



## Werkstoffeigenschaften

### 0. Inhalt

0.Inhalt .....	1
1.Allgemeines.....	2
2.Grundlagen.....	2
3.Begriffe.....	2
4.Bezeichnung.....	5
5.Physikalische Eigenschaften von Eisen.....	6
5.1 Gitterstruktur.....	6
5.2 Mechanische Eigenschaften.....	7
6.Stahlbegleiter.....	7
7.Technologische Eigenschaften.....	10
7.1 Allgemeines.....	10
7.2 Zugversuch.....	11
7.2.1 Probekörper.....	11
7.2.2 Versuchsdurchführung.....	12
7.2.3 Versuchsauswertung.....	15
7.2.4 Ergebnisse.....	16
7.2.5 Mehrachsige Beanspruchung.....	17
7.3 Kerbschlagversuch.....	19
7.3.1 Probekörper.....	19
7.3.2 Versuchsdurchführung.....	20
7.3.3 Versuchsauswertung.....	21
7.3.4 Ergebnisse.....	21
8.Einkauf .....	24
9.Ausblick.....	25
10.Literatur.....	26
10.1 Normen und Regelwerke.....	26
10.2 Fachliteratur.....	28

## **1. Allgemeines**

### Kurzbeschreibung

Werkstoffeigenschaften der im Stahl- und Metallbau üblichen Werkstoffe.

### Einordnung

Stahlbau – Grundaufgaben – Werkstoffkunde

### Lernziele

Die wichtigsten Werkstoffeigenschaften kennen und bewerten können; Werkstoffe entsprechend den Anforderungen auswählen können;

### Einschränkungen, Abgrenzung

Aluminium ist derzeit nicht enthalten;

Schrauben, sonstige Verbindungsmittel und Schweißzusätze sind derzeit nicht enthalten;

## **2. Grundlagen**

Baustoffkunde      Grundkenntnisse der Stahlherstellung und der Stahleigenschaften

## **3. Begriffe**

$A$	elongation at fracture; Bruchdehnung, plastische Dehnung der Probe bei Eintritt des Bruches
$A_g$	uniform elongation; Gleichmaßdehnung, plastische Dehnung der Probe vor dem Einschnüren
Bruchmechanik	fracture mechanics; beschreibt die Rissfortschritts-geschwindigkeit unter zyklischer Beanspruchung sowie die kritische Risslänge, bei der ein Werkstoff endgültig durchreißt
charakteristischer Wert	characteristic value; nach EC0 4.2 (3) das 5 %-Quantil (unten) bzw. 95 %-Quantil (oben); für Steifigkeitsparameter und Wärmeausdehnungskoeffizienten wird nach EC0 4.2 (8) der Mittelwert verwendet;
Duktilität	ductility; Zähigkeit, Verformbarkeit, „Fließfähigkeit“

E-Modul	Young's modulus; achsiale Steifigkeitseigenschaft; wenn man die Zugspannung E auf den Werkstoff aufbringt, verlängert er sich um den Faktor 1
DIN EN, DIN EN ISO	Die deutschen Versionen europäischer Normen, z.B. „DIN EN 10025“, werden vereinfachend im Text nur in der europäischen Form zitiert, also „EN 10025“ oder „ISO 148“.
Fließgrenze	yield limit; synonym für die Streckgrenze
Gestaltänderungshypothese	Vergleichsspannungshypothese für duktile Werkstoffe, bei der die innere Gestaltänderungsarbeit zum Erkennen des Fließbeginns verwendet wird. Im angelsächsischen Sprachgebrauch wird die Bezeichnung Maxwell-Huber-Hencky-von Mises (oder Teile davon) verwendet, in der deutschen Fachsprache spricht man von der „von Mises Vergleichsspannung“ oder dem Huber-Mises-Hencky Kriterium.
Gütegruppen	sub-grade; Gütegruppen verschlüsseln nach EN 10025-2 Abs. 4.1.2 die Anforderungen an die Kerbschlagarbeit. Es ist nach EN 10025-2 Tabelle 9 jeweils eine Kerbschlagarbeit von 27 Joule nachzuweisen, jedoch bei unterschiedlichen Prüftemperaturen: JR bei +20°C J0 bei +0°C J2 bei -20°C K2 40 J bei -20°C; entspr. 27 J bei -30°C;
Hochlage	upper shelf (region); in der Hochlage tritt beim Kerbschlagversuch ein zäher Bruch ein
Kerbschlagversuch	notch pendulum impact test; Versuch, bei dem eine gekerbte Probe mit einem Pendelhammer durchgeschlagen wird
Kohlenstoffäquivalent	carbon equivalent, CEV; die Wirkung verschiedener Elemente auf die Schweißignung wird auf die Wirkung von

Kohlenstoff umgerechnet (EN 10025-1 Abs. 7.2.3), die Angaben sind jeweils in Prozent:

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

kubisch-flächenzentriertes Gitter, kfz

face centered cubic lattice; das Kohlenstoffatom sitzt jeweils in der Mitte der Würfelflächen; diese Anordnung liegt bei (nichtrostenden) austenitischen Stählen und bei Aluminium vor

kubisch-raumzentriertes Gitter, krz

body centered cubic lattice; das Kohlenstoffatom sitzt in der räumlichen Mitte des Würfels; diese Anordnung liegt bei unlegierten Baustählen vor

KV

absorbed impact energy; in der Probe absorbierte Schlagenergie beim Kerbschlagversuch, das V verweist auf einen Probekörper mit V-Kerbe (alternativ KU)

das Quantil

quantile; Anteilsmaß; bei einem  $p$ -Quantil mit  $0 \leq p \leq 1$  liegt der Anteil  $p$  der Werte unterhalb des  $p$ -Quantils (früher: die Fraktile)

$R_{eH}$  ,  $R_{eL}$

upper and lower yield strength; obere und untere Streckgrenze

$R_m$

ultimate strength, Zugfestigkeit

(  $R_{p0,1}$  , )  $R_{p0,2}$  , (  $R_{p1,0}$  )

0,2 % proof stress, 0,2 % Dehngrenze, beschreibt die Spannung, die der Werkstoff bei 0,2 % plastischer Dehnung erreicht

Spannungs-Dehnungs-Linie

stress-strain curve; zeigt das Verhalten des Werkstoffes unter einachsiger, zügiger Dehnung bis zum Bruch

Stahlsorten

steel grade; Stahlsorten werden nach EN 10025-2 Abs. 4.1.2 nach der Streckgrenze bezeichnet: S185, S235, S275, S355, S450, E295, E335, E360;

Steilabfall	transition region, transition temperature; Übergang der aufnehmbaren Schlagenergie von der Hochlage in die Tieflage
Streckgrenze	yield strength, yield limit; Ende des elastischen (reversiblen) Bereichs der Spannungs-Dehnungs-Linie
Tieflage	lower shelf (region); in der Tieflage tritt beim Kerbschlagversuch ein spröder Bruch ein
Vergleichsspannung	equivalent stress; Interaktionsformel, mit der ein mehrachsiger Spannungszustand auf einen gleichwertigen einachsigen Spannungszustand zurückgeführt wird
Zugfestigkeit	ultimate limit; maximal aufnehmbare technische Spannung; die wahre Zugfestigkeit ist höher, da sich zum Zeitpunkt der Maximallast im Zugversuch der Querschnitt schon verringert hat.

#### **4. Bezeichnung**

Der Aufbau der Kurznamen von Stählen ist nach DIN EN 10027-2 geregelt.

Das vorangestellte Hauptsymbol bezeichnet die Verwendung des Stahls, danach folgt die

Angabe der Streckgrenze in  $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  .

S235 ...	Stähle für den Stahlbau (structural steel)
P265 ...	Stähle für den Druckbehälterbau (pressure vessels)
L360 ...	Stähle für Leitungsrohre
E295 ...	Maschinenbaustähle
B500 ...	Betonstähle
Y1770 ...	Spannstähle
R320	Stähle für Schienen

## DX51 ... Stähle zum Kaltumformen

Alternativ dazu haben alle Stähle eine Werkstoffnummer, die nach DIN EN 10027-2 geregelt ist.

An der ersten Stelle steht die Hauptgruppennummer, für Stähle 1, Kupfer 2, Aluminium 3. Es folgt eine zweistellige Gruppennummer gefolgt von einer zweistelligen Zählnummer.

