

Der Werkstoff Stahl, mechanisch-technologische Eigenschaften

Autoren: **Peter Langenberg,**
Ingenieurbüro für Werkstofftechnik, Aachen, Germany
Erscheinungsjahr: 2001
Umfang: 31 Seiten (ohne Deckblatt)
[ggf. bibliogr. Nachweis]

Hinweis: Die kostenfreie, nicht kommerzielle Vervielfältigung und Weitergabe ist ausdrücklich erlaubt. Die Verwendung einzelner Teile (Texte, Bilder, Tabellen) ist gestattet, wenn die Herkunft wie folgt zitiert wird: I-W-T.de-Veröffentlichungen: [Titel, Autoren, Jahreszahl, bibliogr. Nachweis]

Der Werkstoff Stahl, mechanisch-technologische Eigenschaften.

Dr. Peter Langenberg, Ingenieurbüro für Werkstofftechnik, Aachen

1 Einleitung

Die moderne Stahlwerktechnologie ermöglicht heute die Produktion einer breiten Palette von niedriglegierten Stählen mit Festigkeiten zwischen 235 und 1100 MPa und Dicken bis zu 200 mm. Neben der Festigkeit unterscheiden sich diese Stahlsorten vor allem durch die Anforderung an die Werkstoffzähigkeit.

Beide Parameter, Festigkeit und Zähigkeit, werden im allgemeinen als mechanisch-technologische Eigenschaften bezeichnet, und sind wichtige Kennwerte für die Bemessung von Stahlkonstruktionen.

Die Festigkeit bestimmt die Spannungsausnutzung einer Konstruktion, d.h. die maximal ertragbare äußere Beanspruchung aus Lasten, die auf die Konstruktion einwirken, bezogen auf den Bauteilquerschnitt. Die maximale Last F_{\max} in einer Stahlkonstruktion resultiert aus den einwirkenden Einzellasten wie Eigengewicht, Ladung, Wellengang und Wind.

$$s_{\max} = \frac{F_{\max}}{A_{\text{Bauteil}}} \quad (1)$$

Der Werkstoff muss daher eine bestimmte Mindestfestigkeit σ_{zul} aufweisen, damit kein Bauteilversagen durch starke Deformation bis hin zum Bruch auftreten kann:

$$\sigma_{\text{zul}} > \sigma_{\max, \text{Bauteil}} \quad (2)$$

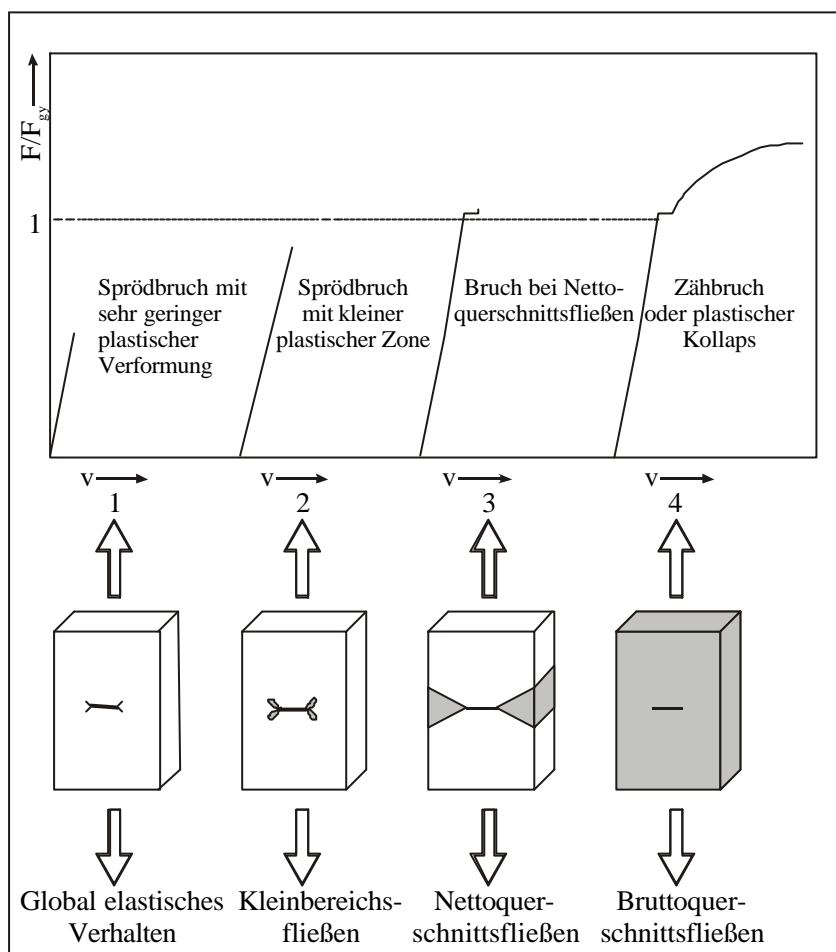
Die Ermittlung der Werkstoffeigenschaft Festigkeit wird in Kapitel 2 erläutert.

Die zweite bemessungsrelevante mechanisch-technologische Größe ist die Zähigkeit.

Zur Erklärung der Zähigkeit ist es notwendig das in **Bild 1** dargestellte Modell eines Bauteils, hier eine ebene Blechplatte, mit einem Anriss zu betrachten.

Man unterscheidet den anrissfreien sogenannten Bruttoquerschnitt vom anrissbehafteten Nettoquerschnitt. Unter einer äußeren Last F ergibt sich gemäß Gleichung 1 eine homogene Spannungsverteilung im Bruttoquerschnitt. Im angerissenen Nettoquerschnitt können die Kräfte nicht ungestört durch das Bauteil fließen, sie müssen den Riss bildlich gesprochen umgehen. Dadurch kommt es zu einer örtlichen Konzentration der Beanspruchungen an der Risspitze, die in einiger Entfernung wieder auf das Niveau der Spannung am Bruttoquerschnitt abklingt. Im Bereich der durch den Riss hervorgerufenen Spannungskonzentration wird der Werkstoff also sehr viel höher beansprucht als es durch die im Bruttoquerschnitt wirkende Spannung vorgesehen ist. Dies wird durch die grauen Flächen in **Bild 1**, welche plastische Verformung symbolisieren, verdeutlicht. Damit ein Werkstoff diese Spannungskonzentration ertragen kann, muss er eine bestimmte Zähigkeit aufweisen.

Aufgrund des nichtlinearen Verlaufs der örtlichen Spannungskonzentration ist die Formulierung von Zähigkeitsanforderungen sehr viel schwieriger als im Falle der Festigkeitsanforderungen.



1.1.1 Bild 1: Globales Verformungsverhalten von Bauteilen mit Anrissen

In der Vergangenheit wurden vielfach erfahrungsbasierte Zähigkeitsanforderungen für eine eingeschränkte Anzahl von Stählen niedriger Festigkeit in den Werkstoffanforderungen festgeschrieben. Die heutigen Entwicklungen im Schiffbau, genauso wie in anderen Anwendungsbereichen sind dagegen gekennzeichnet durch die Forderung nach wirtschaftlicheren Bauweisen und größeren Nutzlasten. Dem steht die bereits angesprochene Stahlientwicklung der vergangenen 3 Dekaden gegenüber mit einer breiten Produktpalette mit unterschiedlichen Herstellungsarten wie:

- gewalzt
- normalgeglüht oder normalisierend gewalzt
- thermomechanisch gewalzt
- vergütet

Das Herstellungsverfahren hat einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften Festigkeit und Zähigkeit und auf die Schweißeignung, aber auch die im Schiffbau vielfach eingesetzte Methode des Warmrichtens. [vgl. Vortrag W. Bleck: Der Werkstoff Stahl, werkstoffkundliche Grundlagen].

2 Festigkeit

2.1 Ermittlung der Festigkeit im einachsigen Zugversuch

Der *Zugversuch* hat unter den mechanischen Prüfverfahren die größte Bedeutung erlangt. Die mit diesem Versuch ermittelten Kennwerte finden Anwendung bei der

Werkstoffentwicklung, bei der Bemessung statisch beanspruchter Bauteile und bei der Qualitätskontrolle im Stahlwerk. Ein Probestab aus dem zu prüfenden Material wird in einer Zugprüfmaschine (**Bild 2**) einer langsam und stetig steigenden Kraft oder Verformung unterworfen, die zur Folge hat, daß sich die Probe unter Einwirkung dieser Zugspannung zunächst elastisch und dann plastisch homogen verformt. Ab einer bestimmten Dehnung tritt eine plastische Instabilität in Form einer lokalen Einschnürung des Probenquerschnittes auf, die dadurch gekennzeichnet ist, dass bei weiterer Belastung nur noch dieser Bereich der Probe weiter verformt wird. Bei einer bestimmten, für den Werkstoff und seinen Zustand charakteristischen Dehnung, der Bruchdehnung geht die Probe zu Bruch. Der Zugversuch wird meist bei niedrigen Verformungsgeschwindigkeiten „quasistatisch“ durchgeführt.

2.1.1 Versuchsbeschreibung

Probenform

Beim Zugversuch verwendet man in der Regel lange, schlanke Proben, da so in guter Näherung ein einachsiger Spannungszustand gesichert ist. Am häufigsten prüft man Rundstäbe. Zur Prüfung von Flacherzeugnissen, insbesondere zur Beurteilung der Tiefzieheigenschaften, werden Proben mit rechteckigem Querschnitt verwendet. Richtlinien zur Dimensionierung von Zugproben sind in DIN EN 10 002 festgelegt. In **Bild 3** sind eine Rundzugprobe mit Gewindeköpfen und eine Flachzugprobe dargestellt.

Versuchsbedingungen

Die wichtigsten Parameter beim Zugversuch sind die Dehngeschwindigkeit und die Temperatur. Die Dehngeschwindigkeit wird durch die Laststeigerungsrate oder durch die Querhauptgeschwindigkeit vorgegeben. Man unterscheidet zwischen der elastischen $\dot{\epsilon}_{el}$ und der plastischen Dehngeschwindigkeit $\dot{\epsilon}_{pl}$. Bei einer von der Raumtemperatur abweichenden Temperatur muß die Probe während der Versuchsdauer auf der gewünschten Prüftemperatur gehalten werden. Dazu können Kühlkammern oder Öfen verwendet werden.

Versuchsdurchführung

Meistens wird bei der Durchführung von Zugversuchen eine konstante Querhauptgeschwindigkeit vorgegeben und die Kraft in Abhängigkeit von der relativen Verschiebung zweier Punkte innerhalb der Meßlänge l_0 der Probe gemessen. Zur exakten Messung der Verlängerung ΔL ist z. B. ein an der Probe anklemmbarer Dehnungsmesser erforderlich. Bei Bedarf einer vollständigen Auswertung der Messungen auch nach der Einschnürung bis zum Bruch kann man die Einschnürkontur der Probe mit optischen Methoden oder auch mit mechanischen Abtastverfahren ausmessen.

