



Werkstoffe

Unterrichtsplanung für TGTM-E

Inhaltsverzeichnis

Lehrplan TGTM von 20101	Bindungsmechanismus bei Metallen4	Spannungs-Dehnungs-Diagramm5
Bezeichnungen metallischer Werkstoffe . 2	typische Merkmale der Metalle4	mit ausgeprägter Streckgrenze5
.. nach Zusammensetzung2	Verformung von Metallen unter Spannung ...4	ohne ausgeprägte Streckgrenze5
unlegierte Stähle2	elastische Verformung4	Vorgänge im Werkstoff6
(niedrig-)legierte Stähle2	plastische Verformung4	elastische Verformung6
(hoch-)legierte Stähle2	Kaltverfestigung4	Einschwingverhalten6
Schnellarbeitsstähle2	Legierung4	plastische Verformung6
NE-Metalle2	mikroskopische Struktur4	Kaltverfestigung6
.. nach Verwendungszweck3	Wachstum aus der Schmelzen4	Einschnürung6
Stähle3	Gefüge4	Kennwerte aus dem Zugversuch6
Gusseisen3	Gitterfehler4	Streckgrenze R_e – Dehngrenze $R_{p0,2}$6
Sonstige Bezeichnungen3	Zugversuch5	(Der) Elastizitätsmodul E6
Stahlgruppen nach Einsatzzweck3	Zweck5	Zugfestigkeit R_m6
Einteilung nach Gebrauchseigenschaften .3	Durchführung5	Bruchdehnung A ($=A_5$) oder A_{10}6
Werkstoff-Nr / Stahlschlüssel3	Zugprobe5	Brucheinschnürung Z6
Stahl für Bleche3	Ablauf5	Streckgrenzenverhältnis V_s6
Sintermetalle3	Standardisierung5	Bruchdehnung $A_5 \leftrightarrow A_{10}$7
Einteilung nach Reinheit3	Zugkraft $F \leftrightarrow$ Zugspannung σ_z5	Zusammenhang zwischen A_5 , A_{10} und A_g .7
Aufbau metallischer Werkstoffe4	Längenänderung $\Delta L \leftrightarrow$ Dehnung ϵ5	Zugversuch im Mindmap8

Lehrplan TGTM von 2010

Richtziele des Unterrichts in Jahrgangsstufe TGTM-E

In der Eingangsklasse planen und realisieren die Schülerinnen und Schüler den Herstellungsprozess von Bauteilen. Sie berücksichtigen hierbei Konstruktion, Werkstoffeigenschaften und Fertigungsverfahren.

T 3	Werkstoffe	12 Stunden
Die Schülerinnen und Schüler unterscheiden Stahlarten, Gusswerkstoffe und NE-Metalle bezüglich ihrer Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten und wenden die Systematik der Werkstoffnormung an. Aus dem Zugversuch ermitteln sie charakteristische Werkstoffkennwerte und normieren diese. Bei der Werkstoffauswahl beachten sie die Wiederverwertbarkeit und Umweltaspekte. Werkstoffnormung Zugversuch – Proportionalstab – Kraft-Verlängerungs-Diagramm – Spannungs-Dehnungs-Diagramm – elastische und plastische Verformung – E-Modul – R_e , $R_{p0,2}$, R_m – Bruchdehnung – Festigkeitsklassen von Schrauben		Vgl. LPE 7 Realisierung eines technischen Produkts



Bezeichnungen metallischer Werkstoffe

Ziel: Werkstoffbezeichnung kennen und im TabB finden.

[Schwab 2013]: Ggü den alten Bezeichnungen fallen die Leerstellen weg, Zahlen werden durch Bindestriche getrennt.

.. nach Zusammensetzung

unlegierte Stähle

Stahl = Fe mit max. 2% C

C45E

C Kennbuchstabe (enthält neben Fe nur C)

45 Kohlenstoffgehalt 0,45%

E Zusatzsymbole (hier: wenig S)

(niedrig-)legierte Stähle

kein Legierungselement über 5%

30NiCrMo16-6

30 Kohlenstoffgehalt 0,45%

→ Fe und C sind immer drin,
muss man nicht angeben

Ni, Cr, Mo Legierungselemente Nickel, Chrom ..

→ TaB „Periodensystem“

16 Ni-Gehalt = 16%/4 = 4%

6 Cr-Gehalt = 6%/4 = 1,5%

Mo-Gehalt = nicht angegeben

(hoch-)legierte Stähle

mind. ein Legierungselement > 5%

X38CrMoV5-3

X Kennbuchstabe für hochlegierter Stahl

38 Kohlenstoffgehalt 0,38%

Cr, Mo, V Legierungselemente Chrom,

Molybdän ..

→ TaB „Periodensystem“

5 Cr-Gehalt =

3 Mo-Gehalt = 3%

V-Gehalt nicht angegeben

Schnellarbeitsstähle

Stähle für Bohrer, Drehmeißel usw.

HS10-4-3-10

HS Kennbuchstabe für Schnellarbeitsstahl

'High Speed Steel'

10-4-3-10 Anteile W-Mo-V-Co

10% W, 4% Mo, 3% V, 10% Co

NE-Metalle

EN AW – AlZn5Mg3Cu

ENEuropäische Norm (entfällt oft)

AW Aluminium-Halbzeug (Knetlegierung)

AC: Gusslegierung

Al Hauptlegierungselement

Zn5 5% Zink

Mg3 3% Magnesium

CuAnteile Kupfer

keine Teiler, Elemente und Anteil stehen beieinander

- 1) Nehmen Sie das TabB, Kapitel Werkstofftechnik (Griffleiste W), suchen Sie Werkstoffe und nennen Sie mir die Abkürzungen.
[EuroTabM46] S.130..144 (Stahl); S.163ff (Gusseisen), S.171..181 (NE-Metalle)
Alle Abkürzungen durcheinander (!) an der Tafel notieren. Anschließend je ein Beispiel aus den Werkstoff-Gruppen verschieden markieren (Farben). Für die anderen Beispiele geben SuS nach dem Prinzip der Mustererkennung die Farbe an.
- 2) GA: Erklären Sie die Bedeutung der Werkstoffbezeichnung.
Eine Schülergruppe je Werkstoffgruppe.

Beispiele → [EuroTabM46] S.133 (Einsatzstähle), S.134 (Vergütungsstähle), S.135 (Stähle für Flamm- und Induktionshärtung), S.136 (Werkzeugstähle), S.140 (Automatenstähle), weitere möglich
Entschlüsselung → [EuroTabM46] S.125

- 1) Am TG suchen wir die Werkstoffe meist wegen der Festigkeitswerte.
Wie unterscheiden sich diese Werte bei C60 und C60E?

Im Rohzustand (normalgeglüht) sind die Festigkeitswerte bei beiden Werkstoffen gleich, der Unterschied kommt erst durch die Wärmebehandlung Vergüten (+QT) zustande.