1.0038 S235JR, die Gruppe 00 steht für „unlegierte Stähle, Grundstähle“

1.0117 S235J2, die Gruppe 01 steht für „allgemeine Baustähle mit  $R_m < 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ “

1.0045 S355JR, die Gruppe 00 steht für „unlegierte Stähle, Grundstähle“

1.4301 nichtrostender Stahl „V2A“, die Gruppe 43 steht für „legierte Stähle, chemisch beständige Stähle, nichtrostende Stähle mit  $\text{Ni} \geq 2,5\%$  ohne Mo, Nb und Ti“

1.4571 nichtrostender Stahl „V4A“, die Gruppe 45 steht für „legierte Stähle, chemisch beständige Stähle Sonderzusätzen“

## 5. Physikalische Eigenschaften von Eisen

### 5.1 Gitterstruktur

Kristallines Eisen liegt in einem kubischen Gitter vor. Das Gitter entspricht damit einer Packung von Würfeln (Elementarzelle), jeweils auf der Ecke eines Würfels liegt ein Eisen Atom, das demzufolge mit 8 anderen Würfeln geteilt wird. Die Kantenlänge der Würfel beträgt 0,287 nm oder 2,87 Å (Angström) oder  $2,87 \cdot 10^{-10}$  m.

Fremdatome, wie z.B. Kohlenstoff, liegen in der räumlichen Mitte der jeweiligen Würfel. Man bezeichnet das Gitter daher als kubisch-raumzentriert. Da der Kohlenstoff kein Eisenatom von seinem Gitterplatz verdrängt hat, bildet er mit dem Eisen ein Einlagerungsmischkristall (im Gegensatz zu einem Austauschmischkristall).

Unter bestimmten Umständen können die Fremdatome auch in den Flächenmitten der Würfel sitzen, dann spricht man von einem kubisch-flächenzentrierten Gitter. Mit diesem Unterschied sind wesentliche Unterschiede in den Eigenschaften verbunden, z.B. gibt es die Hypothese, dass kubisch-flächenzentrierte Metalle keine Dauerfestigkeit haben.

## 5.2 Mechanische Eigenschaften

Dichte	ca.	$7870 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	
Elastizitätsmodul	ca.	$210 \text{ GPa} = 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	
Querdehnungszahl	ca.	0,29	
Zugfestigkeit	ca.	$200 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	(G. Steidl 2007)

## 6. Stahlbegleiter

Legierungselemente des Stahls bezeichnet man auch als Stahlbegleiter (begrifflich nicht ganz sauber, wird aber vereinfachend nachfolgende so verwendet).

Diese werden üblicherweise in Massenprozent angegeben.

### Kohlenstoff C

Technologisch der wichtigste Stahlbegleiter

Die Zugabe von 1 % C erhöht die Zugfestigkeit des Eisens um  $1000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

(G. Steidl 2007). Man kann daher abschätzen:

$$f_u = 200 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} + C * 1000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2 \%}$$

Beispiel:

$$f_u = 200 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} + 0,20 \% * 1000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2 \%} = 400 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{entspricht S235}$$

Diese Festigkeitssteigerung beruht auf dem Blockieren möglicher Gleitebenen im Werkstoff, daher ist eine Zunahme der Festigkeit an eine Abnahme der Duktilität (z.B. gemessen in Bruchdehnung) gebunden.

## Silizium Si

Silizium wirkt als „Beruhigungsmittel“, es wird dem Stahl zugegeben, um unerwünschte nichtmetallische Stahlbegleiter zu binden.

Gleichzeitig bewirkt Silizium die Ausbildung eines feineren Korngefüges, was bei sonst gleicher Legierungszusammensetzung eine Steigerung der Festigkeit zur Folge hat.

## Mangan Mn

Mangan wirkt festigkeitssteigernd, ohne die Zähigkeitseigenschaften in gleichem Maße wie der Kohlenstoff herabzusetzen. Der Werkstoff S355 wird daher hauptsächlich mit Mangan legiert, um die erwünschten Eigenschaften zu erhalten.

Die Zugabe von 1 % Mn erhöht die Zugfestigkeit des Eisens um  $100 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

(G. Steidl 2007). Eine typische Analyse ist z.B. 0,17 % C, 1,5 % Mn, ... , damit wird

eine Zugfestigkeit von  $520 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  erzielt. Auch dies lässt sich abschätzen:

$$f_u = 200 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} + C * 1000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2 \%} + Mn * 100 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2 \%}$$

$$f_u = 200 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} + 0,17 \% * 1000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2 \%} + 1,5 \% * 100 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2 \%}$$

$$f_u = (200 + 170 + 150) \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 520 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Wollte man diese Festigkeit ausschließlich durch Kohlenstoff erzielen, bräuchte man 0,32 % C, der Stahl wäre damit nicht mehr schweißgeeignet.

## Chrom Cr

Chrom ist ein „Härtebildner“, was bei der Herstellung von Werkzeugstählen ausgenutzt wird. Ab einem Chromanteil von ca. 12 % kann der Stahl eine selbstpassivierende Oberfläche bilden, so dass er beständig gegen milden korrosiven Angriff wird. Siehe Skript

[www.peterknoedel.de/lehre/FHA-Stahl/Skript/GrA/Dauer/Passiv.pdf](http://www.peterknoedel.de/lehre/FHA-Stahl/Skript/GrA/Dauer/Passiv.pdf)

## Nickel Ni

Nickel ist ein „Zähigkeitsbildner“; durch genügend hohe Zugaben von Nickel



(Stichwort „18/8“ oder „18/10“) kann man einen Werkstoff erzeugen, der Korrosionsbeständig ist, gleichzeitig aber bei Raumtemperatur in austenitischem Gefügestand vorliegt und daher ausgezeichnete Zähigkeitseigenschaften hat.

### Sonstige

Für den Fachmann sind noch eine Menge anderer Stahlbegleiter wichtig, durch deren Beschränkung auf bestimmte Grenzwerte man sicherstellen kann, dass die Stähle gute Festigkeitseigenschaften bei ausreichender Zähigkeit und befriedigender Schweißseignung haben. Daher wird z.B. in den Werkstoffbescheinigungen von S355 eine sogenannte „14er Analyse“ verlangt.

CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG DER SCHMELZE IN %												C71 - C99	
CHEMICAL COMPOSITION OF THE LADLE SAMPLES %													
B07													
SCHMELZ-NR	C	SI	MN	P	S	AL-G	B-G	CR	CU	MO	N		
078404	,163	,381	1,460	,013	,0024	,038	,0004	,050	,040	,006	,0040		
802784	,161	,351	1,460	,015	,0030	,028	,0005	,038	,020	,005	,0044		

ThyssenKrupp Steel Europe AG

Abnahme

-FOLGESEITE-

Werks-Nr. Works-No. No de l'usine	A08 <b>3229053</b>	Zeugnis-Nr. Certificate-No. No de certificat	A03 <b>1438412001</b>	Sendungs-Nr. Shipment-No. No de envoi	42344246	Seite-Nr. Page-No. Page-No	2
		NB	NI	TI	V	CE1	
	078404	,022	,028	,020	,002	,42	
	802784	,022	,026	,019	,002	,42	
CE1=C+MN/6+ (CR+MO+V) /5+ (NI+CU) /15							

Auszug aus einem Thyssen-Krupp Abnahmeprüfzeugnis 3.1 für S355J2

Schmelze Nr. 802784 (50 mm) und 078404 (70 mm)

freundlicherweise zur Verfügung gestellt von [www.hodapp.de](http://www.hodapp.de)

## **7. Technologische Eigenschaften**

### **7.1 Allgemeines**

Unter physikalischen Werkstoffeigenschaften versteht man invariante oder wahre Stoffeigenschaften. Diese Stoffeigenschaften, oder die, die man eigentlich gerne wüsste, sind bei den technischen Metallwerkstoffen zum Teil nur sehr schwierig oder gar nicht zu bestimmen.

Beispiel:

Die Fließgrenze von Baustahl unter Zugbeanspruchung ist relativ stark abhängig von der Beanspruchungsgeschwindigkeit. Um wahre Fließgrenzen zu bestimmen, müsste man Zugversuche mit quasi unendlich-langsamere Prüfgeschwindigkeit fahren. Offensichtlich ist das den Bedürfnissen des Stahlbaus nicht angemessen. Bei der Fließgrenze unter Druckbeanspruchung kommt noch dazu, dass man bei schlanken Probestäben mit tatsächlich einachsigen Spannungszustand ein Stabilitätsproblem bekommt, bei gedrungener Probekörpern ist man sehr nahe an den Zwangsbedingungen der aufgelagerten Ränder und hat daher einen mehrachsigen Spannungszustand, der schwierig auszuwerten ist.

