödbruches, «Radex Rundschau» 1953. Heft 4/5 S. 186/199.

[8] *P. Ludwik:* Bestimmung der Reissfestigkeit aus der gleichmässigen Dehnung. «Z. f. Metallkunde» 1926, Septemberheft.

[9] *M. Roš* und *A. Eichinger:* Versuche zur Klärung der Bruchgefahr. EMPA Zürich, 1926.

[10] *R. v. Mises:* Die Mechanik der festen Körper in plastisch deformablem Zustand. Nachr. Ges. Wiss. Göttingen 1913 S. 582/592.

H. Hencky: Ermüdung, Bruch und Plastizität. «Der Stahlbau» 1943, S. 95.

[11] *H. Schnadt:* A new Approach to the Solution of brittle Fracture Problems in modern Steel Construction. Zürich–Oerlikon, 1962, Selbstverlag, Paper Nr. 33.

[12] *K. Rühl:* Die Sprödbruchsicherheit von Stahlkonstruktionen. Düsseldorf 1959, Werner Verlag.

[13] *C.W. Mc Gregor* and *N. Grossman:* Dimensional Effects in Fracture. «Welding J.» *31* (1952) W.R.C. S. 20/26.

[14] *A.W. Magnussen* and *W.M. Baldwin:* Low Temperature Brittleness. «J. of the Mech. and Phys. of Solids» *5* (1957) H. 3, S. 172/181.

[15] *A. Kochendörfer:* Physikalische Probleme des spröden Bruchs von Metallen. «Zf. f. angew. Phys.» *14* (1962) H. 3, S. 129/138.

[16] *A. Kochendörfer* und *H. Scholl:* Die Sprödbruchneigung von Stählen in Abhängigkeit von Spannungszustand und Temperatur. «Stahl u. Eisen» *77* (1957), H. 15, S. 1006/18.

[17] *T. Varga* und *B. Marincek:* Über die Wirkung der Korngrösse von Stahl auf die Übergangstemperatur der Kerbschlagzähigkeit. «Arch. f. Eisenhüttenwes.» *38* (1967) H. 2, S. 129/134.

[18] *A. Slattenschek:* Eigenschaften der Stähle im Druckrohrleitungs- und Stahlwasserbau sowie deren Abnahmebedingungen. «Stahlbau-Rundschau», Sonderheft. Stahlbautagung 1955, S. 137/150.

[19] *A. Leon:* Lichtbogengeschweisste Druckrohrleitungen für Wasserkraftanlagen. «Österr. Maschinenmarkt und Elektrowirtschaft» *6* (1951), H. 8.

E. Uhlir: Kritische Betrachtung der Abnahmebedingungen für lichtbogengeschweisste Druckrohrleitungen. «Maschinenbau u. Wärmewirtschaft» *7* (1952), S. 165–186.

[20] *K. Wellinger* und *H. Dietmann:* Festigkeitsberechnung. 2. Auflage Stuttgart 1969, Kröner S. 77 unten.

[21] *W. Kuntze:* Festigkeitstheoretische Untersuchungen. Handbuch d. Werkstoffprüfung, II. Bd., herausgegeben von E. Siebel. Berlin 1939, Springer, S. 708/29.

[22] *W. Kuntze:* Mechanische Eigenschaften metallischer Systeme. Handbuch d. Metallphysik, I. Band, 2. Teil, herausgegeben v. G. Masing, Leipzig 1940, Akad. Verlagsges. Becker u. Erber, S. 208/329.

3. Brucharten

Entsprechend dem Werkstoffverhalten vor und während der Materialtrennung werden zwei Brucharten unterschieden: der Verformungsbruch und der verformungsarme (spröde) Bruch. Werkstofftrennungen, welche im Laufe desselben Bruchvorganges sowohl Verformungs- als auch verformungsarme Bruchanteile aufweisen, werden als Mischbrüche bezeichnet.

3.1 Verformungsbruch

Ein vollkommen plastisches Verhalten, das heisst Gleitverformungen bis zur Trennung, zeigen ferritische Stähle nicht unter allen Beanspruchungen. Im Hinblick auf die Gebrauchseigenschaften können ferritische Stähle weitgehend als zähe betrachtet werden, falls die Werkstofftrennung selbst bei Vorhandensein von scharfkantigen Diskontinuitäten mit einer überwiegend plastischen Trennung (Schub- bzw. Grübchenbruch) bei Überschreiten einer auf den Nennquerschnitt gerechneten Spannung erfolgt, welche über der einachsigen Streckgrenze liegt. Diese Bedingung kann zumeist schon im Mischbruchbereich erfüllt werden.

Diskontinuitäten kommen bei Verformungsbrüchen nur im Masse der Verminderung des tragenden Querschnitts zur Auswirkung. Ausgeschmiedete Einschlüsse, welche zum Beispiel sehr hohe Spannungskonzentrationen ergeben können, bewirken in solchen Fällen durch die Spannungsversprödung eine Erhöhung der Fliessgrenze und der Zugfestigkeit, wozu sich die Kaltverfestigung noch hinzugesellt. Somit kann die Querschnittsverminderung teilweise oder ganz kompensiert werden; dies war der Fall bei dem in Bild 23 dargestellten Zugstab, der eine für Versuche aus der Blockmitte verschmiedeten Platte in Dickenrichtung entnommen wurde. Die Eigenschaften des Stahles sind in Tabelle 2 angeführt.

Wie an der Bruchfläche in Bild 24 ersichtlich, ist eine wesentliche Schwächung des Querschnitts aufgetreten. Die auf den Nennquerschnitt bezogene Zugfestigkeit erreicht fast jene eines fehlerfreien Prüflings aus derselben Platte. Die Zugfestigkeiten liegen also in den mit Diskontinuitäten durchsetzten Proben nur wenig tiefer. In Bild 25 ist eine Diskontinuität vergrössert dargestellt; sie ist scharfkantig. Solche Fehlstellen bewirken demnach im zähen Bereich kaum eine Festigkeitsverminderung, sondern eine Einbusse in der Höhe der Bruchdehnung und Einschnürung.

Zur Kennzeichnung des zähen Verhaltens eines Werkstoffes bei bestimmter Geometrie, Beanspruchung und Verformungsgeschwindigkeit genügt eine untere Temperaturgrenze.

Das klassische Beispiel des Verformungsbruches ist der Schubbruch. Die Ebene der Abgleitung ist unter rund 45° zur Hauptnormalspannung geneigt. Die Oberfläche ist glatt, grau und weist einen matten Glanz auf.

Grossflächige Schubbrüche können in Oberflächennähe beobachtet werden. Gegen Blech- oder Probenmitte ist eine zur Hauptnormalspannung rechtwinklige rauhe, stumpfgraue Bruchfläche zu beobachten. Fraktographische Untersuchungen zeigen, dass eine faserige, mit Grübchen durchsetzte Bruchfläche vorliegt. Durch die nach kristallographischen Ebenen erfolgte Trennung von einzelnen zur Hauptnormalspannung ungünstig orientierten Kristalliten sowie durch die Ablösung der Matrix von Einschlüssen wird der spätere Bruchquerschnitt schon nach verhältnismässig geringer Verformung mit Diskontinuitäten durchsetzt. Die dazwischen liegenden Stege werden stark gedehnt und weisen Schubbrüche in verschiedenen Ebenen auf, die oft auf kleine kristalline Bereiche beschränkt sind. Bei starker Dehnung sind häufig Rotationen zu beobachten.

In Blechen werden Einschlüsse gewöhnlich flächig ausgewalzt; bei zur Walzrichtung paralleler Zugbeanspruchung verhält sich die so längs geteilte Matrix wie aus einzelnen Bändern zusammengesetzt. Da der Querkontraktion nichts im Wege

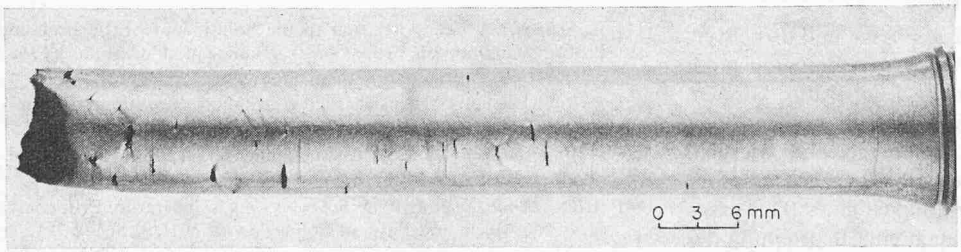


Bild 23. Hälfte eines Zugstabes, welcher einem Dickblech von 100 mm Dicke senkrecht zur Oberfläche entnommen wurde, vgl. Tabelle 2

Bild 24. Bruchfläche aus dem gleichen Blech. Die Diskontinuitäten sind als helle ovale Flächen erkennbar