Beispiele → [EuroTabM46] S.133 (Einsatzstähle), S.134 (Vergütungsstähle), S.135 (Stähle für Flamm- und Induktionshärtung), S.136 (Werkzeugstähle), weitere möglich
Entschlüsselung → [EuroTabM46] S.125 (einschließlich Faktoren)

- 1) 16% Ni und 6% Cr wäre nicht niedriglegiert. Bedeutung der Zahlen?
Man möchte Kommas und mehrstellige Zahlen in der Bezeichnung vermeiden.
- 2) Welchen Teiler hat Kohlenstoff?
- 3) Eselsbrücke für die Elemente mit dem Teiler 4 (M für Mangan statt Mn):

Das Cr Co Si Wohnt Meist am Nil

Teiler heißen im TabB „Faktoren für die Anteile“.

Erst die Liste der Elemente, dann die Liste der Anteile!

Teiler beachten! → TabB S.....

Beispiele → [EuroTabM46] S.136 (Werkzeugstähle), S.137f (Nichtrostende Stähle)
Entschlüsselung → [EuroTabM46] S.126

- 1) Entschlüsselung der Legierungsanteile?

In der Hoffnung, das SuS den Teiler einsetzen..

- 2) Warum jetzt wieder keinen Teiler

Bei höheren Anteilen braucht es keine Kommastellen. Und wenn alles so einfach wäre, bräuchte man keine Abiturienten :-)

X → Fe und C sind immer drin, muss man nicht angeben

X → keine Faktoren (außer für C)

Beispiele → [EuroTabM46] S.136 (Werkzeugstähle)
Entschlüsselung → [EuroTabM46] S.125

TG: nicht benötigt

Beispiele → [EuroTabM46] S.171-173 (Al), S.177 (Mg, Ti), S.180-181 (Cu)
Entschlüsselung → [EuroTabM46] S.170 (Al Knet-Leg.), S.173 (Al Guss-Leg.), S.179 (Schwermetalle)

Man unterscheidet zwei Legierungstypen:

Gusslegierungen bestehen aus verschiedenen Kristallen, die wie bei einem Wasser-Salz-Gemisch den Schmelzpunkt senken. Knetlegierungen bestehen aus Kristallen, die 'intern' legiert sind; wegen ihres gleichartigen Aufbaus nehmen sie die Umformarbeit gleichmäßig auf und sind für Umformen geeignet.

Halbzeug: Halbfertiges Produkt, z.B. Stangen, Rohre, Platten .. werden durch Walzen oder anderen Umformverfahren hergestellt.



.. nach Verwendungszweck

Stähle

S275JR

S Verwendungszweck

- S: structure steel = Baustahl, für Stahlbau
- E: engineering steel = Maschinenbaustahl
- P: pressure vessel steel = Druckbehälterstahl

275 Eigenschaft

(hier: Streckgrenze $R_e = 275 \text{ N/mm}^2$
über 275 MPa beginnt plastische Verformung)

JR Zusatzsymbole

Kerbschlagarbeit 27J bei RT = 20°C

Gusseisen

GJL-150

G Gusseisen

J Iron

L Lamellengrafit

S: Kugelgrafit (Sphärisch)

150 Eigenschaft

(hier: Zugfestigkeit $R_m = 150 \text{ N/mm}^2$)

Sonstige Bezeichnungen

Stahlgruppen nach Einsatzzweck

- Einsatz- und Vergütungsstähle
- Stähle für Flamm- und Induktionshärtung
→ für Wärmebehandlungsverfahren
- Werkzeugstähle
→ Drehmeißel ..
- Automatenstähle
→ für Verarbeitung auf Dreh- und Fräsaufmaschinen
besonders geeignet

Einteilung nach Gebrauchseigenschaften

Grundstähle: ohne besondere Eigensch.

Qualitätsstähle: höhere Reinheit

→ für Wärmebehandlung

Edelstähle: besonders rein und gleichmäßig

→ für Vergütung und Randschichthärtung

Werkstoff-Nr / Stahlschlüssel

Stahl für Bleche

D C 04 – A – m	Blech
H C 300 B	höherfestes Blech
DX53D+Z	veredeltes Blech

Sintermetalle

Sint E Sinter-Aluminium

Stahlschlüssel

Einteilung nach Reinheit

Allgemeiner Baustahl, Einsatzstahl, Vergütungsstahl, Nitrierstahl, Federstahl, Ventilstahl, Automatenstahl, Werkzeugstahl, Kesselstahl (Druckbehälterstahl?)

Beispiele → [EuroTabM46] S.131: S185
Entschlüsselung → [EuroTabM46] S.123

Alt: St 37

1) Am TG suchen wir die Werkstoffe meist wegen der Festigkeitswerte.

Wie unterscheiden sich diese Werte bei S235JR, S235JO und S235J2?

Bei Baustählen werden häufig Angaben zur Kerbschlagarbeit gemacht (JR, JO..), weil Baustähle bei Kälte, Kerbwirkung und schlagartiger Belastung zum spröden Brechen (ohne Vorankündigung) neigen. Angegeben wird die Kerbschlagarbeit (J für 27J; K für 40 J) und zugehörige Temperatur (R für 20°C, 0 für 0°C, 2 für -20°C). Je niedriger die Temperatur und je höher die Kerbschlagarbeit, desto besser.

Zusatzsymbole können am TG meist ignoriert werden

Beispiele → [EuroTabM46] S.164..166
Entschlüsselung → [EuroTabM46] S.163

Alt: GG-15

S.261: J für Iron, weil man im Englischen manchmal J statt I schreibt, um das I nicht mit der 1 zu verwechseln, die im Englischen ebenfalls I geschrieben wird. Da Gusseisen praktisch keinen plastischen Bereich hat, wird weiterhin R_m angegeben.

2) Was ist ein Vergütungsstahl?

Vergütungsstähle sind für das Wärmebehandlungsverfahren Vergüten geeignet, und erreichen nach dem Vergüten deutlich höhere Festigkeitswerte.

Automatenstähle enthalten geringe Anteile von S, Pb (kommt aus der Mode, Bismut als Ersatzstoff siehe NE-Metalle).., die Späne brechen. A. werden verwendet, wenn spanende Fertigung gewünscht ist und keine besonderen Werkstoffeigenschaften gefordert sind. Pb kommt aus der Mode wegen seiner gesundheitsgefährdenden Wirkung.

Beispiele → [EuroTabM46] bei jedem Werkstoff
Entschlüsselung → [EuroTabM46] S.122

Beispiele → [EuroTabM46] S. 143f
Entschlüsselung → [EuroTabM46] S.124

Beispiele → [EuroTabM46]
Entschlüsselung → [EuroTabM46] S.183

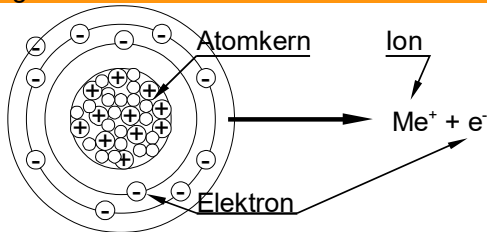
Sintern = Urformen durch Pressen von Metallpulver

Grundstahl, Qualitätsstahl, Edelstahl



Aufbau metallischer Werkstoffe

Bindungsmechanismus bei Metallen



Me geben leicht die äußeren (Valenz-)elektronen ab. e⁻ bilden frei bewegliches Elektronengas und binden Me⁺.

