

Werkstofftechnik

1. Aufbau und Eigenschaften der Metalle

1.1 Atomanordnung (Kristallaufbau)

Das Atom ist der kleinste bestehende Baustein der Materie. Ein Atom besteht aus dem Kern (Protonen und Neutronen), und den Elektronen. Die Elektronen bewegen sich auf entsprechenden Bahnen (oder Schalen). Die Valenzelektronen sind die Elektronen auf der äußersten noch nicht vollen Schale.

Metallische Bindungen: Zur Bindung zwischen Metallatomen geben diese ihre Valenzelektronen ab, die aber als freibewegliche Elektronenwolke (Elektronengas) im Gesamtverband verbleiben und die Positiven Metallionen zusammenhalten .

Die Atomordnung:

- amorph: Gestaltlos, die Atome sind regellos angeordnet (z.B. Glas oder flüssiges Metall)
- kristalline: Gesetzmäßige (regelmäßige) Anordnung der Atome (z.B. Metalle im festen Zustand)

⇒ **Metalle haben einen kristallinen Aufbau im festen Zustand**
(Ausnahme: amorphe Metalle und metallische Gläser)

Elementarzelle: Kleinstes Raumelement durch dessen Verschiebung das gesamte Raumgitter aufgebaut werden kann.

Gitterparameter

(oder Gitterkonstante): Kantenlänge einer Elementarzelle.

Gitter- oder Netzebene: Eine in regelmäßigen Abständen mit Atomen besetzte Ebene im Raumgitter.

1.2 Kristallsysteme und Gittertypen

Es gibt 7 Kristallsysteme. Die meisten Metalle erstarren im **kubischen** oder **hexagonalen** System (siehe Umdruck Blatt 1)

kfz: kubisch-flächen-zentriert

krz: kubisch-raum-zentriert

hdp: hexagonales Gitter dichtester Kugelpackung

1.3 Allotropie (Polymorphie)

Allotropie (Polymorphie): Bestimmte Metalle wie Eisen Fe, Mangan Mg, Zinn Sn, usw. können in verschiedenen Gittertypen kristallisieren. Jedes dieser Gitter tritt in einem bestimmten Temperaturbereich auf. Der Übergang von einem Gittertyp in einen anderen vollzieht sich bei einer bestimmten Temperatur und wird **allotrope** oder **polymorphe** Umwandlung genannt. (vielseitige Umwandlung)

1.4 Realkristalle und Gitterbaufehler

Metalle im festen Zustand bestehen in der Regel aus vielen Kristalliten oder Körnern (=Vielkristall). Es gibt auch sogenannte Einkristalle.

Abweichung vom Idealkristall stellen Gitterbaufehler dar. Es liegen Realkristalle vor.

- punktförmige Gitterbaufehler:
- | | |
|-------------|--|
| Leerstellen | OOO
O O
OOO |
| Fremdatome | OOO
O ° O (Substitutionsatom)
OOO
OOO
O ° OO (Einlagerungsatom)
OOO |

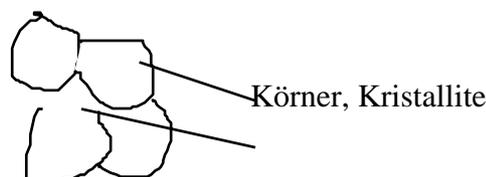
- Linienförmige Gitterbaufehler (Versetzungen): Stufenversetzung

Schraubenversetzung
(siehe Bargel/Schulze)

Die Versetzungen sind die Träger der Plastizität:

Die Grundlage für die Verfestigung durch Kaltverformung (mit zunehmender Kaltverformung steigt die Versetzungsdichte, Bewegung der Versetzung wird erschwert).

- zweidimensionale Gitterbaufehler: Korngrenzen



Gegenüberstellung der Begriffe Struktur und Gefüge:

Struktur : Kristallstruktur, Gitteraufbau

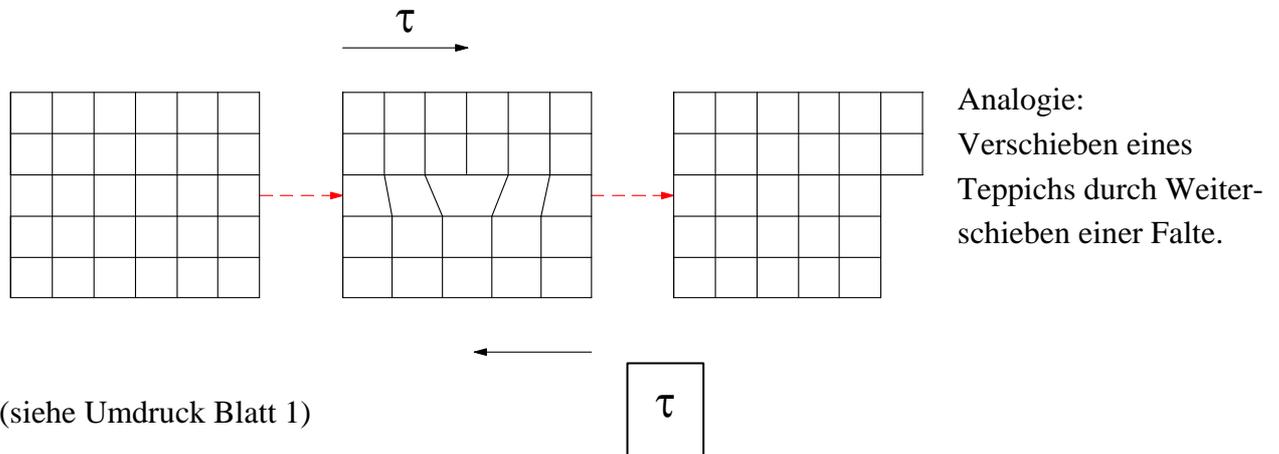
Gefüge : Größe, Form und Anordnung der Kristallite (Körner) mit ihren Korngrenzen sowie Verunreinigungen.

1.5 Mechanische Eigenschaften (Verformung, Festigkeit, Verfestigung)

a) Plastische Verformung

Die Spannungen für die Verformung sind in der Praxis wesentlich niedriger als der theoretische Wert. Grund dafür sind die Versetzungen (Linienförmige Gitterbaufehler).

Versetzungen sind die Träger der Plastizität!



Die Bewegung von Versetzungen erfolgt in der Regel nur auf Gitterebenen, die am dichtesten mit Atomen belegt sind.

Gleitebenen: dichtest besetzte Ebenen auf denen die Gleitung erfolgt

Gleitsystem: Gleitebene mal Gleitrichtung

Vergleich von **kfz** - Gitter und **hdp** - Gitter:

kfz - Gitter: 12 Gleitsysteme

hdp - Gitter: 3 Gleitsysteme

⇒ das hdp - Gitter ist schlechter verformbar als das kfz - Gitter.

b) Verfestigung durch Kaltverformung

Durch Kaltverformung werden viele Versetzungen erzeugt. Darüber hinaus erfolgt durch Kaltverformung eine Wechselwirkung von Versetzungen untereinander und eine Wechselwirkung von Versetzungen mit weiteren Gitterbaufehlern.

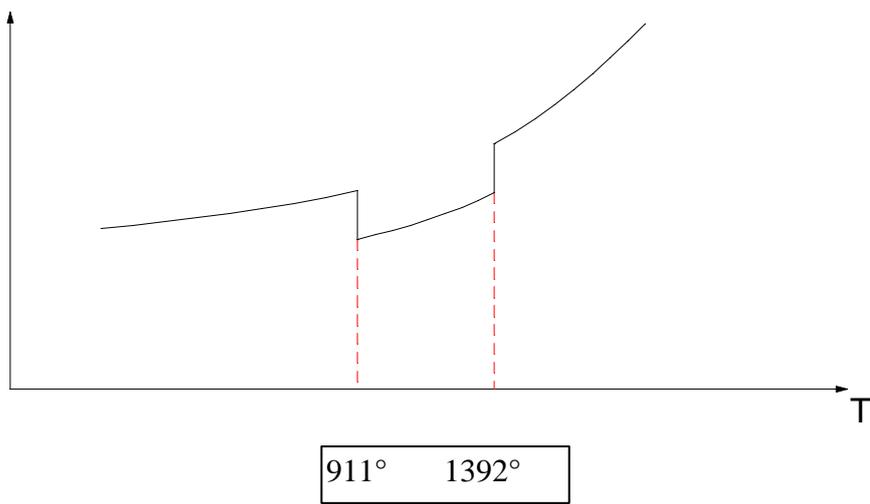
Dadurch steigt die erforderliche Spannung für die Fortsetzung der Verformung, d.h. es tritt eine Kaltverfestigung auf.

1.6 Kristallisation

(siehe Umdruck Blatt 1)

In der Metallschmelze sind die Atome in ständiger Bewegung. Es ist ein ungeordneter Zustand, es liegt keine Gitterordnung vor. Beim Abkühlen sinkt der Energiegehalt und beim Erreichen der Schmelztemperatur setzt die **Erstarrung** ein.

Dilatometerkurve für Eisen:



2. Thermisch aktivierte Vorgänge

Die meisten Zustandsänderungen erfordern einen Platzwechsel der beteiligten Atomarten. Wenn die Platzwechsel durch thermische Aktivierung erfolgt spricht man von **thermisch aktivierten Vorgängen**. Sie spielen eine Rolle z.B. bei der:

- Diffusion
- Erholung und Rekristallisation
- Kriechen und Spannungsrelaxation

2.1 Diffusion

Diffusion = Temperaturbedingte Wanderung der Atome.

Technische Anwendung: z.B. - Diffusionsglühen
- Aufkohlen bei Einsatzstählen

2.2 Erholung und Rekristallisation

(siehe Umdruck Blatt 2 Bild 1 und 2)

Durch Kaltverformung wird der Energiegehalt des Werkstoffes deutlich erhöht. Die gespeicherte Energie besteht primär aus der elastischen Energie der Versetzungen. Bei hinreichender Aktivierung (Temperaturerhöhung) erfolgt oberhalb bestimmter Temperatur:

- a) Erholung = Energieabbau durch Ausheilen und Umordnung von Gitterbaufehlern

bei noch höherer Temperatur erfolgt:

- b) Rekristallisation = Kornneubildung wobei die Zahl der Versetzungen auf den Wert des unverformten Zustandes zurück geht. Es liegt dann die Festigkeit des unverformten Zustandes vor. Bei noch höheren Temperaturen bzw. längerer Glühzeit können die rekristallisierten Körner weiter wachsen = Kornvergrößerung. (Grobes, aber regelmäßiges Gebilde). Es kann ggf. auch zu **sekundärer Rekristallisation** kommen, in der nur einzelne Kristallite auf Kosten ihrer Nachbarn wachsen (unregelmäßiges Gefüge mit einigen sehr großen Körnern).

