

Grundpraktikum

Versuchsreihe: Materialwissenschaft

Schlagartige Belastung

B305

Stand: 10.03.2014

Ziel des Versuchs:

Ermittlung der Temperatur für den Übergang vom zähen zum spröden Bruchverhalten unter verformungsbehindernden Beanspruchungsbedingungen, einer mehrachsigen Zugspannungen und erhöhter Beanspruchungsgeschwindigkeit.

Inhalt

1	Einleitung	2
2	Grundlagen	2
2.1	Prüfverfahren	2
2.2	Brucharten	3
2.3	Sprödbbruch	4
2.4	Einfluss auf Sprödverhalten	6
2.4.1	Einfluss mehrachsiger Zugspannungen	6
2.4.2	Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit	7
2.4.3	Einfluss der Gefügeausbildung	7
3	Verfahrensprinzip	8
4	Versuchsdurchführung	11
4.1	Geräte	11
4.2	Versuchsmaterial	11
4.3	Versuchsablauf	12
4.4	Messergebnisse	12
5	Versuchsauswertung	12
5.1	Bestimmung der Übergangstemperatur	12
5.2	Diskussion der Messergebnisse	12
6	Literatur	13
7	Abbildungsverzeichnis	13
8	Tabellenverzeichnis	13

1 Einleitung

In den Jahren des Zweiten Weltkrieges wurden im Rahmen des amerikanischen „Emergency Shipbuilding Program“ zahlreiche Stückgutfrachter mit der Bezeichnung „Libertyships“ gebaut. Im Laufe der Zeit wurde klar, dass dieser Schiffstyp schwerwiegende Mängel aufwies. Es zeigte sich zum Beispiel, dass ab einer kritischen Wassertemperatur die Schweißnahtumgebung ein sprödes Bruchverhalten zeigte, was einen unerwarteten Bruch mit der Gefahr des Sinkens zur Folge hatte. Aufgrund der ungewollten Erfahrung wurde ersichtlich, dass metallische Werkstoffe sich grundsätzlich zäh verhalten, sie können jedoch durch verschiedene äußere Einflüsse verspröden, d.h. zum verformungsarmen Bruch tendieren.

Die Versprödung kann ausgelöst werden durch:

- Gefügeveränderungen (Grobkorn, harte Ausscheidungen)
- Einlagerung von Gasen (N₂-Alterung, H₂-Wasserstoffversprödung)
- strahlungsinduzierte Gitterfehler
- Korrosion
- sinkende Temperatur
- verschiedene Beanspruchungsarten

Alle ferritischen Stähle (un- und niedriglegierte Stähle) gehen bei tiefen Temperaturen vom plastischen zum spröden Verhalten über. Dadurch tritt bei kurzzeitiger Überlastung keine energieminimierende plastische Verformung, sondern eine sofortige Werkstofftrennung auf. Die für den Übergang vom zähen zum spröden Verhalten charakteristische Temperatur ist keine werkstoffspezifische Kenngröße, sie wird entscheidend von der Beanspruchung beeinflusst.

2 Grundlagen

2.1 Prüfverfahren

Für die Ermittlung der mechanischen Kennwerte von Werkstoffen ist eine Vielzahl von Verfahren mit den jeweils spezifischen Zieleigenschaften genormt.

- Beim Zug- und Druckversuch wird die genormte Probe mit bekanntem Querschnitt gleichmäßig mit relativ gering ansteigender Kraft in Längsrichtung bis zum Bruch belastet. In der Probe herrscht ein einachsiger Spannungszustand. Aus dem aufgezeichneten Kraft-Weg-Diagramm der Zerreißmaschine kann durch Berücksichtigung des Probenquerschnitts das Verhältnis von Spannung zu Dehnung dargestellt werden. Aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm sind u.a. Zugfestigkeit, Streckgrenze/Dehngrenze und Bruchdehnung zu entnehmen (siehe B502 Spannung und Dehnung, Kap.2, B506 Druckfestigkeit, Kap.2.4.1).

Die Härtemessung liefert bei gleichen Prüfbedingungen vergleichbare Werte. Da Härte und Zugfestigkeit immer die gleiche Tendenz aufweisen, ist eine wechselseitige Umrechnung in bestimmten Grenzen möglich. Die Kenntnis der Härte ist besonders bei verschleißbeanspruchten Bauteilen erforderlich. Die Härtemessung wird deshalb auch

zur Kontrolle der Ergebnisse von Wärmebehandlungen genutzt (siehe. B301 Phasenumwandlung, Kap. 2.3)

In diesem Versuch wird der Kerbschlagbiegeversuch eingesetzt, um die Spröbruchneigung von Werkstoffen zu ermitteln.