Deswegen definiert man technologische Eigenschaften; diese sind an standardisierte Prüfprozeduren gebunden. Man bestimmt damit technologische Eigenschaften, von denen die meisten Ingenieure wissen, dass sie von den wahren Eigenschaften abweichen. Sie haben aber für sich, dass sie relativ schnell bestimmt werden können und weltweit die gleichen Ergebnisse liefern. Man hat damit robuste Vergleichswerte, mit denen man im Ingenieurwesen gut leben kann.

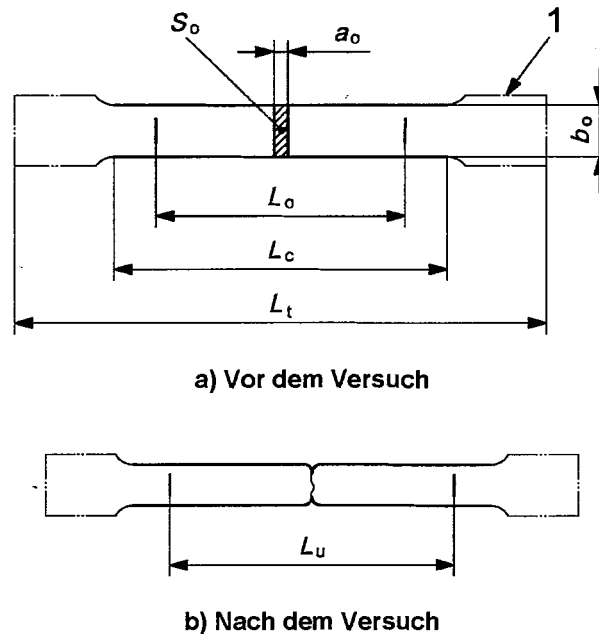
Nur wenn man Materialkennwerte bestimmen möchte, die zur Auswertung eines wissenschaftlichen Bauteilversuchs dienen, weicht man von diesen standardisierten Prozeduren ab, und prüft z.B. mit deutlich langsamer Geschwindigkeit, als im genormten Zugversuch vorgesehen.

Weil die ermittelten technologischen Eigenschaften so eng mit den Versuchen zusammenhängen, aus denen sie gewonnen werden, ist es sinnvoll, die Eigenschaften jeweils in Bezug auf die zugehörigen Versuche zu erläutern.

## 7.2 Zugversuch

### 7.2.1 Probekörper

Flachprobe nach ISO 6892-1 Bild 11 (verbreitet sind auch Rundproben):



#### Legende

$a_0$	Anfangsdicke einer Flachprobe oder Wanddicke eines Rohres	$L_t$	Gesamtlänge der Probe
$b_0$	Breite einer Flachprobe in der Versuchslänge	$L_u$	Messlänge nach dem Bruch
$L_c$	Versuchslänge	$S_0$	Anfangsquerschnitt innerhalb der Versuchslänge
$L_0$	Anfangsmesslänge	1	Probeköpfe

ANMERKUNG Die gezeichnete Form der Probeköpfe ist als Beispiel zu verstehen.

**Bild 11 — Bearbeitete Proben mit rechteckigem Querschnitt (siehe Anhänge B und D)**

(Auszug aus ISO 6892-1)

Typische Maße des Probekörpers für die Prüfung eines 10 mm dicken Blechs, siehe ISO 6892-1 Tabelle D.2:

10 mm	Anfangsdicke	$a_0$
40 mm	taillierte Breite	$b_0$
200 mm	Anfangsmesslänge	$L_0$
220 mm	Mindestversuchslänge	$L_c$
450 mm	Gesamtlänge der Probe	$L_t$

Der Anfangsquerschnitt innerhalb der Versuchslänge beträgt

$$S_0 = 10 \text{ mm} * 40 \text{ mm} = 400 \text{ mm}^2$$

### 7.2.2 Versuchsdurchführung

Der Probekörper wird mit den Probenköpfen in die Prüfmaschine eingespannt. Bei den meisten Prüfmaschinen erfolgt das in der Weise, dass die Längsachse der Probe senkrecht steht.

Typische Beanspruchungsgeschwindigkeiten sind nach ISO 6892-1 Tabelle 3:

$$6 \frac{\text{MPa}}{\text{s}} \leq \dot{R} \leq 60 \frac{\text{MPa}}{\text{s}},$$

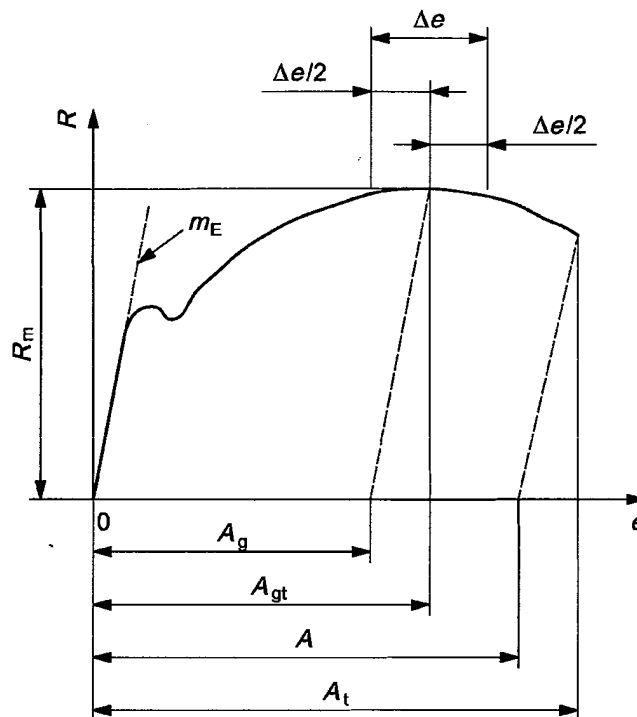
d.h. bei einem S235 wird die Streckgrenze nach 4 s bis 40 s erreicht. Wenn die Probe plastiziert, ist die Angabe oder Einregelung einer Spannungsgeschwindigkeit nicht mehr sinnvoll; die dann gefahrene Dehngeschwindigkeit beträgt z.B.

$$e_{Lc} = \frac{0,00025 * 1}{\text{s}} \quad (\pm 20\% \text{ Toleranz}) \quad \text{oder } 1 \text{ Promille Dehnung in 4 Sekunden;}$$

alternativ

$$e_{Lc} = \frac{0,002 * 1}{\text{s}} \quad (\pm 20\% \text{ Toleranz}) \quad \text{oder } 2 \text{ Promille Dehnung je Sekunde;}$$

Während des Versuchs wird ein Kraft-Dehnungs-Diagramm mitgeschrieben, das mittels der vorher bestimmten Querschnittsfläche  $S_0$  in ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm umgerechnet wird.



#### Legende

- $A$  Bruchdehnung [mit einem Dehnungsaufnehmer oder direkt an der Probe bestimmt (siehe 20.1)]
- $A_g$  Plastische Extensometer-Dehnung bei Höchstkraft
- $A_{gt}$  Gesamte Extensometer-Dehnung bei Höchstkraft
- $A_t$  Gesamte Extensometer-Dehnung beim Bruch
- $e$  Extensometer-Dehnung
- $m_E$  Steigung des elastischen Teils der Spannung/Extensometer-Dehnung-Kurve
- $R$  Spannung
- $R_m$  Zugfestigkeit
- $\Delta e$  Plateaubereich (für die Bestimmung von  $A_g$  siehe Abschnitt 17, für die Bestimmung von  $A_{gt}$  siehe Abschnitt 18)