Die Kristallisationstemperatur hängt unter anderem ab von:

- Verformungsgrad ($\rho \uparrow, T_r \downarrow$, aber ρ_{\min} ist erforderlich)
- Glühzeit ($t \uparrow, T_r \downarrow$)
- chemische Zusammensetzung (Legierungszusätze verzögern die Rekristallisation reiner Metalle)

In der Praxis hat es sich eingebürgert (ohne verbindliche Festlegung) diejenige Temperatur als Rekristallisationstemperatur T_R zu bezeichnen, bei der nach 1 Std. der Vorgang abgeschlossen ist. Bei reinen Metallen und relativ großen Verformungsgraden ist oft die Faustregel erfüllt:

$$T_R \approx 0.4 \cdot T_S \quad (T_S \text{ in K}) \quad (T_S = \text{Schmelztemperatur})$$

Verformung unterhalb der Rekristallisationstemperatur ist gleich Kaltverformung und oberhalb Warmverformung.

Die Glühbedingungen aus der Literatur sind meist nicht übertragbar. In der Regel ist es sinnvoll richtige Zeit und Temperatur für Rekristallisation für gegebenen Anwendungsfall jeweils durch Versuche selbst zu ermitteln.

Rekristallisationsschaubild

Es zeigt die Abhängigkeit der Korngröße von der Glühtemperatur und dem Verformungsgrad. (siehe Blatt 2) Meistens strebt man ein feinkörniges Gefüge an. Die erforderlichen Parameter können aus dem Bild entnommen werden. In der Praxis wird meist ein 2D Bild verwendet. (siehe Bild 2)

2.3 Kriechen und Spannungsrelaxation

Kriechen: Zeitabhängige, fortschreitende plastische Verformung bei konstanter Belastung

Spannungsrelaxation: Zeitabhängige Abnahme der Spannung bei konstanter Verformung

Kriech- und Relaxationsvorgänge sind u.a. entscheidend für die Gebrauchseigenschaften warmfester Werkstoffe.

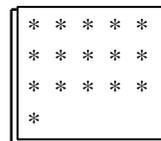
3. Legierungsbildung und Zustandsschaubilder

3.1 Grundbegriffe

<i>Legierung:</i>	Metallischer Werkstoff, der aus mindestens 2 Elementen besteht.
<i>Homogene Legierung:</i>	Alle Kristallite oder Körner haben die gleiche chemische Zusammensetzung.
<i>Heterogene Legierung:</i>	Besteht mindestens aus 2 Kristalliten mit unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung.
<i>Phase:</i>	Bestandteile gleicher chemischer Zusammensetzung. Eine Phase ist in sich homogen und hat an jeder beliebigen Stelle die gleichen Eigenschaften. Homogene Legierungen enthalten also nur eine Phase, heterogene dagegen mindestens 2.



Homogen

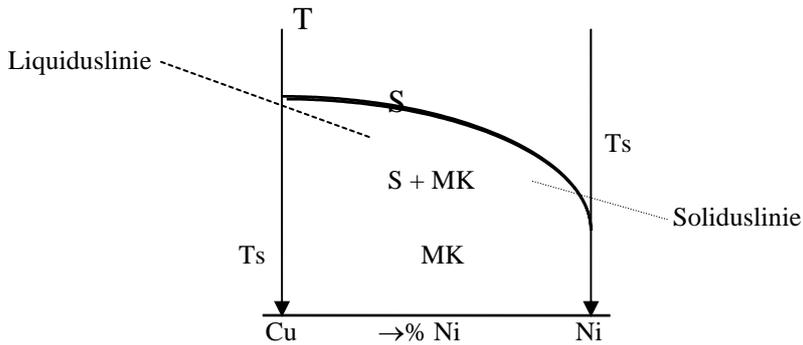


Heterogen

<i>Komponenten:</i>	Chemische Elemente aus denen die Legierung zusammengesetzt ist.
<i>System:</i>	Gesamtheit aller festen Legierungen die Komponenten bilden können. Darüber hinaus auf ihre flüssigen und gasförmigen Zustandsformen. (z.B.: System Eisen-Kohlenstoff)
<i>Zustandsdiagramm:</i> (Zustandsschaubild)	Temperatur-Konzentrationsschaubild, das Übersicht über mögliche Zustandsänderungen des Gefüges der Legierung gibt.
<i>Mischkristalle: (MK)</i>	Die Kristalle bestehen nicht aus einer einzigen Atomsorte, sondern aus verschiedenen Arten und stellen nur eine Phase dar. Mischkristalle werden auch als feste Lösung bezeichnet. a) Substitutions - MK (z.B.: Cu-Ni-Legierung) Fremdatome sitzen auf Gitterplätzen b) Einlagerungs - MK (z.B.: Fe-C-Legierung) Fremdatome sitzen auf Zwischengitterplätzen (Einlagerungsatom muß kleinen Atomdurchmesser haben) nur beschränkte Löslichkeit möglich
<i>Intermetallische Verbindung:</i>	Viele Metalle bilden untereinander (z.B.: Mg_2Si , Al_2Cu) oder mit Nichtmetallen (z.B.: Fe_3C) Verbindungen mit metallischem Charakter. Sie kristallisieren nicht im Gittertyp einer der beiden Komponenten, sondern besitzen einen eigenen typischen Gitteraufbau.

3.2 Binäre Zustandsdiagramme

3.2.1 Völlige Löslichkeit im flüssigen und festen Zustand (siehe Umdruck Blatt 3 Cu-Ni)



Voraussetzung u.a.: - gleiche Gitterstruktur
- gleiche Abweichung der Atomradien

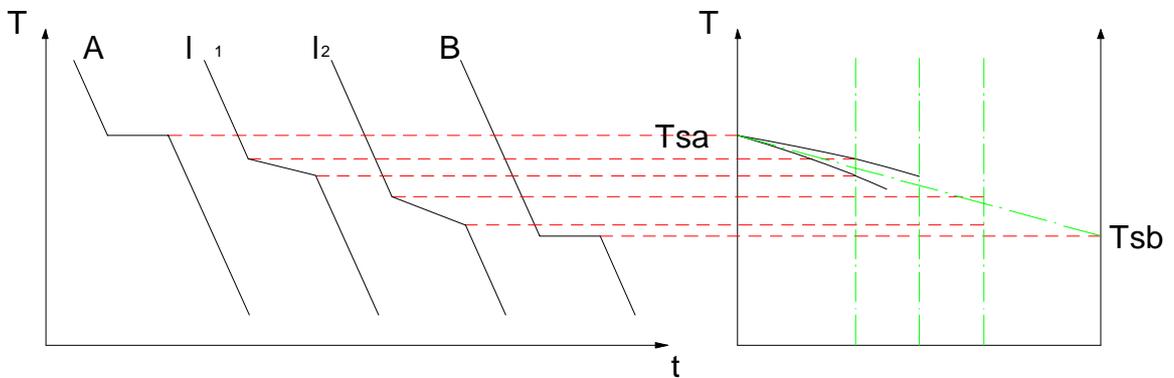
Aufstellen von Zustandschaubildern:

= Ermitteln der Phasengrenzlinien im Temperaturkonzentrationschaubildes.

Bei thermischer Analyse erhält man:

- Haltepunkt beim Erstarren bzw. Schmelzen reiner Metalle. Eutektika, Eutektoide, Peritektika
- Knickpunkte bei Zustandsänderung in Zweiphasengebieten

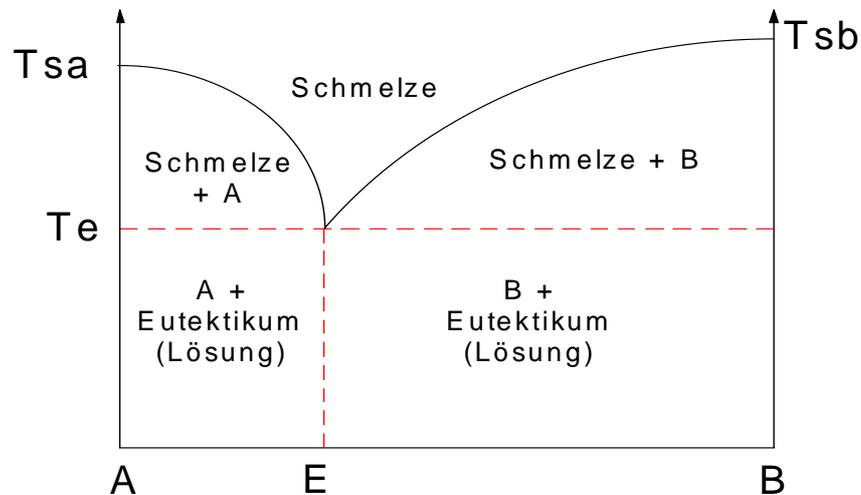
Aufstellen des Zustandsdiagramms mittels thermischer Analyse:



3.2.2 Völlige Löslichkeit im flüssigen Zustand, unlöslich im festen Zustand:

(Eutektisches System)

Bei Erstarrung erfolgt Entmischung in die beiden Komponenten.



Die Legierung mit der **eutektischen** Zusammensetzung E erstarrt bei der eutektischen Temperatur T_E . Sie zerfällt über die eutektische Reaktion $S \leftrightarrow A + B$ in die beiden Komponenten. Das Gefüge der eutektischen Legierung heißt **Eutektikum**.

Wegen der niedrigen Schmelztemperatur haben sich viele Keime gebildet. Außerdem erfolgt ein schnelles kristallisieren, weil kein Erstarrungsintervall vorliegt.