Ob sich ein Werkstoff bei Raumtemperatur spröde oder duktil verhält, lässt sich näherungsweise auch aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Zugversuches ableiten. Auch die Bruchflächen zeigen deutliche Unterschiede, da bei sprödem Bruch nur Grenzflächenenergie, beim duktilen Bruch aber zusätzlich Verformungsenergie verbraucht wird.

Die Neigung eines Werkstoffes zur Versprödung wird durch eine Vielzahl innerer und äußerer Faktoren bestimmt, z.B.:

Tabelle 1: Einflüsse auf die Bruchneigung eines Werkstoffes

innere Faktoren	äußere Faktoren
chemische Zusammensetzung	Oberfläche
Verunreinigungen	Korrosion
Gefügeausbildung	Spannungszustand
	Beanspruchungsgeschwindigkeit
	Einsatztemperatur

Für die genormten Prüfungen werden die inneren Faktoren durch die Herstellung als konstant vorausgesetzt. Treten verarbeitungsbedingte Werkstoffveränderungen auf (Beizen, Glühen, Schweißen), sind die genormten Werkstoffkennwerte zu überprüfen. Von den äußeren Faktoren ist die Oberflächengüte vorgeschrieben, Korrosion wird ausgeschlossen. Bei Abweichungen sind gesonderte Versuche erforderlich. Damit erfolgt die Ermittlung der Spröbruchneigung eines Werkstoffes unter Berücksichtigung von

- Spannungszustand
- Belastungsgeschwindigkeit
- Einsatztemperatur

2.2 Brucharten

Beim Bruch eines Werkstoffes erfolgt im Bruchquerschnitt eine irreversible Trennung der interatomaren Bindungen.

Tabelle 2: Arten des Bruches

Spröbruch	Duktilbruch	Mischbruch
Normalspannungen (evt. Schubspannungen) bewirken eine transkristalline Trennung.	Schubspannungen verursachen ein Abgleiten auf Netzebenen mit Werkstofftrennung.	Duktilbruch mit unterschiedlich stark ausgeprägter Restbruchfläche in Form von Sprödrüchen.
Die Bruchflächen verlaufen	Die Bruchflächen verlaufen	

senkrecht Hauptbeanspruchung.	zu	polykristallin in Richtung der maximalen Schubspannung (45° zur Hauptbeanspruchung).	
----------------------------------	----	---	--

2.3 Sprödbbruch

Der Sprödbbruch erfolgt im Gegensatz zum Duktilbruch (oder auch Verformungsbruch) ohne wesentliche plastische Verformung.

Sprödbbruch tritt dann auf, wenn energieminimierende Prozesse nicht oder nicht ausreichend ablaufen können, z.B. in amorphen Werkstoffen unterhalb der Erweichungstemperatur, bei polykristallinen Werkstoffen mit wenig Gleitsystemen oder unbeweglichen Versetzungen.

Die tatsächliche Bruchspannung ist um Größenordnungen geringer als die aus Bindungszahl und Bindungsenergie zu berechnende Gitterfestigkeit. Ursache sind im realen Kristall auftretende Mikrorisse, an welchen durch Spannungsüberhöhung die atomare Bindungskraft überschritten wird.

Jeder Bruch entsteht aus der Rissbildung (Anriss) und der anschließenden Rissausbreitung. Bei der Rissausbreitung werden zwei Stadien unterschieden:

Tabelle 3: Arten der Rissausbreitung

Stabile Rissausbreitung	Instabile Rissausbreitung
Die Risserweiterung erfolgt langsam und kann durch Entlastung gestoppt werden.	Sie ist durch hohe Geschwindigkeit (bis Schallgeschwindigkeit) gekennzeichnet und führt zum schlagartigen Sprödbbruch.

Der Übergang von stabiler zu instabiler Rissausbreitung erfolgt mit Erreichen einer kritischen Risslänge. Bei gegebenem Werkstoff ist sie abhängig von:

- der Beanspruchungsart,
- der Beanspruchungsgeschwindigkeit,
- der Einsatztemperatur

Die Rissgeometrie, d.h. Größe, Form und Lage zur Beanspruchung sind entscheidend. Von Werkstoffen, welche bereits im Zugversuch ein sprödes Verhalten zeigen, ist unter verschärften Bedingungen kein duktiles Bruchverhalten zu erwarten, da sie nur ungenügend in der Lage sind, die an der Spitze des Risses auftretenden Spannungsüberhöhungen durch mikroplastische Verformung abzubauen.

Zur Prüfung der Sprödbbruchneigung sind Proben mit definierten Rissen wie z.B. scharfe Kerben senkrecht zur angreifenden Zugspannung notwendig, um die ungünstigsten Bedingungen vorzugeben.