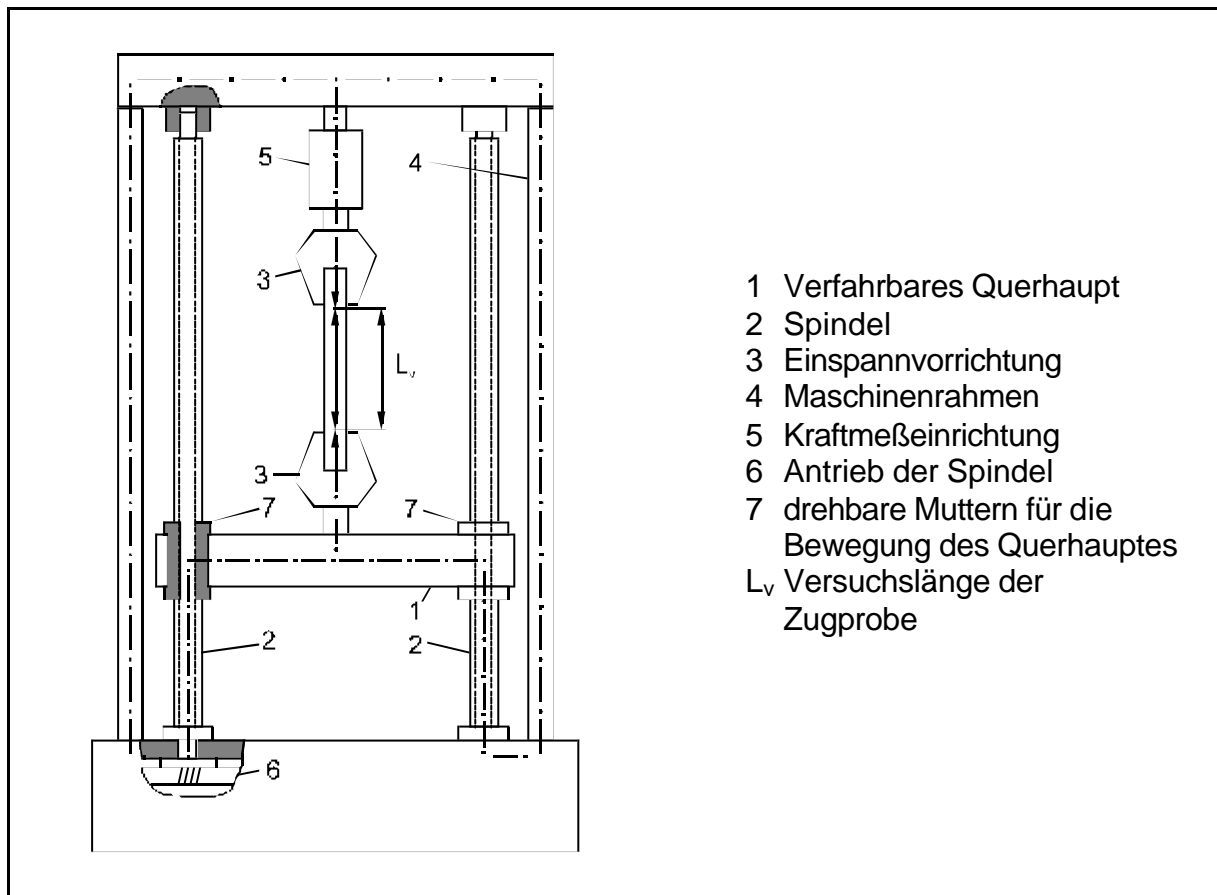


Bild 2:: Aufbau einer Zugprüfmaschine

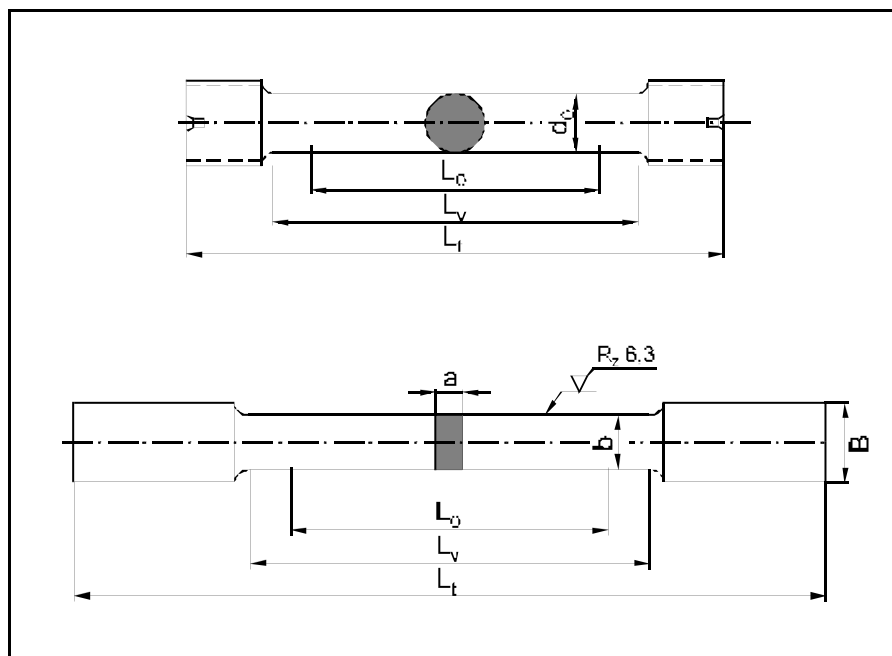


Bild 3: Zugproben mit kreisförmigem und rechteckigem Querschnitt nach DIN EN 10 002 (L_0 =Anfangsmeßlänge, L_v =Versuchslänge, L_t =Gesamtlänge, d_0 =Durchmesser der Rundzugprobe, a =Dicke der Flachprobe, b =Breite der Flachprobe)

2.2 Die konventionelle Spannungs-Dehnungs-Kurve

Aus der Kraft-Verlängerungs-Kurve bzw. dem Kraft-Zeit-Diagramm (**Bild 4**) berechnet man die konventionelle Spannungs-Dehnungs-Kurve.

Die konventionelle Spannung σ , die auch oft als Nennspannung oder technische Spannung bezeichnet ist, wird nach der Formel:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (3)$$

berechnet, wobei F die Kraft und S_0 den Anfangsquerschnitt der Probe bezeichnen. Die Nenndehnung ε ist definiert als die Verlängerung ΔL bezogen auf die Anfangslänge L_0 :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (4)$$

2.2.1 Kenngrößen des Zugversuchs

Die Kenngrößen des Zugversuchs sollen am Beispiel der im **Bild 4** dargestellten Spannungs-Dehnungs-Kurven metallischer Werkstoffe erläutert werden.

Bei metallischen Werkstoffen treten mit steigender Belastung zunächst nur elastische, dann elastische und plastische Dehnungen auf. Elastische Dehnungen sind reversibel, d. h., nach Wegnahme der Belastung nimmt die Probe ihre ursprüngliche Form wieder an. Im ersten, steilen Teil des Diagramms steigt die Spannung proportional zur Dehnung.

Es gilt das *HOOKEsche Gesetz*

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (5)$$

Der Proportionalitätsfaktor E wird *Elastizitätsmodul* oder kurz E-Modul genannt. Der E-Modul hat die Einheit einer Spannung.

Die elastische Verformung ist homogen, d. h., die örtliche elastische Verlängerung und die Querkontraktion sind im gesamten Meßbereich der Zugprobe konstant.

Nach Überschreiten der Elastizitätsgrenze wird die elastische durch die plastische Verformung überlagert, was an der Abweichung vom linearen Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurve zu erkennen ist. Man unterscheidet zwischen einem **kontinuierlichen (Bild 4, oben)** und einem **diskontinuierlichen (Bild 4, unten)** Übergang vom elastischen in den plastischen Bereich. Bei vielen Metallen liegt ein kontinuierlicher Übergang zwischen dem elastischen und plastischen Verformungsbereich vor. In der Praxis charakterisiert man den Beginn des Fließens durch eine technische Elastizitätsgrenze, also eine Spannung, bei der die nichtproportionale (plastische) Dehnung einen bestimmten Betrag erreicht hat. Häufig wird als Kenngröße, je nach Anwendung, die 0,01%-Dehngrenze $R_{p0,01}$ oder die 0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$ verwendet.

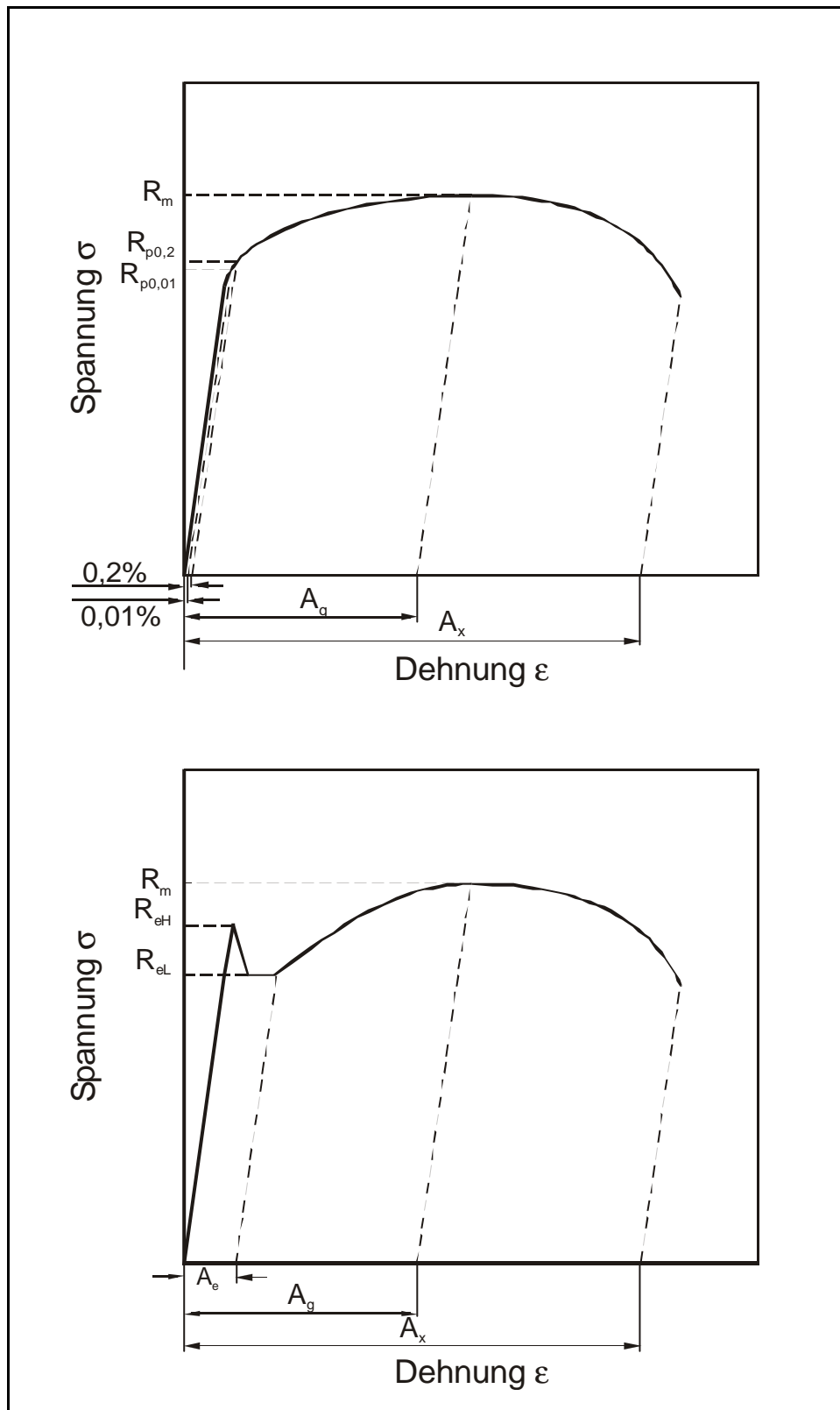


Bild4: Schematische Spannungs-Dehnungs-Diagramme

a) Kontinuierliches Diagramm mit den wichtigsten Kenngrößen des Zugversuchs

b) Diskontinuierliches Diagramm mit ausgeprägter Streckgrenze und LÜDERS-Dehnung

Bei den hier betrachteten Stählen handelt es sich um niedrig legierte ferritische Stähle mit einem diskontinuierlichen Übergang. Zur Beschreibung des diskontinuierlichen Übergangs zwischen dem elastischen und dem plastischen Verformungsbereich verwendet man folgende Kenngrößen:

1. die obere Streckgrenze R_{eH}
2. die untere Streckgrenze R_{eL}
3. die LÜDERS-Dehnung A_e

Erreicht die Spannung den Wert der oberen Streckgrenze R_{eH} , so erfolgt bei weiterer Zunahme der Dehnung ein Abfall der Spannung auf den Wert der unteren Streckgrenze R_{eL} , bei der sich der Werkstoff ohne Anstieg der auf den Anfangsquerschnitt bezogenen Kraft – u. U. allerdings bei geringfügigen Schwankungen der Spannung – dehnt. Die untere Streckgrenze ist die kleinste Spannung im Fließbereich, wobei Einschwingerscheinungen nicht berücksichtigt werden (**Bild 5**).

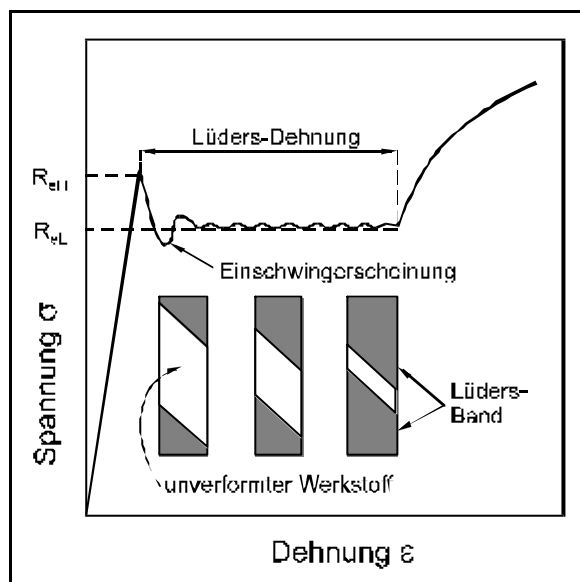


Bild 5: Bildung und Ausbreitung eines LÜDERS-Bandes

Diese Verlängerung erfolgt nicht gleichzeitig auf der gesamten Probenlänge, d. h. homogen, sondern sie breitet sich in Form eines oder mehrerer LÜDERS-Bänder (**Bild 5**), in der Regel von den Probenschultern ausgehend, über die ganze Messlänge aus. Erst nachdem die LÜDERS-Bänder die gesamte Messlänge der Probe erfasst haben und somit die Dehnung überall den Wert A_e erreicht hat, erfolgt mit weiterer Dehnung ein Anstieg der Spannung.