Die Bindung ist richtungsunabhängig (isotrop).

typische Merkmale der Metalle

Elektronenwolke / Elektronengas

- hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit
elektrochemische Korrosion, Supraleitung
- hohe Festigkeit

FO Schildkröttaktik

- richtungsunabhängige Bindung (Isotropie)
- **Metallatome streben zur dichtesten Packung**
- einfache umformbare Gitter (Kristalle)
Gleitebenen ermöglichen Verschieben und erneute Bindung, Details s.u..

Erst Umformbarkeit macht Metalle technisch nutzbar.

→ Atome sind austauschbar → Legierbarkeit

→ metallischer Glanz nach dem Bruch

Verformung von Metallen unter Spannung

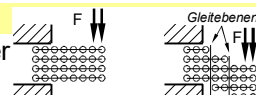
elastische Verformung

erfordert Überbiegen o.ä.



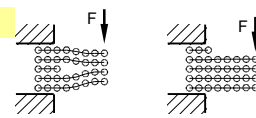
plastische Verformung

durch Versatz an Gleitebenen oder Zwillingsbildung



Kaltverfestigung

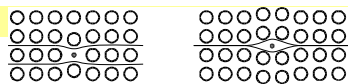
durch Schließen von Gitterfehlern



Legierung

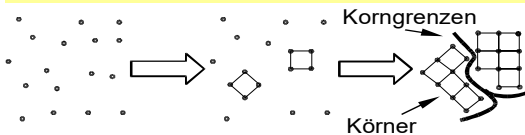
stört Gleitebenen

→ steigert Festigkeit



mikroskopische Struktur

Wachstum aus der Schmelzen



Gefüge

- Körner (Kristalle) + Korngrenzen = Gefüge
 (feines Korn erhöht die Festigkeit)

[Schwab 2013] S.45: „Erst bei hohen Temperaturen stellen Korngrenzen Schwachpunkte dar, weil dann ein Korn am anderen abgleiten kann, so wie Menschen auf Glatteis.“

Gitterfehler

- Fremdatome (→ erhöhte Festigkeit)
- Lücken (→ Umformbarkeit)
- Verschiebung ganzer Lagen
- Gitterfehler senken die Festigkeit

Ohne Gitterfehler sind Metalle mechanisch nicht nutzbar.

[GrundwissenIng8] S.1003: „Metallische Bindung beruht darauf, dass Metalle sehr dazu neigen, positive Atomrümpfe zu bilden, wobei sie Elektronen der äußeren Schale abgeben, die dann nicht mehr zu einem bestimmten Atom gehören, sondern sich gewissermaßen 'frei' zwischen den positiven Atomrümpfen bewegen (freie Elektronen, Elektronengas). Sie bewirken als 'Kitt' den Zusammenhalt der gleichnamig geladenen Metallatomrümpfe. Außerdem ist ihre Beweglichkeit die Ursache für die gute Leitfähigkeit der Metalle für Elektrizität und Wärme.“

AM Al-Blech mit großen Kristallen

- 1) Welche Struktur ist hier zu erkennen ?
- 2) Welche Bindungsmechanismus verursacht solche Strukturen ? bzw. Wie sind Metallatome miteinander verbunden ?

Metallatome geben leicht ihre äußeren Valenzelektronen ab. Da im reinen Metall keine Atome vorhanden sind, die Elektronen aufnehmen, bilden sie eine frei bewegl. Elektronenwolke, die für die typischen metallischen Eigenschaften verantwortlich ist. Die richtungsunabhängige Bindung bewirkt, dass Metallatome zu dichten und dichtesten Packungen neigen.

FO Bindungsarten

[Tipler 1995] S.1317: Die „Wellenfunktion (der Valenzelektronen) erstreckt sich über das ganze Volumen“

Bindungsarten: [Hering 1992] S.634

Kräfte: Elektromagnet. Kraft bindet Atome zu Molekülen, schwache und starke Kraft binden Protonen und Neutronen, starke Kraft bindet Quarks. Protonen bestehen aus 2 up- und 1 down-Quarks, Neutronen aus 2 down- und 1 up-Quark. Isotropie = Unabhängigkeit einer Eigenschaft von der Richtung. Nicht zu verwechseln mit isentrop (= Zustandsänderung mit konstanter Entropie → Thermodynamik)

- 1) Welche typischen Merkmale folgen aus dem Bindungsmechanismus ?

[Hering 1992] S.684: "In reinen Metallen ist die Wärmeleitfähigkeit durch Elektronen stets ein bis zwei Größenordnungen größer als durch Gitterschwingungen..."
[Hütte 29] B156: Elektrischer Widerstand bei Metallen durch Gittergrenzen und -fehler und durch schwingende Atome
 Salze ziehen unter elektrischem Strom (Elektrolyse). Ihre thermische Leitfähigkeit beruht auf der engen Kopplung der Ionen, die Gitterschwingungen übertragen, und ist vermutlich geringer als bei Metallen.

Tischtennisbälle (Metallatome) ordnen sich in einer Kiste richtungsunabhängig, im Gegensatz zu Nägeln (Salzionen mit gerichteter Ionenpaarbindung).

- 2) Wie ordnen sich TT-Bälle an ?

Verformung findet in den Gitterebenen statt. Komplizierte Gitter (Zementit, Diamant, Quarz usw.) sind schwerer verformbar. Salze haben gerichtete Pole (Ionen), die bei Verschiebung einer Atomlage zu Abstoßung führen; [Skolaut 2014] S.344 Salze brechen im Sprödebruch.

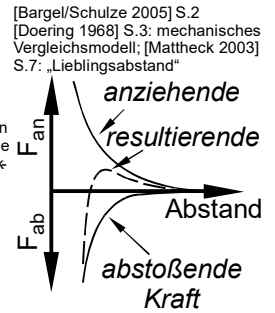
FO Gittertypen

Kristall (von grch. *krystallos* bzw. lat. *crystallus* = 'Eis, Bergkristall') bedeutet 'fester, regelmäßig geformter, von ebenen Flächen begrenzter Körper'.

Weil die Atomrümpfe rund erscheinen und ähnlich groß sind, sind sie vielen Kombinationen austauschbar. Fremdatome stören die Gitterebenen und erhöhen die Festigkeit. Salze können kaum Fremdionen aufnehmen, weil auch die Richtung der Bindungen passen müsste.

Verformung und Bruch findet in den Gitterebenen statt, sodass frische Bruchflächen sehr glatt sind und glänzen.

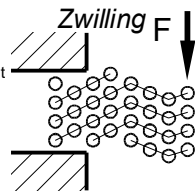
Kurve Kräfte zwischen Atomen



- 1) **Vergleiche die harte Feder: Wie verhält sich die Bindung unter Druck**
 Abstand zwischen 2 Atomen verringert sich, abstoßende Kraft steigt sehr stark an: Metall kann nicht komprimiert werden.