In Abbildung 1 ist die in Rissnähe auftretende tatsächliche Spannung σ_r dargestellt. Mit zunehmendem Abstand r von der Risspitze fällt die Spannung hyperbelförmig von unendlich

auf die anliegende Nennspannung σ_n ab. K_I ist dabei der Spannungsintensitätsfaktor und gibt die Höhenlage der Hyperbel an.

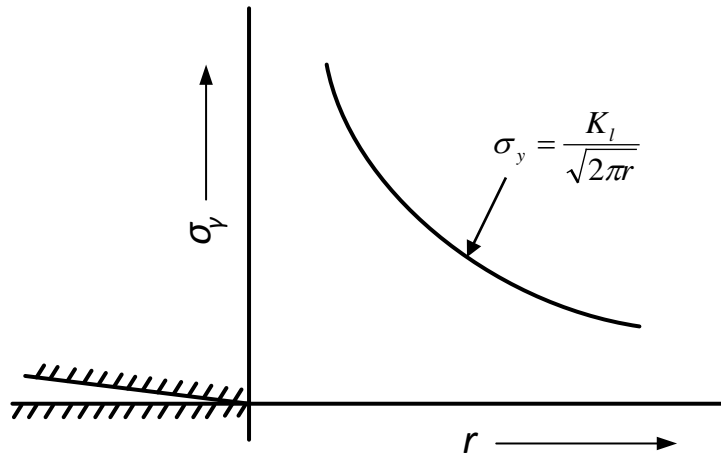


Abbildung 1: Spannungsverlauf im Bereich der Risspitze

Es kommt zur instabilen Rissausbreitung, wenn an der Risspitze die kritische Spannungsintensität K_{Ic} erreicht wird, unabhängig ob durch hohe Spannung σ_n und geringe Risslänge a oder geringe Spannungen und einen längeren Riss (siehe Abbildung 2).

$$K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

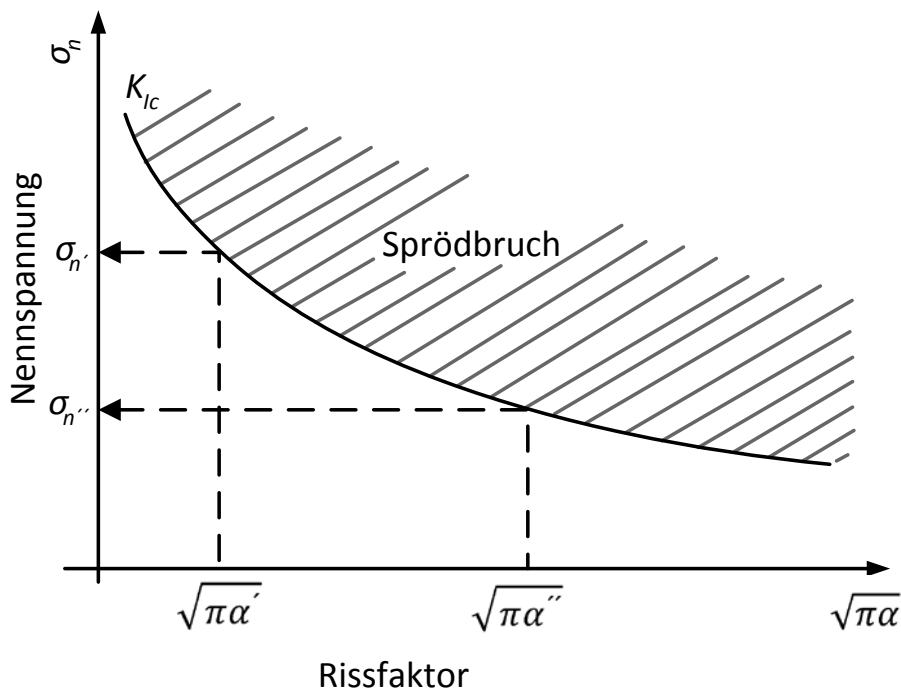


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen kritischer Spannungsintensität K_{Ic} und Nennspannung σ_n bei gegebener Risslänge a

Die K_{Ic} -Werte gelten, da energieelastisches Verhalten unterstellt wird, exakt nur für nichtplastische Werkstoffe wie Glas und Keramik. Sie können aber in guter Näherung für metallische Werkstoffe mit geringer Plastizität genutzt werden, wenn eine Anpassung der Versuchsbedingungen erfolgt.

In Tabelle 4 sind einige Werte gegenübergestellt.