Nach Erreichen der Elastizitätsgrenze im Fall des kontinuierlichen Übergangs bzw. nach der LÜDERS-Dehnung beim diskontinuierlichen Übergang ist eine weitere plastische Verformung nur unter Steigerung der Zugkraft möglich. Dabei kommt es aufgrund der festigkeitssteigernden Mechanismen im Mikrogefüge zur Verfestigung des Werkstoffs und damit zum Anstieg der Spannungs-Dehnungs-Kurve.

Parallel zu dieser werkstoffbedingten Verfestigung $d\sigma/d\varepsilon$ ergibt sich aufgrund der Längenänderung eine Reduzierung des Querschnitts weil Volumenkonstanz des Werkstoffs der plastischen Verformung zu Grunde liegt, dieser Vorgang wird als

geometrische Entfestigung verstanden und wirkt der Verfestigung entgegen. Mit zunehmender Verformung nimmt die Verfestigung $d\sigma/d\varepsilon$ des Materials ab. Sie erreicht im Kraftmaximum den Wert Null (horizontale Tangente an die technische Spannungs-Dehnungs-Kurve). Im Kraftmaximum ist also ein Zustand erreicht, bei dem die Verfestigung gleich der Entfestigung ist und es bei weiterer Verformung zur Einschnürung unter abfallender Kraft kommt.

Die Kraft am Lastmaximum, bezogen auf den Anfangsquerschnitt, wird als *Zugfestigkeit* R_m bezeichnet. Diese Kraft hat für den Konstrukteur eine wichtige Bedeutung, weil sie für die konstruktive Auslegung als zur Berechnung der plastischen Kollapslast verwendet wird. Die entsprechende Dehnung wird als *Gleichmaßdehnung* A_g bezeichnet.

Der Quotient aus Streckgrenze R_e und Zugfestigkeit R_m wird als Streckgrenzenverhältnis bezeichnet. In vielen Bemessungsnormen wird das Streckgrenzenverhältnis als Maß für die Duktilität verwendet und nach oben bei Werten um 0,8 begrenzt. Dies führt zum Ausschluß hochfester Stähle mit Streckgrenzen oberhalb 460 MPa, was nicht grundsätzlich gerechtfertigt ist, weil die Werkstoffzähigkeit nicht richtig erfasst wird.

Im Einschnürdehnungsbereich ist die physikalische Verfestigung kleiner als die geometrische Entfestigung. Die Einschnürung bildet sich mit zunehmender Verformung immer schärfer aus. Da sich im wesentlichen nur noch der Bereich der Einschnürung weiter verformt, liegen jetzt auch inhomogene Verformungsverhältnisse vor. Aufgrund der Kerbwirkung treten zusätzlich Spannungen in Querrichtung der Probe auf; der Spannungszustand ist mehrachsig.

Bei einer bestimmten Dehnung geht die Probe, ausgehend vom Probeninnern, zu Bruch. An Einschlüssen und Verunreinigungen, die eine geringere Verformbarkeit besitzen als das Eisengitter, löst sich die Matrix an den Grenzflächen Einschluss/Matrix ab. Es bilden sich Löcher, die zunächst wachsen und sich dann vereinigen. Makroskopisch ist meistens eine kraterförmige Bruchfläche zu beobachten.

Die Kennwerte zur Beschreibung des Bruchs sind die Bruchdehnung A_x , die Brucheinschnürung Z sowie die Reißspannung σ_f .

Unter der Bruchdehnung A_x versteht man die absolute Verlängerung der Probe nach dem Bruch, bezogen auf die ursprüngliche Meßlänge, sie wird nach Gleichung 3.2 bestimmt. Die Bruchdehnungen von Proben mit unterschiedlichem Querschnitt sind nur für proportionale Proben (z. B. A_5 und A_{10}) vergleichbar, wenn das Verhältnis x , das in diesem Fall das Verhältnis von Meßlänge L_0 zu Probenquerschnitt S_0 beschreibt, konstant ist. Der Vergleich von Bruchdehnungen nichtproportionaler Proben (z. B. A_{50} und A_{80}) erfordert die Umrechnung mittels Korrekturfunktionen.

Die Brucheinschnürung

$$Z = \frac{S_0 - S_{Br}}{S_0} \quad (6)$$

ist von der Länge des Prüfstabes unabhängig und somit ein geeigneter Kennwert zur Beschreibung der Zähigkeit.

Die Reißspannung σ_f wird bestimmt, indem man die Bruchlast F_f auf den Querschnitt S_{Br} an der engsten Stelle, den man aus der gebrochenen Probe bestimmt, bezieht.

2.3 Einflußgrößen auf die Festigkeit

Die Festigkeit eines Stahles wird durch sein Gefüge was sich als Resultat der chemischen Zusammensetzung sowie des Herstellungs- und/oder Wärmebehandlungsverfahrens einstellt. Auf die Beschreibung der metallkundlichen Vorgänge wird hier verzichtet und auf den vorangegangenen Vortrag verwiesen.

Für die konstruktive Auslegung kann jedoch der äußere Einfluss aus Temperatur oder Verformungsgeschwindigkeit sein. **Bild 6** zeigt für Baustähle mit vergleichbarer Zusammensetzung wie Schiffbaustahl, dass erstens mit abnehmender Temperatur die Streckgrenze und auch die Zugfestigkeit zunimmt und zwar überproportional und dass zweitens mit zunehmender Verformungsgeschwindigkeit ebenfalls eine Anstieg der Streckgrenze auftritt.

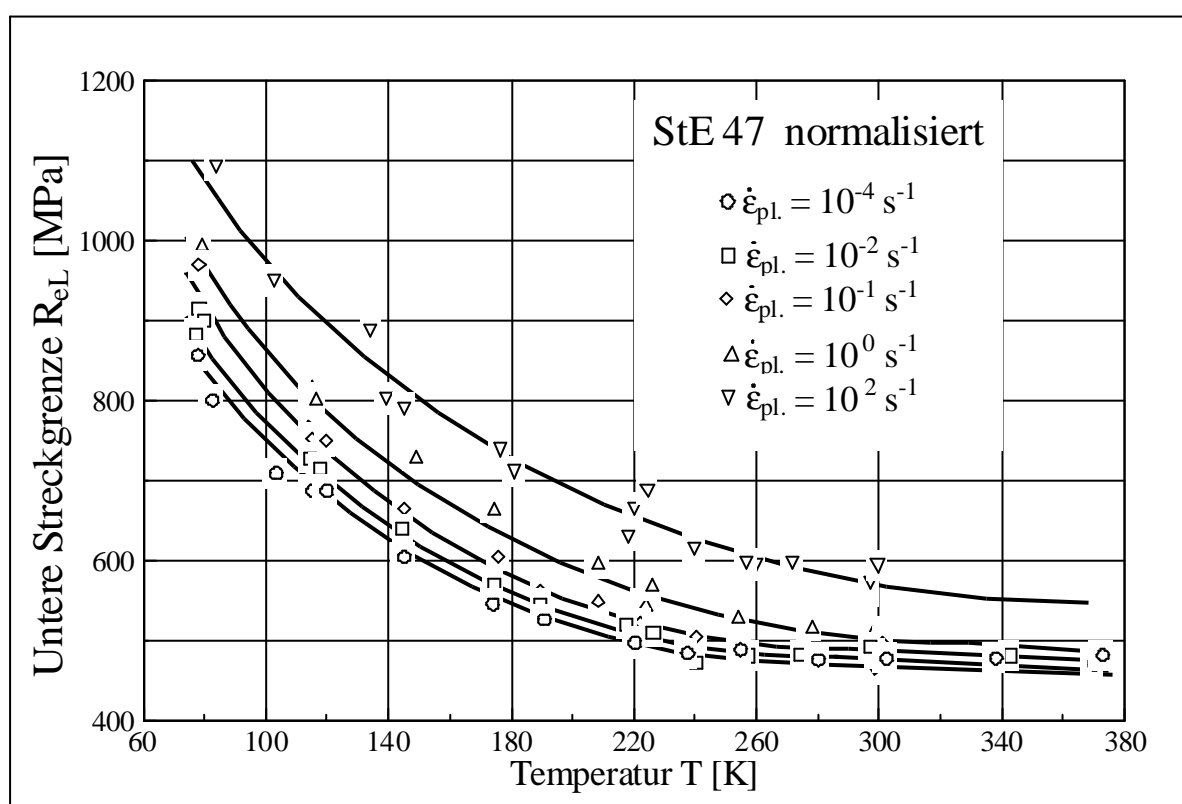


Bild 6: Einfluss von Temperatur und Festigkeit auf die Streckgrenze eines S460 Stahls

2.4 Festigkeiten von Schiffbaustählen

Schiffbaustähle werden in erster Linie hinsichtlich ihrer Festigkeit und zweitens innerhalb der Festigkeitsgruppen nach der Zähigkeit beurteilt. Die Tabellen im Anhang wurden den Richtlinien des Germanischen Lloyd entnommen und beinhalten die Mindestanforderungen an die jeweilige Stahlgruppe. Die vorangestellte Bezeichnung GL ist spezifisch und verweist auf die GL-Richtlinien, die zweite Kennung A bis E ist international im Rahmen der International Association of Classification Societies, dem Dachverband der Klassifikationsgesellschaften festgelegt. Man spricht auch von Grade A usw. Diese Nomenklatur gilt sinngemäß für alle folgenden Tabellen.

Die erste Tabelle im Anhang mit der GL-Nummer 1.6 enthält die vom Verbrauch her betrachtet weitaus wichtigsten Stähle. Dabei nimmt die Stahlgruppe Grade A mit einem Anteil von ca. 80 % den größten mengenmäßigen Anteil der verwendeten Schiffstähle ein. Das interessante im Vergleich zu anderen technischen Bereichen mit vergleichbaren Stählen ist, dass an diesen Stahl Grade A keine Zähigkeitsanforderungen gestellt werden (vergl. Kapitel Zähigkeit).

Die angegebenen Werte sind garantierte Mindestwerte. Da in der Stahlherstellung keine exakten Festigkeits- und Zähigkeitswerte eingestellt werden können, sondern aus anlagen- und legierungstechnischen Gründen nur Spannweiten erzielt werden können, bewegen sich die tatsächlichen Werte immer oberhalb der Mindestwerte. Das heißt, die Mindestwerte sind untere Fraktile-Werte einer statistisch verteilten Eigenschaftsverteilung. Die Verteilung variiert von Hersteller zu Hersteller und ist meist nicht bekannt. **Bild 7** verdeutlicht diese Situation am Beispiel der konventionellen Spannungs-Dehnungs-Kurve. Eingezeichnet sind die schematischen Verteilungen der Festigkeitskennwerte für die Streckgrenze R_e und für die Zugfestigkeit R_m .