Ergebnis:

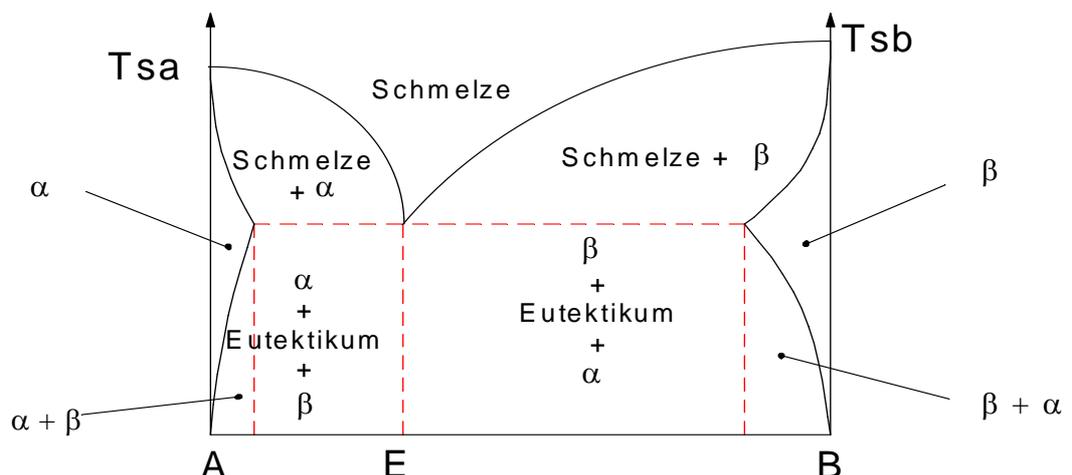
- Gefüge ist im allgemeinen feinkörnig
- meist lamellare Anordnung der Komponenten (z.B.: Zustandsschaub. Bi-Ca) (siehe Umdruck Blatt 3)

3.2.3 Völlige Löslichkeit im flüssigen Zustand, teilweise im festen

(Mischungslücke im festen Zustand)

a) Eutektisches System mit beschränkter MK-Bildung: Gewisse Löslichkeit im festen Zustand, die Löslichkeit nimmt mit fallender Temperatur ab.

Beispiel Al - Si, Ag - Cu,



α = A - reicher MK

β = B - reicher MK

Eutektische Reaktionen zeigen nur die Legierungen mit Zusammensetzung zwischen x_1 und x_2 .

- b) Peritektisches System: Ist ein weiteres Beispiel für ein System mit beschränkter MK-Bildung. Tritt z.B. im System Fe-C auf.

3.3 Ternäre Zustandsdiagramme (Dreistofflegierungen)

3 Komponenten. Zusammenmischungen der Dreistofflegierungen lassen sich in einer Fläche darstellen. z.B.: Pb-Bi-Sn, Cu-Al-Ni,

3.4 Erläuterung der Ausscheidungshärtung anhand von Zustandsdiagrammen

Ausscheidungshärtung oder Aushärtung (nicht Härten!) :

Ausscheidungshärtung ist Wärmebehandlung zur Festigkeitssteigerung durch Ausscheidungsvorgänge im übersättigten MK. Man erzeugt feine Ausscheidungsteilchen, die die Bewegung der Versetzungen behindern.

Bedingung für die Aushärtung ist, daß die Löslichkeit der zulegierten Komponente im Grundmaterial (z.B.: Al) mit abnehmender Temperatur geringer wird.

Beispiele: Al-Cu-Leg, Al-Mg-Si-Leg, Al-Zn-Mg-Leg, Al-Cu-Mg-Leg,
(siehe Umdruck Blatt 4)

Die Wärmebehandlung erfolgt in drei Stufen:

- a) Lösungsglühen zur Erzeugung eines homogenen MK
- b) Abschrecken von der Lösungsglühtemperatur zur Erzeugung eines übersättigten MK
- c) Je nach Eignung der Legierung: Auslagern bei Raumtemperatur (= Kaltaushärten)
Auslagern bei erhöhter Temperatur (= Warmaush.)

Aluminium - Kupfer:

Ausschnitt aus dem Zustandsschaubild Al-Cu (siehe Umdruck Blatt 4)

Kaltaushärten:

Geeignete Legierung Lösungsglühen, abschrecken und bei geeigneter Temperatur auslagern. Cu - Atome sammeln sich an bestimmten Gitterebenen (Guinier-Preston-Zonen I), es erfolgt Festigkeitserhöhung. Bei kurzzeitiger Erwärmung auf 100°C bis 200°C entsteht wieder übersättigter MK. Dann ist erneut Kaltaushärtung (Warmmaushärtung) möglich.

Warmmaushärten: Geeignete Legierung Lösungsglühen, abschrecken und bei ca. 180°C auslagern. Anderer Mechanismus: Cu-Ansammlungen nicht einlagig, sondern mehrere Atomlagen dick (Guinier-Preston-Zone II), es erfolgt Festigkeitserhöhung. Nach Überschreiten eines Maxima erfolgt Festigkeitsabfall.

(Weiteres Beispiel für Kaltaushärtung siehe Umdruck Bild 1 Blatt 4)

Festigkeit und Dehnung streben mit steigender Auslagerungszeit einem Endwert zu. Je größer die Temperatur ist, desto kürzer ist die Zeit für den Endwert.

(Weiteres Beispiel für Warmmaushärtung siehe Umdruck Bild 2 Blatt 4)

Hier sieht man höchste Härtewerte bei Auslagerungstemperatur ca. 150°C (also entsprechend lange Zeit erforderlich). Abfall der Härte nach Maximum wegen Übersättigung (Vergrößerung der Ausscheidungsteilchen)

Weitere Systeme mit Ausscheidungshärtbarkeit: Cu-Cr, Cu-Cr-Zn, Cu-Be,

4. Eisen - Kohlenstoff - Zustandsschaubilder

(Umdruck Blatt 5)

4.1 Stabiles System

Kohlenstoff liegt als Graphit vor.

(Stabiles System Fe-C ist im Umdruck mit gestrichelter Linie dargestellt)

4.2 Metastabiles System

Kohlenstoff liegt als Fe₃C (Zementit) vor. Zementit kann durch Wärmebehandlung in Fe und Graphit zerlegt werden = Metastabiles Verhalten

(Metastabiles System Fe-Fe₃C ist im Umdruck mit ausgezogenen Linien dargestellt.)

4.3 Gefügearten

Metastabiles System:

Gefügeart	Metallographische Bezeichnung
α - MK	Ferrit (α-Ferrit)
χ - MK	Austenit
δ - MK	δ - Ferrit
Fe ₃ C (Eisenkarbit)	Zementit
Eutektikum	Ledeburit
Eutektoid	Perlit

Stabiles System:

Kohlenstoff tritt nicht als Fe₃C auf, sondern als Graphit. Statt Ledeburit verwendet man die Bezeichnung Graphit-Eutektikum und statt Perlit die Bezeichnung Perlit-Graphit-Eutektikum.

4.4 Erläuterung der Umwandlungen und der Gefüge

(Umdruck Blatt 5)

Eutektische Umwandlung: $S \rightarrow \chi - MK + Fe_3C = \text{Ledeburit (metastabiles System)}$
4,3% 1147° 2,06% C 6,7% C Eutektikum

Eutektoide Umwandlung: $\chi - MK \rightarrow \alpha - MK + Fe_3C = \text{Perlit (metastabiles System)}$
0,8% 723° 0,02% 6,7% Eutektoid

Stahl: i.a.: C ≤ 2%

Gußeisen: i.a.: C ≥ 2%

(Einteilung der reinen Fe-C-Legierungen siehe Umdruck Blatt 6)

(Eisengußwerkstoffe siehe Kapitel 10)

4.5 Beeinflussung des Austenit-Feldes durch Legierungszusätze

z.B.: Ferritischer hochlegierter Stahl → Einschnürung des Austenit-Feldes durch Chrom-zusatz:

z.B.: X6Cr17(S. Fachliteratur)

Austenitischer hochlegierter Stahl → Erweiterung des Austenit-Feldes durch Zusatz von Cr+Ni

z.B.: x5CrNi1810 (S. Fachliteratur)

Vorsicht: Bei thermischer bzw. mechanischer Behandlung können unerwünschte Effekte auftreten.
(s. Fachliteratur)

5. Herstellung von Stahl

5.1 Herstellung von Roheisen

- Erze sind Rohstoffe zur Metallherstellung
- Erze enthalten das gewünschte Metall (Fe) nicht in metallischer Form, sondern in Form chemischer Verbindungen: Oxide, Carbonate, ... (meist Fe-Oxide)
- Erze werden in **Eisenhütte** (= Werk) zum Roheisen reduziert
- Für Fe-Oxide: Reduktionsmittel: Koks
- Hochofen ist Anlage, in der die Reduktion im großtechnischen Maßstab durchgeführt wird
- Koks hat im Hochofen drei Funktionen:
 - Reduktionsmittel
 - Wärme-Energie-träger
 - Aufkohlungsmittel für flüssiges Fe
- Die C-gesättigte Fe-Schmelze sammelt sich aufgrund ihrer Dichte im unteren Teil des Hochofens und wird dort intervallweise als Roheisen **abgestochen**. Roheisen ist vor allem mit Mn, S, P verunreinigt.
- Auf dem Roheisen schwimmt die flüssige Schlacke, die abgezogen wird.

5.2 Herstellung von Stahl (Reinheitssteigerung von Roheisen)

- Roheisen ist Vorprodukt, Gehalt von Verunreinigungen schwankt, technologische Eigenschaften sind unbefriedigend.
- Ziel der Stahlherstellung aus Roheisen: Entfernung der Verunreinigungen und Herabsetzen des C-Gehaltes auf Werte nahe 2,1%.
- Stahlherstellung erfolgt im Stahlwerk, das in der Regel das noch flüssige Roheisen vom nahegelegenen Hochofenwerk übernimmt.
- Außer Roheisen wird noch Stahlschrott eingesetzt
- C und die anderen Fe-Begleiter (Mn, Si, P, ...) werden am einfachsten und billigsten mit O₂ entfernt (Fachbezeichnung: **Frischen**)
- Wichtigste Verfahren zur Stahlherstellung:
 - **Sauerstoff-Aufblasverfahren:**
Reiner O₂ wird mit H₂O – gekühlter Lanze auf das Metallbad aufgeblasen
 - **Elektrostahlverfahren:**
Meist für legierte Stähle mit hohem Reinheitsgrad

Weitere Verfahren: siehe Fachliteratur

5.3 Vergießen von Stahl

- Der fertig gefrischte Stahl wird abgestochen in Gießpfanne und dann abgegossen:
 - a) **Blockguß**
Schmelze aus Gießpfanne in Kokille abgießen
 - b) **Strangguß**
Kontinuierliches Verfahren → Endlosstränge → Strangguß
Vorteile: - Rationelle Produktion (z.B. Blockwalzwerk einsparen)
- gute Oberflächenqualität
- größere Ausbringung als beim Blockguß, da der verlorene Kopf nur einmal im ganzen Strang vorkommt

Nur beruhigter Stahl wird im Stranggußverfahren hergestellt. Bei unberuhigtem Stahl würde durch CO-Blasen starke Porigkeit entstehen.