- 2) **Wie verhält sich die Bindung unter leichtem Zug**
 Verschiebung der Atomkerne, federn nach Entlastung ohne Veränderung (außer Hysterese) zurück: elastische Verformung

- 3) **Wie verhält sich die Bindung unter großem Zug**
 Es verschieben sich komplette Lagen des Gitters und springen in ein neues Gitter: plastische Verformung. Die Besonderheit von Metallen ist, dass der Körper nicht nur nicht bricht, sondern eine hohe Festigkeit behält. Zwillingsbildung: Teile eines Kornes klappen in eine spiegelbildliche Lage (besonders hexagonale Gitter)



Kaltverfestigung entsteht durch Schließen der Gitterfehler.

Für monokristallines Fe wird $R_m \approx 14000\text{N/mm}^2$ errechnet, tatsächlich ist $R_m(\text{Fe}) \approx 150\text{N/mm}^2$. Die Verschiebung entlang der Gitterebene muss also abgeschwächt sein.

Die Verschiebung der Gitterebenen endet an den Korngrenzen oder an Gitterfehlern. Ohne Gitterfehler wären Metalle praktisch nicht verformbar bzw. bearbeitbar, d.h. technisch nicht verwendbar.

Im Bild: Substitutionsmischkristall: Fremdatom ersetzt Wirtsatom, z.B. CuNi. Einlagerungsmischkristall: Fremdatom auf Zwischengitterplätzen, z.B. C in Fe.

AM Rogers Connection

- 1) **Wie wird Metall fest? Wie erstarrt es aus einer Schmelze?**

Wenn die Atome beim Abkühlen Bewegungsenergie verlieren, binden sich an vielen Stellen einzelne Atome. Mit weiterer Abkühlung binden sich weitere Atome an die Keimzellen, die Kristalle wachsen und bilden ein System von Körnern mit Korngrenzen. [Schwab 2013] S.45: Korngrenzen haben meist eine Dicke von 1 bis 2 Atom \emptyset . Bei Stahl erfolgt das Wachstum aus der Schmelze in Dendriten ähnlich wie bei Eisblumen. "Runde" Kristallen mit höhere Festigkeit entstehen erst beim Umformen. Korngrenzen beeinflussen die Festigkeit: Je kleiner die Körner, desto höher die Festigkeit (vgl. Kettenglieder beim Kettenhemd: Je kleiner, desto fester). Viele Körner erhöhen die Umformbarkeit, das es mehr Gleitebenen in mehr Richtungen gibt. Rekristallisation: [Bargel/Schulze 2005]

- 2) **Bezug auf Eingangsbeispiel**

Gitter beginnen beim Abkühlen an vielen Kristallkeimen zu wachsen, jedes Gitter bildet ein Korn. An den Korngrenzen lagert sich ab: Schlacke, nicht gelöste Fremdstoffe, Grafit in GJ [EuroTabM]: **Schliffbilder**

- 3) **Welche Bauweise hält besser: Mit Zement verbundene große Steine oder feinkörniger Kies mit Zement (= Beton)?**

- 4) **Folgen von Gitterfehlern**

Wie sehr die Form von den äußeren Bedingungen, vor allem Abkühlgeschwindigkeit und Störfaktoren abhängen kann, sieht man bei Eiskristallen an der Fensterscheibe.

- **Verformbarkeit:** Bei plastischer Verformung muss nicht eine ganze Gitterebene verschoben werden, sondern nur bis zur nächsten Lücke. Die theoretische Festigkeit idealer Kristalle ist 100-fach höher als die reale → kann nicht bearbeitet werden könnten.
- **Fremdatome** können leicht von Lücke zu Lücke wandern. Dies ist wichtig beim Ändern von Stoffeigenschaften, (z.B. Aufkohlen)
- **Kaltumformung** nutzt die Gitterfehler aus. Der Werkstoff lässt sich bis zu einer bestimmten Grenze kalt umformen, dabei wird er härter und spröder (Kaltverfestigung). Wenn alle nutzbaren Bauehler genutzt sind, beginnt ein Teil zu reißen.
- **el. und therm. Widerstände** Gitterfehler stören ei. und therm. Leitfähigkeit.





Zugversuch

Zweck

- dient der Ermittlung des Werkstoffverhaltens bei einachsiger Zugbeanspruchung
- liefert wichtige Werkstoffkennwerte, die auf viele andere Belastungsarten übertragbar sind.

Durchführung

Zugprobe

- wegen ihres Einflusses auf das Ergebnis sind genormt:
- Form (rund oder flach)
 - Zylinderköpfe (glatt oder Gewinde)
 - Oberfläche (Rz 6,3)
 - Längenverhältnis (Proportionalstäbe)

Kurzer Prop.-Stab rund bzw. beliebig	Langer Prop.-Stab (für Sonderfälle)
$\frac{L_0}{d_0} = 5$ bzw. $\frac{L_0}{\sqrt{S_0}} = 5,65$	$\frac{L_0}{d_0} = 10$ bzw. $\frac{L_0}{\sqrt{S_0}} = 11,3$

Ablauf

man zieht die Zugprobe langsam und ruckfrei bis zum Bruch und zeichnet die Kraft F und Länge L auf.

Standardisierung

Werkstoffkennwerte werden unabhängig von den Maßen des Bauteiles angegeben.

Zugkraft F ↔ Zugspannung σ_z

$$\sigma_z = \frac{F}{S_0} \quad \text{in} \quad \left[\frac{N}{mm^2} = MPa \right] \quad S_0 = \text{Anfangsquerschnitt}$$

Längenänderung ΔL ↔ Dehnung ϵ

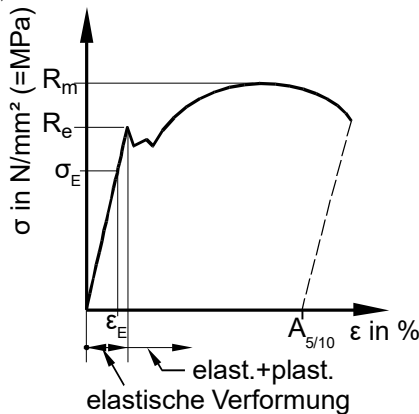
$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L} \quad \text{in} \quad [\% \text{ oder o.E.}] \quad L_0 = \text{Anfangsmesslänge}$$

Die Werte werden aufgezeichnet im

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

mit ausgeprägter Streckgrenze

[Schwab 2013] S.154: „... ausgeprägte Streckgrenze [tritt] nur bei wenigen Werkstoffen auf... .. ausgerechnet bei den einfachen Baustählen, der meistgebrauchten metallischen Werkstoffgruppe, eine Ironie der Natur.“



- 3) Beschreiben Sie den Kurvenverlauf (makroskopische Vorgänge)
 - 4) Gleichmaßdehnung A_g ist verzichtbar
 - 5) dann Bezug auf die mikroskopischen Vorgänge
- AB verschiedene gezogene Zugproben

Quellen: DIN EN 10002:2001 Metallische Werkstoffe - Zugversuch in [Klein 2008], [Hering 1992], [Bargel/Schulze 2005]

- 1) Ein: Bauarbeiter unter schwebender Last; Bungeespringen
Was gibt dennoch einigermaßen Sicherheit?
- 2) Aufbau und Ablauf mündlich entwickeln, anschließend Zugversuch in der Werkstatt durchführen oder Video zeigen.