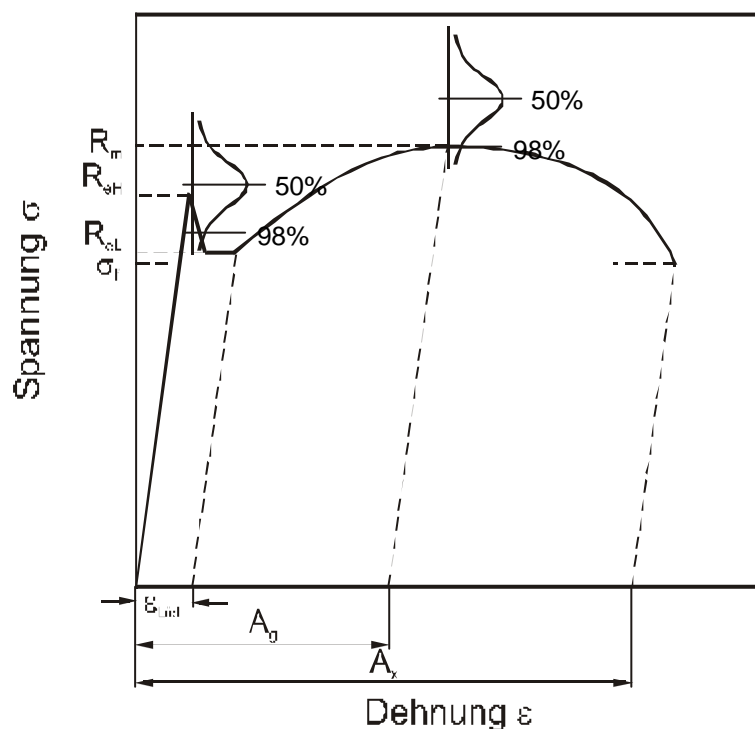


Bild 7: Konventionelle Spannungs-Dehnungs-Kurve als unterer Grenzwert der Verteilung der in der Stahlherstellung erzielten Eigenschaftsspanne

3 Zähigkeit

Verformungsloses Versagen von Bauteilen unterhalb der Fließgrenze (Sprödbbruch) kann durch die Festigkeit des Werkstoffes nicht allein erfaßt werden. Bei dieser Versagensart ist die Zähigkeit des Werkstoffes die bestimmende Eigenschaft und somit von maßgebender Bedeutung für die Tragfähigkeit von Bauteilen aus Stahl. **Bild 8** zeigt ein typisches Beispiel für einen bei tiefer Temperatur erzeugten Sprödbbruch. Zuvor wurde in das 80 mm dicke Blech eines S460 Feinkornstahls ein

halb-ellipsenförmiger Ermüdungsanriss durch zyklische Beanspruchung bei Raumtemperatur eingebracht. Prüftemperatur war -110°C , was für die Zähigkeit diese Stahls spricht. Die Zähigkeit kann als ein Maß für das Verformungsvermögen eines Werkstoffes bei äußeren Belastungen gesehen werden. Mit steigender Zähigkeit nimmt das Vermögen zur plastischen Verformung zu, so daß im Bauteil auftretende Spannungsspitzen abgebaut werden können.

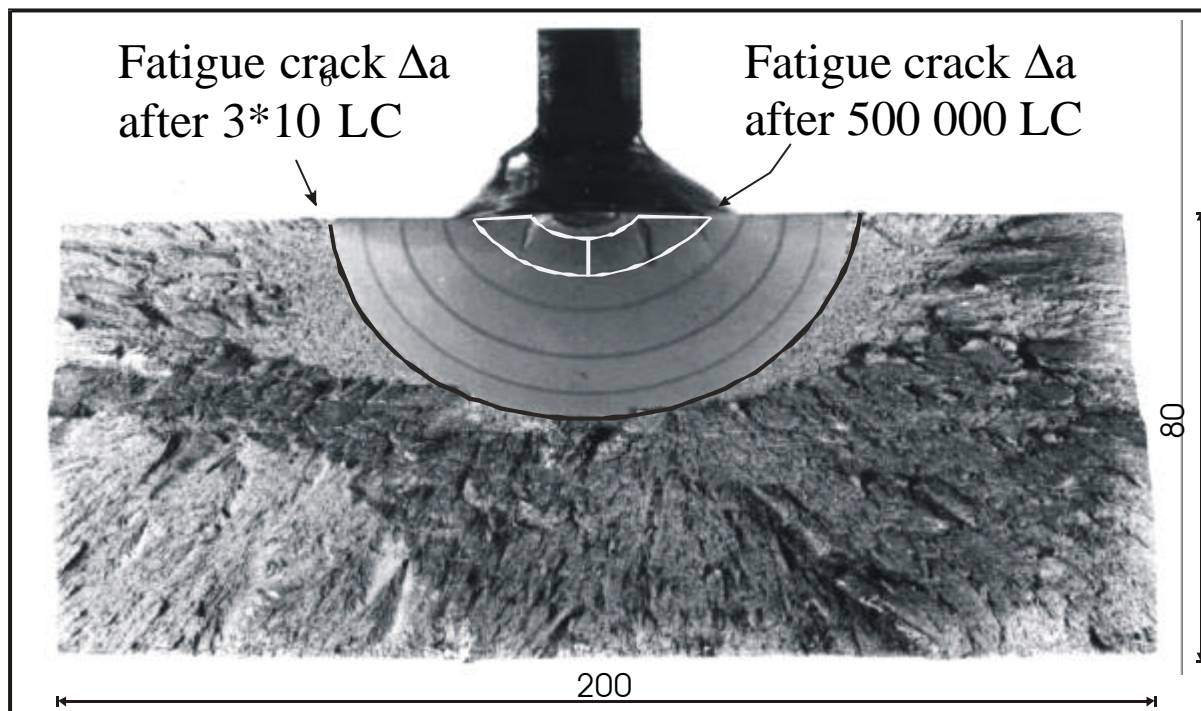


Bild 8: Spröbruchfläche eines Feinkornstahls nach vorherigen Ermüdungsanriss bei Raumtemperatur und Prüfung bei $T = -110^{\circ}\text{C}$.

Die Zähigkeit ist besonders dann von Bedeutung, wenn große Querschnittsänderungen oder auch Fehler im Bauteil mit den daraus resultierenden lokalen Spannungsüberhöhungen auftreten. Sie muß dabei allgemein so groß sein, daß die Tragfähigkeit eines Bauteils unter Betriebsbedingungen jederzeit gewährleistet ist. Darüber hinaus muß für eine sichere Konstruktion gefordert werden, daß ein Bauteil nach Überschreiten der Gebrauchsfähigkeit nicht schlagartig versagt. Es muß in diesem Falle eine ausreichende, durch die Zähigkeit des Werkstoffes beeinflusste Sicherheitsreserve vorhanden sein.

Für herkömmliche Bauteile wird hinsichtlich der verwendeten Werkstoffe mindestens gefordert, daß die Zähigkeit ausreicht, um sprödes Bauteilverhalten, charakterisiert durch ein Versagen bei Belastungen unterhalb der Fließgrenze des belasteten Querschnittes, auszuschließen.

Zur Prüfung des Zähigkeitsverhaltens wurden verschiedene Prüfverfahren entwickelt, von denen die wichtigsten in den nachfolgenden Kapiteln erläutert werden. Einige Prüfverfahren beschränken sich auf die qualitative Beurteilung der Werkstoffe, während andere Verfahren die Prüfung unter möglichst betriebsnahen Beanspruchungen ermöglichen. Hierbei werden auch die auf den Spaltbruch wirkenden Einflußgrößen wie Temperatur, Beanspruchungsgeschwindigkeit und Spannungszustand berücksichtigt. Als Bewertungsmerkmale dienen allgemein Größen wie Bruchaussehen, Energieaufnahme, Verformung oder Rißauffang-

vermögen. Dabei muß die Übertragbarkeit der Ergebnisse von Prüfverfahren auf Bauteile berücksichtigt werden.

3.1 Bruchmechanismen

Der Prozeß des Entstehens und Ausbreitens von Rissen umfaßt verschiedene Stadien, die begrifflich eindeutig zu trennen sind.

- *Rißbildung* ist das Entstehen eines Risses in einem bis dahin rißfreien Werkstoffbereich. Die Länge des entstehenden Risses kann in atomaren, mikroskopischen oder makroskopischen Größenordnungen liegen.
- *Rißeinleitung (Rißinitiierung)* ist der Übergang von einem ruhenden zu einem bewegten Riß. Die Rißeinleitung kann durch eine statisch oder dynamisch wirkende Beanspruchung hervorgerufen werden.
- *Rißausbreitung* oder *Rißfortschritt* ist die Vergrößerung eines Risses, wobei das Endstadium der Rißausbreitung im allgemeinen der Bruch ist. Der Oberbegriff Rißausbreitung ist unabhängig von Art, Mechanismus und Ursache des Vorgangs der Rißvergrößerung zu verwenden.
 - Die *stabile Rißausbreitung* erfolgt unter ständigem Energieverbrauch und führt in den meisten Fällen makroskopisch zu einem Zähbruch. Als das die Zuverlässigkeit einer statisch belasteten Konstruktion bestimmende kritische Ereignis kann entweder der Beginn oder ein bestimmter Betrag der stabilen Rißausbreitung angesehen werden.
 - Die *instabile Rißausbreitung* vollzieht sich unter Energiefreisetzung. Sie verläuft mit hoher Geschwindigkeit und hat makroskopisch im allgemeinen einen Spröbruch zur Folge. Sie kann auch nach vorheriger stabiler Rißausbreitung eintreten.
- Das *allmähliche (subkritische) Rißwachstum* ist ein sich über einen längeren Zeitraum erstreckender Prozeß der stabilen Rißausbreitung, der charakteristisch ist für den Schwingbruch, den Kriechbruch und den Bruch infolge Spannungsrißkorrosion. Das Rißwachstum kann durch beschleunigte stabile oder instabile Rißausbreitung beendet werden.

Die sich aus den verschiedenen Möglichkeiten der Rißausbreitung ergebenden Versagenswege 1 bis 8 sind in **Bild 9** schematisch dargestellt. Der Weg 2-4 beispielsweise kennzeichnet folgendes Bruchverhalten: Ein vorhandener Anriß breitet sich zunächst stabil aus und geht beim Erreichen einer kritischen Rißgröße in das instabile Stadium über. Der Vorgang der Rißausbreitung wird entweder durch das Eintreten eines Spröbruchs (2-4-1) oder durch erneuten Stillstand des Risses (2-4-1-8) abgeschlossen.

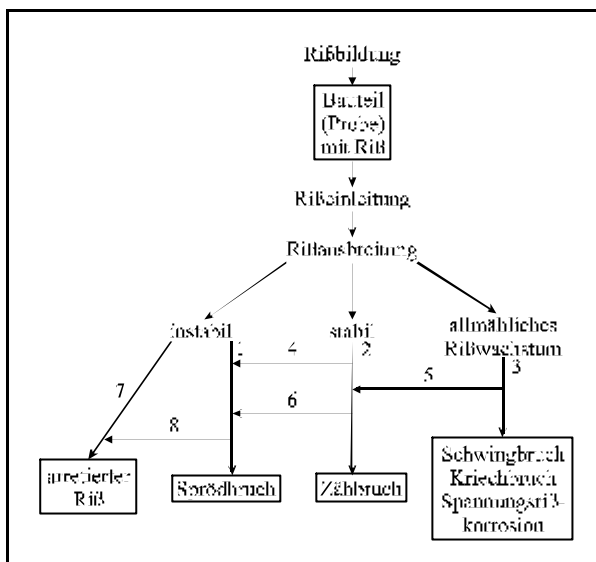


Bild 9: Möglichkeiten der Rißausbreitung

3.2 Bruchmechanismen und Brucharten

Zur Beschreibung des makroskopisch zu beobachtenden Bruchverhaltens werden die Begriffe Sprödbruch und Zähbruch, auch duktiler Bruch genannt, verwendet. Diese Begriffe charakterisieren das Bauteilverhalten. Die Begriffe Spröd- und Zähbruch sind jedoch von den in Kapitel 1.2.2 geklärten Begriffen Spaltbruch und Gleitbruch zu trennen. Diese beschreiben das mikroskopische Bruchverhalten, den Vorgang der lokalen Werkstofftrennung.

Unter Sprödbruch versteht man einen Bruch bei elastischer Verformung oder makroskopisch sehr kleinen plastischen Verformungen. Im rechten Teilbild von **Bild 10** ist eine Probe abgebildet, die spröde versagt hat. Die Probenränder sind unverformt, das heißt, daß keine plastische Verformung vor dem Bruch stattgefunden hat.

Der Begriff Zähbruch beschreibt den Bruch nach makroskopisch größeren plastischen Verformungen. Im linken Teilbild von **Bild 10** ist ein extremer Zähbruch dargestellt. In dem hier gezeigten Beispiel liegt eine große plastische Verformung vor.