5.4 Erstarren von Stahl

- Nach dem Frischen gibt es im Stahl einen Rest FeO als gelöster O₂ (ebenso wie z.B. auch N₂)
- Wichtiges Verhältnis ist das Produkt C x O₂ = konstant
 - **Stahl mit viel C hat wenig O₂ gelöst**
 - **Stahl mit wenig C hat viel O₂ gelöst**
- **Rotbruchgefahr:** Stahl hat nach dem Frischen soviel O₂ (wenn wenig C) und soviel S, daß Versprödung infolge FeO und FeS bei ca. 800 – 950 °C bei Warmumformung auftritt
 - Rotbruch (Bruch bei Rotglut)
- **Beseitigung der Rotbruchgefahr:**
Dazu setzt man dem Stahl im Konverter oder in der Gießpfanne z.B. Ferromangan zu, eine Fe-Mn-Legierung mit 10-18 % Mn (je nach Bedarf) und 5-7 % C (zur gleichzeitigen Rückkohlung auf den gewünschten C-Gehalt). Dadurch erfolgt teilweise Desoxidation und Entschwefelung.

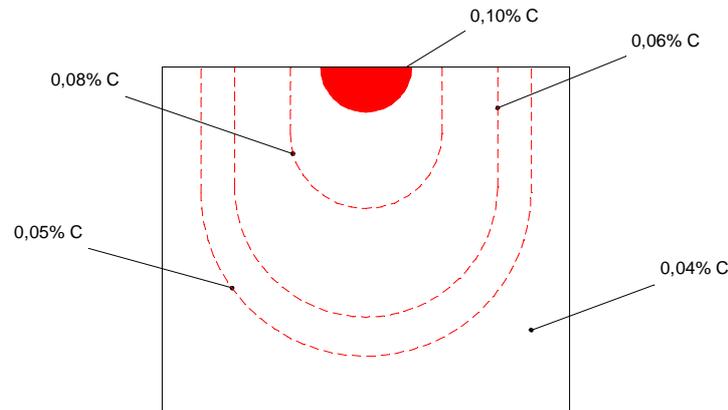


Stahl desoxidiert (teilweise) und entschwefelt zur Beseitigung der Rotbruchgefahr und steht ruhig in der Gießpfanne.

5.4.1 Unberuhigter Stahl FU (früher U)

- Beim Vergießen in die Kokille (= Abkühlen = verringerte Gaslöslichkeit) werden gelöste Gase ausgeschieden.
 - Wallende Bewegung des Stahls
 - Stahl *kocht*; *unberuhigter* Stahl
- $\text{FeO} + \text{C} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}$
CO entweicht und versetzt Bad in Wallung, reißt N₂ und H₂ mit
- Es entsteht Auswärtsströmung am Kokillenrand und Abwärtsströmung in der Mitte

- Daher kein Konzentrationsausgleich zwischen der erstarrten Außenzone an der Kokillenwand und der Schmelze in der Mitte.
- Entmischung, d.h. Konzentrationsunterschiede, da verschiedene Elemente (z.B. P, S, C, Mn, usw.); diese Erscheinung heißt **Blockseigerung**
- Speckschicht = seigerungs- und verunreinigungsarme Randzone
-
- z.B.



- Die Gasblasen verdrängen Stahl und ersetzen so das beim Erstarren (Schwinden) verlorengehende Volumen, unberuhigt vergossene Stähle zeigen keinen, oder nur geringen Lunker.
- Weitere Angaben siehe Übersicht im Umdruck Bild 13 a (z.B. Alterungsauffälligkeit, Kerbschlagarbeit, usw.)

5.4.2 Beruhigter Stahl FN (früher R)

- kein Kochen; Verminderung der Gasblasen und der Blockseigerung im festen Zustand
- Um Stahl zu beruhigen, gibt man in der Gießpfanne außer Mn (zur Beseitigung der Rotbruchgefahr) auch Si dazu (Si hat größere Affinität zu O als C)
- SiO₂ geht in Schlacke und z.T. bleibt es als Einschlüsse im Stahl
- kein Schwindungsausgleich durch Gasblasen, daher entsteht ein Blocklunker, der bis zu 30 % des Blockes unbrauchbar machen kann
- Wird der Lunker nicht vollständig entfernt, so entstehen beim Auswalzen die gefürchteten Doppelungen
- Nur geringe Blockseigerung
- In verschiedenen Fällen muß Stahl beruhigt vergossen werden, z.B. Stahlguß → wird nicht mehr gewalzt oder geschmiedet, d.h. Gasblasen würden erhalten bleiben
- Weitere Angaben s. Umdruck Blatt 13a

5.4.3 Besonders beruhigter Stahl FF (früher RR)

- man gibt außer Mn und Si noch zusätzlich Al zu
- Al bindet restlichen Sauerstoff ($\rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$) und Stickstoff ($\rightarrow \text{AlN}$)
- Streckgrenze und Kerbschlagarbeit steigen, die Übergangstemperatur wird zu tieferen Temperatur verschoben
- Alterungsanfälligkeit am geringsten
- Siehe Übersicht Umdruck Blatt 13a

5.5 Herstellung von Stählen mit besonders hoher Reinheit und Gleichmäßigkeit

- z.B. durch
- Vakuum-Metallurgie
(Schmelzen bzw. Umschmelzen unter Vakuum)
 - Umschmelzverfahren
(Elektro-Schlacke-Umschmelzen)
 \rightarrow siehe Fachliteratur

5.6 Wirkung der Begleitelemente in Stahl

- Legierungselemente sind erwünschte Elemente
- Stahlbegleiter sind die während der Stahlherstellung *unbeabsichtigt* aufgenommenen Bestandteile z.B. aus Erzen, aus der Ofenausmauerung, aus dem Schrott

Mangan

- unlegierte Stähle können bis zu 1,6% Mn enthalten, darüber hinaus gelten sie als mit Mangan legiert
- Mn führt S in die ungefährliche Form MnS über, wodurch die Stahl warmverformbar wird
- MnS wird beim Walzen zeilenförmig in Walzrichtung gestreckt
 \rightarrow Einfluß auf Zähigkeit quer zur Walzrichtung

Silizium

- ist ein wirksames Desoxidationsmittel; es entstehen rundliche, meistens harte und spröde Silikate, die beim Walzen in Zeilenform angeordnet werden
- erhöht zwar die Festigkeit und die Härte, setzt aber die Bruchdehnung und damit die Kaltverformbarkeit stark herab

Phosphor

- vermindert die Kerbschlagarbeit sehr stark
- neigt sehr stark zum Seigern
- Begrenzung des P-Gehalts: siehe Norm

Schwefel

- löst sich nicht in Eisen, es entsteht FeS mit $T_S = 1200^\circ\text{C}$
- zur Vermeidung von Rotbruch und Heißbruch wird Mn zugesetzt \rightarrow MnS (schmilzt erst bei ca. 1600°C)
- S neigt noch stärker zum Seigern als P
- S verringert die Kerbschlagarbeit im Stahl
- Begrenzung des S-Gehalts: siehe Norm
- Bei Automatenstähle gewisse S-Zugabe; die geringe Festigkeit der Sulfide führt zu den gewünschten kurzbrüchigen Spänen

Stickstoff

- schädigt mechanische Eigenschaften \rightarrow verringert Verformungsvermögen, insbesondere die Kerbschlagarbeit
- Begrenzung des Stickstoffgehalts: siehe Normen
- α -Eisen löst max. 0,1% Stickstoff bei 590°C ; bei Raumtemperatur ist Stickstoff in α -Eisen praktisch unlöslich; durch schnelles Abkühlen \rightarrow Stickstoff zwangsgelöst; durch nachträgliches Erwärmen \rightarrow Ausscheiden von Eisennitriden Fe_4N \rightarrow Verringerung der Zähigkeit \rightarrow **Abschreckalterung**
- wesentlich gefährlicher ist die **Verformungsalterung (Reckalterung)**; sie bewirkt außerordentlichen Zähigkeitsverlust und entsteht nur an **kaltverformten** Stählen.
Durch Kaltverformung \rightarrow viele Versetzungen \rightarrow Stickstoff wandert bevorzugt in Versetzungsbereiche \rightarrow Versetzungen werden blockiert \rightarrow Stahl versprödet. Verringerung der Bruchdehnung, Abnahme der Kerbschlagarbeit, Erhöhung der Übergangstemperatur
 - natürliche Alterung: Zähigkeitsverlust erfolgt bei Raumtemperatur z.B. erst Wochen oder Monate nach Kaltverformung
 - künstliche Alterung: erfolgt bei erhöhter Temperatur z.B. bei 250°C schon nach wenigen MinutenBei Verformung des Stahls zwischen 200°C und 350°C \rightarrow geringe Zähigkeit \rightarrow Gefahr des Blaubruchs (Blausprödigkeit)
- Alterungsauffälligkeit läßt sich wesentlich herabsetzen durch Zugabe von Elementen, die den Stickstoff zu festen, schwerlöslichen Nitriden binden, z.B. Al (siehe z.B. besonders beruhigter Stahl)

Wasserstoff

- Wasserstoff im Stahl bewirkt Versprödung, bzw. Rißbildung; Abhilfe: trockenes Erz und Vakuumentgasen der Schmelze
- Durch zu schnelles Abkühlen, vor allem im Bereich zwischen 200°C und 300°C , entstehen durch Wasserstoff im Inneren von größeren Schmiedestücken, Mikrorisse, die als Flockenrisse bezeichnet werden
- Wasserstoffversprödung auch z.B. nach Beizen oder Galvanischer Behandlung, gegebenenfalls Wasserstoff austreiben durch Wärmebehandlung (siehe Fachliteratur)

Sauerstoff

- Sauerstoff führt zur Versprödung des Stahls
- FeO macht ähnlich wie FeS den Stahl rotbrüchig
- Mn, Si, Al im Stahl → Desoxidation → Oxide und Silikate können durch Bildung eines Zeilengefüges schädlich wirken

Nichtmetallische Einschlüsse

- haben großen Einfluß auf Werkstoffeigenschaften
- Einschlußgehalt z.B. bestimmen mittels Schlacken-Richtreihen

6. Normgerechte Bezeichnung der Stähle

- alte Bezeichnungen in geeigneten Fachbüchern nachlesen, z.B. Bargel/Schulze (neu) und in den Normen
- Nachfolgend werden die neuen Bezeichnungen in kurzer Form erläutert

Bezeichnungssysteme für Stähle nach DIN EN 10 027 Teil 1

Kurznamen werden in 2 Hauptgruppen eingeteilt:

① **Kurznamen, die Hinweise auf die Verwendung und die mechanischen oder physikalischen Eigenschaften der Stähle enthalten (Gruppe1)**

Hauptsymbol: min. ein Großbuchstabe zur Kennzeichnung des Verwendungszweckes und mehrstellige Ziffer zur Beschreibung einer charakteristischen mechanischen oder physikalischen Eigenschaft (manchmal zusätzlicher Buchstabe vor der Ziffer)

Beispiele für Buchstaben zur Kennzeichnung des Verwendungszweckes:

S = Stähle für den allgemeinen Stahlbau

E = Maschinenbaustähle

P = Stähle für der Druckbehälterbau

usw.