Prüfungen sind lange üblich, z.B. enthält [Musschenbroeck 1729] Hinweise zu Prüfmaschinen und Spannungsprüfungen bei Drähten [Ferguson 1992] S.204, Fußnote 9). Ein anderes Beispiel ist [Agricola 1548]

-> [EuroTabM] „Zugversuch“

FO verschiedene Zugproben

FO Einfluss des Längenverhältnisses auf die Bruchdehnung

AM Papierstreifen

FO gespannte und umgeformte Gewinde

Abhängig vom Längenverhältnis ist z.B. die Bruchdehnung A, weil die Verformung nach der Einschnürung nicht von der Anfangslänge abhängt.

Die Proportionalitätsfaktoren $k = 5,65$ bzw. $11,3$ ([Bargel/Schulze 2005] S.98; [EuroTabM] „Baustähle, unlegierte“) für beliebige Querschnitte wurden im Abi bisher nicht verwendet, sondern nur $L_0/d_0 = 5$ bzw. $L_0/d_0 = 10$ für runde Proportionalstäbe, gelegentlich mit Umrechnung in entsprechende Flachproben. Die Proportionalitätsfaktoren $k = 5$ für runde Stäbe und $k = 5,65$ für beliebige Stäbe können ineinander umgerechnet werden.

$$\frac{L_0}{\sqrt{S_0}} = \frac{L_0}{\sqrt{\pi/4 \cdot d_0^2}} = \frac{L_0}{\sqrt{\pi/4} \cdot d_0} = \frac{1}{\sqrt{\pi/4}} \cdot \frac{L_0}{d_0} = \frac{1}{\sqrt{\pi/4}} \cdot 5 \approx 5,65$$

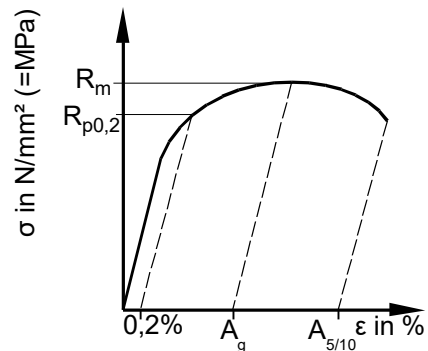
Langsam und ruckfrei wegen dynamischer Kräfte, vergleiche: Spalten von Holz. Was langsam ist, hängt vom Werkstoff ab.

Damit die Ergebnisse unabhängig von der Probengröße werden, bezieht man sie auf Querschnittsfläche und Länge der Probe. Den Einfluss von Oberfläche und Längenverhältnis vernachlässigt man zunächst. Wenn es genauer sein muss: Im TabB sind die Streckgrenzen R_e bei Stahl abhängig von der Erzeugnisdicke angegeben, und bei der Bruchdehnung gibt man das Längenverhältnis als Index an, z.B. A_{10} oder A_{100} , wg. des seines Einflusses. Andere Beispiele: zulässige Stromdichte Spannung ist auf Fläche bezogene Kraft.

Ingenieure rechnen mit Zugspannungen, die auf den Anfangsquerschnitt bezogen sind, und ignorieren, dass der Querschnitt kleiner und die tatsächlichen Spannungen größer werden, weil man Bauteile kaum noch beeinflussen kann. Dagegen betrachten Festkörperphysiker bei der Untersuchung von Werkstoffverhalten die tatsächlichen Spannungen im engsten Querschnitt.

100% = 1, kann in der Formel auch entfallen

ohne ausgeprägte Streckgrenze



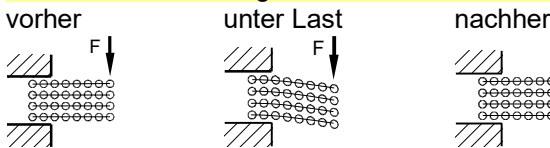
AB SDD kombiniert mit Gitterbildern und 2ten Achsen F und ΔL



Vorgänge im Werkstoff

Metallische Gitter sind einfach angeordnet

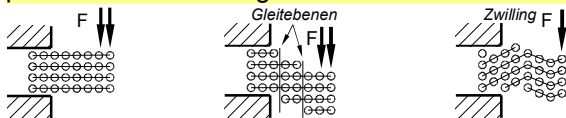
elastische Verformung



Werkstoff verhält sich wie eine Feder und nimmt nach Entlastung die ursprüngliche Form wieder an.

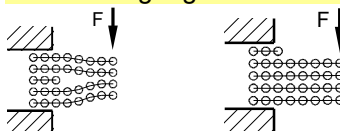
Einschwingverhalten

plastische Verformung



Werkstoff wird bleibend verformt

Kaltverfestigung.



Gitterfehler werden geschlossen, die Streckgrenze eines Metalles steigt beim Umformen (Walzen, Schmieden ..)

Hinweise: Einen gebogenen Draht kann man nicht einfach an der Biegestelle zurückbiegen. Bis zur Bruchdehnung bleiben Zugproben zylindrisch, weil bereits gedehnte Bereiche eine höhere Festigkeit bekommen und die weitere Dehnungen erstmal woanders stattfindet.

Einschnürung

Nach Überschreiten von R_m tritt Einschnürung der Probe ein. Die Kraft im Diagramm sinkt bis zum Bruch.

Kennwerte aus dem Zugversuch

Es gilt das Hooke'sche Gesetz: $\sigma = E \cdot \epsilon$

Streckgrenze R_e – Dehngrenze $R_{p0,2}$

= Grenze des elastischen Bereiches [N/mm² = MPa]

(Der) Elastizitätsmodul E

[kN/mm²] (E-Modul)

- ist ein Maß für die Steifigkeit
- $E = \frac{\sigma_E}{\epsilon_E}$ mit einem Wertepaar (σ_E ; ϵ_E) von der Hooke'schen Geraden

Zugfestigkeit R_m

in [N/mm² = MPa]

- das Überschreiten von R_m führt zum Bruch

Bruchdehnung A (=A₆) oder A₁₀

in [% oder ohne Einheit]

- Bleibende Verformung nach dem Bruch
- Index = Längenverhältnis der Zugprobe
→ starker Einfluss auf die Bruchdehnung (s.u.)

Bruchdehnung Z

→ TabB

$$Z = \frac{S_0 - S_U}{S_0}$$

Streckgrenzenverhältnis V_s

$$V_s = \frac{R_e}{R_m}$$

Vertiefung

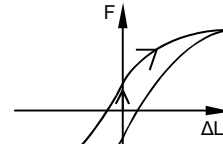
1) Ordnen Sie Kurven mit verschiedenen Streckgrenzenverhältnissen zu:

Bruchgetrenntes Pleuel, FO Tiefziehen

Seil einer Hängebrücke (plastische Verformung erwünscht, um Überlastung anzuzeigen).