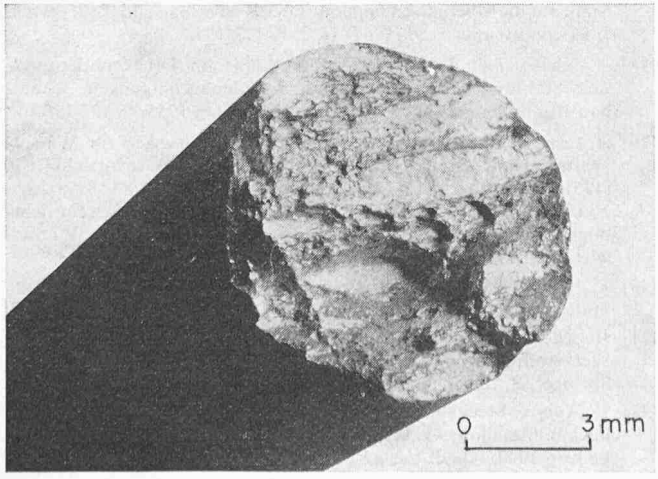
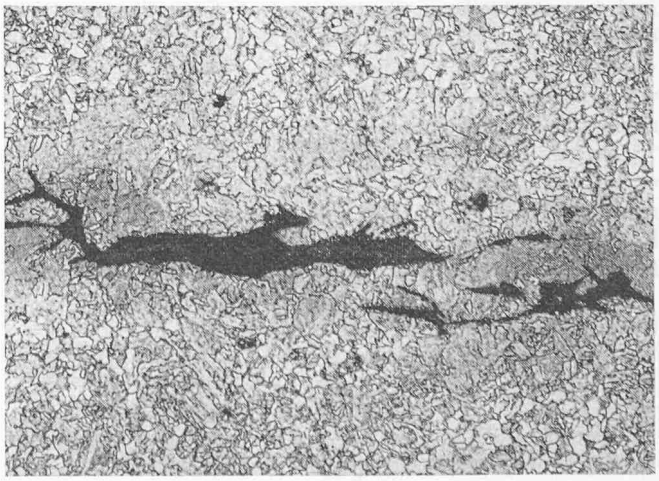


Bild 25. Schliffbild einer Diskontinuität. Vergrösserung hundertfach



Zugversuch					Kerbschlagprüfung Ch–V	
Proben	σ_S	σ_B	ψ	δ_5	Proben b.–12 °C	a_k
	kp/mm²	kp/mm²	%	%		mkp/cm²
Abschnitt A						
1	48,3	60,6	17	10,0	1	4,1
2	46,1	51,1	17	5,4	2	3,3
3	48,3	59,5	15	8,6	3	1,3
1		64,8			1	11,3
					2	6,9
					3	14,0
Abschnitt B						
1		63,7	71,9	29,4		
2		64,6	71,1	28,4		

Tabelle 2. Mechanische Eigenschaften im Dickblech A 508

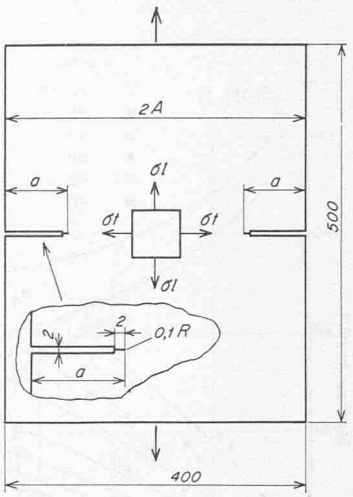


Bild 26. Grossprobe nach Kihara u. a. zur Prüfung des Bruchverhaltens von Blechen bei statischer Belastung

steht, können in solchen Fällen sehr grosse Dehnungswerte bzw. ausgezeichnete Kerbschlagzähigkeiten erreicht werden. Ist die Beanspruchungsrichtung hingegen senkrecht zur Oberfläche, so sind die Dehnungs- und die Kerbschlagzähigkeitswerte in Dickenrichtung sehr niedrig, da sowohl die Verminderung des tragenden Querschnitts als auch die Spannungsversprödung in dieser Richtung wirken, siehe Tabelle 2.

3.2 Verformungsarmer (spröder) Bruch

Bei verformungsarmen Brüchen erfolgt die Trennung nach kristallographischen Ebenen. Ist die mittlere scheinbare Korngrösse, welche dem mittleren Korndurchmesser an der Bruchfläche entspricht, wesentlich grösser als die zur Beobachtung verwendete Lichtwellenlänge, so wird eine Reflexion erfolgen. Die Bruchfläche glitzert durch die Spiegelungen an den kristallinen Trennflächen. Bei kleinerem Korndurchmesser kann die Bruchfläche durch das Abdruckverfahren elektronenoptisch oder im Raster-Elektronenmikroskop räumlich betrachtet werden.

Bei bis zum Bruch vollkommen elastischem Verhalten wird mit der Abwesenheit von Diskontinuitäten bzw. bei homogener Beanspruchung das Verhältnis Beanspruchung zu Reissfestigkeit bruchbestimmend. Sind Spannungskonzentrationen vorhanden, so tritt örtlich Bruch ein, falls diese die Reissfestigkeit σ_R überschreiten.

Diese wird definiert mit

$$\sigma_R = \sigma_u = \frac{P_u}{A_u}, \tag{8}$$

worin σ_R, die Reissfestigkeit, gleich der Spannung σ_u ist. Der Index u steht für «ultima».

Ob der Bruch sich fortpflanzt, hängt vom Energie- bzw. Spannungsverlauf über der Risslänge ab. Wird die Reissfestigkeit unterschritten, was zum Beispiel durch eine örtliche Entlastung erfolgen kann, so wird der Riss aufgefangen.

In Bauteilen bedeutet ein verformungsarmes Verhalten die Gefahr des spröden Bruches unterhalb der auf den Nennquerschnitt berechneten zulässigen Spannung. Der tragende Querschnitt, welcher die Differenz zwischen dem Nennquerschnitt und der Querschnittsverminderung durch Diskontinuitäten darstellt, wird gewöhnlich nur bei konstruktiven Diskontinuitäten berücksichtigt. Bei Werkstoffehlern ist es üblich, die sowieso kaum vorauszusehenden Fehler in dieser Betrachtung zu vernachlässigen. Damit ergibt sich die effektive Beanspruchung erstens wegen der Querschnittsabnahme und zweitens wegen der Spannungskonzentrationen höher als die berechnete.

3.3 Mischbruch

Ein Grossteil der Brüche ist weder der einen noch der anderen Bruchart ausschliesslich zuzuordnen. Viele als Verformungsbruch beginnende Werkstofftrennungen schlagen mit zunehmender Fortpflanzungsgeschwindigkeit sowie Spannungsversprödung in verformungsarme Brüche um. Umgekehrt kann gewöhnlich ein laufender spröder Riss in demselben Werkstoff ohne Änderung der Spannungsversprödung und -höhe nicht aufgefangen werden. Häufig zeigen oberflächennahe Bereiche einen Verformungsbruch, während in Werkstoffmitte sich ein verformungsarmer Bruch ergibt.

Ein typisches Merkmal dieses Übergangsverhaltens ist im Mischbruch zu erkennen, der spröde und zähe getrennte Bereiche an der gleichen Bruchfläche aufweist. Das Bruchaussehen kann entsprechend von matt bis zum kristallin glitzernden variieren.

Selbst glitzernde kristalline Bruchflächen können vor der Trennung eine beträchtliche plastische Verformung bis zu einigen Prozent Dehnung hinter sich haben [23], was ein vorgehendes Fliessen des Gesamtquerschnitts anzeigt. Diesem Bruchverhalten ist der Begriff des Trennbruchs wohl am

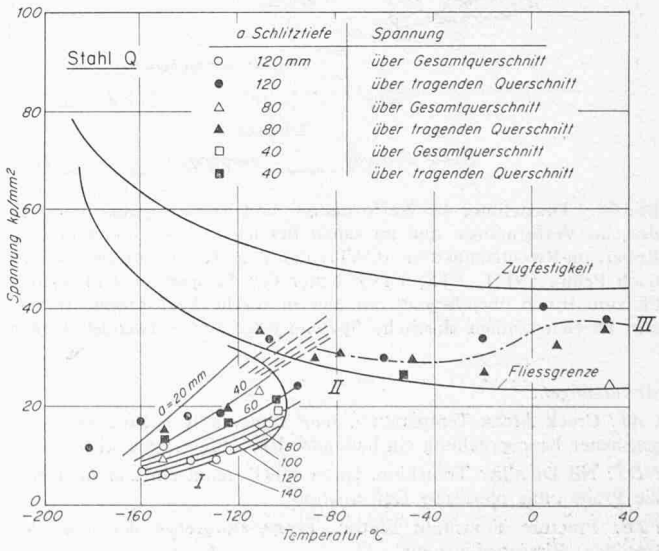


Bild 27. Quantitative Darstellung des Bruchverhaltens von Grossproben gemäss Bild 26 bei verschiedenen Schlitztiefen in Abhängigkeit der Temperatur, Stahl Q