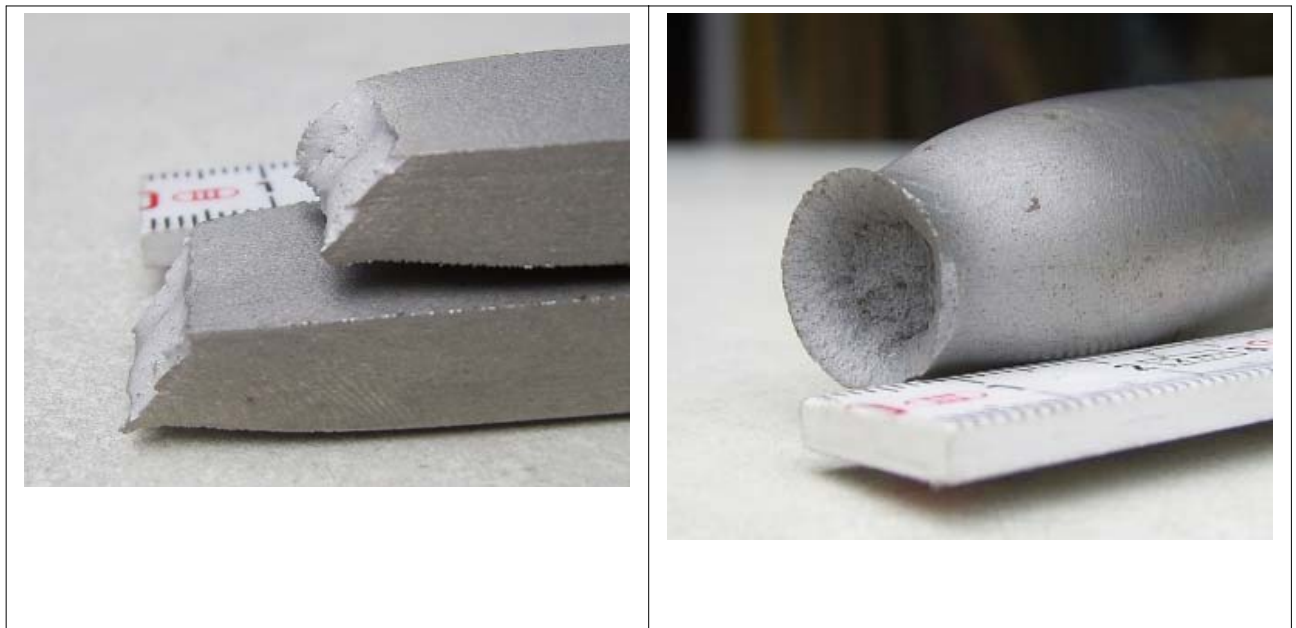
**Bild 1 — Definitionen der Extensometer-Dehnungen**  
sches Spannungs-Dehnungs-Diagramm  
(Auszug aus ISO 6892-1)

Schemati-

Nach dem Bruch zeigen die Proben einen Einschnürung des Querschnittes und einen zähen Bruch mit Scherlippen unter  $45^\circ$ .

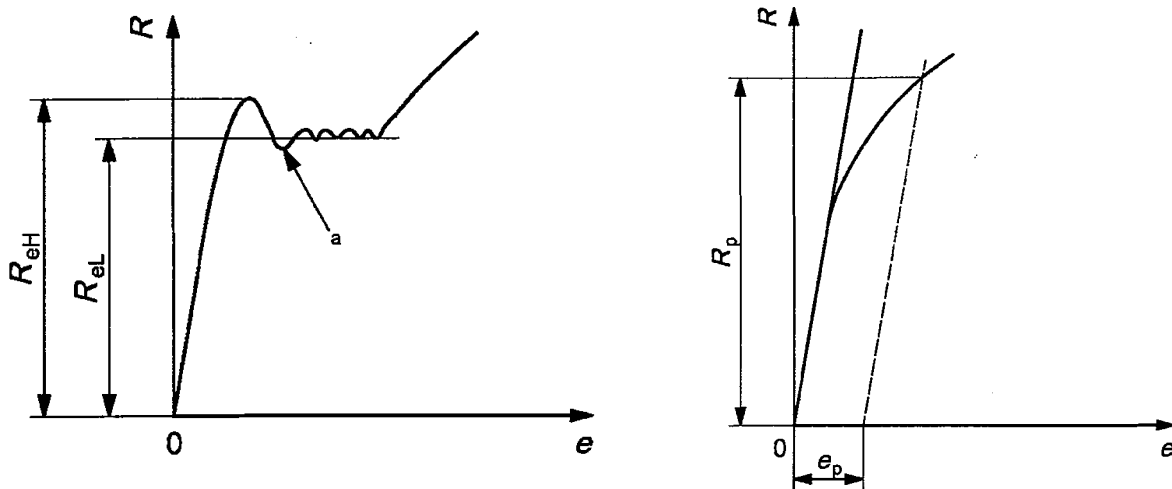


Flachzugprobe nach dem Versuch – FH Offenburg (Foto: P. Knödel)



Flach- und Rundzugprobe nach dem Versuch – FH Offenburg (Foto: P. Knödel)

### 7.2.3 Versuchsauswertung



Ausschnitt aus der Spannungs-Dehnungs-Linie:  
ausgeprägte Streckgrenze (links); nicht ausgeprägte Streckgrenze (rechts)  
(Auszüge aus ISO 6892-1 – Bild 2a (links); Bild 3 (rechts))

Folgende Kennwerte werden aus der Spannungs-Dehnungs-Linie gewonnen:

Streckgrenze  $R_{eH}$  ;  $R_{eL}$  ;  $R_{p0,2}$  ;

die obere  $R_{eH}$  und untere  $R_{eL}$  Streckgrenze, wenn der Werkstoff eine ausgeprägte Streckgrenze hat; die 0,2 % Dehngrenze  $R_{p0,2}$  , wenn der Werkstoff keine ausgeprägte Streckgrenze hat;

E-Modul

wird an einer Entlastungslinie aus dem plastischen Bereich ermittelt; in den obigen Kurven nicht dargestellt;

Zugfestigkeit  $R_m$

Gleichmaßdehnung  $A_g$

die plastische Dehnung, die gleichmäßig entlang der ganzen Probe auftritt, danach schnürt sich die Probe ein. Der Hochpunkt tritt nur in der technischen Spannungs-Dehnungs-Linie auf, bei der die Spannungen jeweils auf den Ausgangsquerschnitt

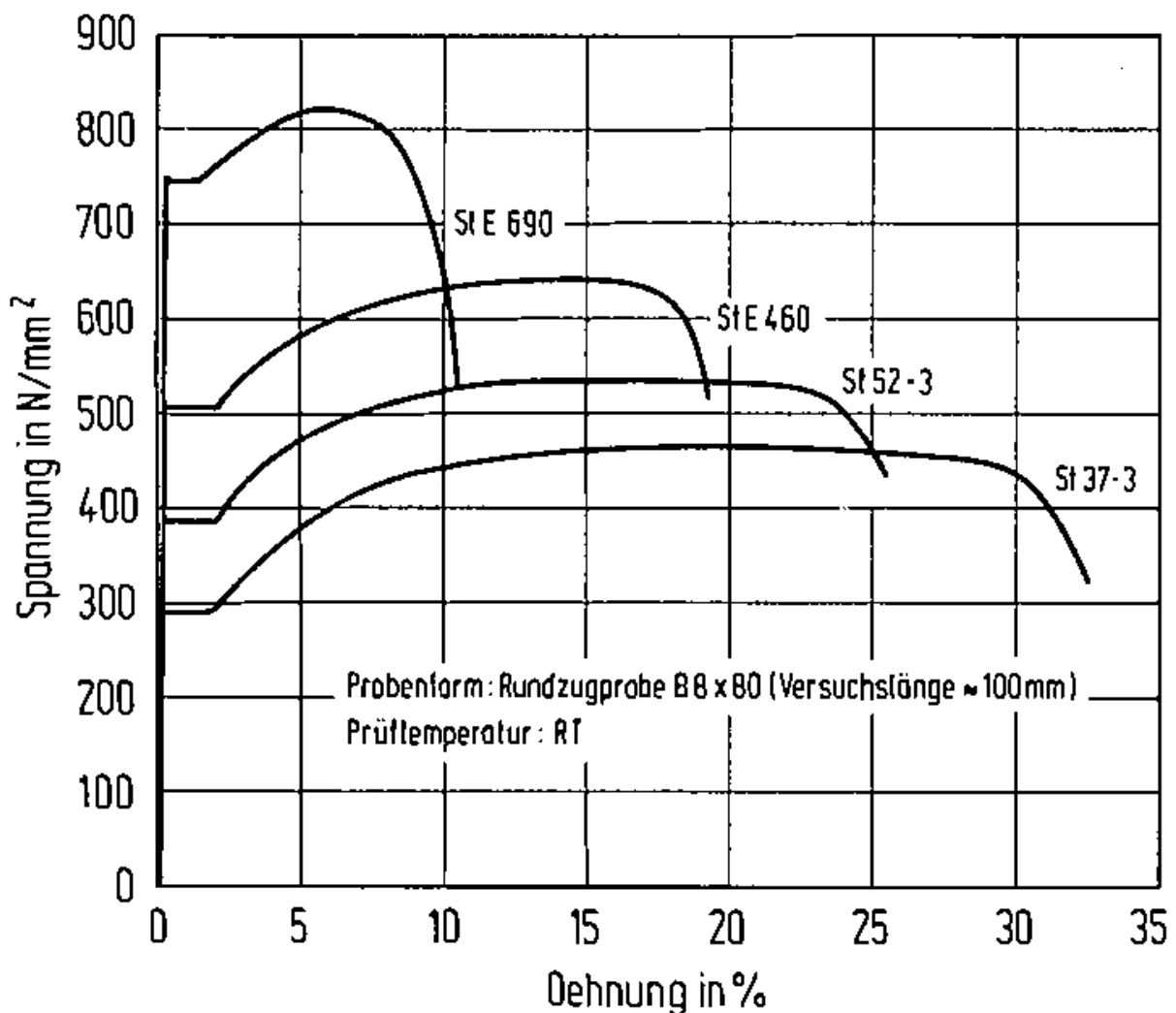
bezogen werden. Die wahren Spannungen, d.h. die auf den jeweils aktuellen minimalen Querschnitt bezogenen Spannungen, steigen bis zum Bruch weiter an.