Zum Thema → [Schwab 2013] „Kerbschlagbiegeversuch“

Tatsächlich ist die elastische Verformung im oberen Bereich nicht genau linear. Doch die Abweichungen von der Geraden sind schwer zu ermitteln und meist vernachlässigbar, sodass man meist auf der Ermittlung der Proportionalitätsgrenze verzichtet.



Hysteresis beim Zugversuch

Auch beim elastischen Verformen von Material kommt es durch innere Reibung zu einer Hysterese [Bargel/Schulze 2005] S.112. Deshalb wollen Radfahrer möglichst steife Fahrradbauteile.

AB Hysterese

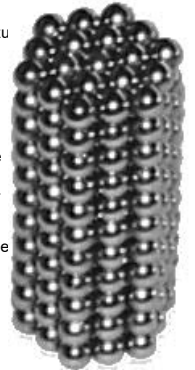
Man unterscheidet: (1) linear elastisches Verhalten, für das das Hooke'sche Gesetz gilt (gilt für alle Festkörper für kleine Verformungen bis $\epsilon=0,1\%$); (2) nicht-linear-elastisches Verhalten, z.B. Gummi und (3) anelastisches Verhalten (elastische Hysterese): der Werkstoff gibt nicht mehr die ganze Verformungsenergie zurück [Hütte 29] D42, [Hering 1992] S.92.

Mit der Dehnung ϵ erfolgt eine Verringerung des Querschnittes. Ihr Maß ist die Querkürzung $\nu = \frac{\epsilon_\nu}{\epsilon}$

bzw. die Poisson- oder Querdehnzahl ν . Sie beträgt für Stahl $\nu = 0,3$ [Decker 2009] S.30.

Sechseckige Säule aus Nanodots, Elmo:

Bei Verdrehung ist die elastische und plastische Verformung gut zu sehen. Wenn man die mittleren Magnete entfernt, wird die plast. Verformung zufälliger



Nach der 2011 geltenden Theorie entsteht die Einschwingphase ([Grundwissen14] S.533: Lüders-Dehnung) durch Zwischengitteratome (ZGA: C, N), die etwas größer als die Wirtsgitterplätze sind und das Wirtsgitter verzerren. Durch die energetische Situation bewegen sich die ZGA bei angelegter (Zug-)Spannung auf die Versetzungen zu, bilden dort s.g. Cottrell-Wolken und blockieren plast. Vfg. (erhöhen Streckgrenze). Wenn sie bei R_{eH} endlich doch beginnt, verlieren die C-Wolken ihre Wirkung und die relativ hohe Spannung dehnt den Werkstoff. Ohne Alterung zeigt der Werkstoff keine ausgeprägte Streckgrenze mehr. [de.Wikipedia.org/./Cottrell-Wolke], [Bargel/Schulze 2005] S.105f., [Schwab 2013] S.156f.

Umklappen eines nichtorthogonalen Gitters ist ebenfalls möglich. Gleitebenen gehören zu den typischen metallischen Eigenschaften. Sie werden möglich durch Isotropie (richtungsunabhängige Bindung) der Metalle, die zu einfachen und dichten Gittern führt.

Die Verschiebung endet an den Korngrenzen oder an Gitterfehlern. Ohne Gitterfehler wären Metalle praktisch nicht verformbar bzw. bearbeitbar. Für monokristallines Fe wird $R_m \approx 14000 \text{ N/mm}^2$ errechnet, tatsächlich ist $R_m(\text{Fe}100) \approx 150 \text{ N/mm}^2$. Die Verschiebung entlang der realen Gitterebene muss also abgeschwächt sein.

Bruchmechanismen siehe [SdW] 01/2000

Die auf den Ausgangsquerschnitt bezogene Spannung sinkt im Diagramm jenseits von R_m , die tatsächliche Spannung unter Berücksichtigung des verengenden Querschnitts steigt aber weiter an; es tritt sogar noch Kaltverfestigung auf. Die tatsächliche Spannung spielt für den Ingenieur aber keine Rolle, solange er den Querschnitt an belasteten Stellen nicht wachsen lassen kann – wie die Natur es bei Bäumen, Knochen usw. tut [Mattheck 2003].

→ [EuroTabM] „Zugversuch“

[Schwab 2013] S.149: R kommt von engl.: resistance für mechanischen Widerstand. DIN EN 10002:2001 unterscheidet Obere (R_{mH}) und untere (R_{mL}) Streckgrenze [Klein 2008], [Bargel/Schulze 2005]. Ich verwende die obere Streckgrenze R_e wie in → [EuroTabM] „Zugversuch“. R_p auch technische Elastizitätsgrenze.

Dehngrenze: Bei Werkstoffen ohne ausgeprägte Streckgrenze ist der Übergang von elastischer zu plastischer Verformung, von der Geraden zur Kurve, messtechnisch nur schwer erfassbar, außerdem wird der Werkstoff dort nicht voll ausgenutzt. Deshalb verwendet man die Dehngrenze, bei der ein bestimmtes Maß an plast. Verformung auftritt, $R_{p0,2}$ ist die gängigste.

→ [EuroTabM] „Elastizitätsmodul“; Tabellenwerte → [Hütte 29] E66 und D44

Der (!) E-Modul ist der Proportionalitätsfaktor zwischen Normalspannung und Dehnung. Bildlich ist er eine Federkonstante oder die Steigung der Hooke'schen (!) Geraden und damit die gedachte Spannung für 100% Dehnung. Vergleiche auch Schubmodul G für Schubspannungen und Kompressionsmodul K für hydrostatischen Druck.

[Bargel/Schulze 2005] S.97: Es gibt nichtlineare Elastizität (z.B. Grauguss), der E-Modul für Zug und Druck muss nicht symmetrisch sein (z.B. Sinterwerkstoffe, Nichtmetalle).

E-Modul aus SDD ermitteln (HP96/97-3)

R_m ist eine rechnerische Größe mit dem Anfangsquerschnitt S_0 , die für Konstruktionen zweckmäßig ist. Will man das Stoffverhalten untersuchen, legt man den tatsächlichen Querschnitt zugrunde und erhält eine wesentlich größere Spannung.

[Schwab 2013] S.150: A kommt von vermutlich von frz. allongement für Dehnung. A_6 oder $A_{5,65}$ oder ohne Index sind kurze; A_{10} und $A_{11,3}$ lange Prop.-Stäbe.

FO Zugprobe: Folgen des Längenverhältnisses

[Bargel/Schulze 2005] S.96: Die Rückfederung parallel zur Hooke'schen Geraden ist eine Vereinfachung, die bei höheren Temperaturen oder Kriechversuchen nicht zulässig ist.

Verhältnis kleinster Querschnitt nach Bruch zu Anfangsquerschnitt.

Verformungskennwerte (Bruchdehnung, Bruchdehnung, Dehnung bei Höchstkraft) dienen nicht der Konstruktion, aber der Beurteilung des Stoffverhaltens.