Tabelle 4: Spannungsintensität im Vergleich mit der Energie

Werkstoff	K_{Ic} in $\text{MN}/\text{m}^{3/2}$	E in GN/m^2	Bemerkungen
Ferr. Stahl	63,0	221	bei - 40°C
Hartmetall	9,0	624	WC+5% Co, RT
Korund	3,4	367	Al ₂ O ₃ (rein), RT

2.4 Einfluss auf Sprödverhalten

2.4.1 Einfluss mehrachsiger Zugspannungen

Bei allen Verformungsvorgängen gilt das Gesetz der Volumenkonstanz, wenn Werkstoffverluste durch Oxidation und Abrieb unberücksichtigt bleiben.

$$V_0 = V_1 = \text{const.} \quad (2)$$

Wird ein Werkstoff in Richtung einer Raumachse auf Zug belastet, so liegt ein einachsiger Spannungszustand vor. Der Werkstoff fließt in Beanspruchungsrichtung aus und senkrecht dazu ein, d.h. die Probe dehnt sich bei gleichzeitiger Querkontraktion.

Wirken Zugspannungen gleichzeitig in zwei oder drei Richtungen senkrecht zueinander, so wird die Querkontraktion behindert oder bei gleich großen Zugspannungen in allen drei Raumrichtungen vollständig unterbunden. Es liegt ein dreiachsiger Spannungszustand vor, wie er z.B. in Druckbehältern oder Druckröhren (siehe Abbildung 3) auftritt, besonders, wenn Versteifungen angeschweißt wurden (Schweißbeigenspannungen).

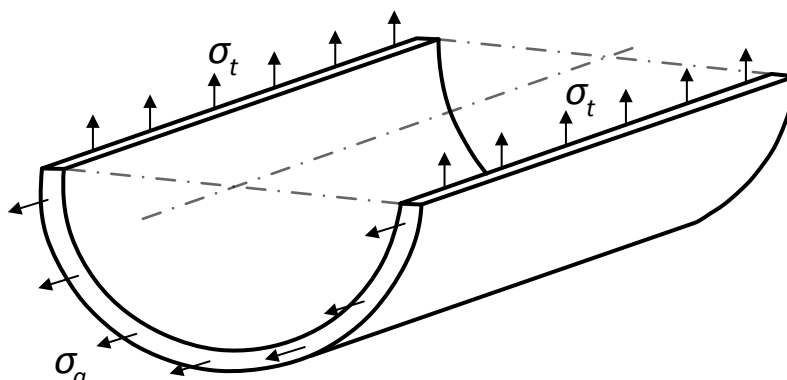


Abbildung 3: Spannungen bei Innendruck

Jede Kraftumlenkung, jede Nut oder Kerbe bewirkt die Ausbildung eines dreiachsigen Spannungszustandes und damit eine Fließbehinderung des Werkstoffes (siehe Abbildung 4).

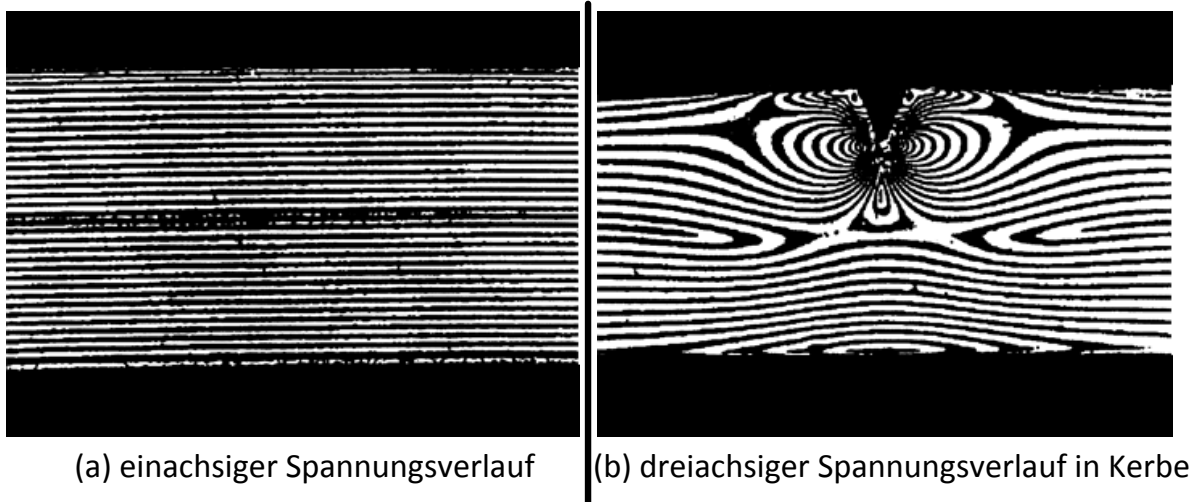


Abbildung 4: Einachsiger Spannungsverlauf und dreiachsiger Spannungsverlauf im Kerbgrund

Diese Fließbehinderung hat zur Folge, dass keine energieminimierenden Prozesse (Versetzungswanderung, Verformung) ablaufen können; der Werkstoff verhält sich bei Überlastung spröde.