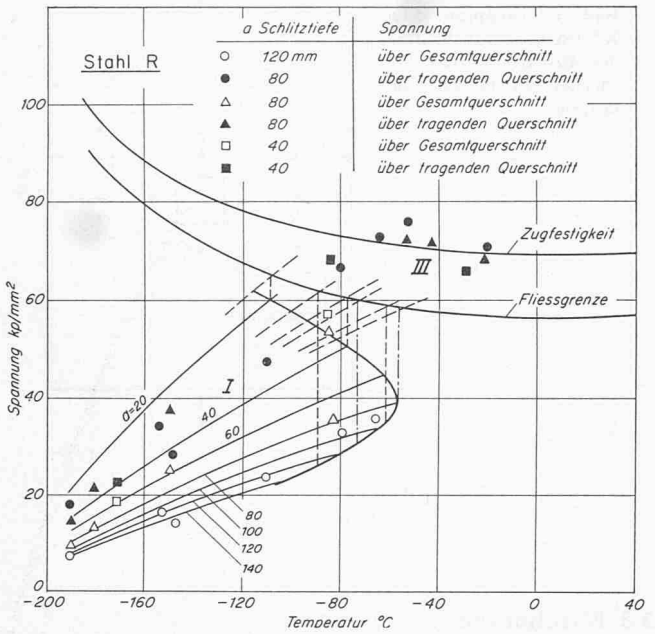


Bild 28. Quantitative Darstellung des Bruchverhaltens von Grossproben gemäss Bild 26 bei verschiedenen Schlitztiefen in Abhängigkeit der Temperatur, Stahl R

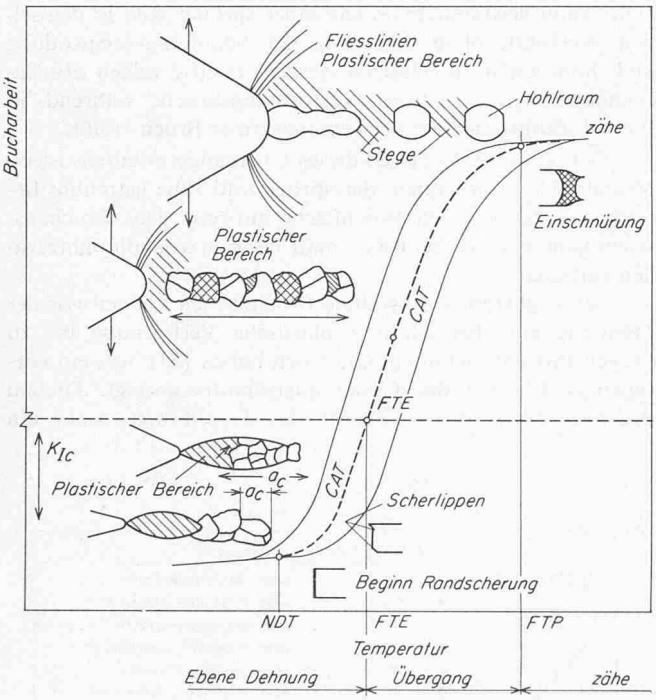


Bild 29. Darstellung der Verformungs- und Trennvorgänge im spröden, im Verformungs- und im zähen Bereich in Verbindung mit der Robertson-Rissauffangkurve (CAT) und den Temperaturgrenzwerten nach Pellini (NDT, FTE, FTP). Unter der Temperatur FTE erfolgt bis zum Bruch überwiegend nur eine elastische Verformung. In diesem Bereich können elastische Spannungskriterien verwendet werden

Abkürzungen:

CAT: Crack Arrest Temperature. Jene Temperatur, bei welcher unter gegebener Beanspruchung ein laufender Riss aufgefangen wird

NDT: Nil Ductility Transition. Unter NDT trennt ein laufender Riss die Probe ohne plastische Deformation

FTE: Fracture Transition Elastic. Temperaturgrenze der instabilen (spröden) Rissfortpflanzung

FTP: Fracture Transition Plastic. Oberhalb der so bezeichneten Temperatur zeigt die ganze Bruchfläche plastische Verformung (vollzäher Bruch)

besten zuzuordnen, zumal die auf die Hauptnormalspannung senkrechte Bruchfläche der klassischen Definition entspricht.

Charakteristisch für den Übergangsbereich kann für die technische Anwendung das Auftreten des Bruches bei einer auf den tragenden Querschnitt berechneten Spannung bezeichnet werden, welche an oder über der einachsigen Fliessgrenze liegt. Durch die beschränkte plastische Verformung sind hingegen dem Abbau von örtlichen Spannungskonzentrationen Grenzen gesetzt.

Besonders anschaulich können die drei Bruchbereiche nach den Versuchen von *H. Kihara* und Mitarbeitern [24, 25] dargestellt werden. Das Verhalten von Stählen unter Einwirkung von den Querschnitten stark schwächenden Diskontinuitäten wurde dabei ausgehend von Versuchen von *D. K. Felbeck* und *E. Orowan* [26] eingehend untersucht.

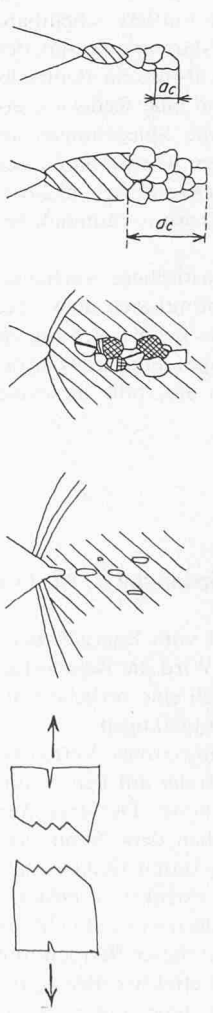
Blechproben der Abmessung 400 × 500 mm, siehe Bild 26, wurden bei verschiedenen Temperaturen statischem Zug unterworfen. Die Beanspruchung erfolgte parallel zur längeren Kante, so dass die seitlichen Schlitze dazu rechtwinklig lagen.

Neben der Fliessgrenze und der Zugfestigkeit sind für die Schlitztiefen von 40, 80 und 120 mm die Bruchpunkte in doppelter Auftragung in Bild 27 gegeben. Die leeren Zeichen geben Punkte der modifizierten mittleren Bruchspannung σ'_m (modified gross stress) an, welche berechnet wird gemäss

(9) $\sigma'_m = \sigma_m \gamma$

worin

(10) $\gamma = f\left(\frac{a}{A}\right)$



Plastischer Bereich entspricht einigen Gefügekörnern
Kritische Grösse der wirksamen Diskontinuität in der Grössenordnung der freien Gleitbahnlänge

Plastischer Bereich erfasst eine Vielzahl der Körner
Kritische Grösse der wirksamen Diskontinuität > Korngrösse

Beidseits vom Kerb laufen Verformungsbahnen aus; im plastischen Bereich sind
Gleitungen:
dünne, gekreuzte Striche in den Körnern
Spaltungen:
dicke Striche in den Körnern und *stark verformte* Bereiche dicht schraffiert

Ausgehend von Spaltungen, Abgleitungen und Einschlüssen bilden sich Hohlräume. Die Trennung erfolgt mit dem Durchreissen der Stege, sobald deren Verformungsvermögen erschöpft ist

Bei Anwachsen der plastischen Zone erscheint eine unter rund 45 ° geneigte Scherlippe an der Bruchfläche

Bei zähem Verhalten erfolgt die Werkstofftrennung nach bedeutender Verformung, für welche die Bruchdehnung und eventuelle Einschnürung als Mass dienen

Bild 30. Pellini-Diagramm

eine Funktion der halben Probenbreite A und der Schlitztiefe a und σ_m die über den Gesamtquerschnitt (400 mm mal Blechdicke) gerechnete mittlere Spannung ist.

Als Nennspannung (net stress) wird die auf den tragenden Querschnitt berechnete Spannung bezeichnet.

An einem mit Q bezeichneten, halbberuhigten, unlegierten, schweissbaren Baustahl von 25 mm Dicke, der eine Fliessgrenze von 27 und eine Zugfestigkeit von 45 kp/mm² aufwies, bewirkten die Schlitze bis zu etwa —95° herunter keine Brüche unterhalb der auf den Gesamtquerschnitt berechneten Fliessgrenze, siehe Bild 27.

Ein höherfester Stahl der Bezeichnung R, ebenfalls 25 mm dick, mit einer Fliessgrenze von 65 kp/mm², vergütet, zeigt eine höhere Temperatur, bei welcher Risse unterhalb der Streckgrenze zum Versagen führen, vgl. Bild 28. Die Temperaturgrenze liegt unterhalb von —50 °C, also für die meisten Anwendungen verhältnismässig tief. Bei einer Schlitztiefe von 20 mm, die in Europa in keiner Maschinenbaukonstruktion geduldet würde, liegt die Versprödungstemperatur unter —100 °C.