Wird benötigt bei:

- Festigkeitsklassen von Schrauben
- Umrechnung von Brinellhärten auf R_m
- Anhaltswert der Verformbarkeit für Umformverfahren

Gespeicherte Energie im elastischen Bereich , Verformungsenergie im plastischen Bereich (Zähigkeit) und freierelastische Energie beim Bruch berechnen [Hering 1992] S.92



Video Zugversuch

Zeigt Durchführung des Zugversuches und Ermittlung der Kennwerte

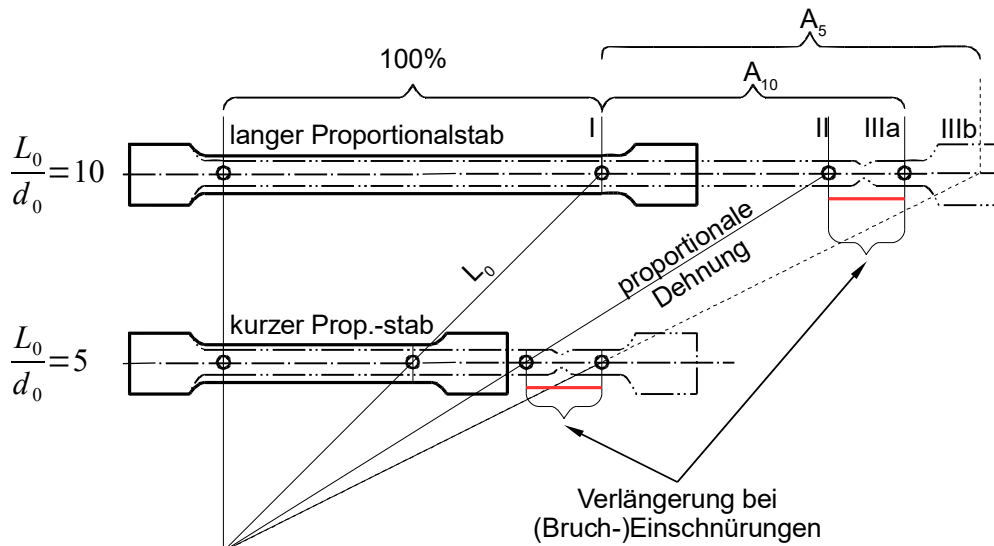
0050 Universalprüfmaschine
0075 genormter Prüfstab mit Gewindeköpfe
0100 genormte Geschwindigkeit, Dehnung, Schleppeizer für F_m
0147 Einschnürung

0160 $R_m = F_m / S_0$
0170 Spannungs-Dehnungs-Diagramm
0185 R_{eH} , R_{eL} , R_m
0199 Diagrammschreiber, Kraftanzeige
0234 ohne ausgeprägte Streckgrenze, $R_{0.2}$, F_m und ϵ -Anzeige; mehrmaliges Be- und Entlasten mit steigender Kraft zur Ermittlung von $R_{0.2}$
0330 Zeichnerische Ermittlung
0340 Bruchdehnung messen
0376 Vergleich St-60 und St-37 im Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit Kraftanzeige

Bruchdehnung $A_5 \leftrightarrow A_{10}$

A_5 , $A_{5,65}$ = Bruchdehnung am kurzen Prop.-Stab
 A_{10} , $A_{11,3}$ = Bruchdehnung am langen Prop.-Stab
 A_5 , A_{10} : zylindrische Probe
 $A_{5,65}$, $A_{11,3}$: Flachprobe

[Schwab 2013] S.146: „Der kurze Proportionalstab ist Standard... Früher hat man den [langen Proportionalstab] gerne angewendet, weil die Längenmesstechnik noch nicht so ausgefeilt war. Heute findet man ihn eher selten, weil er von der Herstellung her teurer ist.“
[Schwab 2013] S.155f: „Statt A_5 wird seit einiger Zeit gerne auch nur A oder $A_{5,65}$ verwendet, statt A_{10} auch $A_{11,3}$. Das hängt mit den Faktoren 5,65 und 11,3 zusammen, ... die auch bei ... Proben und anderen Querschnittsformen sinnvoll sind.“



1) Unterschied langer / kurzer Proportionalstab?

Phase I: unbelastete Zugproben aus gleichem Werkstoff

2) Verhalten im elastischen Bereich?

Phase II: Proben werden dünner und länger, Dehnung ist bei gleicher Kraft bei den Proben proportional gleich

3) Verhalten bei Einschnürung?

Phase III: Dehnung findet fast (weglassen) Kraft steigt nicht mehr nur noch im Bereich der Einschnürung statt, die Längenänderung ist bei beiden Proben gleich → die Dehnung ist bei gleicher Kraft in einer längeren Probe proportional geringer.

4) Bruchdehnung?

Nach dem Bruch werden die Bruchstücke gegeneinander gedrückt und die Bruchdehnung gemessen.

A_g = Gleichmaßdehnung

Zusammenhang zwischen A_5 , A_{10} und A_g

Die Bruchdehnung $A_{5,10}$ [%] setzt sich zusammen aus der Gleichmaßdehnung A_g [%], die bei beiden Proben gleich ist, und der Längenänderung x [mm] bei der Bruchdehnung, bezogen auf die ursprüngliche Länge L_5 bzw. L_{10} [mm]. Bei gleichem Querschnitt gilt: $L_{10} = 2 \cdot L_5$.

$$A_5 = A_g + \frac{x}{L_5} \Rightarrow \frac{x}{L_5} = A_5 - A_g$$

$$A_{10} = A_g + \frac{x}{L_{10}} = A_g + \frac{x}{2 \cdot L_5} \Rightarrow \frac{x}{L_5} = 2 \cdot (A_{10} - A_g)$$