#### Bruchdehnung $A$

plastische Dehnung der Probe zum Zeitpunkt des Bruches; wird von Hand dadurch ausgewertet, dass man die gebrochenen Hälften wieder zusammenschiebt und den Abstand der ursprünglich bei  $L_0$  liegenden Messmarken misst (siehe obiges Bild 11 aus ISO 6892-1).

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \quad (\text{in Prozent})$$

#### 7.2.4 Ergebnisse



(Auszug aus Stahlbauhandbuch 1982, Kapitel „Stähle“, Bild 7.4-2)



Im obigen Diagramm ist erkennbar, dass Stähle unterschiedlicher Festigkeit (S235, S355, S460, S690) den gleichen E-Modul haben. Abhängig von den Festigkeitseigenschaften verlassen sie in unterschiedlichen Höhen den elastischen Bereich. Meistens ist es so, dass eine Steigerung der Festigkeit mit einer Verringerung der Bruchdehnung einher geht. Im übrigen ist das Diagramm nur schematisch zu verstehen: das Fließplateau der unteren Fließgrenze erstreckt sich bei S235 über ca. 1-2 % plastischer Dehnung, mit zunehmender Werkstofffestigkeit wird es kleiner, S690 hat keine ausgeprägte Streckgrenze mehr.

MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN ZUGVERSUCH													
MECHANICAL CHARACTERISTICS TENSILE TEST													
B07	C00	C01/	B05	C10	C03	C11		C12	R/	C13			
SCHM.-	PROBE-	LAGE	ZUST.	FORM	ALTER	TEMP.	R	Rm	Rm	L0	A		
NR.	NR.					°C	MPa	MPa	%	mm	%		
											Rm*A		
078404	*55814	0401	0004	0002	0006	+20	379	RE H	541	70	200	29	15689
802784	*58652	0401	0004	0002	0006	+20	389	RE H	543	72	200	34	18462

Auszug aus einem Thyssen-Krupp Abnahmeprüfzeugnis 3.1 für S355J2

Schmelze Nr. 802784 (50 mm) und 078404 (70 mm)

freundlicherweise zur Verfügung gestellt von [www.hodapp.de](http://www.hodapp.de)

### 7.2.5 Mehrachsige Beanspruchung

Alle oben beschriebenen Eigenschaften beziehen sich auf den Standard-Zugversuch, d.h. auf eine einachsige Beanspruchung. Das Verhalten unter mehrachsiger Beanspruchung kann man nur sehr aufwendig testen. Bei einem dünnwandigen Hohlzylinder unter Innendruck, Längskraft und Torsion kann man z.B. unabhängig von einander die Umfangsspannung, die Längsspannung und den Schub einstellen (Hemmer 1984).

Wenn im Bauteil mehrachsige Beanspruchungen auftreten, so muss man mit anderen Mitteln das Versagen des Bauteils beurteilen, auch wenn man nur Informationen aus dem einachsigen Zugversuch hat. Dies geschieht über sogenannte Vergleichsspannungshypothesen: man vergleicht die mehrachsige Beanspruchung des Werkstoffes mit den Werkstoffwiderständen aus dem einachsigen Zugversuch.

Eine Hypothese, die für spröde Werkstoffe erfolgreich angewandt wird, ist die Hauptspannungshypothese. Der Werkstoff bricht, wenn die Hauptzugspannung größer ist, als die Werkstofffestigkeit.

Für den ebenen Fall lauten die Hauptspannungen (Winkler/Aurich 1985):

$$\sigma_{max,min} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau^2} ,$$

das positive Vorzeichen führt zur größeren Zugspannung, da die Wurzel stets positiv sein muss. Dies wurde wohl schon von Galilei so formuliert (Winkler/Aurich 1985).

Für duktile Werkstoffe wird heute die Gestaltänderungshypothese nach Huber, v. Mises und Hencky verwendet.

Für den ebenen Fall lautet die Vergleichsspannung (Winkler/Aurich 1985):

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau^2} .$$

Ihr Zahlenwert wird direkt mit den Ergebnissen für den einachsigen Zugversuch verglichen, da für den Zugstab gilt:

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau^2} = \sqrt{\sigma_x^2 + 0^2 - \sigma_x \cdot 0 + 3 \cdot 0^2} = \sqrt{\sigma_x^2} = \sigma_x .$$

Ebenso gewinnt man aus dieser Beziehung eine Aussage darüber, wie hoch die Schubtragfähigkeit des Werkstoffes ist. Für reine Schubspannungen gilt

$$\sigma_v = \sqrt{3\tau^2} , \text{ mit } \tau = \frac{\sigma_v}{\sqrt{3}} .$$

In der numerischen Strukturmechanik wird der Spannungszustand in Tensorschreibweise (Matrizenschreibweise) formuliert. Durch formale Transformationen lässt sich ein Spannungstensor in einen hydrostatischen Spannungszustand (Spannung in allen drei Raumrichtungen gleich) und den verbleibenden deviatorischen Spannungszustand aufspalten. Der hydrostatische Spannungszustand bewirkt kein Fließen eines duktilen Materials, so dass für ein Versagenskriterium nur der deviatorische Spannungszustand betrachtet zu werden braucht.

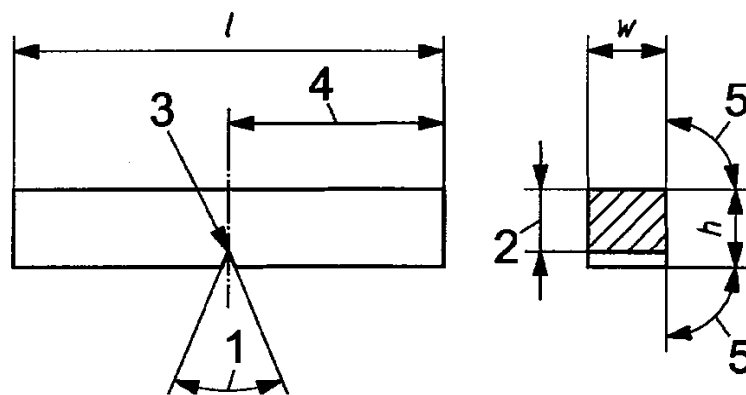
Wegen der formalen Gleichheit zwischen der oben angegebenen Huber-Mises-Hencky Beziehung und  $J_2$ , der zweiten Invarianten des deviatorischen Spannungstensors, bezeichnet man das v. Mises Kriterium in der Strukturmechanik auch als „ $J_2$  flow theory“. Die zahlenmäßige Verknüpfung erfolgt über die Beziehung  $J_2 = \tau^2$ .

Da die oben beschriebenen Methoden den Fließbeginn beschreiben, können sie, je nach den verwendeten Elementen und deren Beschreibung einer „Schale“ in Dickenrichtung,

plastische Reserven nicht beschreiben. Es entstehen daher u.U. Aussagen hinsichtlich der Tragfähigkeit, die zu stark auf der sicheren Seite liegen. Dem begegnet man z.B. durch Verwendung des Ilyushin-Kriteriums, nach welchem man entsprechend den bekannten Regeln für Rechteck-Querschnitte die Spannungen aus Biegemomenten mit dem plastischen Moment  $T^2/4$  auswertet anstatt mit dem elastischen Widerstandsmoment  $T^2/6$  (siehe z.B. EC3-1-6 Abs. 6.2.1 (2); Doerich/Rotter 2011).