Die mit I bezeichneten verformungsarmen Bruchbereiche in den Diagrammen enthalten Brüche, welche vor dem Fliessen des gesamten Querschnitts (general yield) eintreten.

Im Bereich II erfolgt die Materialtrennung nach dem Fliessen des gesamten Querschnitts: Es liegt ein Trenn- bzw. Mischbruch vor. Dieser Bereich des Übergangs ist beim vergüteten Stahl R fast verschwunden.

Im Bereich III erfolgt die Trennung nach grosser plastischer Verformung überwiegend als Schubbruch. Hier verursachen selbst hohe Spannungskonzentrationen, das heisst grosse Diskontinuitäten, bis zu ziemlich tiefen Temperaturen keine Minderung der Tragfähigkeit; ausgenommen sind bedeutende zusätzliche Eigenspannungen und örtliche Werkstoffschädigungen. Zu beachten ist die geringe Wanddicke der in den Bildern 27 und 28 dargestellten Proben. Mit grösserer Blechdicke dürfte die Spannungsgrenze eher unter die einachsige Fliessgrenze fallen bzw. die Übergangstemperatur ansteigen.

Das Tragfähigkeits- und Bruchverhalten kann im Bereich II mit einer Grenznormalspannung bei einer bestimmten Temperatur beschrieben werden. Änderungen der Werkstoffeigenschaften durch die Verformung sowie des Ausgangsspannungszustandes werden in diesen Proben ähnlich wie im Bauteil auftreten, vorausgesetzt, dass die Schlitzgeometrie, die Verformungsgeschwindigkeit und die Wanddicke gleich sind. Weiterhin muss die Homogenität des Werkstoffes und die Konstanz der Temperatur während der Belastung vorausgesetzt werden.

3.4 Bruchvorgänge im Kristallhaufwerk

Nachfolgend sollen zu den Beschreibungen der Brucharten noch einige Erläuterungen hinzugefügt werden. In Bild 29 ist der spröd-zähe Überganng von Baustählen dargestellt. Die Bruchvorgänge sind nach Pellini angedeutet; eine kurze Erläuterung ist in Bild 30 gegeben.

Verformungsbrüche können nicht nur als Schub- und Scherbrüche auftreten. Durch die Bildung und das Wachsen von Hohlräumen und deren Vereinigung, das heisst das Abreissen der noch bestehenden Stege, können solche Brüche ebenfalls entstehen. Dieser letztere Mechanismus, der schematisch in Bild 30 unten dargestellt ist, ist einer rechnerischen Behandlung nun zugänglich. Eine an Zugproben bestätigte quantitative Behandlung, beruhend auf den Volumenanteil der Hohlräume bzw. Einschlüsse, gibt A. Kochendörfer in [27] an. Für bruchmechanische Betrachtungen vgl. Abschnitt 5.2.2.

Im Verformungsbereich werden scharfkantige Fehler ausgerundet, vor dem Reissen innerhalb der Gleitlinien ein verhältnismässig grosses Volumen plastisch verformt, während an der Bruchfläche ähnlich der wirklichen Dehnung im statischen Zugversuch Verformungen in der Grössenordnung von 100 % durchaus möglich sind.

Mit sinkender Temperatur oder zunehmender Spannungsversprödung nimmt an der Kante der Diskontinuität das plastisch verformte Volumen sowie das Mass der Verformung ab. Im Übergangsbereich werden Körner in relativ grossem Abstand vor der Diskontinuität je nach ihrer Orientierung zur Beanspruchung einen Trenn- oder einen Schubbruch aufweisen [23]. Häufig treten auch Mehrfachschiebungen in verschiedenen Gitterebenen auf.

Zur Kennzeichnung des Bruchverhaltens kann ein Verformungs-, ein Spannungs- bzw. ein Energie-Kriterium mit der zugehörigen Temperatur herangezogen werden.

Die Ausbildung der Gleitungen und plastischen Zonen unter Kerben wurde insbesondere von *F. A. McClintock* [28] untersucht.

Ein Energiekriterium für den Verformungsbruch wurde in der Form der volumenbezogenen Brucharbeit von *L. Gillemot* und *G. Sinay* angegeben [29].

Bei weiterer Senkung der Temperatur nimmt der plastisch verformte Bereich ab. Bei verformungsarmen Brüchen, Fall der ebenen Dehnung, unterscheiden wir zwei Fälle: Geht der Trennung eine mindestens einige Prozent betragende plastische Verformung in den einzelnen Körnern voran, so erhalten wir den Trennbruch; erfolgt hingegen die Trennung ausser im kleinen plastischen Bereich an der Kante der Diskontinuität im weiteren nahezu verformungslos, so liegt der eigentliche verformungsarme (spröde) Bruch vor, siehe auch die Skizzen in Bild 30 oben. Als ein Mass für die Verformung kann das Verhältnis des verformten Bereiches zu der Korngrösse dienen.

4. Denkmodelle zur Beurteilung der statischen Tragfähigkeit

Neben einer korrekt durchgeführten herkömmlichen Bemessung ist die Beurteilung des Bruchverhaltens – zumeist aufgrund von Sprödbruchprüfungen – notwendig.

Eine Vielzahl dieser Prüfungen hat den Nachweis einer genügenden Zähigkeit zum Ziel, welche durch die spezifische Brucharbeit (zum Beispiel Kerbschlagzähigkeit) ausgedrückt wird.

Andere Prüfungen sind auf minimale Verformungswerte (C.O.D.-Prüfungen) oder die Art des Bruches (Pellini-Prüfung) ausgerichtet. Alle an ferritischen Baustählen ermittelten Werte sind im Übergang temperaturabhängig, oft wird daher bei Festhalten eines konstanten Verformungsminimums oder der Bruchart die Temperatur als Kriterium angegeben.

Werden die gewählten Prüfungen den Verhältnissen im Bauteil nicht gerecht, so kann dies zu Fehlinterpretationen und katastrophalen Schadenfällen führen, so zum Beispiel bei Anwendung rund gekerbter Kerbschlagproben für Schweisskonstruktionen.

Ist mit Erhöhung der Temperatur keine wesentliche Zunahme der Verformbarkeit verbunden, sei es wegen der Beschaffenheit des Werkstoffes an sich oder wegen starker Verformungsbehinderung, so kann das Temperaturkriterium nicht angewendet werden. Dies gilt auch für Werkstoffe, die im Bereich der temperaturbedingten Versprödung beansprucht werden.

Die in diesen Fällen notwendige Bewertung der Bruchwirksamkeit von Spannungskonzentrationen kann mit Hilfe von Spannungskriterien durchgeführt werden. Ein Verfahren hierzu bietet die linear elastische Bruchmechanik.

Die zwei Beurteilungsverfahren gemäss den Temperatur- bzw. den Spannungskriterien sind gegeneinander schwer abgrenzbar. Bedauerlicherweise sind die meisten Fachexperten

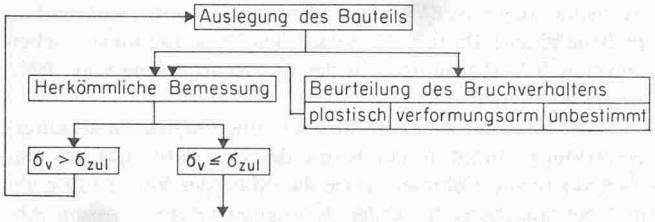


Bild 31. Ablaufschema gemäss dem Denkmodell bei hinreichend plastischem Verhalten mit Rückführung zum herkömmlichen Bemessungsgang

derzeit noch entweder auf die eine oder die andere Beurteilungsart eingeschworen.

Die Anhänger beider Richtungen versuchen mit wenigen Ausnahmen das gesamte Gebiet der Bruchphänomene zu erfassen, welches Unterfangen beim heutigen Stand des Wissens a priori zum Scheitern verurteilt ist. Erschwert wird die Lage dadurch, dass Metallurgen und Chemikern die Bruchmechanik, Ingenieuren hingegen Gefüge-, Temperatur- und Geschwindigkeitseinflüsse zumeist fremd sind. Einige Spezialisten der Fraktographie bzw. Mikrofraktographie sehen wiederum nur die Bedeutung der Trennmechanismen im Gefüge.

Der heutige Zustand ist gekennzeichnet durch hinreichend gesichert erscheinende Beurteilungsverfahren für bestimmte Bereiche, so zum Beispiel jener der Temperaturkriterien für Bauteile bis zu mittleren Wanddicken (50 bis 70 mm) oder der Spannungskriterien bei nahezu elastischem Verhalten bis zum Bruch. Eine Übersicht bzw. eine systematische Erfassung der Prüftechnik und Bewertung aller Bereiche des Bruchverhaltens der Bauteile vom spröden bis zum Verformungsbruch hingegen ist nicht bekannt.