2.4.2 Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit

Verformungsprozesse sind durch Bildung und Wanderung von Versetzungen gekennzeichnet; diese Prozesse benötigen Zeit.

Wird die Beanspruchung wie im Zugversuch langsam gesteigert, so können vorhandene und neugebildete Versetzungen über den gesamten Kornbereich wandern. Der Werkstoff nimmt während der Verformung einen Teil der aufgewendeten Energie auf.

Mit steigender Belastungsgeschwindigkeit werden die von den Versetzungen zurückgelegten Wege kürzer, die Neubildung von Versetzungen wird gehemmt, die vom Werkstoff aufgenommene Energie und damit die Verformung sinken. Der Werkstoff reagiert zunehmend spröder, d.h. Zugfestigkeit und Streckgrenze eines Werkstoffes steigen bei gleichzeitigem Absinken von Bruchdehnung und Brucheinschnürung.

2.4.3 Einfluss der Gefügeausbildung

Gefüge und Eigenschaften bedingen einander. Korngrenzen sind Störungen des idealen Kristallgitters, ihre Ausdehnung und Anordnung beeinflussen die Eigenschaften auch über die von ihnen begrenzten ungestörten Gitterbereiche nach Form und Größe.

Unter Berücksichtigung der beim Bruch ablaufenden Verformungsprozesse gelten folgende allgemeine Gesetzmäßigkeiten für die Verminderung der Sprödbbruchneigung:

- sinkender Gehalt an festen und gasförmigen Fremdeinschlüssen
- feines, gleichmäßiges Gefüge
- sinkender Kohlenstoffgehalt in Stählen

Daraus ist abzuleiten, dass bereits eine Rekristallisationsglühung eines verformten Werkstoffes oder ein Normalglühen von geschweißten Bauteilen die Sprödbbruchneigung senkt.

3 Verfahrensprinzip

Unter den ungünstigsten Bedingungen, d.h. unter mehrachsigen Zugspannungen bei hoher Beanspruchungsgeschwindigkeit, soll für einen bestimmten Werkstoff die Temperatur bestimmt werden, bei welcher sein Bruchverhalten von zäh in spröde übergeht.

Durch die verformungsbehindernden Bedingungen des Kerbschlagbiegeversuches wird diese Übergangstemperatur T_{ii} stark angehoben, wodurch sich die Versuchsbedingungen wesentlich vereinfachen.

Statt einer äußeren Zugspannung mit gleichmäßiger Spannungsverteilung über die gesamte Probe (siehe Abbildung 4 (a)) wird durch eine Einzelkraft eine Biegespannung mit einem örtlichen Zugspannungsmaximum an der Stelle der Krafteinleitung verwendet (siehe Abbildung 5).

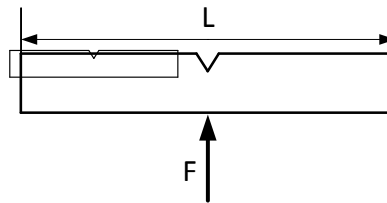


Abbildung 5: ISO-V-Form der Prüfkörper mit Krafteinwirkung

Dabei ist das maximale Biegemoment in der Probenmitte:

$$M_{E_{max}} = \frac{F_{Schalg} \cdot L}{4} \quad (3)$$

Durch den am Ort der Krafteinleitung eingebrachter definierter Kerbe wird die örtliche Spannung erhöht, die Querkontraktion durch den nicht beanspruchten Werkstoffbereich behindert, so dass im Kerbgrund ein dreiachsiger Spannungszustand entsteht (siehe Abbildung 4 (b)).

Die Krafteinleitung erfolgt mit einem Pendel. Damit kann gegenüber dem Zugversuch eine annähernd um den Faktor 100 höhere Beanspruchungsgeschwindigkeit erzeugt werden.

Das Pendel mit der Masse m wird in die Ausgangsposition h_0 gebracht und besitzt damit die potentielle Energie E_0 :

$$E_0 = m g h_0 \quad (4)$$

Da ein reibungsfrei arbeitendes Pendel vorausgesetzt wird, trifft das Pendel mit der kinetischen Energie

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m v^2 \quad (5)$$

im tiefsten Punkt der Kreisbahn auf die am Widerlager anliegende Probe. Die für das Zerschlagen der Probe benötigte Energie wird dem Pendel entzogen, sodass es nur bis zur Höhe h_1 durchschwingt (siehe Abbildung 6).