Mehrstellige Ziffer zur Beschreibung einer charakteristischen Eigenschaft:

- z.B. Mindeststreckgrenze R_e in N/mm^2 für kleinste Erzeugnisdicke
- weitere Einzelheiten siehe Norm

Wenn Hauptsymbol nach DIN EN 10 027 Teil 1 für vollständige kurzgefaßte Identifizierung nicht ausreicht, dann noch Zusatzsymbole nach ECISS-Mitteilung IC 10

Beispiele für Kurznamen für diese Gruppe:

- Stähle für den allgemeinen Stahlbau (DIN EN 10 025, frühere DIN 17 100)

S 235 JR (früher St 37-2)

S 235 JRG 2 (früher RSt 37-2)

S 275 JR (früher St 44-2)

usw.

- Maschinenbaustähle (DIN EN 10 025, früher DIN 17 100)

E 295 (früher St 20-2)

E 335 (früher St 60-2)

② Kurznamen, die Hinweise auf die chemische Zusammensetzung der Stähle beinhaltet (Gruppe 2)

- Unlegierte Stähle, ausgenommen Automatenstähle mit mittlerem Mn-Gehalt < 1%

Kurzname: C und Zahl, die dem 100-fachen Mittelwert von C in % entspricht

Bsp.: C 45 (früher C 45)
C 45 E (früher Ck 45) k = kleine Phosphor + Kaliumgehalte

- Unlegierte Stähle mit mittleren Mn-Gehalt > 1%, unlegierte Automatenstähle, sowie legierte Stähle (außer Schnellarbeitsstähle) mit mittleren Gehalten der einzelnen Legierungselementen < 5%

Kurzname:

- Zahl, die dem 100-fachen Mittelwert von C in % entspricht
- Chemische Symbole der kennzeichnenden Legierungselementen
- Zahlen mit Hinweis auf Gehalt der Elemente
Die Zahlen ergeben sich durch Multiplikation des mittleren Gehaltes des Legierungselementes mit bestimmten Faktor
- Runden auf ganze Zahl
- Zahlen der einzelnen Elemente durch Bindestrich getrennt

<u>Faktor</u>	<u>Elemente</u>
4	Cr, Co, Mn, usw. s. Norm
10	Al, Be, Cu usw.
100	Ce, N, P, S
1000	B

Beispiele: 42 CrMo 4 (früher 42 CrMo 4)
40 CrMoV 4-7 (früher 10CrMoV 4 7)

- Legierte Stähle, außer Schnellstähle, wenn min. ein Legierungselement ≥ 5 Massen% beträgt

Kurzname:

- X
- 100-facher Mittelwert des C-Gehaltes in %
- chemische Symbole der Legierungselemente
- Gehalt der Legierungselemente in % (aufgerundet auf ganze Zahl des mittleren Gehaltes)
- Gehalte der Elemente (Bindestrich)

Beispiel: X 5 CrNi 18-10 (früher X 5 CrNi 18 10)

- Schnellarbeitsstähle

- Kurzname:
- HS
 - Gehalte in % von W, Mo, V, Co (in dieser Reihenfolge) gerundet auf nächste ganze Zahl des mittleren Gehaltes
 - Bindestriche zwischen den Gehalten

Beispiel: HS 6-5-2 (früher S 6-5-2)

Hinweis: Diese Beispiele werden unter Vorbehalt angegeben. Die endgültigen Kurznamen werden bei der Herausgabe der DIN-EN-Norm für die jeweilige Stahlgruppe festgelegt.

Bezeichnung der Stähle durch Werkstoffnummer nach DIN EN 10 027 Teil 2

- Werkstoffhauptgruppennummern (1 = Stahl)
- Stahlgruppennummer (z.B. 43 = nichtrostende Stähle mit Ni \geq 2,5%, usw.)
- Zählnummer
- Weitere Einzelheiten siehe Norm

7. Einteilung der Stähle / Stahlgruppen

Einteilung der Stähle nach DIN EN 100 20

7.1 Einteilung nach chemischer Zusammensetzung (DIN EN 10 020)

- unlegierte Stähle: maßgebende Gehalte der einzelnen Elemente erreichen bestimmte Grenzwerte nicht (siehe z.B. Tab S. 181, Bargel/Schulze, Ausgabe '94)
- legierte Stähle: maßgebende Gehalte der einzelnen Elemente erreichen oder überschreiten zumindest in einem Fall den angegebenen Grenzwert

7.2 Einteilung nach Hauptgüteklassen (DIN EN 10 020)

- Hauptgüteklassen der unlegierten Stähle
 - Grundstähle
 - Unlegierte Qualitätsstähle
 - Unlegierte Edelstähle
- Hauptgüteklassen der legierten Stähle
 - Legierte Qualitätsstähle
 - Legierte Edelstähle

7.3 Hinsichtlich praktischer Anwendung

Hinsichtlich ihrer praktischen Anwendung werden die Stähle eingeteilt in:

- Bau- oder Konstruktionsstähle
- Werkzeugstähle

- Unlegierte Baustähle nach DIN EN 100 25 (früher DIN 17 100)

Angaben hinsichtlich Sorten, Gütegruppen, Desoxidationsarten, chemischer Zusammensetzung, mechanischer Eigenschaften (auch Kerbschlagarbeit), technologische Eigenschaften (auch Schweißbeignung), usw. siehe Norm und Fachliteratur

Beispiel: S 235 JRG 2 (früher RSt 37-2)
 S 275 JR (früher St 44-2)
 E 295 (früher St 50-2)

- Hochfeste Baustähle

- Hochfeste, nicht vergütete Feinkornbaustähle
z.B. liegen geringe Gehalte an Elementen vor, die feinverteilte Karbide bilden, sieh z.B. DIN 17 102. Sie werden auch als mikrolegierte Feinkornbaustähle bezeichnet. Einzelheiten siehe z.B. Bargel/Schulze und Normen
- Hochfeste, vergütete Feinkornbaustähle
Es wird niedriggekohlter, angelassener Martensit mit guten Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften verwendet (siehe Bargel/Schulze)

- Vergütungsstähle nach DIN EN 10 089 (früher 17 200)

- sind aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung zum Vergüten geeignet → gute Zähigkeit bei gegebener Zugfestigkeit
- im Gegensatz zu den vorher genannten niedriggekohlten schweißgeeigneten Vergütungsstählen, besitzen die hier genannten unlegierten und legierten Vergütungsstähle C-Gehalte von Ca. 0,2% bis 0,65%. Sie werden i.a. recht hoch angelassen (> 500°C, siehe Norm)
- Sie werden hauptsächlich für dynamisch hochbeanspruchte Bauteile hoher Festigkeit verwendet.
- Beispiele: C 45 E (früher Ck 45)
 41 Cr 4 (früher auch 41 Cr 4)
 42 CrMo 4 (früher auch 42 CrMo 4)
- Stahlsorten, Wärmebehandlung, Eigenschaften, Besonderheiten usw. siehe Norm + Fachlit.

- Einsatzstähle nach DIN 17 210

- C-arme Stähle mit bis ca. 0,22% C-Gehalt
- Geeignet bis 200°C
- Einsatzhärten z.B. zwecks Erzeugung einer harten, verschleißbeständigen Oberfläche und Erhöhung der Dauerfestigkeit bis zu einer Tiefe von 2 mm
- Aufkohlen - Härten - Anlassen (Norm + Fachlit.)
- Beispiele: Ck 15
 17 Cr 3
 16 MnCr 5

- Nitrierstähle
 - durch Nitrieren Verbesserung der Verschleißbeständigkeit und der Dauerfestigkeit
 - Nitrierschicht im Oberflächenbereich (→ geringe Tiefe)
 - Geeignet bis 500°C
 - Legierungselemente mit hoher Stickstoffaffinität z.B. Al, Mo, V
 - Für hinreichende Kernfestigkeit wird der Stahl vor dem Nitrieren vergütet
 - Eigentliche Nitrierstähle → genormt DIN 17 211
 - Beispiele: 34 CrAl 6
 31 CrMoV 9
 - z.B. auch Vergütungsstähle, Einsatzstähle und Werkzeugstähle können nitriert werden (siehe Norm und Fachliteratur)

- Warmfeste und hitzebeständige Stähle
 - Einzelheiten siehe z.B. Bargel/Schulze
 - Metalle kriechen bei höheren Temperaturen und entsprechender Beanspruchung
 - Mit zunehmender Temperatur steigt auch die Zundergefahr und die Gefahr der Korrosion durch heiße Gase und Flüssigkeiten
 - Warmfestigkeit erhöhen durch z.B.:
 - Bestehen Legierungselemente in fester Lösung → verringern die Atombeweglichkeit und verzögern Rekristallisationsvorgänge
 - Vermischen der Kriechvorgänge durch feindisperse Ausscheidungen z.B. Karbide, Nitride
 - Im kfz-Gitter ist Atombeweglichkeit geringer als im krz-Gitter, daher Warmfestigkeit und Rekristallisationstemperatur von austenitischen Stählen größer als die von ferritischen Stählen
 - Einzelheiten siehe Norm und Fachlit.
 - Hitzebeständigkeit: → hochlegierte Stähle → Cr-Zusatz ($Cr \geq 12\%$) bewirkt Cr-Oxidschutzschicht, Schutzschicht wird hinsichtlich Zunderbeständigkeit durch z.B. Al und Si noch verbessert. z.B. ferritische Cr-Stähle und austenitische Cr-Ni-Stähle
 - Einzelheiten siehe Norm und Fachlit.