## 7.3 Kerbschlagversuch

### 7.3.1 Probekörper

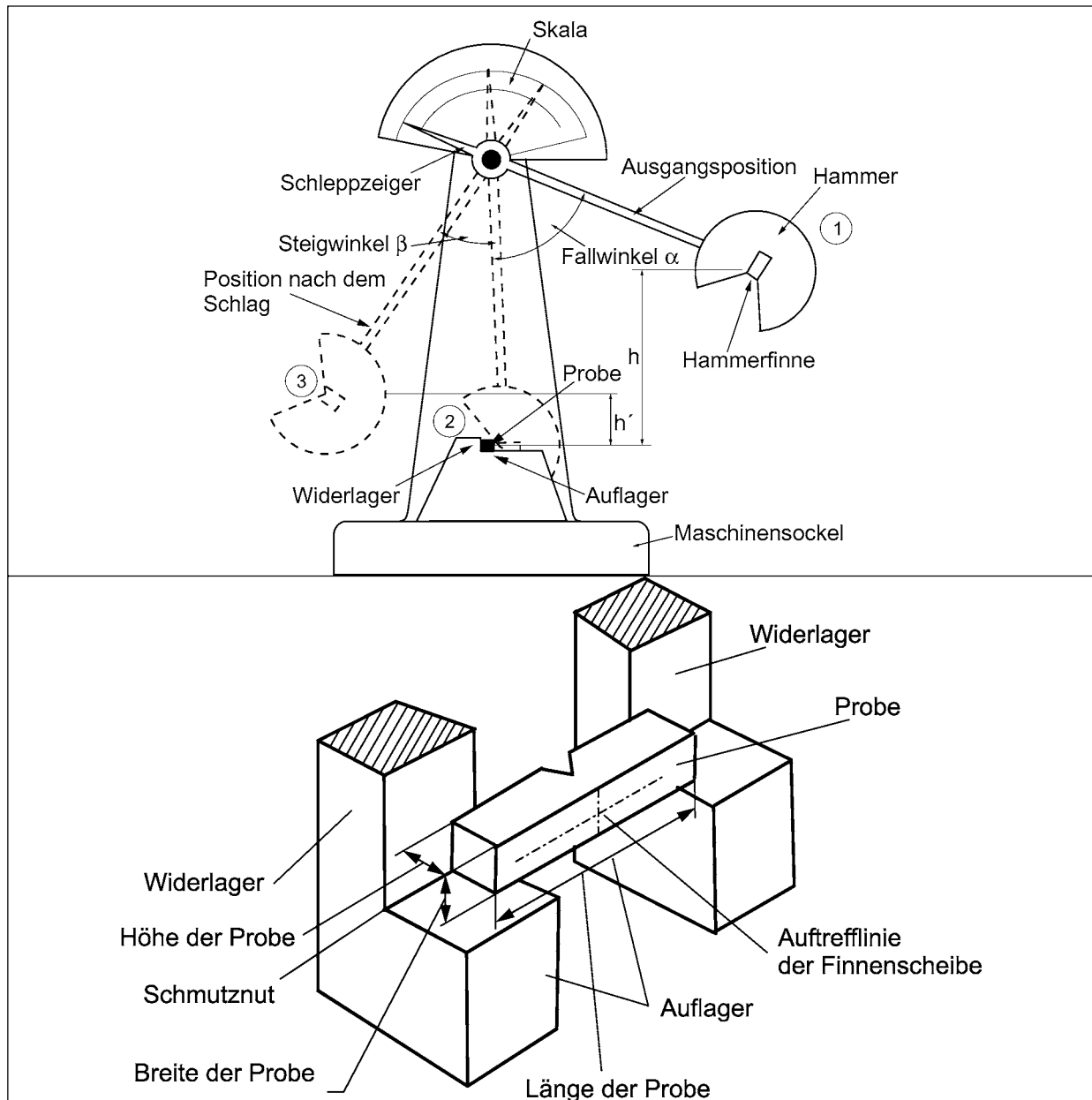


a) Geometrie für einen V-Kerb

(Auszug aus ISO 148-1)

Eine Kerbschlagprobe nach ISO 148-1 ist nach Tabelle 2 ein prismatischer Stab mit den Querschnittsabmessungen 10 mm x 10 mm und einer Länge von 55 mm. Sie hat eine 2 mm tiefe Kerbe mit dem Öffnungswinkel 45° und einem Kerbradius von 0,25 mm.

### 7.3.2 Versuchsdurchführung



**Abb. 4.1:** Prinzip des Kerbschlagbiegeversuchs

(aus Skript IWMF, siehe auch Knödel 2007)

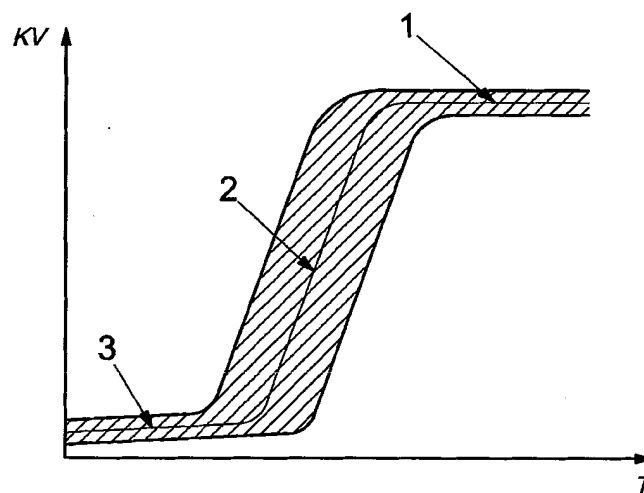
Die Probe wird gegen das Widerlager des Pendelschlagwerkes gelegt. Die Auflagerkanten haben nach ISO 148-2 Tabelle 3 einen lichten Abstand von 40 mm.

Nach dem Auslösen des Kerbschlag-Hammers aus Stellung 1 schwingt dieser am Tiefpunkt 2 durch die Probe und erreicht auf der Gegenseite die Position 3, die durch einen Schleppzeiger festgehalten wird. Der Hammer hat eine Pendellänge von ca. 75 cm und trifft die Probe mit ca. 5,5 m/s (Knödel 2007).

### 7.3.3 Versuchsauswertung

Aus der Höhendifferenz des Hammers, die zwischen dem Auslösen (Stellung 1) und nach dem Versuchsende (Stellung 3) verbleibt, kann die Energie KV errechnet werden, die in der Probe verblieben ist.

### 7.3.4 Ergebnisse



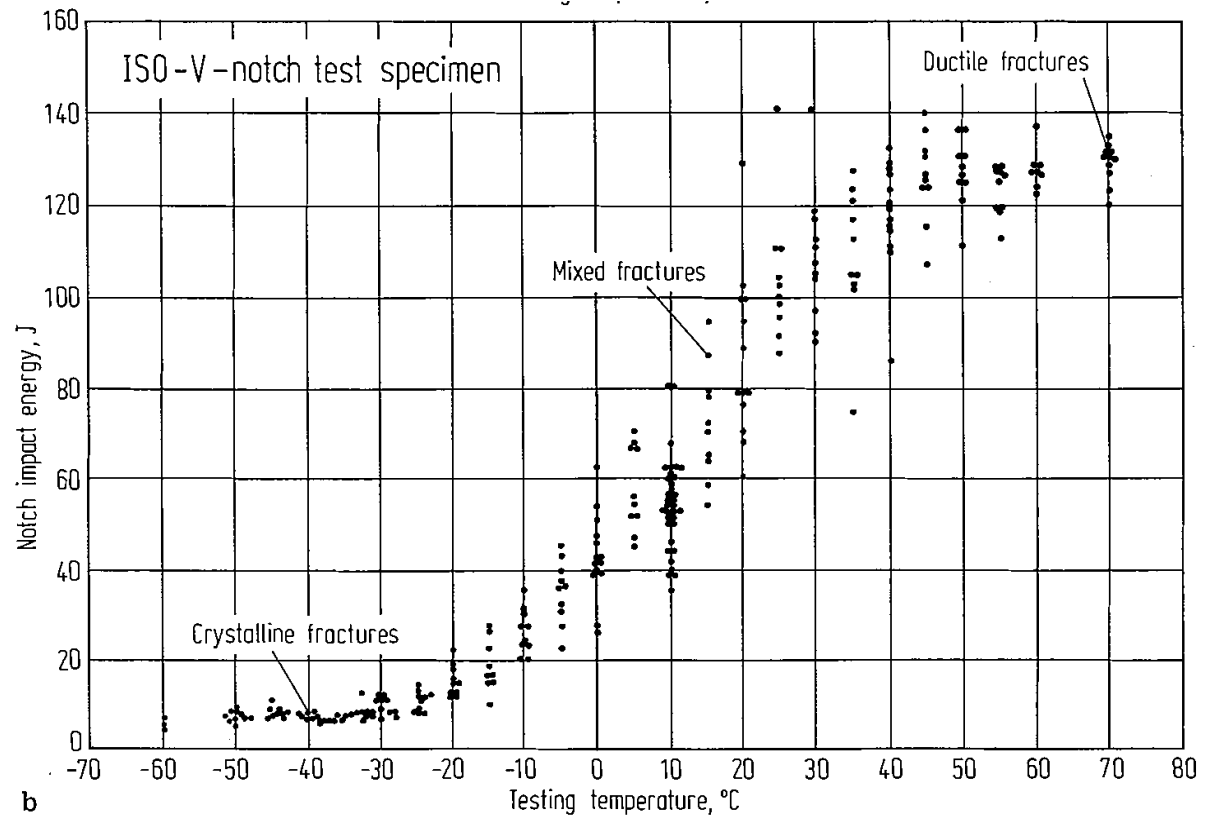
#### Legende

$T$	Temperatur
$KV$	verbrauchte Schlagenergie
1	Hochlage
2	Übergangsgebiet (Steilabfall)
3	Tieflage