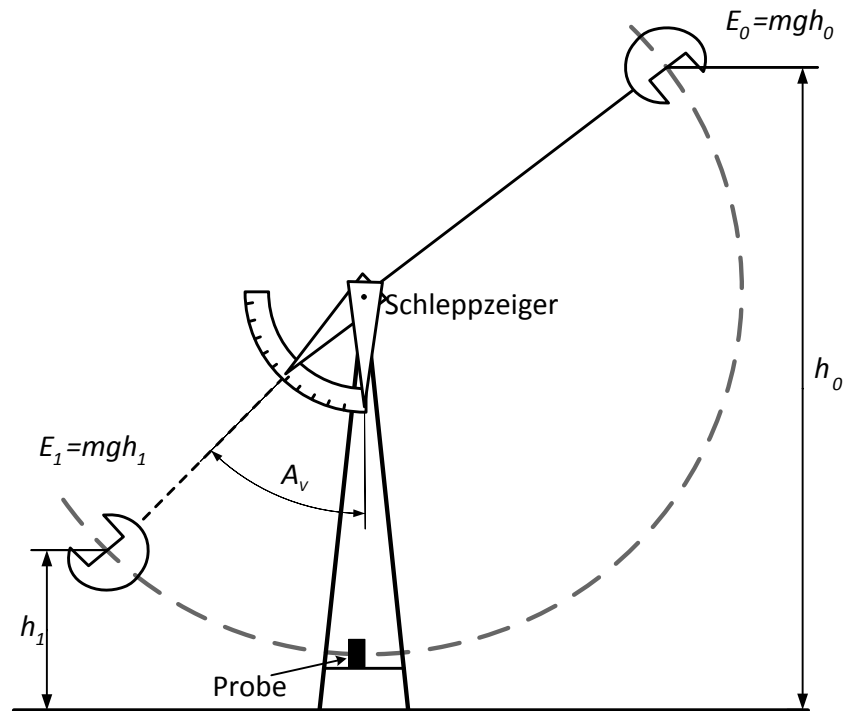


Abbildung 6: Verbrauchte Schlagarbeit

Die Differenz aus Anfangs- und Endenergie ist die in der Probe gespeicherte Energie. Damit ergibt sich für die verbrauchte Schlagarbeit

$$A_V = m \cdot g \cdot (h_0 - h_1) \quad (6)$$

Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, sind zu verwendende Proben nach Abmessungen, Oberflächenzustand, Kerbform und Kerbschärfe genormt.

Beim Versuchsablauf ist darauf zu achten, dass die Proben innerhalb von 5 sec nach der Entnahme aus der Temperierkammer zerschlagen werden. Nur unter diesen Bedingungen gilt die Temperatur des Kühl- und Wärmemediums als Prüftemperatur.

Werden Proben eines Werkstoffes in der beschriebenen Weise bei unterschiedlichen Temperaturen geprüft und die Schlagarbeit in Abhängigkeit von der Prüftemperatur aufgetragen, so erhält man den in Abbildung 7 dargestellten Kurvenverlauf.

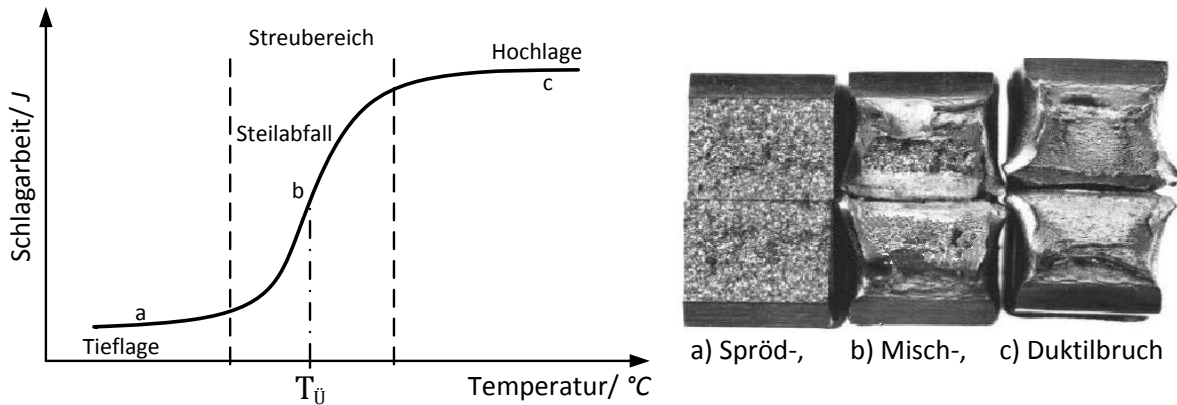


Abbildung 7: Kerbschlagarbeit - Prüftemperatur - Kurve (schematisch)

Daraus ist zu entnehmen, dass geringe A_V -Werte, d.h. geringer Energieverbrauch beim Zerschlagen der Probe und damit sprödes Bruchverhalten durch die Tieflage, duktiles Verhalten durch die Hochlage der Kurve charakterisiert werden. Der Übergang wird durch den Steilabfall mit größeren Messwertstreuungen dargestellt.