- Nichtrostende Stähle
 - bei $Cr \geq 12\%$ entsteht unter oxidierenden Bedingungen dichter Oxidfilm → Stahl wird passiviert und ist im gewissen Umfang beständig gegenüber oxidierenden Medien
 - Cr muß gleichmäßig im Gitter verteilt sein
 - Je nach Anwendungsfall und Stahl weiter Legierungselemente, z.B. Ni, Mo, ...
 - z.B. ferritische Chromstähle, austenitische Cr-Ni-Stähle
 - Vermeidung von Cr-Karbidbildung, z.B. beim Glühen und Schweißen
 - Falls Cr-Karbide entstehen → bei bestehenden Stählen primär an Korngrenzen → dann interkristalline Korrosion

- **Wichtig:** Richtige Beurteilung der Korrosionsbedingungen, richtige Werkstoffwahl, richtiger Werkstoffzustand und gute Passivierung sonst doch Korrosionsschäden z.B. Flächenkorrosion, interkristalline Korrosion, Lochfraß, Spannungsrißkorrosion, ... Einzelheiten siehe Norm und Fachlit. (EsFluN)

- Weitere Stahlgruppen EsFluN
z.B. Kaltgewalzte weiche Stähle zum Kaltumformen nach DIN EN 10 130, DIN EN 10 142 (DIN 1623), kaltzähe Stähle, ...

- Werkzeugstähle
EsFluN (DIN 17 350)

- Unlegierte Werkzeugstähle
 - nach DIN 17 350 mehrere Güteklassen, die sich in ihrem Härungsverhalten unterscheiden
 - ihre Bedeutung ist deutlich geringer geworden, da ihnen die legierten Kaltarbeitsstähle hinsichtlich Härbarkeit, Anlaßbarkeit und Verschleißwiderstand überlegen sind

- Legierte Werkzeugstähle
 - legierte Kaltarbeitsstähle
 - zur Herstellung von Werkzeugen für spanende und spanlose Fertigung bei Raumtemperatur → Oberflächentemperatur bis ca. 200°C
 - hohe Härte, gute Verschleißfestigkeit, Maß- und Formbeständigkeit
 - Einhärbarkeit wird besonders erhöht durch z.B. Mn, Cr, Mo, Ni, ...
 - Als Karbidbildner werden verwendet: Cr, W, V
 - legierte Warmarbeitsstähle
 - für Warmarbeitswerkzeuge wie Preßmatrizen, Warmziehringe, Wärmerschermesser, Schmiedehämmer
 - Temperatur ständig > 200°C
 - Warmfest, warmverschleißfest, anlaßbeständig, warmrißunempfindlich
 - i.d.R. dreifach legiert; Hauptlegierungselement: Cr
die beiden anderen Legierungselemente stammen aus der Gruppe W, V, Ni, Mo, Co
 - legierte Schnellarbeitsstähle
 - zum Zerspanen bei hohen Schnittgeschwindigkeiten eingesetzt
 - hohe Temperatur an Werkzeugschneide
 - Anlaßbeständigkeit bis ca. 600°C
 - Bezüglich Dauerwamhärte siehe Text und Bild Bargel/Schulze
 - Hoher Anteil an Sonderkarbiden der Elemente W, Mo, V, Co, Cr

8. Wärmebehandlung der Stähle

siehe Text und Bilder im Umdruck

9. Anwendung von Stahl

wurde SS 1997 nicht behandelt

10. Eisengußwerkstoffe

siehe Text und Bilder im Umdruck

11. Nichteisenmetalle

wurde SS 1997 nicht behandelt

12. Werkstoffprüfung

12.1 Metallographie (Metallographische Untersuchung)

(siehe Umdruck Blatt 8)

Aufgabe der metallographischen Untersuchung ist es, Aufschluß über den makroskopischen und mikroskopischen Gefügebau bis hin zur Art und Verteilung von Gitterfehlern zu geben.

12.1.1 Makroskopische Verfahren

Sie liefern lediglich erste Anhaltspunkte über das Gefüge oder über die Art und Verteilung bestimmter Gefügebestandteile. Diese Verfahren beruhen auf der Wirkung chemischer Reaktionen auf der Oberfläche.

Ätzverfahren: Nach geeigneter Probevorbereitung erfolgt die Ätzung.

Ätzung nach Adler: Dient vor allem zur Kontrolle von Schweißverbindungen unlegierter und niedriglegierter Stähle. Die Ätzung ergibt ein Gesamtbild einer Schweißverbindung im Querschnitt. (Ätzmittel siehe Fachliteratur).

Ätzung nach Oberhoffer: Ermöglicht den Nachweis von Phosphorseigerungen. Die seigerungsfreien Stellen werden aufgeraut und erscheinen daher im Makroätzbild dunkler. Die Phosphoranreicherungen werden von der Ätzung nicht angegriffen und erscheinen hell. (Ätzmittel siehe Fachliteratur)

Ätzung nach Fry: Bei dieser Ätzung zeigen sich an Stellen, an denen die Fließgrenze überschritten wurde, schwarze Kraftgrenzlinien. Ihre Entstehung beruht darauf, daß an solchen Stellen infolge Stickstoffausscheidungen der Ätzangriff stärker ist. Damit wird der Faserverlauf sichtbar. (Ätzmittel siehe Fachliteratur)

Abdruckverfahren:

Baumann - Abdruck: Dient zum Nachweis von Schwefelanreicherungen. Drückt man mit 5%-iger Schwefelsäure getränktes Bromsilberpapier auf den Schliff, so färben die schwefelhaltigen Stellen das Papier dunkel. Der Abdruck wird fixiert, gewässert und getrocknet.

12.1.2 Mikroskopische Verfahren

Lichtmikroskopie:

Probe vorbereiten, ätzen und im Lichtmikroskop beurteilen.

Je nach Lichteinfall: **Hellfeld-** oder **Dunkelfeldbeleuchtung.**

Kornflächenätzung: Unterschiedlicher Angriff durch unterschiedliche Orientierung der Kristalle.

Korngrenzenätzung: Es werden primär die Korngrenzen angegriffen

(siehe Umdruck Blatt 8)

Elektronenmikroskopie:

- Durchstrahlungsmikroskopie
- Rasterelektronenmikroskopie

12.2 Zugversuch (DIN EN 10002)

12.2.1 Aufgabe

- Der Zugversuch dient zur Ermittlung der Festigkeit und Verformungskennwerte der Werkstoffe bei einachsiger, gleichmäßiger über den Querschnitt verteilter Beanspruchung.
- Die Zugprobe wird gleichmäßig und stoßfrei gereckt, bis der Bruch eintritt.
- Werte für Spannungszunahme bzw. Dehnungsgeschwindigkeit siehe Norm.
- Beim Zugversuch wird zunächst ein Kraft - Verlängerungs - Diagramm ermittelt. Dann erfolgt die Umwertung in ein Spannungs - Dehnungs - Diagramm.
- Gemäß der Norm gilt: $\sigma = \frac{F}{S_0}$; (F = Zugkraft, S_0 = Anfangsquerschnitt)
 $\varepsilon = \frac{dL}{L_0} \cdot 100$; (L_0 = Anfangsmesslänge)

12.2.2 Zugproben

Zugproben sind nach DIN 50125 und DIN EN 10002 Teil 1 genormt um gleiche Bedingungen beim Zugversuch zu gewährleisten. Für bestimmte Fälle z.B. Grauguß gelten besondere Normen (siehe Fachliteratur).

Meist werden proportionale Proben verwendet, bei denen zwischen der Anfangslänge L_0 und dem Anfangsquerschnitt S_0 die Beziehung besteht:

$$L_0 = k \cdot \sqrt{S_0}; \text{ (mit } k = 5,65)$$

Bei Proben mit kreisförmigen Querschnitten ergibt sich daraus: $L_0 = 5 \cdot d_0$.

In Sonderfällen kann der Proportionalitätsfaktor auch $k = 11,3$ sein.

Für kreisförmigen Querschnitt gilt dann: $L_0 = 10 \cdot d_0$.

Proportionale Proben ergeben vergleichbare Bruchdehnungen, wenn jeweils der gleiche Proportionalitätsfaktor vorliegt.

Angaben zu nichtproportionalen Proben siehe Norm.

12.2.3 Prüfmaschinen

- Moderne Maschinen arbeiten rechnergestützt und haben EDV - Auswertung.
- Bei modernen Maschinen wird ein Längenänderungsmeßgerät bei L_0 angesetzt und bis zum Bruch drangelassen.
- Erforderliche Meßgenauigkeit → Feindehnung → siehe Norm.

12.2.4 Kraft - Verlängerungs - Diagramm

(Spannungs - Dehnungs - Diagramms)

Siehe Beispiele für $\sigma - \varepsilon$ - Diagramme im Umdruck Blatt 9 und 10.

12.2.5 Kennwerte und Definitionen

Siehe $\sigma - \varepsilon$ - Diagramme im Umdruck Blatt 9.

Elastizitätsmodul E:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}; \left(\frac{\text{Spannung}}{\text{Dehnung}} \right)$$

Der E - Modul ist die Steigung der Hookschen Gerade.

(Bei Stahl ca. 210000 N/mm² ; Aluminium ca. 70000 N/mm²)

Obere Streckgrenze (R_{eH})

Bei verschiedenen Metallen und Legierungen tritt bei plastischer Verformung eine Unstetigkeit auf. Man spricht von einer **Ausgeprägten Streckgrenze**.

Obere Streckgrenze R_{eH} = Spannung in dem Moment in dem der erste deutliche Kraftabfall auftritt.

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} = \left(\frac{\text{Kraft - bei - erster - deutlicher - Abfall - auftritt}}{\text{Anfangsquerschnitt}} \right)$$

Untere Streckgrenze (R_{eL})

- Kleinste Spannung im Unstetigkeitsbereich wobei Einschnürerscheinungen nicht berücksichtigt werden.
- Dehnung im Bereich der Streckgrenze wird auch „Lüdersdehnung,“ genannt.
- Lüders - Dehnung erfolgt nicht homogen über die ganze Probe, sondern örtlich → breitet sich über die ganze Probe aus → so lange findet keine Verfestigung statt. Danach übliche Verformung und Verfestigung.
- Ausgeprägte Streckgrenze wird meist in krz - Metallen und krz - Legierungen mit gewissem Gehalt an interstitiell gelösten Atomen beobachtet.

→ bevorzugt an weichen, unlegierten Stahl mit geringem C - Gehalt.

Ursache: Blockierung der Versetzungen durch die interstitiell gelösten Atome. Bei Erreichen von R_{eH} beginnt die Verformung in schmalen Bereichen (Lüdersbänder).