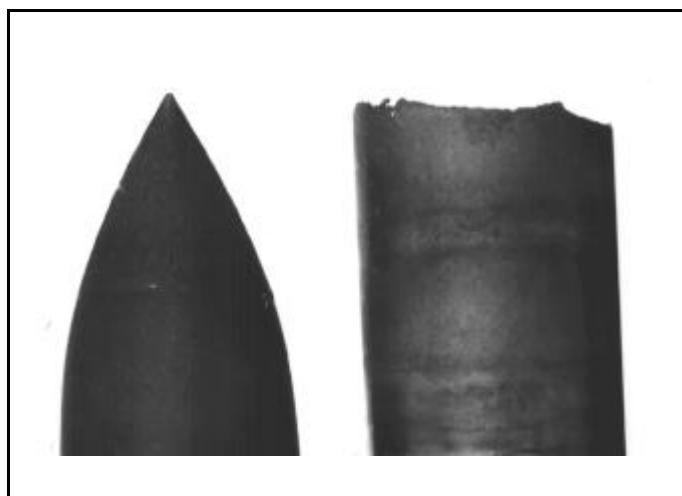


Bild 10: Brucharten Zähbruch (links) und Sprödbruch (rechts)

3.3 Beurteilung des Bruchverhaltens mit Hilfe von Übergangstemperaturen

Die Abgrenzung der verschiedenen Brucharten und Bruchmechanismen voneinander geschieht durch die Ermittlung von Übergangstemperaturen. Das Verformungs- und Bruchverhalten gekerbter und rißbehafteter Proben aus ferritischen Stählen in Abhängigkeit von der Temperatur ist schematisch in **Bild 11** dargestellt. Dieses Verhalten findet sich unabhängig von Geometrie und Fehlerart qualitativ immer in gleicher Weise. Die absoluten Werte der ertragbaren Spannungen und Dehnungen sowie die Lage der Übergangstemperaturen werden aber deutlich von der Proben- und Fehlergeometrie beeinflusst.

In dieser Darstellung wird im **Teilbild 1** zwischen den mikroskopischen Bruchmechanismen Spaltbruch und Gleitbruch unterschieden. Von tiefen Temperaturen ausgehend tritt zuerst 100 % reiner Spaltbruch auf der Bruchfläche auf. Mit steigender Temperatur treten vor der Rißspitze erste Anteile von Gleitbruch auf, nach kurzem stabilem Rißwachstum versagt der restliche Querschnitt durch Spaltbruch. Mit weiter steigenden Temperaturen erhöht sich der Anteil von Gleitbruch auf der Bruchfläche.

Im unteren **Teilbild 4** wird die Definition der makroskopischen Begriffe Sprödbbruch und Zähbruch in Verbindung mit den typischen Last-Verformungs-Kurven, die in **Teilbild 3** dargestellt sind, verdeutlicht.

Teilbild 2 zeigt die Bruchspannung σ_{Bruch} , die Fließspannung $\sigma_{\text{Fließen}}$ und die Maximalspannung σ_{max} in Abhängigkeit von der Temperatur. Dieses Teilbild zeigt keine kontinuierlich aufgenommene Kurve, sondern die miteinander verbundenen Messwerte, die bei einzelnen Versuchen unter Zugbeanspruchung bei verschiedenen Temperaturen ermittelt werden. Im Diagramm im Teilbild 2 sind zusätzlich die plastisch verformten Bereiche im Querschnitt bei verschiedenen Temperaturen dargestellt, so wie sie bei Versagen in der Probe vorliegen. Im **Bild 11** werden außerdem verschiedene Übergangstemperaturen zur Unterscheidung des Verformungs- und Bruchverhaltens von Bauteilen gezeigt.

Als Sprödbbruchübergangstemperatur T_{gy} („general yield“=allgemeines Fließen) wird die Temperatur bezeichnet, bei der, ausgehend von tiefen Temperaturen, erstmals der Nettoquerschnitt (verbleibender Probenquerschnitt in einer durch einen Riß geschwächten Probe) vor dem Bruch vollständig plastifiziert ist. T_{gy} stellt somit makroskopisch gesehen die Grenze zwischen sprödem und duktilem Verhalten dar. Unterhalb von T_{gy} erfolgt das Versagen bei nur kleinen plastischen Zonen unterhalb der Fließgrenze. Bei Temperaturen oberhalb von T_{gy} erfolgt der Bruch weiterhin, mikroskopisch gesehen, als Spaltbruch, makroskopisch jedoch als Zähbruch. Dies ist bis zum Erreichen von T_i der Fall.

Den Übergang der mikroskopischen Bruchmechanismen Spaltbruch und Gleitbruch kennzeichnet die Übergangstemperatur T_i . Sie ist die tiefste Temperatur, bei der vor der Rißspitze Anteile von stabilem Rißwachstum auf der Bruchoberfläche sichtbar sind. T_i ist bestimmt durch die Werkstoffzähigkeit und die Beanspruchungssituation im Bauteil (Geometrie, Fehlergröße und Beanspruchungsgeschwindigkeit) und kann daher auch unterhalb T_{gy} liegen. Bei weiterer Temperaturerhöhung nimmt die Verformung zu und die maximal erreichbaren Spannungen liegen aufgrund der einsetzenden Werkstoffverfestigung oberhalb der Fließspannung. Die Temperatur, bei der erstmals nach der maximal ertragbaren Last, auch plastische Kollapslast genannt, wieder ein Abfall gefunden wird, wird mit der Temperatur T_m beschrieben. Der Anteil stabilen Rißwachstums an der Gesamtfläche nimmt mit erhöhter Temperatur ständig zu, bis schließlich das Versagen der Probe vollständig durch Gleitbruch erfolgt. Diese Temperatur wird mit T_{max} gekennzeichnet. T_{lc} ist die Temperatur, bis zu der die linear-elastische Bruchmechanik anwendbar ist.

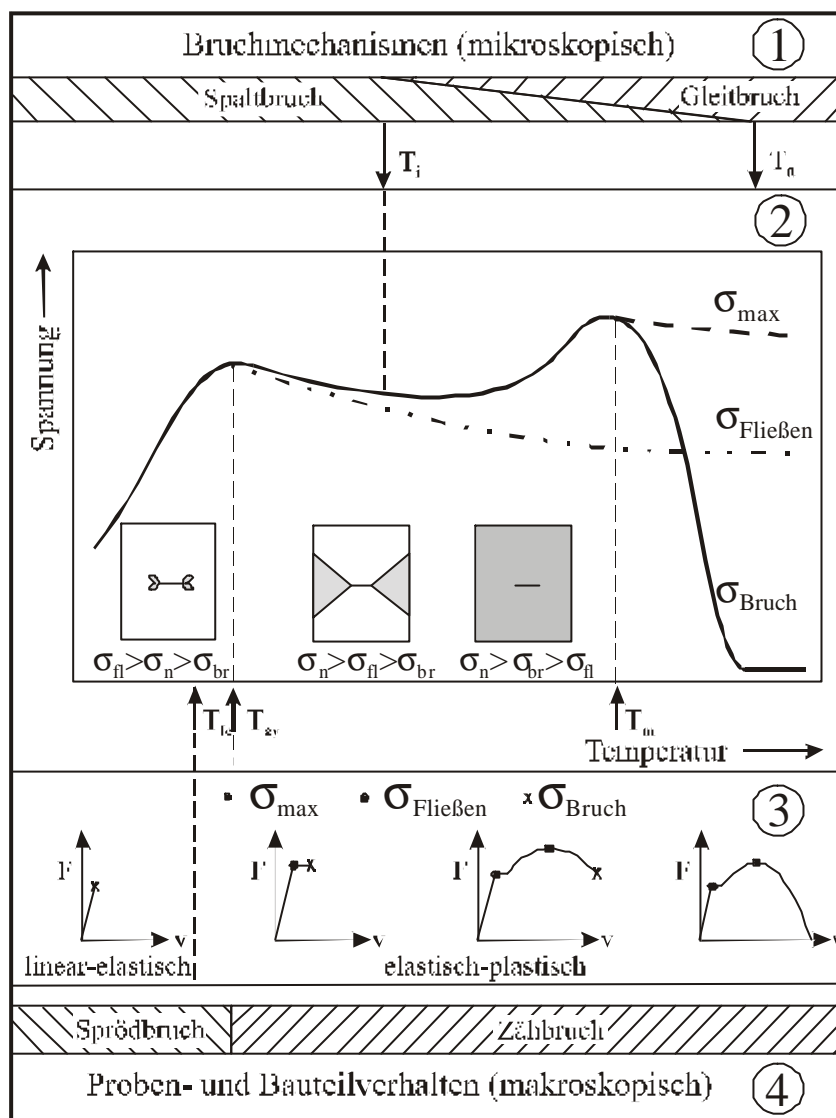


Bild 11: Schematische Kennzeichnung des Verformungs- und Bruchverhaltens von Proben und Bauteilen mit Übergangstemperaturen

Zur Festlegung von Übergangstemperaturen wurden verschiedene Arten von Versuchen entwickelt. In den nachfolgenden Kapiteln wird der Kerbschlagbiegeversuch als wichtigster Vertreter bei der Qualifizierung und Auswahl von Stählen beschrieben:

- Kerbschlagbiegeversuch
- Bruchmechanikversuch
- Großzugversuch
- Rissarrestversuche

3.4 Kerbschlagbiegeversuch

Der Kerbschlagbiegeversuch ist das am häufigsten angewandte Verfahren zur Ermittlung von Zähigkeitseigenschaften. Die Gründe hierfür sind:

- kostengünstige Probenherstellung und einfache Versuchsdurchführung
- genormtes Standardprüfverfahren

Der Nachweis einer Mindestkerbschlagzähigkeit bei bestimmten Temperaturen wird in vielen Regelwerken für Stahlgüten als Klassifizierungskriterium verwendet. Aus der Einfachheit des Versuches resultieren aber auch die Nachteile:

Es können nur qualitative Kennwerte ermittelt werden d. h., die ermittelten Kennwerte sind geometrieabhängig und nicht unmittelbar auf Bauteile desselben Werkstoffes übertragbar. Es ist nur der Vergleich von verschiedenen Werkstoffen untereinander möglich.

3.4.1 Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung

Der Kerbschlagbiegeversuch nach CHARPY ist in der europäischen Norm DIN EN 10045 beschrieben.

Bei der Prüfung wird eine in der Mitte gekerbte Probe, die auf zwei Auflagern und gegen zwei Widerlager liegt, unter den nachfolgend beschriebenen Bedingungen mit einem Pendelhammer in einem einzigen Schlag durchgeschlagen. Die dabei verbrauchte Schlagarbeit wird in Joule [J] gemessen, die bei Bezugnahme auf die Fläche am Kerb auch als Kerbschlagzähigkeit a_k [J/cm²] bezeichnet wird. Diese verbrauchte Schlagarbeit ist ein Maß für die Widerstandsfähigkeit der Werkstoffe gegen schlagartige Beanspruchung. Ein Pendelschlagwerk mit Probe ist in **Bild 12** dargestellt.

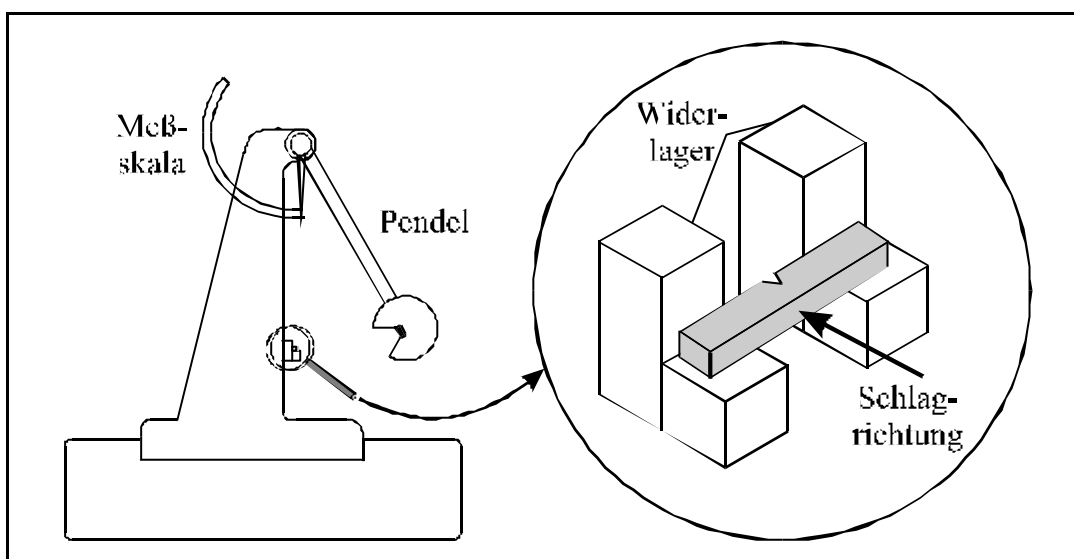


Bild 12: Pendelschlagwerk

In der Norm sind zwei Probenformen mit Rund- und Spitzkerb festgelegt (**Bild 13**). Die Normal-Probe ist 55 mm lang und hat einen quadratischen Querschnitt von 10 mm Seitenlänge. Sie besitzt in der Mitte ihrer Länge eine Kerbe. Bei Blechdicken kleiner als 10 mm sind auch Untermaßproben möglich. Bei von Raumtemperatur abweichenden Prüftemperaturen wird die Probe so lange in einer Temperiereinrichtung gelagert, bis sichergestellt ist, daß die angestrebte Prüftemperatur in der gesamten Probe erreicht ist.