Als vergleichbarer Grenzwert für den Übergang vom zähen zum spröden Verhalten wird häufig die Übergangstemperatur $T_{\ddot{u}}$ genutzt. Bei Verwendung der ISO-V-Probe gilt

$$A_V(ISO - V) = 27 J \quad (7)$$

Mit steigender Übergangstemperatur $T_{\ddot{u}}$ sinkt die Sprödbrechtsicherheit eines Werkstoffes.

Jedoch weisen nicht alle Materialien eine deutlich ausgeprägte Übergangstemperatur aus.

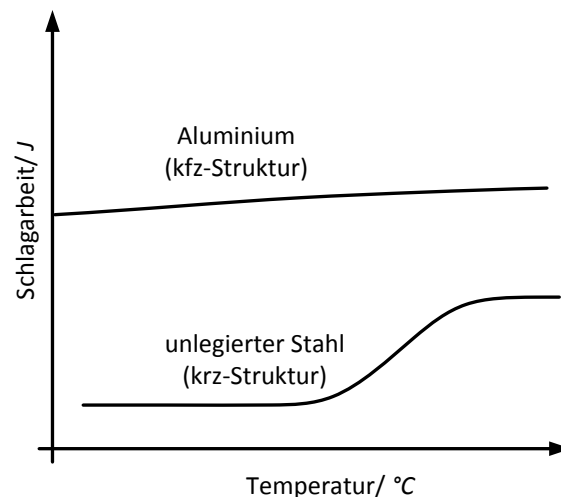


Abbildung 8: Auswirkung des Gittertyps auf das Bruchverhalten

Wie in Abbildung 8 zu sehen ist, bilden Metalle mit kubischflächenzentrierte (kfz) Struktur praktisch keine erkennbare Übergangstemperatur. Diese charakteristische Ausbildung ist für Aluminium sowie austenitische Stähle typisch. Der S-förmige Verlauf hingegen ist für un- und niedriglegierte Stähle markant, welche eine kubischraumzentrierte (krz) Struktur aufweisen.

Die Kenntnis der Sprödbruchsicherheit, besonders von Stählen mit gleicher Streckgrenze und Kunststoffen, ist erforderlich, um bei komplizierten Beanspruchungsverhältnissen, z.B. für Schweißkonstruktionen, den optimalen Werkstoff auswählen zu können.

A_v und $T_{\ddot{u}}$ sind keine Kennwerte für die Festigkeitsberechnung. Die Übergangstemperatur lässt keinen unmittelbaren Schluss auf die minimale Betriebstemperatur zu.

4 Versuchsdurchführung

An unterschiedlichen Stahlproben oder gleichen Werkstoffen mit unterschiedlichen Behandlungszuständen sind Kerbschlagbiegeversuche bei unterschiedlichen Temperaturen durchzuführen.

Zu bestimmende Größen:

Kerbschlagarbeit A_v : Beim Brechen / Durchziehen der Probe verbrauchte Schlagarbeit.

Übergangstemperatur $T_{\ddot{u}}$: Prüftemperatur, bei welcher das Bruchverhalten von zäh zu spröde wechselt.

4.1 Geräte

- Pendelschlagwerk RKP 300 für Metallproben mit
 - 300 J-Pendelhammer
 - Fallwinkel 150°
 - Auftreffgeschwindigkeit $v = 5,23$ m/sec
- Pendelschlagwerk mit 7,5 J-Pendel für Polymerproben
- Kühlboxen
- Trockenschränke



Durch hohen Arbeitsinhalt des Hammers und durch tiefe und erhöhte Temperaturen der Proben besteht erhöhte Unfallgefahr. Schutzgitter schließen! Proben nur mit Zange einlegen und aus dem Fanggitter entnehmen!

4.2 Versuchsmaterial

Probenform: ISO-V

Versuchsmaterialien:

Es werden unterschiedliche Werkstoffe zur Verfügung gestellt. Es handelt sich hierbei um mehrere Stähle in unterschiedlichen Legierungen, Wärmebehandlungen und Bearbeitungszuständen. Des Weiteren werden Polymere und Aluminiumproben bereitgestellt. Die genauen Bezeichnungen sowie Bearbeitungszustände sind bei dem Versuchsbetreuer zu erfragen und zu protokollieren.