Dehngrenze (R_p)

- Bei verschiedenen Werkstoffen liegt ein stetiger Verlauf der $\sigma - \varepsilon$ - Kurve vor.
- Dehngrenze R_p ist die Spannung bei einer bestimmten nichtproportionalen Dehnung ε_p .
- Kurzzeichen: R_p + Angabe der nichtproportionalen Dehnung in %.

z.B.: $R_{p0,2}$ (0,2% Dehngrenze)

$R_{p0,01}$ (0,01% Dehngrenze oder technische Elastizitätsgrenze)

Zugfestigkeit (R_M)

$$R_M = \frac{F_M}{S_0} = \left(\frac{\text{max. Zugkraft}}{\text{Anfangsquerschnitt}} \right)$$

Bruchdehnung A (Dehnung nach dem Bruch)

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad ; \quad (\text{in } \%)$$

L_u = Meßlänge nach dem Bruch

L_0 = Anfangslänge

z.B.: $A_5; A_{10}$; (Index 5 bzw. 10 bezieht sich auf $\frac{L_0}{d_0}$)

Wenn der Bruch nicht annähernd mittig erfolgt ist, dann muß man besondere Hinweise in der Norm beachten.

Brucheinschnürung Z

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \quad ; \quad (\text{in } \%)$$

S_u = kleinster Probenquerschnitt nach dem Bruch.

S_0 = Anfangsquerschnitt

Streckgrenzenverhältnis

- Streckgrenzenverhältnis: $\frac{R_{eH}}{R_M}$ bzw. $\frac{R_{p0,2}}{R_M}$;

- Es ist ein Maß dafür, wie weit ein Werkstoff ohne nennenswerte bleibende Verformung ausgenutzt werden kann.

12.2.6 Beispiele für Kennwerte

Siehe Werkstoffnormen

12.2.7 Probenbrüche im Zugversuch

Siehe Bilder im Umdruck Blatt 10

12.3 Zeitstandsversuch unter Zugbeanspruchung (DIN 50118)

- Der Zeitstandsversuch dient zur Ermittlung des Festigkeitsverhaltens von Werkstoffen bei ruhender Beanspruchung und bei einer Temperatur, bei der die Beanspruchungsdauer wesentlichen Einfluß auf die Festigkeit hat.
- Mit allen Zeitstandswerten wird die Warmfestigkeit von Metallen gekennzeichnet.

12.3.1 Versuchsdurchführung

- Durchführung als Langzeit- oder Kurzzeitversuch
z.B.: $t = 100 \text{ h}$ noch Kurzzeitversuch
 $t = 1000 \text{ h}$ bereits Langzeitversuch
- Dauerstandprüfgerät: $F = \text{const.}$ (Gemäß dieser Norm: $\delta = \frac{F}{S_0}$; $S_0 = \text{Anfangsquerschnitt}$)
 $T = \text{const.}$
- Messung der Verformung über der Zeit z.B. mit induktivem Wegaufnehmer.
- Plastische Verformung unter ruhender Last nennt man Kriechen.

12.3.2 Werkstoffkennwerte des Zeitstandversuchs

- Zeitstandversuch nach DIN 50118 gilt für ruhende Zugbeanspruchung.
- Zeitstandfestigkeit ist die ruhende Nennspannung (ruhende Last bezogen auf Anfangsquerschnitt) die bei $T = \text{const.}$ nach bestimmter Belastungszeit zum Bruch führt.
z.B.: $R_{m/10000/550}$ (Belastungsdauer 10000 h, Konstante Temperatur 550°C)
- Zeitstanddehngrenze (siehe Norm)
z.B.: $R_{p0,2/1000/350}$ (= die ruhende Last bezogen auf Anfangsquerschnitt, die bei $T = \text{const.} = 350^\circ\text{C}$ nach 1000 h zu einer plastischen Dehnung von 0,2% führt.)
- Zeitsstandbruchdehnung (siehe Norm)
z.B.: $A_{5/1000/550}$ (= Bruchdehnung nach 1000 h bei $T = \text{const.} = 550^\circ\text{C}$ und $\frac{L_0}{d_0} = 5$)
- Zeitstandbrucheinschnürung (siehe Norm)

12.3.3 Zeitstand - Schaubild

- Auswertung des Zeitstandversuchs. Die Meßergebnisse von allen Proben (bei gleicher Temperatur) werden als Zeitdehnlinsen auf doppeltlogarithmischem Papier aufgezeichnet (siehe Zeitdehnliese im Umdruck Blatt 11)
- Dann werden die Zeitdehnlinsen in ein Zeitstand - Schaubild umgezeichnet.
Zeitstand - Schaubild: Zugbeanspruchung über die Zeit \rightarrow doppeltlogarithmisch \rightarrow man findet Dehngrenzlinien und die Zeitbruchlinie.
- Extrapolation nach der Zeit (siehe Einzelheiten in der Norm) Die extrapolierten Kurven sind zu stricheln und extrapolierte Werte sind durch Einklammern kenntlich zu machen. (siehe Umdruck Blatt 11 oben)

12.4 Härteprüfung bei metallischen Werkstoffen

(siehe Umdruck Blatt 12)

12.4.1 Definition

Härte = Widerstand den ein Körper dem Eindringen eines anderen Körpers entgegen setzt.

12.4.2 Härteprüfung nach Brinell (DIN EN 10003)

- Gehärtete Stahlkugel oder Hartmetallkugel mit Durchmesser D wird mit Prüfkraft F senkrecht in die ebene, blanke Probeoberfläche gedrückt.

- Nach dem Entlasten werden die Eindruckdurchmesser d1 und d2 in zwei, rechtwinklig zueinander liegenden Richtungen gemessen und der arithmetische Mittelwert ermittelt.
- Mit D und d (arithmetischer Mittelwert von d1 und d2) erhält man die Brinell - Härte wie folgt:

$$\text{Brinellhärte} = \frac{0,102 \cdot \text{PRÜFKRAFT}}{\text{EINDRUCKOBERFLÄCHE}} \quad \left| \text{ (siehe Norm) } \right.$$

Prüfkraft in N und D und d in mm

- Härtewert aus der Tabelle in Norm ablesen.
- Für den Eindruckdurchmesser d soll gelten: $0,24 \times D < d < 0,6 \times D$. Diese Bedingung wird im Regelfall eingehalten wenn der Beanspruchungsgrad (früher Belastungsgrad) $\frac{0,102 \cdot F}{D^2}$ nach Norm eingehalten wird.
- Um vergleichbare Härtewerte zu erhalten ist bei Benutzung von Eindringkörpern mit unterschiedlichem D der gleiche Beanspruchungsgrad zu verwenden da unter dieser Bedingung ähnliche Eindrücke entstehen. Der Beanspruchungsgrad $\frac{0,102 \cdot F}{D^2}$ ist dem Werkstoff und der Härte entsprechend zu wählen, wie in der Norm angegeben.

$$\text{z.B.: für Stahl: } 0,102 \cdot \frac{F}{D^2} = 30 \quad \left| \right.$$

- Nach Norm sind folgende Werte für D möglich: 1; 2; 2,5; 5; 10; mm
- Beanspruchungsgrade nach Norm: Je nach Werkstoff und Härte: 30; 15; 10; 5; 2,5; 1; mm
- D so groß wie möglich wählen (aber Mindestdicke usw. beachten)
- Mindestabstand zwischen Eindruck und Probenrand so wie zwischen 2 Eindrücken beachten und Mindestdicke der Probe beachten (siehe Norm)
- Einwirkdauer der Prüfkraft beachten (siehe Norm): 10 - 15 sec. Je nach Fließkraft der Probe kann auch eine längere Einwirkdauer erforderlich sein.
- Normgerechte Härteangaben:

HBS , wenn eine Stahlkugel verwendet wird

HBW , wenn eine Hartmetallkugel verwendet wird

z.B.	350 HBS 5/750	BRINELLHärte 350 gehärtete Stahlkugel mit D = 5 mm Prüfkraft 7,355kN Einwirkzeit 10-15 s (nicht angeben, jedoch andere Zeit schon) (siehe Norm)
	600 HBW 1/30/20	BRINELLHärte 600 Hartmetallkugel mit D = 1 mm Prüfkraft 294,2 N Einwirkzeit 20 s

- gehärtete Stahlkugel nur verwenden bis Brinellhärte 350
- Hartmetallkugel nur anwenden bis Brinellhärte 650
- weitere Einzelheiten siehe Norm

12.4.3 Härteprüfung nach VICKERS (DIN 50 133)

- Eindringkörper ist vierseitige regelmäßige Diamantpyramide mit 136° Spitzenwinkel zwischen den gegenüberliegenden Flächen
- Pyramide mit Prüfkraft F senkrecht in die ebene, blanke Oberfläche der Probe gedrückt
- nach Wegnahme der Prüfkraft werden die Diagonalen d_1 und d_2 des Eindrucks gemessen und der arithmetische Mittelwert gebildet:

$$VICKERS\textit{H}ä\textit{r}te = \frac{0,102 \cdot PRÜFKRAFT}{EINDRÜCKOBERFLÄCHE}$$

Prüfkraft in N und d in mm (siehe Norm)

- Härtewert aus Tabelle ablesen

12.4.4 Härteprüfung nach ROCKWELL

(DIN 50 103, Entwürfe für DIN EN 10 004 bzw. DIN EN 10 019)

- Es gibt zahlreiche Varianten des Verfahrens, wir behandeln hier nur HRC- und HRB – Verfahren.
- Härte direkt auf Anzeige ablesbar, ohne Nachschlagen in Tabelle

ROCKWELL - C - Verfahren HRC

- Eindringkörper ist ein Diamantkegel (C - cone = Kegel) mit Spitzenwinkel 120° und Spitzenradius 0,2 mm
- Zunächst wird Prüfvorkraft von 98,07 N aufgebracht und der Zeiger der Meßuhr auf 100 gestellt (Bedienungsanleitung des Gerätes beachten).
- Dann kommt zusätzlich Prüfzusatzkraft von 1373 N dazu. Dabei läßt sich das Eindringen des Diamanten an der Bewegung des Zeigers verfolgen.
- Einwirkzeit und Prüfkraft nach Norm beachten
- Wegnahme der Prüfzusatzkraft
- Als Maß für die Härte gibt die bleibende Eindringtiefe e (bezogen auf Bezugslinie nach Aufbringen der Prüfvorkraft).
- 0 HRC : Eindringtiefe $e = 0,2$ mm
100 HRC : Eindringtiefe $e = 0$ mm
 \Rightarrow 100 Skalenteile zu je 0,002 mm
- Meßuhr so beschriftet, daß HRC-Wert direkt ablesbar
- Mindestabstand zweier Prüfeindrücke sowie Abstand vom Probenrand \rightarrow siehe Norm
- Härteangabe: z.B. 55 HRC
 \uparrow Härtewert
- Prüfkraft siehe Norm