Versuchsdurchführung

Der Pendelhammer fällt von einer Ausgangshöhe gegen die Probe, so daß die Finne des Pendelhammers auf die der gekerbten Seite gegenüberliegende Fläche auftrifft. Nach dem Zerschlagen der Probe steigt der Pendelhammer auf eine bestimmte Höhe, die ein Maß für die verbrauchte Schlagarbeit ist. Je höher der Hammer steigt, desto weniger Energie wurde für das Zerschlagen der Probe verbraucht.

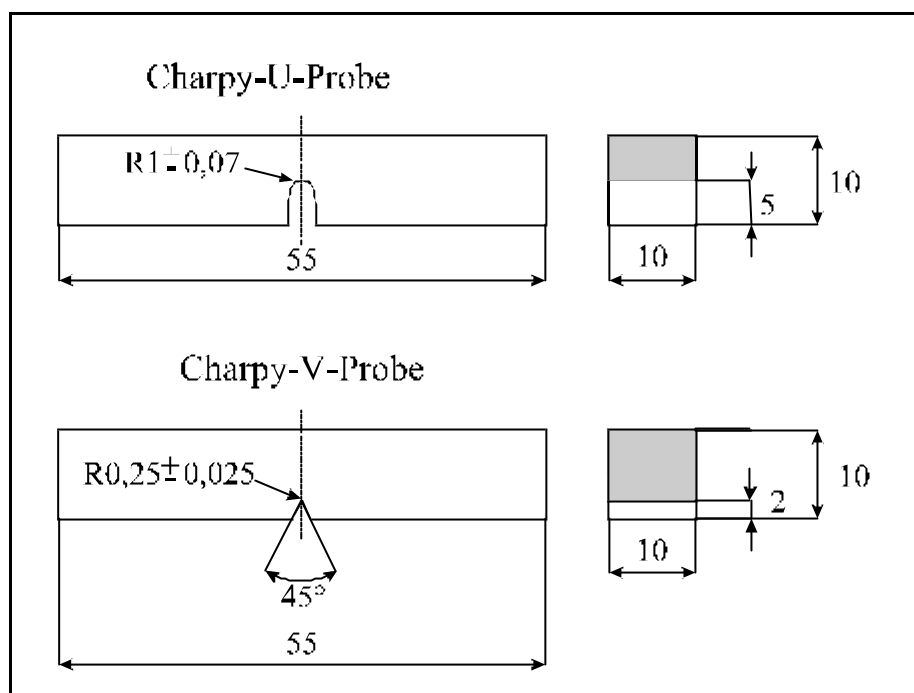


Bild 13: Probenformen nach DIN EN 10045

Neben dem üblicherweise zur Durchführung von Kerbschlagbiegeversuchen benutzten Pendelschlagwerk können auch Rotationsschlagwerke verwendet werden. Zum Zerschlagen der Proben wird statt des Pendels eine rotierende Scheibe großer Masse, an der eine versenkbare Schlagnase angebracht ist, verwendet. Durch unterschiedliche Rotationsgeschwindigkeiten und Änderung der Scheibenmasse können unterschiedliche Verformungsgeschwindigkeiten eingestellt werden.

3.4.2 Kennwerte des Kerbschlagbiegeversuchs

Die Kerbschlagarbeit ergibt in Abhängigkeit von der Temperatur für einen ferritischen Stahl einen S-förmigen Kurvenverlauf (**Bild 14**).

Diese Kurve lässt sich in drei Bereiche unterteilen:

- *Tieflage*: Der Bruch erfolgt als reiner Spaltbruch mit geringer oder ohne plastische Verformung (**Bild 14, links**).
- *Übergangsbereich*: Mit steigender Temperatur verringert sich der Anteil an Spaltbruch auf der Bruchfläche. Gleichzeitig nimmt der Gleitbruchanteil und die Kerbschlagarbeit entsprechend zu (**Bild 14, Mitte**).
- *Hochlage*: Der Bruch erfolgt nach plastischer Verformung unter großer Arbeitsaufnahme vollständig als Gleitbruch (**Bild 14, rechts**).

Die Kennzeichnung des Übergangsverhaltens erfolgt i. a. mit Hilfe von Übergangstemperaturen $T_{\bar{u}}$. Da sich der Übergangsbereich über ein größeres Temperaturintervall erstreckt, gibt es keine allgemeingültige Definition der Übergangstemperatur. Es werden folgende Kriterien benutzt:

- Temperatur, bei der ein bestimmter Wert der Kerbschlagarbeit erreicht wird, z. B. 27 J oder 40 J: $T_{27\text{ J}}$; $T_{40\text{ J}}$
- Temperatur, bei der die Hälfte der Kerbschlagarbeit in der Hochlage erreicht wurde. Bei dieser Übergangstemperatur wird also kein absoluter Wert der Kerbschlagarbeit gefordert, sondern die Höhe der Hochlage mitberücksichtigt: $T_{AVmax/2}$

- Temperatur, bei der 50 % Gleitbruchanteil auf der Bruchfläche vorliegt: FATT 50 (Fracture Appearance Transition Temperature 50 % Shear-Fracture)

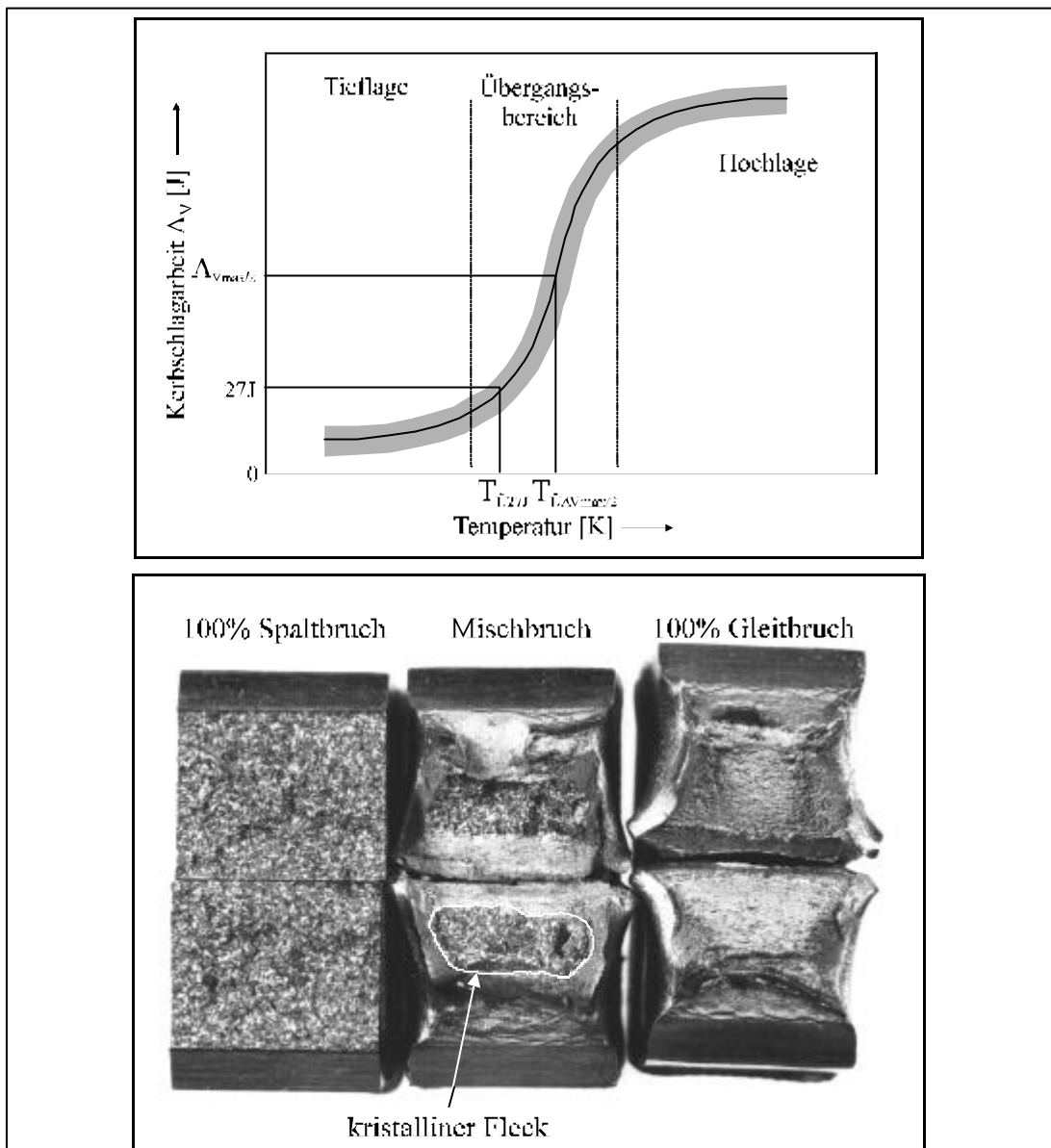


Bild 14: Kerbschlagarbeit-Temperatur-Kurve (oben) und Bruchflächen von Kerbschlagbiegeproben, von links: Tieflage, Übergangsbereich, Hochlage

Bei der Ermittlung einer Kerbschlagarbeit-Temperatur-Kurve findet man besonders im Übergangsbereich eine starke Streuung der Werte, die in die Betrachtung mit einbezogen werden muß (**Bild 14**). Verursacht wird dies durch lokale Unterschiede in der Mikrostruktur.

3.4.3 Anwendung des Kerbschlagbiegeversuch als Qualitätskriterium

Der Kerbschlagbiegeversuch ist trotz der nicht auf das Bauteil übertragbaren Ergebnisse weit verbreitet. Der Nachweis einer bestimmten Schlagarbeit bei einer festgelegten Temperatur wird als Abnahmekriterium für Stahl-Liefernormen verwendet. Auch für Schiffstähle zeigen die Tabellen im Anhang die jeweiligen Mindestanforderungen an die Schlagarbeit bei einer festgelegten Temperatur in Abhängigkeit von der Stahlsorte. Wie bei der Festigkeit, können bei der Stahlherstellung kein exakten Werte eingestellt werden sondern in Abhängigkeit der Legierungszusammensetzung und des gewählten Herstellungsverfahrens werden bestimmte Spannweiten erzielt, so dass dem Endverbraucher jeweils höhere Zähigkeiten als die geforderte Mindestzähigkeit ausgeliefert werden. Diese Aussage gilt jedoch nicht für Grade A Stahl, weil hier überhaupt keine Anforderungen an die Zähigkeit gestellt werden. **Bild 15** zeigt aus einer Untersuchung an Schiffstähle eine Gegenüberstellung der Anforderungen an die T_{27J} Temperatur und die gefundenen Werte innerhalb einer Festigkeitsstufe.