4.3 Versuchsablauf

Entsprechend den vorgegebenen Proben ist die Kerbschlagarbeit A_v für unterschiedliche Werkstoffe und/oder unterschiedliche Behandlungszustände zu ermitteln. Überlegen Sie sich vor dem Versuch eine geeignete Tabellenstruktur zum Aufnehmen der Werte.

- Die Proben sind im Bereich von -80°C bis $+250^{\circ}\text{C}$ temperiert.
- Für jede Messung wird genau eine Probe für genau eine vorgegebene Temperatur verwendet.
- Die Standardabweichung der Messwerte ist mit 3 Proben eines Werkstoffes und Pendels bei Raumtemperatur zu bestimmen.
- Vor dem Versuchsbeginn ist die reibungsfreie Bewegung und die Nullstellung der Pendel zu überprüfen.
- Die Proben sind zügig, beginnend mit der tiefsten Temperatur, mittig in das Widerlager einzulegen und zu zerschlagen. Die Kerbe ist dem Hammer des Pendels abgewandt.
- Nach dem Stillstand des Pendels ist die Probe dem Fangkorb zu entnehmen und für die Auswertung zu kennzeichnen.

4.4 Messergebnisse

Die am Pendelschlagwerk ausgewiesenen Werte sind für jede Probe getrennt nach Prüftemperatur und Werkstoff / Behandlungszustand zu erfassen. Nötige Korrekturwerte der Schlagarbeit können hierbei gleich mit einbezogen werden.

Die Bruchflächen sind nach Bruchaussehen und Größe der aufgetretenen Verformung qualitativ zu beschreiben.

5 Versuchsauswertung

5.1 Bestimmung der Übergangstemperatur $T_{\ddot{u}}$

- a. Die ermittelten Werte für die Schlagarbeit A_v sind in Abhängigkeit von der Prüftemperatur graphisch darzustellen.
Für die Eintragung der Fehlerbalken ist eine geeignete Schwankungsbreite zu wählen.
- b. Die jeweilige Übergangstemperatur $T_{\ddot{u}}$ ist zu bestimmen.
- c. Die Bruchflächen sind dem jeweiligen Verlauf der $A_v - T$ -Kurve zuzuordnen.

5.2 Diskussion der Messergebnisse

- a. Die Übergangstemperaturen sind kritisch zu werten und zu diskutieren. Fertigen Sie dafür zusätzlich geeignete Grafiken für sinnvolle Vergleiche an. Vergleichen Sie Ihre erhaltenen Werte gegeben falls mit Literaturwerten.
- b. Das Bruchverhalten der Proben ist nach Art und Aussehen zu werten und mit dem Verlauf der $A_v - T$ -Kurve zu vergleichen. Wie lässt sich das Sprödbbruchverhalten mit der jeweiligen Mikrostruktur der Proben begründen?

6 Literatur

- [1] Bergmann, *Werkstofftechnik 1*, Carl-Hanser-Verlag München, Wien 1989.
- [2] Heckel, *Einführung in die technische Anwendung der Bruchmechanik*, Carl-Hanser-Verlag, München 1970.
- [3] Tetelmann, McEvily, *Bruchverhalten technischer Werkstoffe*, Düsseldorf 1971.
- [4] Wassermann, *Praktikum der Metallkunde und Werkstoffprüfung*, Springer Verlag, Berlin 1965.
- [5] Donald R. Askeland, *Materialwissenschaften*, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg·Berlin·Oxford 1996
- [6] Hornbogen Eggeler·Werner, *Werkstoffe*, Springer-Verlag, Berlin 2012

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Spannungsverlauf im Bereich der Rißspitze.....	5
Abbildung 2: Zusammenhang zwischen kritischer Spannungsintensität K_{Ic} und Nennspannung σ_n bei gegebener Risslänge a	5
Abbildung 3: Spannungen bei Innendruck.....	6
Abbildung 4: Einachsiger Spannungsverlauf und dreiachsiger Spannungsverlauf im Kerbgrund.....	7
Abbildung 5: ISO-V-Form der Prüfkörper mit Krafteinwirkung.....	8
Abbildung 6: Verbrauchte Schlagarbeit	9
Abbildung 7: Kerbschlagarbeit - Prüftemperatur - Kurve (schematisch).....	10
Abbildung 8: Auswirkung des Gittertyps auf das Bruchverhalten	10

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einflüsse auf die Bruchneigung eines Werkstoffes	3
Tabelle 2: Arten des Bruches.....	3
Tabelle 3: Arten der Rissausbreitung	4
Tabelle 4: Spannungsintensität im Vergleich mit der Energie.....	6