**Bild D.1 — Schematische Darstellung der Kurve der verbrauchten Schlagenergie über der Temperatur**

(Auszug aus ISO 148-1)

Baustähle haben den in ISO 148-1 Bild D.1 dargestellten Steilabfall. Das bedeutet, es gibt einen Temperaturbereich, in dem sie extrem spröde sind. Die Lage dieses Steilabfalls kann man durch Legierungselemente verändern. Grundsätzlich muss man dafür sorgen, dass das Bauteil unter Betriebstemperatur in der Hochlage liegt, bei einer Kranbrücke im Freien wären das in Mitteleuropa  $-30^{\circ}\text{C}$ .



**Fig. B 1.66.** Notch impact energy-temperature curves obtained by test specimens with different shapes of the notch for an unalloyed steel containing about 0.22% C and with a yield stress of min. 255 N/mm<sup>2</sup> (St 42-2).

### Versuchsergebnisse einer Serie von Kerbschlagversuchen (Auszug aus Steel Vol. I 1992)

Es gibt Werkstoffe, wie z.B. nichtrostende austenitische Stähle („Edelstähle“) oder Aluminium, die keinen Steilabfall und keine Tieflage haben. Diese Werkstoffe sind daher zum Einsatz unter extrem kalten Bedingungen besonders geeignet (Flugzeugbau).

Die Eigenschaft eines Stahls, bei einer bestimmten Temperatur noch nicht in der Tieflage zu sein, wird über die Gütegruppe gekennzeichnet (siehe Abs. Begriffe).

MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN KERBSCHLAG BIEGEVERUCH										
MECHANICAL CHARACTERISTICS IMPACT TEST										
B07	C00	C01/ 02	B05	C40	C41	C03	C42	C42	C42	C43
SCHM.- NR.	PROBE-NR.	LAGE	ZUST.	FORM	B mm	ALTER	PRUEF- TEMP. °C	1	2	3 M
								ARBEIT [Joule]		
078404	*63402	0101	0004	0007	10,00	0006	-20	175	180	149 168
802784	*63599	0101	0004	0007	10,00	0006	-20	175	161	127 154

Auszug aus einem Thyssen-Krupp Abnahmeprüfzeugnis 3.1 für S355J2

Schmelze Nr. 802784 (50 mm) und 078404 (70 mm)

freundlicherweise zur Verfügung gestellt von [www.hodapp.de](http://www.hodapp.de)

Häufig wird missverstanden, dass man eine besondere Gütegruppe nur dann braucht, wenn das Bauteil tatsächlich einer schlagartigen Beanspruchung unterworfen ist. Über die technologische Eigenschaft „Kerbschlagarbeit“ wird aber auch die Fähigkeit des Werkstoffes beschrieben, einen bereits vorhandenen oder entstehenden Riss zähplastisch aufzufangen, so dass kein Spröbruch auftritt. Dies hat außer mit möglicher schlagartiger Beanspruchung auch mit den Eigenspannungen zu tun, die beim Schweißen in einem Bauteil entstehen, und unter sonst gleichen Bedingungen mit steigender Wanddicke kritischer werden.

Die Wahl einer geeigneten Gütegruppe hängt daher außer von der Betriebstemperatur auch von der Wanddicke ab. Die Zuordnung erfolgt nach EC3-1-10 Tabelle 2.1.

Stahlsorte		AC KV AC		Bezugstemperatur $T_{Ed}$ °C													
		bei $T$ °C	$J_{min}$	10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50
Stahl-sorte	Stahl-güte-gruppe			$\sigma_{Ed} = 0,75 f_y(t)$							$\sigma_{Ed} = 0,50 f_y(t)$						
S235	JR	20	27	60	50	40	35	30	25	20	90	75	65	55	45	40	35
	J0	0	27	90	75	60	50	40	35	30	125	105	90	75	65	55	45
	J2	-20	27	125	105	90	75	60	50	40	170	145	125	105	90	75	65
S275	JR	20	27	55	45	35	30	25	20	15	80	70	55	50	40	35	30
	J0	0	27	75	65	55	45	35	30	25	115	95	80	70	55	50	40
	J2	-20	27	110	95	75	65	55	45	35	155	130	115	95	80	70	55
	M,N	-20	40	135	110	95	75	65	55	45	180	155	130	115	95	80	70
	ML,NL	-50	27	185	160	135	110	95	75	65	200	200	180	155	130	115	95
S355	JR	20	27	40	35	25	20	15	15	10	65	55	45	40	30	25	25
	J0	0	27	60	50	40	35	25	20	15	95	80	65	55	45	40	30
	J2	-20	27	90	75	60	50	40	35	25	135	110	95	80	65	55	45
	K2,M,N	-20	40	110	90	75	60	50	40	35	155	135	110	95	80	65	55
	ML,NL	-50	27	155	130	110	90	75	60	50	200	180	155	135	110	95	80

(Aus

zug aus EC3-1-10 Tabelle 2.1)

## 8. Einkauf

Metallische Werkstoffe oder Halbzeuge werden nach Technischen Lieferbedingungen gekauft. Die wichtigsten Technischen Lieferbedingungen sind z.B.

EN 10025 für warmgewalzte Halbzeuge

EN 10088 für nichtrostende Stähle

Darüber hinaus gibt es dann noch weitere Technische Lieferbedingungen die z.B. die Form von I-Profilen sowie deren geometrische Toleranzen beschreiben.

Nur wenn die Bestellung vollständig und richtig nach einer Technischen Lieferbedingung erfolgt ist, kann man sich darauf verlassen, dass man den Werkstoff bekommt, den man gewollt hat.



Dies lässt man sich durch ein Werkszeugnis bestätigen, vorzugsweise durch ein Abnahmeprüfzeugnis nach EN 10204-3.1 (spezifische Prüfung).

Beispiel: <Menge><Erzeugnisform> EN 10025-2 S235JR <Maße><Toleranzen>  
Optionen 3 und 5; EN 10204-3.1

Hinweis: Option 3: Kerbschlagarbeit der Gütegruppe JR ist nachzuweisen;  
Option 5: zum Schmelztauchverzinken geeignet;

## **9. Ausblick**

Außer den oben dargestellten gibt es noch eine Reihe weiterer technologischer Eigenschaften, deren Begriffe hier eingeführt werden:

- Risszähigkeit, Rissfortschrittsgeschwindigkeit  
Mit der Risszähigkeit wird beschrieben, unter welcher Beanspruchung ein schon vorhandener Riss im Werkstoff endgültig und möglicherweise spröde durchreißt. Mit der Rissfortschrittsgeschwindigkeit wird beschrieben, welche Verlängerung eines Risses unter einem vorhandenen Beanspruchungszyklus auftritt. Zur Beantwortung dieser Fragen hat sich eine eigene Disziplin etabliert, die Bruchmechanik. Siehe hierzu Skript unter [www.peterknoedel.de/lehre/bruchmech/bruchmech.htm](http://www.peterknoedel.de/lehre/bruchmech/bruchmech.htm)
- Schweißeignung  
Unter schweißgeeigneten Stählen versteht man Stähle, die ohne besondere Maßnahmen wie z.B. Vorwärmen geschweißt werden können. Bei unlegierten Baustählen gilt dies für einen Kohlenstoffgehalt bis max. 0,22 % bzw. ein Kohlenstoffäquivalent von 0,35 % (aber auch darüber, siehe EN 10025-2 Tab. 6).
- zum Verzinken geeignet  
Das gewünschte Ergebnis beim Schmelztauchverzinken („Feuerverzinken“) - gleichmäßige Schichtdicke mit einheitlichem Aussehen und einer Schichtdicke von ca. 80-100  $\mu\text{m}$  lässt sich nur dann erreichen, wenn der Siliziumgehalt (und andere Legierungselemente) innerhalb bestimmter Schranken liegen.