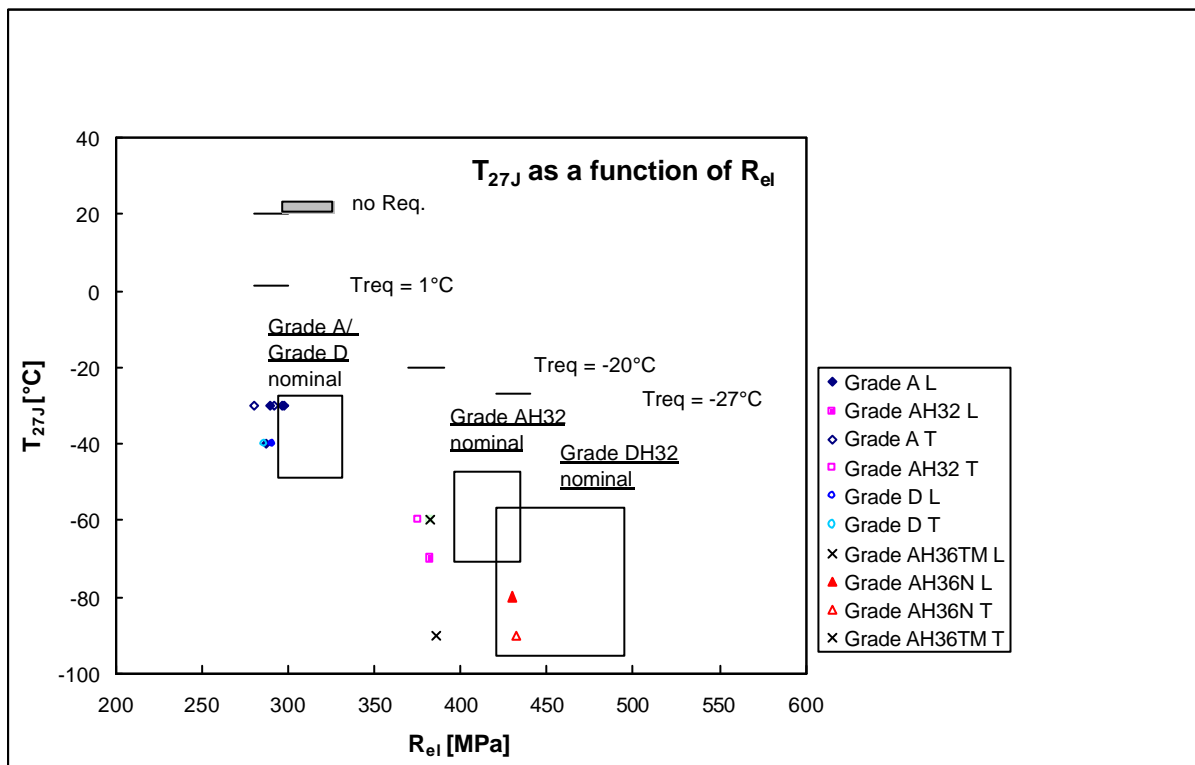
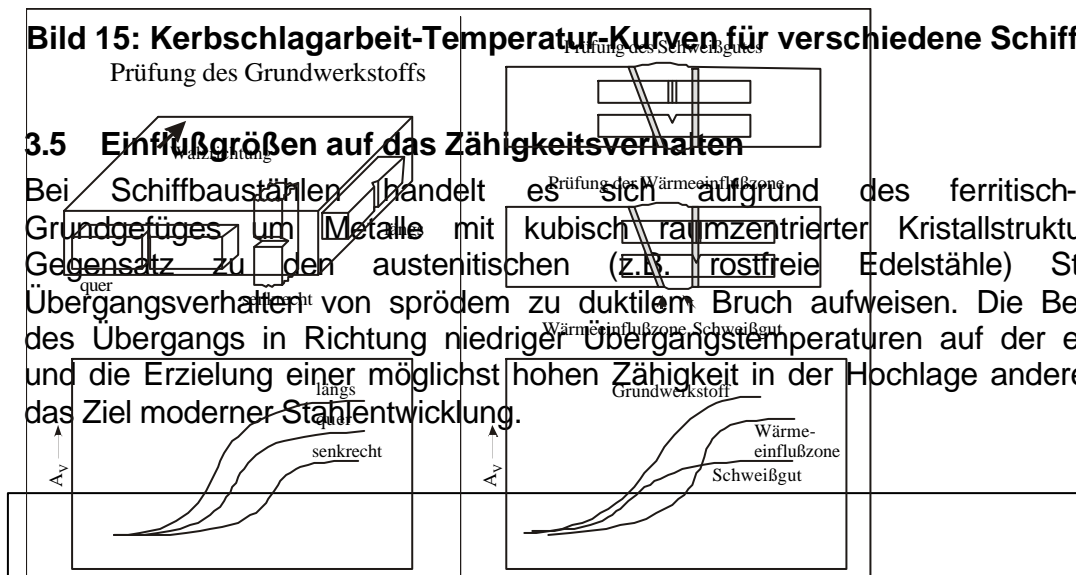


Bild 15: Kerbschlagarbeit-Temperatur-Kurven für verschiedene Schiffbaustähle

3.5 Einflußgrößen auf das Zähigkeitsverhalten

Bei Schiffbaustählen handelt es sich aufgrund des ferritisch-perlitischen Grundgefüges um Metalle mit kubisch raumzentrierter Kristallstruktur, die im Gegensatz zu den austenitischen (z.B. rostfreie Edelstähle) Stählen ein Übergangverhalten von sprödem zu duktilem Bruch aufweisen. Die Beeinflussung des Übergangs in Richtung niedriger Übergangstemperaturen auf der einen Seite und die Erzielung einer möglichst hohen Zähigkeit in der Hochlage andererseits sind das Ziel moderner Stahlentwicklung.



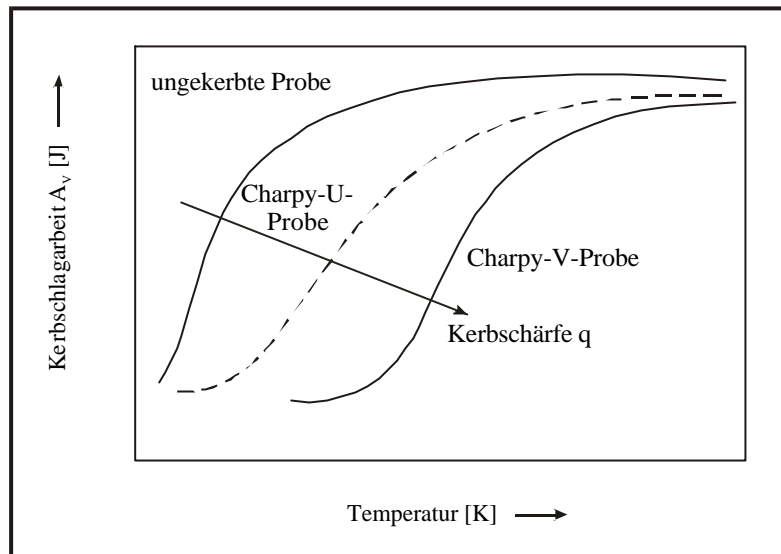


Bild 16: Einfluß der Probenlage relativ zur Walzrichtung und relativ zur Schweißverbindung (oben) und Einfluss der Kerbschärfe auf die Kerbschlagarbeits-Übergangs-Kurve (schematisch).

Bei welcher Temperatur der Wechsel des Bruchmechanismus stattfindet, wird durch „äußere Einflußgrößen“ (Temperatur, Belastungsgeschwindigkeit, Spannungszustand) sowie verschiedene innere Einflußgrößen bestimmt. Unter dem Begriff „innere Einflußgrößen“ wird dabei das Gefüge, d. h. Legierungszusammensetzung, Korngröße, Versetzungsdichte usw., verstanden. Von den äußeren Einflussgrößen soll insbesondere der Einfluß der Probenlage, der Kerblage in geschweißten Proben und der Einfluss der Kerbschärfe hier diskutiert werden (**Bild 16**).

Beim Walzen kommt es zu einer Gefügestreckung in Walzrichtung, welche eine Anisotropie der Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften zur Folge hat. Aus diesem Grunde kommt der Auswahl der Kerblage besondere Bedeutung zu, wie **Bild 16** verdeutlicht. So ergeben Proben die längs zur Walzrichtung entnommen werden die besten Resultate.

Beim Schweißen wird lokal eine Schmelze erzeugt und in den angrenzenden Bereichen kommt es aufgrund der Wärmebeeinflussung zu verschiedenen Gefügereaktionen, die das Ausgangsgefüge verändern. Im allgemeinen reduziert sich insbesondere in der sogenannte Wärmeeinflusszone die Werkstoffzähigkeit aufgrund von Grobkornbildung am stärksten, was **Bild 16, linkes Teilbild oben**, verdeutlicht.

Auch die Kerbschärfe hat einen starken Einfluss auf das Ergebnis der Zähigkeitsprüfung, **Bild 16, unten**. Heutzutage wird jedoch im allgemeinen die Spitzkerbprobe verwendet.

Weiter ist der Einfluss hoher Beanspruchungsgeschwindigkeiten zu erwähnen, weil bei hohen Dehnraten die Übergangstemperatur zu höheren, das heißt ungünstigeren Werten verschoben wird.

3.6 Beurteilung der Bauteilsicherheit anhand der Werkstoffzähigkeit

Die Beurteilung der Bauteilsicherheit hinsichtlich des Bruchverhaltens erfolgt im Schiffbau erfahrungsbasiert anhand von Zähigkeitsanforderungen an die Kerbschlagarbeit, siehe Tabellen im Anhang.

Die Bemessungsphilosophie im Schiffbau zur Vermeidung von katastrophalen Schiffsunglücken ist an sich eine Rissarrestphilosophie. Sie geht davon aus, dass in Schiffen ermüdungsbedingte Anrisse entstehen können die nach unterkritischem ermüdungsbedingtem Wachstum in kritische instabil wachsende Risse umschlagen können. Diese instabil unter Ausnutzung der gespeicherten elastischen Energie wachsenden Risse müssen rechtzeitig gestoppt werden können. Dies geschieht, indem an wichtigen stark gefährdeten Teilen der Schiffskonstruktion sehr viel zähere Stähle eingesetzt werden als zum Beispiel in der Hülle. In solchen Bereich soll der laufende Riss wieder aufgefangen, arretiert werden. Versuch zur Rissarretierung wie der Pellini-Versuch sollen hier nicht diskutiert werden, weil se sich nicht um gängige Abnahmeversuche handelt. Bei der Entwicklung von neuen Stählen und oder Schiffskonstruktionen muss dieser Philosophie jedoch mit Hilfe entsprechender Qualifizierungsversuche des Werkstoffs und der Schweißung Rechnung getragen werden.

4 Zusammenfassung

Die mechanisch-technologischen Eigenschaften Festigkeit und Zähigkeit werden für niedriglegierte Stähle im Schiffbau in den Klassifikationsvorschriften, z.B. GL-Teil 2, für bestimmte Stahlsorten als Mindestwerte festgeschrieben. Dabei sind die Festlegung der absoluten Werte, der Anzahl der Wiederholprüfung pro Stahllos und die Probenlage nicht willkürlich festgelegte Angaben. Sie entspringen meist umfangreichen Untersuchungen zum Bruch- und Verformungsverhalten und werden in Bezug zu Fertigung und Konstruktion zur Gewährleistung von Bauteilsicherheit festgelegt. **Bild 17** zeigt, das Werkstoff, Konstruktion und Bemessung immer einen Zusammenhang bilden, der bei jeder neuen Festlegung von Anforderungswerten oder beim Einsatz neuer bisher nicht erprobter Stähle aufs Neue überprüft werden müssen.

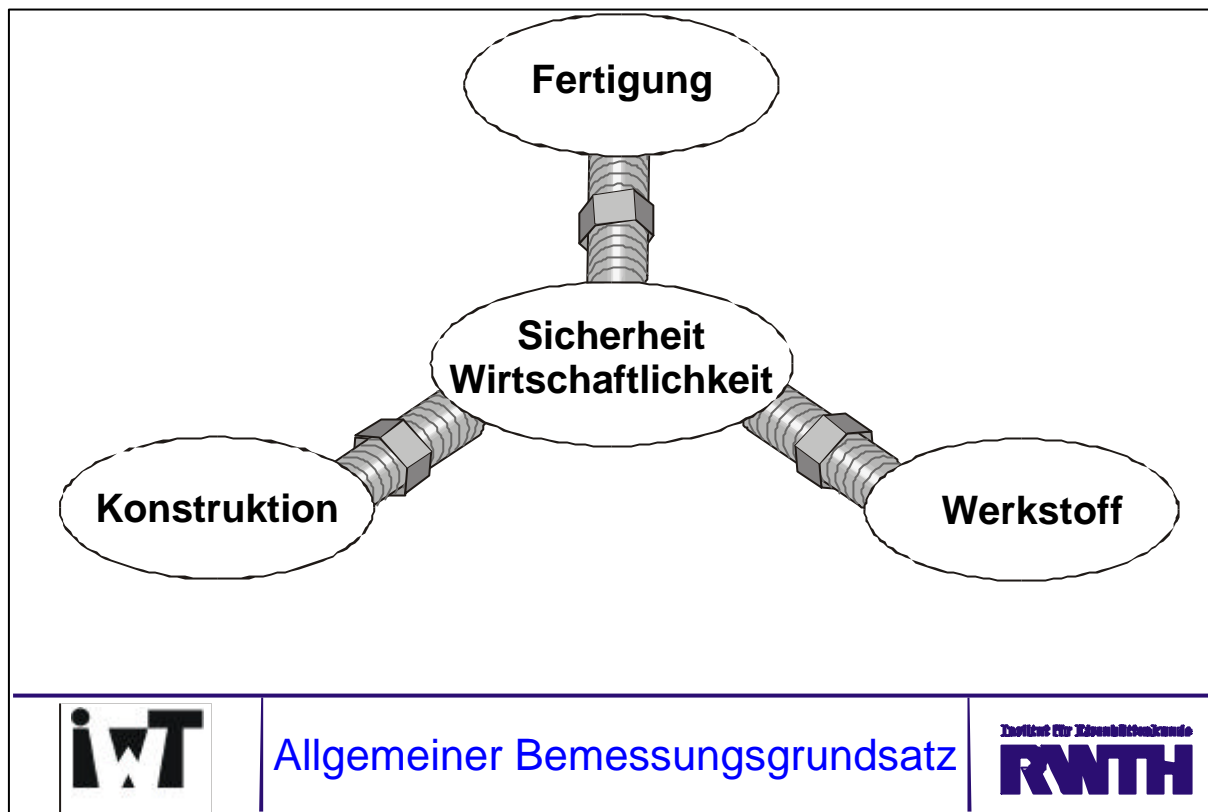


Bild 17: Zusammenspiel von Werkstoff, Konstruktion und Bemessung

Die von den Stahlherstellern gelieferten Stähle müssen die Mindestanforderungen erfüllen, was mit Hilfe von werksseitig durchgeführten Zugversuchen und Kerbschlagbiegeversuchen nachzuweisen ist.