Über Einzelprobleme wurde in den letzten Jahren eine sehr grosse Anzahl von Aufsätzen veröffentlicht. Unter Inkaufnahme mehr oder weniger willkürlicher Vereinfachungen der grundlegenden Gesetzmässigkeiten und der Vernachlässigung verschiedener Einflussgrössen wurden wissenschaftliche Arbeiten vorgelegt, welche oft durch eine brillante Handhabung des herkömmlichen Instrumentariums der Mechanik, der Mathematik, aber auch der Thermodynamik oder der Metallkunde bestechen. Leider sind diese häufig nicht einmal für die Ausweitung der Kenntnisse im anvisierten Bereich geeignet, da wegen des mangelnden Verständnisses der Zusammenhänge die Weichen von Anfang an falsch gestellt wurden. Andere wertvolle Arbeiten können nur mangelhaft in das Mosaik der Einzeluntersuchungen eingefügt werden, da nur unvollständige

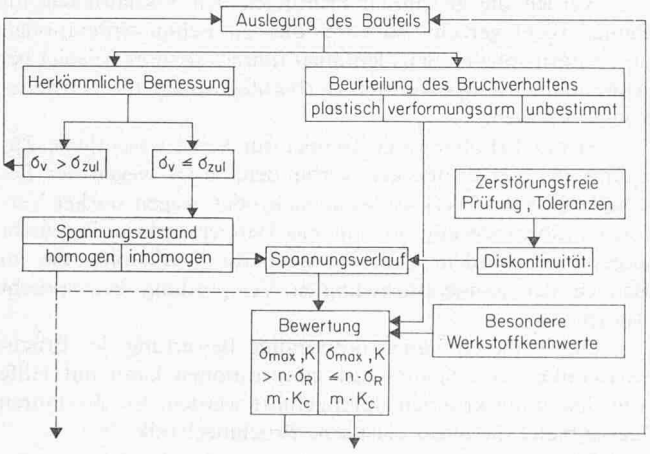


Bild 32. Ablaufschema gemäss dem Denkmodell bei verformungsarmem Verhalten mit einer zur herkömmlichen Bemessung parallelen Bewertung des Bruchverhaltens

Angaben betreffend die Versuchsbedingungen oder den Werkstoff mitgeteilt werden. Hierzu ein einschlägiges Zitat von *F. A. McClintock:*

«The scientist, besides choosing problems for the fun of it, wants to observe phenomena and establish a relatively simple set of interrelationships between phenomena. Considering the variety of materials and modes of fracture, he has a wide choice. Since his choice is so much a matter of taste, we shall consider only his role as the describer of phenomena...» [30].

Es wird daher nachfolgend der Versuch unternommen, Vorgehen zur Beurteilung der verschiedenen Brucharten an Bauteilen zu skizzieren. Die Denkmodelle werden kurz erläutert und wesentliche Entscheidungswege schematisch dargestellt.

Zur Anwendung der Denkmodelle ist eine Einordnung der Prüfverfahren in ein System notwendig. Dieses folgt im Kapitel 5.

4.1 Plastisches Verhalten

Die Bemessung von Bauteilen nach den Festigkeitshypothesen ohne spezielle Prüfung des Bruchverhaltens ist zulässig, falls eine genügende Verformbarkeit des Werkstoffes oder (als gleichwertige Bedingung) eine hinreichende Homogenität des Beanspruchungszustandes gewährleistet ist.

Das Kriterium der genügenden Verformbarkeit ist erfüllt, falls an den ungünstigsten Diskontinuitäten und damit Spannungskonzentrationen noch ein genügender Abbau der Spannungsspitzen durch plastische Verformung erfolgt. Diese werden damit auf die örtlich gültige Fliessgrenze reduziert.

Eine hinreichende Homogenität des Beanspruchungszustandes kann mit dem Nichterreichen der Fliessgrenze oder der Reissfestigkeit an den Spannungskonzentrationsstellen angenommen werden.

Obige Feststellungen bedingen kein quantitatives Kriterium einer notwendigen minimalen Verformung. Dementsprechend entfallen auch quantitative Zähigkeitskriterien. Als Limite ist lediglich jene Temperatur zu setzen, bis zu welcher herunter die genügende Verformbarkeit gewährleistet erscheint. Zur Feststellung dieses Temperaturkriteriums, welches vom Werkstoff, vom Beanspruchungszustand und von der Verformungsgeschwindigkeit abhängt, sind besondere Prüfungen, welche in Kapitel 5 beschrieben werden, notwendig.

Temperaturkriterien

Falls die ermittelte Temperaturgrenze tiefer als die tiefste Temperatur im belasteten Bauteil liegt, so genügen wiederum die aus den Festigkeitshypothesen abgeleiteten Bemessungsverfahren. Dieser Gedankengang kann auch im Falle einer mehrstufigen Prüfung zur Ermittlung der Temperaturgrenze angewendet werden und wird im folgenden als *«Rückführung»* bezeichnet. Der entsprechende Ablauf bei der Bemessung und Beurteilung des Bruchverhaltens an einem Bauteil ist in Bild 31 dargestellt.

Zur Feststellung der unteren Temperaturgrenze des plastischen Bereiches eines Werkstoffes werden verschiedene Prüfungsarten eingesetzt. Grundsätzlich gelten die zu ermittelnden Temperaturgrenzen nur für den untersuchten Werkstoff, die verwendete Probeform und die vorliegende Verformungsgeschwindigkeit. Eines der hauptsächlichsten Probleme der Sprödbruchprüfung ist denn auch die Übertragung von der Probe auf das Bauteil. Die Möglichkeiten hierzu werden ebenfalls im Kapitel 5 angeführt.

4.2 Elastisches (sprödes) Verhalten bis zum Bruch

Die Bemessung nach Festigkeitshypothesen ohne Berücksichtigung der örtlichen Spannungszustände wird unmöglich, falls keine genügende Verformbarkeit des Werkstoffes oder

keine hinreichende Homogenität des Beanspruchungszustandes gesichert sind.

Spannungskriterien

Ist die Verformung bis zum Bruch elastisch, so werden Spannungsspitzen bruchbestimmend. Diese müssen ermittelt und mit der örtlich gültigen Reissfestigkeit verglichen werden. Beurteilungsgrundlage ist also ein Spannungskriterium. Da bei gegebener Nennspannung die Höhe der Spannungsspitze im elastischen Fall von der Orientierung, der Form und der Grösse der sie verursachenden Diskontinuität abhängt, wird oft eine aus der Beschaffenheit der Diskontinuität und der Nennspannung abgeleitete gemeinsame Kenngrösse verwendet, die gemäss der Griffith-Orowan-Irwinschen linearelastischen Bruchmechanik (fracture mechanics) als Spannungsintensität (stress intensity factor K) bezeichnet wird. Die zum Bruch führende Spannungsintensität wird mit Reisszähigkeit (Bruchzähigkeit, Sprödbruchzähigkeit, fracture toughness K_c) benannt. Falls die Reissfestigkeit bzw. die Reisszähigkeit im betrachteten Bereich kaum temperaturabhängig ist, so wird die Anwendung von Temperaturkriterien unmöglich.

Zusätzlich zur Bemessung nach den Festigkeitshypothesen ist eine Ermittlung des Verlaufs der Beanspruchung über das gesamte Bauteil allgemein und der Spannungskonzentration bzw. der Spannungsintensität im besonderen erforderlich. Es ist also eine zweite Bewertung ausser der üblichen Bemessung notwendig, welche im folgenden als «Parallelbewertung» bezeichnet wird. Das entsprechende Schema ist in Bild 32 dargestellt.

Ein vollkommen elastisches (sprödes) Verhalten bis zum Bruch ist bei ferritischen Baustählen oberhalb etwa 50 K selten anzutreffen. Es wurden daher Kriterien ausgearbeitet, bis zu welchen plastischen Verformungen die vorgängig angeführte Betrachtungsweise angewendet werden kann, siehe die entsprechenden Prüfungen in Kapitel 5.2.

Es sind die Fälle der scharfkantigen Diskontinuitäten und damit unendlich hoher theoretischer Spannungskonzentration von jenen der endlichen Kerbradien und damit weniger extremen Spannungsspitzen zu unterscheiden. Für den ersteren Fall wurde in den letzten 15 Jahren vor allem in den USA das Instrumentarium der linearelastischen Bruchmechanik entwickelt.

Die nicht minder wichtige Behandlung der endlichen Kantenradien bzw. Spannungskonzentrationen ist von der Seite der Spannungsberechnung schon seit langem bekannt. Die Ausdehnung auf Bruchkriterien hingegen ist verhältnismässig neu; eine möglich erscheinende Hypothese wird auch bei den Prüfverfahren später angeführt.