- Makrobereich HV5 bis HV100 ($F = 49,03$ N bis $980,7$ N)
Kleinlastbereich HV 0,2 bis $< HV5$
Mikrobereich $< HV0,2$
- Im Bereich von HV10 bis HV100 ist Einfluß der Prüfkraft auf Härtewert praktisch vernachlässigbar. Exakter Vergleich jedoch nur möglich, wenn gleiche Prüfbedingungen vorliegen
- Mindestabstand zwischen Eindruck und Probenrand sowie zwischen zwei Eindrücken beachten, siehe Norm.
- Mindestdicke der Proben beachten, siehe Norm
- Einwirkdauer der Prüfkraft beachten, (siehe Norm: 10 - 15 sec.). Je nach Fließverhalten der Probe kann auch längere Einwirkzeit erforderlich sein.
- Normgerechte Härteangabe
z.B. 640 HV 30 Vickershärtewert 640
Prüfkraft 294,2 N
Einwirkdauer 10 - 15 s
(nicht angeben; andere Zeit schon \rightarrow siehe Norm)

- 545 HV 1/20 Vickershärtewert 545
Prüfkraft 9,807 N
Einwirkdauer 20s
- Weitere Einzelheiten siehe Norm

ROCKWELL - B - Verfahren HRB

- Eindringkörper ist gehärtete Stahlkugel (B...ball = Kugel) mit $D = 1,5875 \text{ mm}$
- Prüfvorkraft 98,07 N
- Zeiger der Meßuhr auf 130 stellen (Bedienungsanleitung des Gerätes beachten)
- Prüfzusatzkraft 883 N
- Analog HRC, jedoch 0 HRB: Eindringtiefe $e = 0,26 \text{ mm}$
130 HRB: Eindringtiefe $e = 0 \text{ mm}$
→ 130 Skalenteile je 0,002 mm

12.4.5 Vergleich der Verfahren und Anwendung

- BRINELL - Verfahren HBS bzw. HBW nur bis zu jeweils bestimmter Härte anwendbar. Gut für heterogene Werkstoffe (z.B. Gußeisen), weil ggf. großer Kugeldurchmesser verwendbar.
- VICKERS - Verfahren universell einsetzbar. Meist kleiner Eindruck, d.h. ggf. nicht für heterogene Werkstoffe
- ROCKWELL - Verfahren: schnell durchführbar
HRC für gehärtete Stähle
HRB für Werkstoffe mit mittlerer Härte (außerdem s. Norm + Fachliteratur)

12.4.6 Umwertetabelle für Härte und Zugfestigkeit bei unlegierten und niedriglegierten Stählen und Stahlguß im warmumgeformten oder wärmebehandeltem Zustand (DIN 50 150)

- Umwertung ist mit Ungenauigkeiten behaftet, (→ siehe Norm)
- Wenn Zugfestigkeits- oder Härtewerte durch Umwertung nach DIN 50 150 ermittelt werden, dann angeben: << ermittelt aus Härte ... durch Umwerten nach DIN 50 150 >>.

12.5 Kerbschlagbiegeversuch nach CHARPY

(DIN EN 10 045 und DIN 50 115)

12.5.1 Einführung

- siehe 13 und 13a
- Kerbschlagbiegeprüfung liefert Aussage zur Neigung metallischer Werkstoffe zum Sprödverhalten
- ist sehr wichtige Ergänzung zum Zugversuch
- Manche Werkstoffe verhalten sich im Zugversuch duktil, jedoch im Kerbschlagbiegeversuch (Schlag, Kerbe, bestimmte Temperatur) spröde
- Brücke beim Kerbschlagversuch:
 - Trennbruch:
 - körniges glitzerndes Aussehen
 - verbrauchte Arbeit für Bruch ist gering
 - Verformungsbruch:
 - Bruch hat sehniges Aussehen
 - verbrauchte Arbeit für Bruch ist groß
 - Mischbruch: Beide Brucharten treten auf

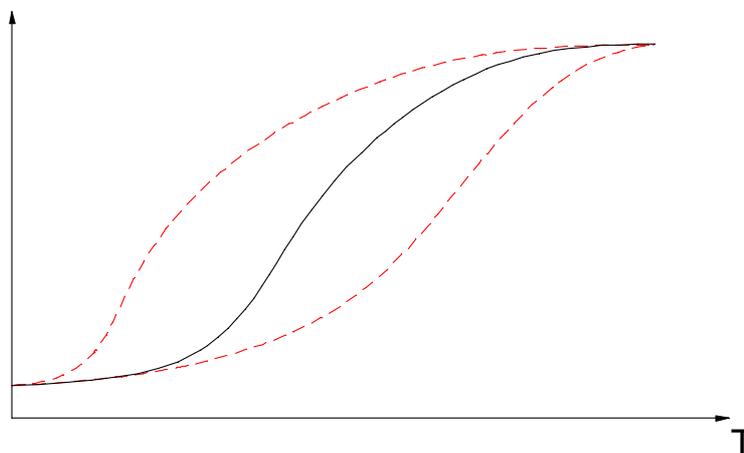
- Kerbschlagbiegeversuch mit folgenden Parametern:
 - schlagartige Verformung
 - gekerbte Probe
 - Prüfung in Abhängigkeit von der Temperatur
- Werkstoff, Werkstoffzustand und Temperatur haben großen Einfluß auf Art des Bruches und auf die Kerbschlagarbeit. (weitere Einflußgrößen s. Fachlit.)

12.5.2 Probenform

- Kerbschlagarbeit hängt stark von der Probenform ab
- Probeformen siehe Umdruck Blatt 13 + Norm

12.5.3 Versuchdurchführung

- Pendelschlagwerk siehe Umdruck Blatt 13
- Kerbschlagarbeit: $K = G(h_1 - h_2)$ [J]
- In der Regel an Maschine Skala → mit Hilfe eines Schleppzeigers → Schlagarbeit direkt ablesbar
- Angabe der Schlagarbeit mit Probenform und weiteren Daten (s. Norm), z.B.
 - KV = 121 J; b = 10 mm
 - Arbeitsvermögen des Pendelschlagwerks 300J
 - Normalprobe mit V - Kerbe
 - Beim Bruch verbrauchte Schlagarbeit: 121 J
- Kerbschlagarbeit - Temperaturkurve für krz – Stahl
(nicht-austenitischer Stahl) zeigt 3 kennzeichnende Bereiche:
 - Hochlage: hohe Kerbschlagarbeit, geringe Streuung, **Verformungsbrüche**
 - Steilabfall: starke Streuung der Kerbschlagarbeit (bei ein und derselben Temperatur), mehr oder weniger steiler Abfall zur Tieflage, **Mischbrüche**
 - Tieflage: niedrige Kerbschlagarbeitswerte, geringe Streuung, **Trennbrüche**



- Austenitischer Stahl (kfz) ist auch bei tiefen Temperaturen zäh, kein Steilabfall

- Übergangstemperatur $T_{\ddot{u}}$: ist diejenige Temperatur, bei der z.B.:
 - ein bestimmter Prozentanteil von K der Hochlage erreicht wird, z.B. 50%
 - weitere Möglichkeiten s. Norm

12.5.4 Anwendung

- Kerbschlagbiegeversuch dient zur Beurteilung der Sprödbruchneigung
- eignet sich besonders für die Überwachung der Wärmebehandlung (weitere Anwendungen s. Fachlit.)
- Der Versuch liefert keine Kennwerte für die Festigkeitsberechnung

12.6 bis 12.8.3 wurde im SS 1997 nicht behandelt

12.8.4 Schallverfahren, Ultraschallprüfung

- Als Ultraschall bezeichnet man Schallwellen mit einer Frequenz oberhalb der Hörgrenze von 20 000 Hz (20 kHz)
- Für Ultraschallprüfung von Metallen werden jedoch meist Prüffrequenzen zwischen 0,5 MHz und 10 MHz verwendet. Dafür gibt es zwei Gründe:
 - Je höher die Frequenz ist, desto besser läßt sich der Schallstrahl bündeln und richten
 - Je höher die Frequenz ist, um so kleinere Fehler können erkannt werden.
- Für die Erzeugung der hochfrequenten Schwingungen wird der piezoelektrische Effekt genutzt.
 - Piezoelektrischer Effekt (piezein: (griech.) drücken)
Quarz und einige andere Kristalle zeigen bei Verformung auf bestimmten Kristallflächen elektrische Ladungen.
Und umgekehrt:
Ein piezoelektrischer Kristall wird im elektrischen Feld deformiert. So kann im Hochfrequenzfeld eine Quarzscheibe zur Dickenänderungen und damit zum Aussenden von Longitudinalwellen gleicher Frequenz angeregt werden.
- An der Grenzfläche zweier Medien wird der Ultraschall um so stärker reflektiert, je größer der Unterschied zwischen den Schallwiderständen der beiden Medien ist. Der Schallwiderstand ist das Produkt aus Dichte und Schallgeschwindigkeit.
- An der Grenzfläche Metall-Luft tritt Totalreflexion ein, selbst wenn der Luftspalt nur 10^{-6} mm (\approx Gitterkonstante) beträgt.
- Daher muß die dünne Luftschicht zwischen Schallgeber und Werkstück durch Öl oder Wasser als Kopplungsflüssigkeit verdrängt werden.
- Durchschallungs-Verfahren: siehe Umdruck Blatt 16
- Impuls-Echo-Verfahren: siehe Umdruck Blatt 16
 - Normalprüfkopf \rightarrow Einschaltung senkrecht zur Prüffläche \rightarrow longitudinale Schallwellen. Der Prüfkopf arbeitet abwechselnd als Sender und Empfänger.
 - Winkelprüfkopf \rightarrow sendet im allg. nur transversale Schallwellen in das Prüfstück \rightarrow z.B. zur Prüfung von Schweißnähten.
- Ausführliche Erläuterungen zur Ultraschallprüfung siehe Diareihe bei der Einführung zum Werkstoff-Praktikum

12.8.5 Strahlenverfahren, Durchstrahlungsprüfung

wurde im SS 1997 nicht behandelt