Die Ergebnisse werden in Werkszeugnissen, die dem jeweiligen Produkt eindeutig zugeordnet werden müssen, dokumentiert. Stahllieferanten für den Schiffbau unterliegen zur Gewährleistung der Richtigkeit der Prüfergebnisse der Überwachung der jeweiligen Klassifikationsgesellschaften.

Die Festigkeits- und Zähigkeitskennwerte haben immer einen streuenden Charakter. Sie können bei der Stahlherstellung nicht exakt eingestellt werden. Das heißt, dass die Ergebnisse sich immer oberhalb der geforderten Anforderungen an eine Stahlsorte bewegen. Diese zusätzliche Festigkeit und Zähigkeit findet jedoch im allgemeinen keine direkte Berücksichtigung bei der konstruktiven Bauteilauslegung. Man spricht daher bei den Anforderungswerten auch von Nominalwerten. Die Einhaltung dieser Nominalwerte auch nach einer Weiterverarbeitung durch Schweißen oder Warmrichten oder Kaltformen ist eine wichtige Voraussetzung für die Anwendung der Konstruktionsregeln. Daher ist verständlich, dass Bleche ohne Werkszeugnisse einer besonderen Nachkontrolle unterzogen werden müssen, um festzustellen, ob die Anforderungen erfüllt sind oder nicht. Dabei müssen die gleichen Probenlagen und Prüfvorschriften wie sie für den Stahlhersteller gelten angewendet werden.

Teile dieses Berichtes sind in Absprache mit dem Herausgeber Prof. Bleck vom Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen aus den Praktikumsunterlagen Werkstoffprüfung des Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen entnommen. Für die freundliche Überlassung sei an dieser Stelle gedankt.

6 Weiterführende Literatur

Bleck W. (Hrsg.), Werkstoffprüfung ins Studium und Praxis, Verlag Mainz, Wissenschaftsverlag, 1999

Dahl W. Hrsg., Werkstoffkunde Stahl Band 1, Verlag Stahleisen Düsseldorf, 1984

Merkel M., Thomas K.H.; Taschenbuche der Werkstoffe, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 5.Auflage, 2000

Anhang: Werkstofftabellen des Germanischen Lloyd, aus: Germanischer Lloyd, Klassifikations- und Bauvorschriften, Teil II: Werkstoff- und Schweißtechnik, Teil 1 – Metallische Werkstoffe Kapitel 2: Stahl- und Eiesenwerkstoffe, Abschnitt 1: Bleche, Bábder, Form- und Stabstähle

Anhang

zum Vortrag

Der Werkstoff Stahl, mechanisch-technologische Eigenschaften.

Von

Dr. Peter Langenberg, Ingenieurbüro für
Werkstofftechnik, Aachen

Werkstofftabellen des Germanischen Lloyd,

aus:

**Germanischer Lloyd, Klassifikations- und Bauvorschriften, Teil II:
Werkstoff- und Schweißtechnik, Teil 1 – Metallische Werkstoffe
Kapitel 2: Stahl- und Eisenwerkstoffe, Abschnitt 1: Bleche, Bänder,
Form- und Stabstähle
Ausgabe 1992**

Tabellennummerierung übernommen

**Anmerkung: Die verwendete Ausgabe könnte in der Zwischenzeit
aktualisiert sein, die folgenden Tabellen sind daher nicht für die
Verwendung bei der Bemessung, sondern nur als Beispiele zu
verstehen. Aktualisierte Tabellen können beim Germanischen Lloyd
bezogen werden.**

Abschnitt 1 Bleche, Bänder, Form- und Stabstähle; B Normalfeste und höherfeste Schiffbaustähle

Tabelle 1.6 Mechanische und technologische Eigenschaften für normalfeste Schiffbaustähle mit Erzeugnisdicken bis 50 mm

Gütegrad	Streckgrenze R_{eH} [N/mm ²] min.	Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]	Bruchdehnung A_5 [%] min.	Kerbschlagbiegeversuch		
				Prüftemp. [°C]	KV	
					[J] längs ³⁾ min.	[J] quer ³⁾ min.
GL-A	235	400-490 ¹⁾	22 ²⁾	⁴⁾	-	-
GL-B				0	27 ⁵⁾	20 ⁵⁾
GL-D				-20	27	20
GL-E				-40	27	20

1) Bei Profilen in Gütegrad GL-A darf die Obergrenze der Zugfestigkeit unabhängig von der Erzeugnisdicke nach Vereinbarung mit dem GL überschritten werden.

2) Für Flachproben, deren Dicke der Erzeugnisdicke entspricht, die 25 mm breit sind und 200 mm Messlänge haben, muss die Bruchdehnung folgende Mindestwerte erreichen:

Dicke [mm]	≤ 5	> 5 ≤ 10	> 10 ≤ 15	> 15 ≤ 20	> 20 ≤ 25	> 25 ≤ 30	> 30 ≤ 40	> 40 ≤ 50
Bruchdehnung [%]	14	16	17	18	19	20	21	22

3) Vergleiche hierzu Absatz 6.3.

4) Für den Gütegrad GL-A wird vorausgesetzt, dass dieser eine Kerbschlagarbeit von mindestens 27 J bei 20°C an Längsproben erbringt.

5) Kerbschlagbiegeversuche (Charpy-V-Proben) werden im allgemeinen nicht für Stähle in Gütegrad GL-B bis 25 mm Dicke gefordert.

Tabelle 1.7 Mechanische und technologische Eigenschaften für höherfeste Schiffbaustähle mit Erzeugnisdicken bis 50 mm

Gütegrad	Streckgrenze R_{eH} [N/mm ²] min.	Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]	Bruchdehnung A_5 [%] min.	Kerbschlagbiegeversuch		
				Prüftemp. [°C]	KV	
					[J] längs ²⁾ min.	[J] quer ²⁾ min.
GL-A 32 GL-D 32 GL-E 32	315	440-590	22 ¹⁾	0	31 ³⁾	22 ³⁾
-20				31	22	
-40				31	22	
GL-A 36 GL-D 36 GL-E 36	355	490-620 ⁴⁾	21 ¹⁾	0	34 ³⁾	24 ³⁾
-20				34	24	
-40				34	24	

- 1) Für Flachproben, deren Dicke der Erzeugnisdicke entspricht, die 25 mm breit sind und 200 mm Messlänge haben, muss die Bruchdehnung folgende Mindestwerte erreichen:

Dicke [mm]	> 5		> 10		> 15		> 20		> 25		> 30		> 40	
	≤ 5	≤ 10	≤ 15	≤ 20	≤ 25	≤ 30	≤ 40	≤ 50	≤ 30	≤ 40	≤ 50	≤ 40	≤ 50	
Bruchdehnung [%] GL-A 32/D 32/E 32	14	16	17	18	19	20	21	22	20	21	22	20	21	
GL-A 36/D 36/E 36	13	15	16	17	18	19	20	21	19	20	21	20	21	

- 2) Vergleiche hierzu Absatz 6.3.
 3) Für Stähle der Gütegrade GL-A 32 und GL-A 36 kann bei Abnahmeprüfungen die Anzahl der Kerbschlagbiegeproben verringert werden, wenn dieses vom GL besonders zugelassen ist und gelegentlich stichprobenweise Prüfungen zufriedenstellende Ergebnisse erbringen.
 4) Bei TM-gewalzten Stählen wird eine Unterschreitung des unteren Grenzwertes für die Zugfestigkeit um bis zu 30 N/mm² nicht beanstandet.

Tabelle 1.10 Mechanische und technologische Eigenschaften von normal- und höherfesten Schiffbaustählen für Erzeugnisdicken über 50 bis 100 mm

Gütegrad	Streckgrenze R_{eH} [N/mm ²] min.	Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]	Bruchdehnung A_5 [%] min.	Mittelwert der Kerbschlagarbeit bei – 40°C für Dicken t in [mm] [J]min ¹⁾	
				50 < t ≤ 70	70 < t ≤ 100
GL-E	235	400-490	22	(L) 34 (Q) 24	(L) 41 (Q) 27
GL-E 32	315	440-590	22	(L) 41 (Q) 27	(L) 46 (Q) 31
GL-E 36	355	490-620 ²⁾	21	(L) 41 (Q) 27	(L) 50 (Q) 34

1) Probenlage: (L) längs und (Q) quer zur Hauptwalzrichtung

2) Bei TM-gewalzten Stählen wird eine Unterschreitung des unteren Grenzwertes für die Zugfestigkeit um bis zu 30 N/mm² nicht beanstandet.

Tabelle 1.12 Mechanische und technologische Eigenschaften für Schiffbaustähle mit Mindeststreckgrenze von 390 MPa und Erzeugnisdicken bis 50 mm

Gütegrad	Streckgrenze R_{eH} [N/mm ²] min.	Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]	Bruchdehnung A_5 [%] min.	7 Kerbschlagbiegeversuch	
				8 Prüfte mp. [°C]	Mittelwert ¹⁾ der Schlagarbeit [J] min.
GL-A 40 GL-D 40 GL-E 40	390	510-650 ²⁾	20	0 -20 -40	(L) 41 (Q) 27
<p>1) Probenlage: (L) längs und (Q) quer zur Hauptwalzrichtung</p> <p>2) Bei TM-gewalzten Stählen wird eine Unterschreitung des unteren Grenzwertes für die Zugfestigkeit um bis zu 30 N/mm² nicht beanstandet.</p>					

Tabelle 1.14 Mechanische und technologische Eigenschaften von unlegierten Baustählen für geschweißte Konstruktionen für Erzeugnis-dicken bis 50 mm

Güte-grad	Streckgrenze R_{eH} [N/mm ²] min.	Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]	Bruchdehnung A_5 [%] min.	9 Kerbschlagbiege- -versuch		
				10 Prüf- tem- p. [°C]	Mittelwert ¹⁾ der Schlag- arbeit [J] min.	
					(L)	(Q)
GL-F 32	315	440-590	22	-60	31	22
GL-F 36	355	490-620 ²⁾	21		34	24
GL-F 40	390	510-650 ²⁾	20		41	27

1) Probenlage: (L) längs und (Q) quer zur Hauptwalzrichtung
2) Bei TM-gewalzten Stählen wird eine Unterschreitung des unteren Grenzwertes für die Zugfestigkeit um bis zu 30 N/mm² nicht beanstandet.

Tabelle 1.16 Mechanische und technologische Eigenschaften von hochfesten vergüteten Stählen für geschweißte Konstruktionen für Erzeugnisdicken bis 70 mm Dicke

Gütegrad	Streckgrenze R_{eH} [N/mm ²] Min. bei Dicken		Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]	Bruchdehnung A_5 quer ²⁾ [%] min.	Kerbschlagbiegeversuch		
	≤ 50mm	> 50mm ≤ 70mm			Prüf- temp. [°C]	KV	
						[J] längs min.	[J] quer min.
GL-D 420 GL-E 420 GL-F 420	420	400	530-680	18	-20 -40 -60	41	27
GL-D 460 GL-E 460 GL-F 460	460	440	560-710	17	-20 -40 -60	41	27
GL-D 500 GL-E 500 GL-F 500	500	480	600-750	16	-20 -40 -60	41	27
GL-D 550 GL-E 550 GL-F 550	550	530	640-790	16	-20 -40 -60	41	27
GL-D 620 GL-E 620 GL-F 620	620	600	710-860	15	-20 -40 -60	41	27
GL-D 690 GL-E 690 GL-F 690	690	670	770-920	14	-20 -40 -60	41	27

1) Prägt sich im Zugversuch die Streckgrenze R_{eH} nicht aus, gilt die 0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$.

2) Für Längsproben liegen die Anforderungen an die Bruchdehnung A_5 um 2%-Einheiten höher.