Eine besondere Beurteilung des Bruchverhaltens ist unnötig, falls bei homogener Beanspruchung die zulässige Spannung nicht überschritten wird. Ebenso kann diese gemäss hypothetischer Voraussage und erfolgter experimenteller Bestätigung entfallen, falls die Beanspruchung in ferritischen Baustählen 5 kp/mm² nicht überschreitet. Zur spröden Trennung ist selbst bei grosser Reissgeschwindigkeit eine höhere Spannung notwendig.

Zwar wird die zur Risseinleitung notwendige Spannung bei sonst sprödem Verhalten auf 14 kp/mm² geschätzt, doch dürfte dieser Wert nicht auf alle statisch belasteten Bauteile bedenkenlos anwendbar sein (Begründung siehe Kapitel 6).

4.3 Übergangsbereich

Im Übergangsbereich, in welchem die Werkstofftrennung nach einer beschränkten plastischen Verformung in Spannungsabhängigkeit erfolgt, kann sowohl die Zähigkeit und Verformbarkeit als auch die Reissfestigkeit bzw. die Reisszähigkeit in Temperaturabhängigkeit zur Beurteilung herangezogen werden. Im Bereich der beschränkten plastischen Verformung sind demnach jeweils zwei Grössen als Kriterienpaar notwendig.

Die rechnerische Behandlung von Spannungskriterien wird durch den Einfluss des Verformungszustandes auf verschiedene Parameter erschwert. Davon betroffen sind die Geometrie (und damit der Spannungszustand), die Verformungsgeschwindigkeit der entscheidenden Stellen und unter Umständen sogar die massgebenden Werkstoffeigenschaften.

Oft werden Verformungsminima bei Betriebstemperatur als Kriterien gesetzt, wobei die Übersetzung auf Spannungen, das heisst auf die Tragfähigkeit, hergestellt werden muss.

Zweckmässig erscheint daher die Forderung nach jener minimalen Verformung, bei der ein Abbau der Spannungsspitzen auf die örtlich gültige Fliessgrenze angenommen werden kann. Es gibt Vorschriften, die ein Fliessen des Gesamtquerschnittes vor dem Reissen verlangen. Anstatt Verformung, das heisst Dehnung, können andere Kriterien gesetzt werden, wie Kristallinität der Bruchfläche, eine gewisse Querkontraktion oder eine gewisse spezifische Brucharbeit. In diesen Fällen ist aber die Korrellierbarkeit mit Spannungen, also mit der Tragfähigkeit, zu prüfen.

Das zu wählende Denkmodell zur Beurteilung der Tragfähigkeit im Bereich der beschränkten plastischen Verformung ergibt sich aus einer eingehenden Betrachtung der Phänomene im Übergangsbereich. Daraus folgt:

Gegenüber den vorgehenden, einer einzigen Beurteilungsart zuteilbaren Verhaltensbereichen wird im Übergang oft ein Vielfaches an Prüf- und Bewertungsaufwand notwendig.

In vielen Fällen ist weiterhin zum vornherein nicht abzusehen, ob ein allenfalls hinreichend plastisches Verfahren die Beurteilung nach Temperaturkriterien allein erlaubt oder, als anderes Extrem, Diskontinuitäten und damit Spannungskriterien massgebend werden.

Im folgenden wird das Vorgehen bei unbestimmtem Bruchverhalten beschrieben.

4.3.1 Die Kerbschlagprüfung als statistisch gestütztes Verfahren

Zur Sprödbruchprüfung wird als erster Schritt allgemein die Kerbschlagprüfung durchgeführt.

Eine Prüfung mit Rundkerbproben kann genügen, falls Erfahrungen mit ähnlichen Bauteilen vorliegen, die aus dem zu untersuchenden Material gefertigt wurden und unter gleichwertiger Beanspruchung stehen, weiterhin genügend Kerbschlagwerte bekannt und keine scharfkantigen Diskontinuitäten vorhanden sind. Gegossene und geschmiedete Teile können demnach nach geeigneter zerstörungsfreier Untersuchung mit Rundkerbproben geprüft werden. Die Kriterien sind den Erfahrungen anzupassen.

Falls kleine scharfkantige Diskontinuitäten nicht auszuschliessen sind, so muss die *Charpy-V-Probe* eingesetzt werden. Bedingung ist eine statistische Sicherung, das heisst Kenntnis der Korrelation der Kerbschlagwerte zum Bruchverhalten und deren Streuung bzw. Vertrauensgrenzen in ähnlichen Anwendungen. Hierzu ist die experimentell ermittelte Korrelation zwischen aussagefähigeren Sprödbruchprüfungen mit der durchgeführten Kerbschlagprüfung ebenfalls verwendbar.

4.3.2 Erste Folgeprüfung; Grenzwertverfahren

Erscheint die Korrelation der Charpy-V-Prüfung zum Bruchverhalten nicht hinreichend gesichert, so sind Folgeprüfungen notwendig.

Zur besseren Beurteilung des Bruchverhaltens werden zusätzlich oft *Pellini-Proben* geprüft. Anmerkungen zur Bewertung siehe Kapitel 5. Als Alternativlösung können mit Ermüdungsriss oder gedrückter Scharfkerbe versehene Kerbschlagproben erwogen werden.

Für Schweisskonstruktionen sind ausserdem Folgeprüfungen bei Nichterreichen der geforderten Kerbschlagwerte, bei Wanddicken über etwa 50 bis 70 mm oder bei katastrophalen Folgen eines möglichen spröden Bruches vorzusehen.

Die bisherigen Ausführungen gelten unter den üblichen Abnahmekriterien, das heisst bei Ausschluss von Rissen, scharfkantigen Lunkern, Bindefehlern und Mängeln der Durchschweissung innerhalb der heute erreichbaren Nachweisgrenzen der Ultraschall- und Oberflächenriss-Prüfverfahren. Richtwert: rund 10 mm² flächige Trennung bei Ultraschallverfahren.

Ist das Bestehen grösserer Fehler oder ein Überschreiten der örtlich gültigen Fliessgrenze (angenähert durch die einachsige Fliessgrenze) oder eine plötzliche Freisetzung sehr grosser elastischer Energien denkbar, so sind weitere Ergänzungsprüfungen notwendig.

Die Pellini-Prüfung ist wegen der üblichen Durchbiegungsbegrenzung zur Prüfung der Trennbruchanfälligkeit nach mehreren Prozenten plastischer Verformung sowie ausserhalb des Dickenbereiches von 25 bis 75 mm nicht geeignet.

Eine weitere Folgeprüfung kann entfallen, falls mit Ermüdungsriss oder gedrückter Scharfkerbe versehene Kerbschlagproben bei der Belastungstemperatur zähes Verhalten zeigen. Diese Feststellung gilt zumindest für Blechdicken bis zu 50 bis 70 mm. Die Anwendung von statisch gebogenen Kerbschlagproben kann nicht empfohlen werden. Jene der ersten Folgeprüfung zugeordneten Grenzwertprüfungen sind unter 5.1.3 angeführt.

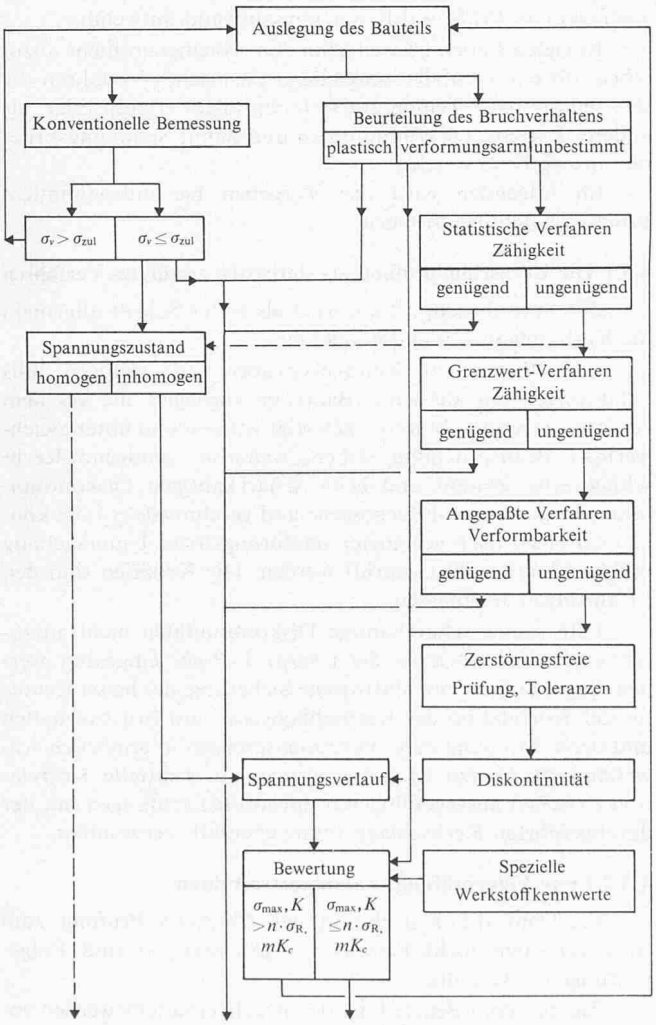


Bild 33. Ablaufschema gemäss den Denkmodellen zur Beurteilung der Tragfähigkeit. Es ist die Zusammenführung der beiden Geleise «konventionelle Bemessungs» und «Beurteilung des Bruchverhaltens» aus kürzestem Wege anzustreben

4.3.3 Zweite Folgeprüfung; angepasste Verfahren

Die zweite, hinsichtlich der Eignung des Werkstoffes wiederum aussagefähigere, aber auch aufwendigere Folgeprüfung kann mit Hilfe von Proben der vollen Wanddicke durchgeführt werden. Neben der bauteilgleichen Wanddicke werden auch Fehlstellen den möglichen ungünstigsten Fällen im Bauteil angepasst. Diese Verfahren, welche hier als angepasste Prüfungen bezeichnet werden, sollen auch die Geschwindigkeit simulieren; sie sind dem Punkt 5.1.4 zugeordnet.