$$A_5 - A_g = \frac{x}{L_5} = 2 \cdot A_{10} - 2 \cdot A_g \Rightarrow$$

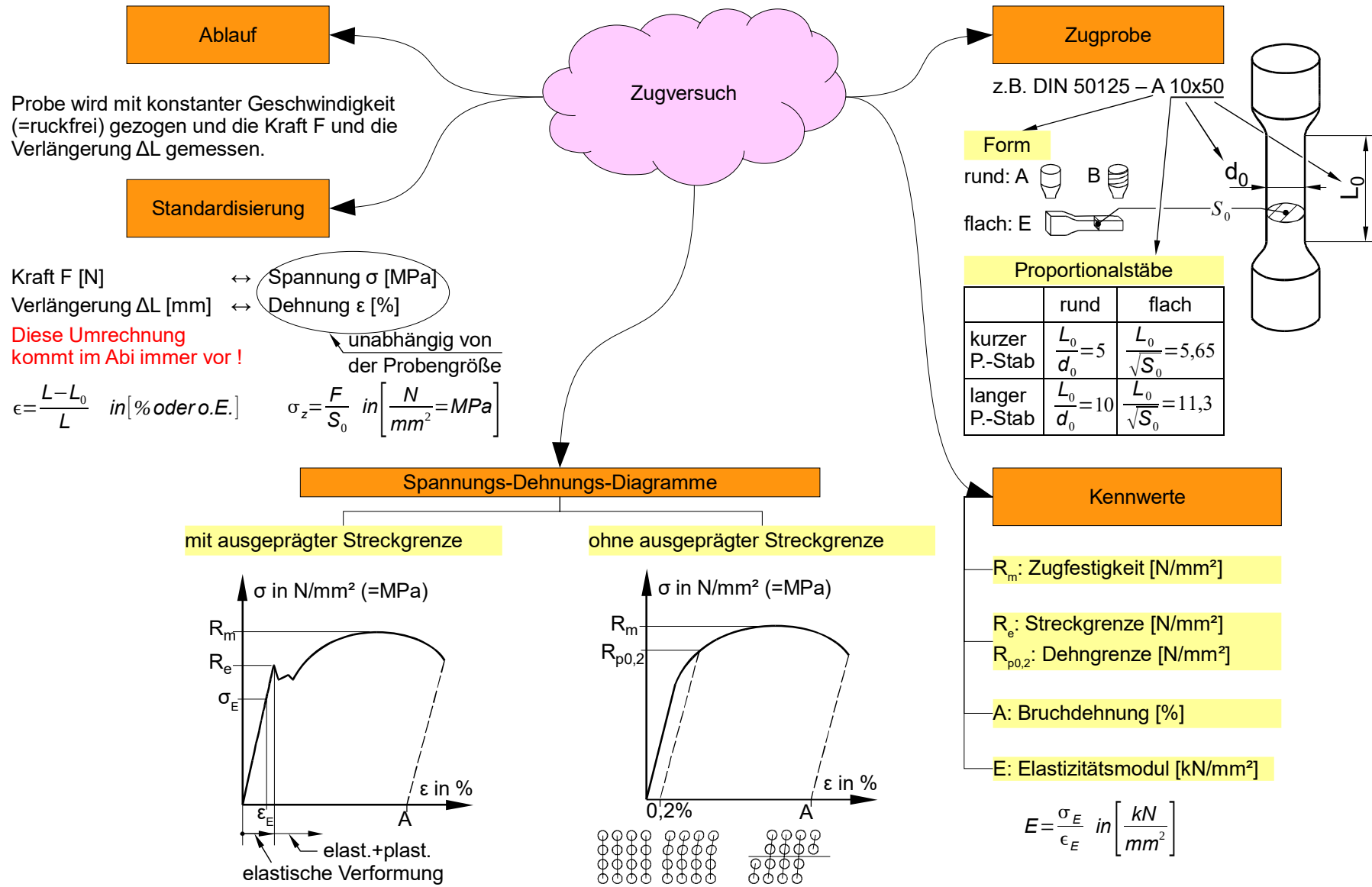
$$A_g = 2 \cdot A_{10} - A_5$$

[Bargel/Schulze 2005] S.99: Nennt die Gleichung „hinreichend genau“.

[Schwab 2013] S.149, Sinngemäß: „Es wurde genau untersucht und festgestellt, dass das Volumen einer Probe immer konstant bleibt.“ [Bargel/Schulze 2005] S.99: „Die mit der Längenänderung verbundene Verminderung des Querschnitts ist .. überwiegend darauf zurückzuführen, dass das Volumen annähernd konstant bleiben muss.“
Meine Vermutung: Es handelt sich wohl um die Frage, wie genau man es nimmt.

[Schwab 2013] S.149, Sinngemäß: „Bis R_m wird die Probe zwar länger und dünner, aber sie bleibt zylindrisch. Ursache ist eine Art innere Regelung durch Kaltverfestigung: Dort, wo die Probe etwas stärker gedehnt wird, steigt die Festigkeit, deshalb findet die weitere Dehnung zunächst an anderen Stellen statt. Die innere Regelung funktioniert nur bis zur so genannten Gleichmaßdehnung A_g , die laut SDD (S.148) und Text bei R_m auftritt. Gemessen wird sie wie A_5 und A_{10} abzüglich des elastischen Anteil.“ [Schwab 2013] S.155: „Die Gleichmaßdehnung .. ist ein Kennwert, der in der Umformtechnik sehr wichtig ist, vor allem, wenn es um Ziehen, Biegen oder Strecken geht. Die Gleichmaßdehnung wird immer im Höchstlastpunkt des Zugversuches erreicht.“ [Bargel/Schulze 2005] S.99: „In der Regel sinkt bei Einschnürung der Probe die übertragene Prüfkraft.“

Meine Vermutung: Auch hier geht es wohl nur um die Genauigkeit. Für mich klingt es jedenfalls seltsam, dass die Bruchdehnung genau im Maximum des Diagramms ohne Knick beginnen soll.





Literaturverzeichnis

- Agricola 1548: Georg Agricola, De Re Metallica libri XII - 12 Bücher vom Berg- und Hüttenwesen, fourierverlag Wiesbaden, 2003?
- Bargel/Schulze 2005: H.-J. Bargel, G. Schulze, Werkstoffkunde, Springer Berlin, 2005
- Decker 2009: Decker et al., Maschinenelemente, Carl Hanser Verlag München, 2009
- Doering 1968: Ernst Doering, Technische Wärmelehre, B.G.Teubner Stuttgart, 1968
- EuroTabM: Ulrich Fischer ua., Tabellenbuch Metall, Europa-Lehrmittel Haan-Gruiten,
- EuroTabM46: Roland Gommeringer ua., Tabellenbuch Metall 46.Auflage, Europa-Lehrmittel Haan-Gruiten, 2014
- Ferguson 1992: Eugene S. Ferguson, Das innere Auge - von der Kunst des Ingenieurs, Birkhäuser Basel, 1993
- GrundwissenIng14: Ekbert Hering (Hrsg.), Karl-Heinz Modler (Hrsg.), Grundwissen des Ingenieurs, Fachbuchverlag Leipzig, 2007
- GrundwissenIng8: Dr. Erna Padelt ua., Das Grundwissen des Ingenieurs 8.Auflage, VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1970
- Hering 1992: Ekbert Hering ua., Physik für Ingenieure, vdi verlag Düsseldorf, 1992
- Hütte 29: Ahrendts ua., Hütte - die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften, Springer Berlin, 1989
- Klein 2008: Dieter Alex ua., Klein Einführung in die DIN-Normen, Beuth Verlag Berlin, 2008
- Mattheck 2003: Claus Mattheck, Warum alles kaputt geht, Forschungszentrum Karlsruhe, 2003
- Musschenbroeck 1729: Pieter van Musschenbroek, Dissertationes physicae experimentalis et geometricae de magnete, Leyden, 1729
- Schwab 2013: Rainer Schwab, Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung für Dummies, Wiley-VCH Weinheim, 2013
- SdW: wechselnde Autoren, Spektrum der Wissenschaft,
- Skolaut 2014: Werner Skolaut (Hrsg.), Maschinenbau - Ein Lehrbuch für das ganze Bachelor-Studium, Springer Vieweg Berlin Heidelberg, 2014
- Tipler 1995: Paul Tipler, Physik, Spektrum Lehrbuch , 1995