## 10. Literatur

### 10.1 Normen und Regelwerke

- [1] DIN EN ISO 148: Metallische Werkstoffe – Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy. Metallic materials – Charpy pendulum impact test.  
Teil 1: Prüfverfahren (ISO 148-1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 148-1:2010. Januar 2011.  
Part 1: Test method (ISO 148-1:2009); German version EN ISO 148-1:2011. January 2011.  
Teil 2: Prüfung der Prüfmaschinen (Pendelschlagwerke) (ISO 148-2:2008); Deutsche Fassung EN ISO 148-2:2008. September 2009.  
Part 2: Verification of testin machines (ISO 148-2:2008); German version EN ISO 148-2:2008. September 2009.  
Teil 3: Vorbereitung und Charakterisierung von Charpy-V-Referenzproben für die indirekte Prüfung der Prüfmaschinen (Pendelschlagwerke) (ISO 148-3:2008); Deutsche Fassung EN ISO 148-3:2008. Juni 2009.  
Part 3: Preparation an characterization of Charpy-V-notch test pieces for indirect verification of pendulum impact machines (ISO 148-3:2008); German version EN ISO 148-3:2008. June 2009.
- [2] DIN EN 1993 Eurocode 3 (EC3): Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Design of steel structures.  
Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005. General rules and rules for buildings  
EN 1993-1-10:2005-05 Material toughness and through-thickness properties.
- [3] DIN EN ISO 6892: Metallische Werkstoffe – Zugversuch. Metallic materials – Tensile testing  
Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 6892-1:2009. Dezember 2009.  
Part 1: Method of test at room temperature  
Teil 2: Prüfverfahren bei erhöhter Temperature (ISO 6892-2:2011); Deutsche Fassung EN ISO 6892-2:2011. Mai 2011.  
Part 2: Method of test at elevated temperature
- [4] DIN EN 10025: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen. Hot rolled products of structural steels.  
Teil 1: Allgemeine technische Lieferbedingungen. Februar 2005.  
Part 1:2005-02 General technical delivery conditions; German version EN 10025-1:2004.  
Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle. April 2005.  
Part 2:2005-04 Technical delivery conditions for non-alloy structural steels; German version EN 10025-2:2004.  
Teil 3: Technische Lieferbedingungen für normalgeglühte/normalisierend gewalzte schweißgeeignete Feinkornbaustähle. Februar 2005.  
Part 3: Technical delivery conditions for normalized/normalized rolled weldable fine grain structural steels; German version EN 10025-3:2004.  
Teil 4: Technische Lieferbedingungen für thermomechanisch gewalzte schweißgeeignete Feinkornbaustähle. April 2005.  
Part 4: Technical delivery conditions for thermomechanical rolled weldable fine

- grain structural steels; German version EN 10025-4:2004.  
Teil 5: Technische Lieferbedingungen für wetterfeste Baustähle. Februar 2005.  
Part 5: Technical delivery conditions for structural steels with improved atmospheric corrosion resistance; German version EN 10025-5:2004.  
Teil 6: Technische Lieferbedingungen für Flacherzeugnisse aus Stählen mit höherer Streckgrenze im vergüteten Zustand. Februar 2005.  
Part 6: Technical delivery conditions for flat products of high yield strength structural steels in the quenched and tempered condition; German version EN 10025-6:2004.
- [5] DIN EN 10088: Nichtrostende Stähle. Stainless steels.  
Teil 1:2005-09 Verzeichnis der nichtrostenden Stähle (Deutsche Fassung EN 10088-1:2005).  
Part 1:2005-09 List of stainless steels (German Version EN 10088-1:2005).  
Teil 2:2005-09 Technische Lieferbedingungen für Blech und Band aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung (Deutsche Fassung EN 10088-2:2005).  
Part 2:2005-09 Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes (German Version EN 10088-2:2005).  
Teil 3:2005-09 Technische Lieferbedingungen für Halbzeug, Stäbe, Walzdraht, gezogenen Draht, Profile und Blankstahlerzeugnisse aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung (Deutsche Fassung EN 10088-3:2005).  
Part 3:2005-09 Technical delivery conditions for semi-finished products, bars, rods, wire, sections and bright products of corrosion resisting steels for general purposes (German Version EN 10088-3:2005).  
Teil 4 (Entwurf):2006-01 Technische Lieferbedingungen für Blech und Band aus korrosionsbeständigen Stählen für das Bauwesen (Deutsche Fassung prEN 10088-4:2005).  
Part 4 (draft):2006-01 Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for construction purposes (German Version prEN 10088-4:2005).  
Teil 5:2009-07 Technische Lieferbedingungen für Stäbe, Walzdraht, gezogenen Draht, Profile und Blankstahlerzeugnisse aus korrosionsbeständigen Stählen für das Bauwesen (Deutsche Fassung prEN 10088-5:2009).  
Teil 5 (Entwurf):2006-01 Technische Lieferbedingungen für Stäbe, Walzdraht, gezogenen Draht, Profile und Blankstahlerzeugnisse aus korrosionsbeständigen Stählen für das Bauwesen (Deutsche Fassung prEN 10088-5:2005).  
Part 5 (draft):2006-01 Technical delivery conditions bars, rods, wire, sections and bright products of corrosion resisting steels for construction purposes (German Version prEN 10088-5:2005).
- [6] DIN EN 10204: Metallische Erzeugnisse; Arten von Prüfbescheinigungen; Deutsche Fassung EN 10204:2004. Januar 2005.  
Metallic products; Types of inspection documents; German version EN 10204:2004. January 2005.
- [7] DIN EN ISO 14556:2006-10 Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy (V-Kerb) – Instrumentiertes Prüfverfahren. Deutsche Fassung EN ISO 14556:2000 + A1:2006.  
Steel – Charpy V-notch pendulum impact test – Instrumented test method. German version EN ISO 14556:2000 + A1:2006.

## **10.2 Fachliteratur**

- [8] Deutscher Stahlbau Verband (Hrsg.): Stahlbau Handbuch, Für Studium und Praxis, 2. Auflage, Stahlbau-Verlags-GmbH, Köln. Band 1 (1982), Band 2 (1985).
- [9] Doerich, C., Rotter, J.M.: Estimating the Plastic Collapse Load of a Shell using LA, MNA and GMNA Finite Element Analyses. ICTWS 2011, 6<sup>th</sup> Int. Conf. on Thin Walled Structures, 05-07 September 2011, Timisoara, Romania.
- [10] Hemmer, K.: Versagensarten des Holzes der Weißtanne (*Abies alba*) unter mehrachsiger Beanspruchung. Diss. Karlsruhe 1984.
- [11] IWMF Institut für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre, Universität Stuttgart, [www.imwf.uni-stuttgart.de/lehre/vd/wkp/Script\\_pdf/04\\_Kerbschlag.pdf](http://www.imwf.uni-stuttgart.de/lehre/vd/wkp/Script_pdf/04_Kerbschlag.pdf), 16.01.07.
- [12] Knödel, P.: Bruchmechanik. Skriptum zur Vorlesung im Rahmen der Schweißfachingenieurausbildung an der SLV-Mannheim. Von 2004 bis 2007 laufend aktualisiert. Herunterladbar unter [www.peterknoedel.de/lehre/bruchmech/bruchmech.htm](http://www.peterknoedel.de/lehre/bruchmech/bruchmech.htm)
- [13] Knödel, P.: Schweißanschlüsse bei „Außergewöhnlichen Einwirkungen“. Vortrag in der SLV Mannheim am 01.02.2007. Skript enthalten in den Seminarunterlagen der SLV Mannheim und herunterladbar von [www.peterknoedel.de](http://www.peterknoedel.de).
- [14] Knödel, P.: Lehrunterlagen Stahlbau an der Fachhochschule Augsburg, herunterladbar über [www.peterknoedel.de/lehre/lehre.htm](http://www.peterknoedel.de/lehre/lehre.htm), laufend aktualisiert.
- [15] Steidl, G.: Persönliche Mitteilung an P. Knödel 2007.
- [16] Verein deutscher Eisenhüttenleute (ed.): Steel. A Handbook for Materials Research and Engineering. Volume 1: Fundamentals. Springer, Berlin 1992. Volume 2: Applications. Springer, Berlin 1993.
- [17] Winkler, J., Aurich, H.: Taschenbuch Technische Mechanik. Harri Deutsch, Frankfurt 1985.