Bei der Möglichkeit scharfkantiger Fehlstellen sind Schlitze mit ebensolchen Kanten vorzusehen. Die Prüfung soll bei der tiefsten Belastungstemperatur des Bauteiles erfolgen und eine bestimmte minimale geforderte Spannungskonzentration bzw. Spannungsintensität oder Dehnung (am Kerbgrund oder auf einer Prüfstrecke über der Kerbe) vor der Materialtrennung in der Kerbe aufweisen.

Zur Einsparung der Grossversuche werden auch hier Korrelationen zur Kerbschlagprüfung gesucht. Die zur Charpy-V-Prüfung verschiedentlich aufgestellten Umrechnungskurven gelten nur für bestimmte Stähle und weisen selbst dort erhebliche Streuungen auf. Ermüdungsangerissene oder mit gedrückter Scharfkerbe versehene Proben dürften hier geringere Streuungen und u. U. markantere Änderung der Korrelation zwischen Ergebnissen der angepassten Prüfung und der Kerbschlagprüfung durch verschiedene Stahlqualitäten aufweisen.

4.3.4 Zusammenfassung der Rückführungsstufen

Die geschilderten drei Prüfstufen entsprechen: im ersten einem allgemeinen Qualitätsnachweis, im zweiten einer Grenzwertprüfung mit maximaler Kerbschärfe und einer relativ zur Risseinleitung grossen Verformungsgeschwindigkeit, während die dritte Folgeprüfung gemäss den angepassten Prüfverfahren der Werkstoffbeanspruchung im Bauteil am nächsten kommt. Sowohl der Prüfaufwand als auch der Aussagewert nimmt von jeder Prüfstufe zur nächsten zu.

Die jeweilige Rückführung auf die herkömmliche Bemessung erlaubt die Begrenzung des Prüfaufwandes auf das notwendige Mass. In sehr vielen Fällen wird die Beurteilung des Bruchverhaltens mittels einer üblichen Prüfung mit der Charpy-V-Probe genügen. In etlichen Fällen wird die erste, in einigen auch die zweite Folgeprüfung notwendig.

Die erwähnte Notwendigkeit der statistischen Stützung der Kriterien für die herkömmliche Kerbschlagprüfung kann durch die Parallelprüfung mit den Grenzwertverfahren und den angepassten Prüfverfahren zumindest zum Teil ersetzt werden.

4.3.5 Dritte Folgeprüfung; quantitative Verfahren

Bei Nichtgenügen in der 2. Folgeprüfung wird die Untersuchung auf die Spannungs- bzw. Fehlergrössen-Kriterien ausgedehnt. Es wird die an der Kante der grösstmöglichen flachen Diskontinuität auftretende Spannungskonzentration σ_{max} bzw. Spannungsintensität K mit der im Extremfall bei ebener Dehnung ermittelten Reissfestigkeit σ_R bzw. Reisszähigkeit K_{Ic} ermittelt, womit die Überführung zu den Bruchkriterien der elastischen Verformung bis zum Bruch vollzogen ist.

Der schematische Ablauf der Prüfungen ist in Bild 33 dargestellt. Falls von Anfang an eine überwiegend elastische Verformung bis zum Bruch zu erwarten ist, wird direkt zur dritten Folgeprüfung geschritten, welche die alleinige Prüfung in diesem Fall darstellt.

Der K_c-Wert kann, ähnlich wie der K_{Ic}-Wert, zur Bestimmung kritischer Fehlergrössen herangezogen werden, falls

die Spannungen bekannt sind und die Prüfbedingungen den ungünstigsten Betriebsbedingungen entsprechen. Die von der Beanspruchung her gerechnete Spannungsintensität K für scharfkantige Diskontinuitäten bestimmter Grössen wird durch die zwar begrenzte, jedoch wirksame Verformung gemindert. Damit ist ein Anwachsen der kritischen Diskontinuität verbunden, das abgeschätzt werden kann. In diesem Zusammenhang sind Arbeiten von Weiss u.a., siehe Abschnitt 5, über eine Bruchmechanik für Kerben endlicher Radien von Interesse, die auf der Neuberschen Kerbspannungslehre und der Orowan-Irwinschen Bruchmechanik beruht. Einige Gedanken zur plastischen Verformung an scharfkantigen Diskontinuitäten sind weiterhin in den Überlegungen zur Bruchmechanik, Punkt 5.2.1, erwähnt.

Auch hier wurden schon für bestimmte Baustähle Korrelationen [31] zwischen der Reisszähigkeit und den Kerbschlagprüfungen ermittelt. Diese können zur Qualitätsüberwachung dieser Stähle unter Anwendung einer verhältnismässig grossen Sicherheitsmarge benutzt werden. Für die Untersuchung des Bruchverhaltens sowie die Eignungsprüfung eines Werkstoffes für eine bestimmte Anwendung sind hingegen die Probenformen nach ASTM E 24 oder gleichwertige, siehe in 5.2, vorzusehen.

In diesem Fall ist eine Parallelbewertung notwendig. In deren Verlauf werden die Spannungskonzentrationen σ_{max} bzw. die Spannungsintensitäten K ermittelt. Als Bruchkriterium gilt der Vergleich mit der Reissfestigkeit σ_R bzw. der Reisszähigkeit K_c. Bruch tritt ein, falls

(11) $\sigma_{Nenn} \cdot K_t = \sigma_{max}$

ergibt und

(12) $\sigma_{max} > \sigma_R$

ist. Darin sind σ_{Nenn} die Nennspannung oder Mittelspannung, K_t der Kerbfaktor (Formzahl) und σ_{max} die auftretende Spannungsspitze.

Gleichwertig erfolgt der Bruch bei

(13) $K > K_c$ bzw. $K > K_{Ic}$,

worin K die Spannungsintensität, K_c die Reisszähigkeit und K_{Ic} die gültige Reisszähigkeit für den hinreichend elastischen ebenen Verformungsfall bedeuten.

Für die technische Anwendung sind Sicherheitsfaktoren vorzusehen, siehe n und m in Bild 33.

Literaturverzeichnis

[23] *F. A. McClintock:* Challenges in Fracture Mechanics. Dev. in «Mechanics», Vol. 5; Proc. 11th Midwestern Mech. Conf., Paper No. 55.

[24] *J. M. Barsom* and *S. T. Rolfe:* Correlations between K_{Ic} and Charpy V-Notch Test Results in the Transition Temperature Range. ASTM STP 466, 1970, S. 281/302.

Wichtigste Bezeichnungen

Die Bedeutung von Buchstaben, welche hier nicht aufgeführt sind, wird an Ort und Stelle erläutert, falls sie nicht unmittelbar aus der Definition hervorgeht.

A	halbe Breite von Flachzugproben (mm)
A_u	Bruchquerschnitt (mm²)
a	Tiefe einer flachen, an die Oberfläche stossenden Diskontinuität bzw. halbe wirksame Abmessung einer flachen inneren Diskontinuität, Schlitztiefe (mm)
a_c	wie vorhin, jedoch bruchkritischer Wert
a_K, a'_K, a''_K	Kerbschlagzähigkeiten in mkp/cm². Werte ohne Angabe der Probenform und der Prüftemperatur sind undefiniert
B	Dicke der Bruchmechanik-Probe (mm)
b	Abstand zwischen inneren Diskontinuitäten (mm)
C	und andere Abkürzungen chemischer Elemente bedeuten in Analysen Gewichtsprozente
c	Verhältniszahl Druckfestigkeit zu Zugfestigkeit
c_1	werkstoffabhängige Konstante (m/s)
c_2	werkstoffabhängige Konstante (mK/s)
CAT	Crack Arrest Temperature. Jene Temperatur, bei welcher unter gegebener Beanspruchung ein laufender Riss aufgefangen wird (°C)
C_S	Verhältniszahl (σ_R/σ_{BS})
Charpy-V-Proben	Kerbschlagproben mit Spitzkerbe (r = 0,25 mm)
d	mittlere Korngrösse von Baustahl (μm)
$d_{F,m}$	mittlere scheinbare Ferritkorngrösse (μm)
E	Elastizitätsmodul (kp/mm²)
E, H, R	im Diagramm nach Kuntze: markante Punkte im Verlauf der Trennfestigkeit über der Bruch-einschnürung
FTE	Fracture Transition Elastic. Temperaturgrenze der instabilen (spröden) Rissfortpflanzung (°C)
FTP	Fracture Transition Plastic. Oberhalb der so bezeichneten Temperatur zeigt die ganze Bruchfläche plastische Verformung, d.h. vollzähen Bruch (°C)
G	zur Rissausbreitung notwendige spezifische Energie (kp/mm)
G'	Gleitmodul (kp/mm²)
G_1, G_2, G_3	Rissausbreitungsenergien entsprechend den Trennungsarten gemäss den Indices I, II bzw. III
H_1, H_2, H_3	Bezeichnungen verschiedener Hüllparabeln im Koordinatenkreuz $\sigma - \tau$

Indices I, II, III stehen für die Belastungs- bzw. Trennungsart

I. Art	senkrecht zur Ebene der Diskontinuität
II. Art	in der Ebene der Diskontinuität, senkrecht zur Kante
III. Art	in der Ebene der Diskontinuität, parallel zur Kante
K	Spannungsintensität (Spannungsüberhöhung, stress intensity factor) der linear elastischen Bruchmechanik (kp/mm² · mm$^{1/2}$)
K_b	Kerbfaktor an einer inneren Diskontinuität, analog zu K_t
K_c, K_{Ic}	Reisszähigkeit (Bruchzähigkeit, Fracture Toughness) der linear elastischen Bruchmechanik; bei Trennung senkrecht zur Ebene einer Diskontinuität: Index Ic steht für «Cleavage» (Spaltung) (kp/mm² · mm$^{1/2}$)
K_{Id}	Reisszähigkeit bei Belastung und Trennung nach der Art I bei schlagartiger Belastung (kp/mm² · mm$^{1/2}$)
K_t	Kerbfaktor an einer die Oberfläche berührenden Diskontinuität, entspricht dem Verhältnis σ_{max}/σ_N

$K_0, K_{20}, K_{50}, K_{67}, K_{100}$ Bezeichnung von Schnadt-A-Proben, welche bei rund 5 m/s Schlaggeschwindigkeit geprüft werden und Kerbradien von $r \leqslant 0{,}005$ mm, $r = 0{,}25$, 1,0, 2,0 und ∞ aufweisen.

K_q ungültige (wegen fehlendem Nachweis der Erfüllung der ASTM-Kriterien oder zu grosser bleibender Verformung vor dem Bruch) Reisszähigkeit (kp/mm² · mm$^{1/2}$)

K_Z, K_R Beanspruchungen (Mohrsche Kreise) im Koordinatenkreuz $\sigma - \tau$

k Faktor zur Berechnung der erforderlichen Kerbschlagzähigkeit nach Lloyds Register of Shipping

$$k = \frac{71}{\sigma_S + \sigma_B} \left(\frac{\text{kp/mm}^2}{\text{kp/mm}^2}\right)$$

k_t werkstoffabhängige Richtungskonstante

n, m Sicherheitsbeiwerte

NDT Nil Ductility Transition. Unter NDT trennt ein laufender Riss die Probe ohne plastische Deformation (°C)

O Oberflächenenergie auf die Länge der Diskontinuität bezogen $\left(\frac{\text{kpmm}}{\text{mm}}\right)$

P Kraft (kp)

P_u letzte messbare Kraft im Zugversuch (kp)

p Innendruck (kp/cm²)

r Kerbradius (mm); Polarkoordinate

r_s Halbmesser der fiktiven plastischen Zone an der Kante einer Diskontinuität (mm)

r^* Halbmesser des Bereichs der gemittelten Spannungen (mm)

S Spezifische Oberflächenenergie (kp/mm)

Schnadt-Ao-Proben Kerbschlagproben mit gedrückter Scharfkerbe ($r \leqslant 0{,}005$ mm)

St 42, St 52, St 65V Baustahlklassen mit Mindestzugfestigkeiten von 42, 52 bzw. 65 kp/mm². V bedeutet «vergütet»

T absolute Temperatur (K)

t Probendicke, Blechdicke (mm)

t_0 werkstoffabhängiger Temperaturwert (°C)

$t_{ü}$ Übergangstemperatur, mit einer Kerbschlagzähigkeit a_K oder einem Verformungs- bzw. kristallinen Bruchanteil gekoppelter Temperaturwert, der für den spröd-zähen Übergang eines Stahles charakteristisch ist. Ohne Angabe der Prüfbedingungen undefiniert (°C)

u Verhältniszahl $u = 10 - \frac{2730}{T}$

VSM Verein Schweiz. Maschinenindustrieller

VSM-Proben Kerbschlagproben mit Rundkerbe (⌀ 2 mm)

v_{krit} kritische Verformungsgeschwindigkeit, bei welcher das Bruchverhalten von zähe auf spröde ändert (m/s)

W auf die Länge der Diskontinuität bezogene Rissaufweitungsenergie $\left(\frac{\text{kpmm}}{\text{mm}}\right)$

y Abstand der nächsten inneren Diskontinuität zum Kerbgrund (mm)

α der Mikrostützwirkung zugeordneter Faktor

γ Einflusszahl, Funktion des Verhältnisses a/A, worin a die Schlitztiefe und A die halbe Breite der beidseits symmetrisch geschlitzten Flachzugproben bedeuten

δ Winkel des Polarkoordinaten r

ϑ_c Grenzdehnung (kritische Dehnung) an der Kante einer Diskontinuität in Prozenten ausgedrückt

ϑ_{el} elastische Grenzdehnung an der Kante einer Diskontinuität (mm)

ϑ_5 Bruchdehnung des runden Zugstabes bezogen auf eine Messlänge vom fünffachen Durchmesser in Prozenten ausgedrückt

$\varepsilon_g, \varepsilon_e$ Gleichmass- bzw. Einschnürungsverformung (Dehnungsprozente)

$\dot{\varepsilon}$ Dehnungsgeschwindigkeit (1/s)

η_2 Verhältniszahl σ_2/σ_1

η_3 Verhältniszahl σ_3/σ_1

$\varkappa$ Verhältniszahl $= \frac{\eta_2 - \eta_3}{1 - \eta_3}$

ν Poissonsche (Querdehn-) Zahl $\varepsilon_q/\varepsilon_l$, worin ε_q die elastische Dehnung in Querrichtung, ε_l jene in Längsrichtung unter einachsigem Zug bedeuten

π 3,14

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ Winkel des Halbmessers zum Berührungspunkt des Mohrschen Kreises mit der Leonschen Hüllparabel und der τ-Achse

σ_B Zugfestigkeit (kp/mm²)

σ_{-B} Druckfestigkeit (kp/mm²)

σ_{BA} Festigkeit bei allseitigem Zug (kp/mm²)

σ_m mittlere Spannung (kp/mm²)

σ'_m modifizierte mittlere Spannung $\sigma'_m = \sigma_m \ldots \gamma$, wobei γ von der Probengeometrie abhängt

σ_{Nenn}, σ_N Nennspannung (kp/mm²)

σ_R Reissspannung (kp/mm²)

$\bar{\sigma}_R$ mittlere Bruchspannung eines mit Diskontinuitäten durchsetzten Volumens (kp/mm²)

σ_S Fliessgrenze des Stahls (kp/mm²)

σ'_S, σ''_S Fliessgrenzen bei verschiedenen Prüfbedingungen

σ_u letzte messbare wirkliche Spannung im Zugversuch, entspricht der Reissfestigkeit (kp/mm²)

σ_v Vergleichsspannung (kp/mm²)

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ Spannungen (kp/mm²) im Koordinatennetz x, y, und z

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ Hauptspannungen (kp/mm²), wobei $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ $\sigma_1 > 0$

σ_{zul} zulässige Spannung (kp/mm²)

τ Schubspannung (kp/mm²)

τ_{BS} Schubfestigkeit (kp/mm²)

τ_{BD} Verdrehfestigkeit (kp/mm²)

τ_{max} maximale Schubspannung (kp/mm²)

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ Schubspannung in der Ebene xy, yz, xz

φ Spannungsversprödung, $\varphi = 1/\pi$ (dimensionslos)

ψ Einschnürung: Verhältnis der Querschnittsabnahme beim Bruch zum Originalquerschnitt des Zugstabes in Prozenten ausgedrückt

Fortsetzung folgt