

Legt man eine zweite Kugelschicht so dicht wie möglich auf die Schicht nach ► Bild 3 S. 21, liegen diese Kugeln in Mulden, die durch je drei Kugeln der ersten Schicht gebildet werden. Entsprechend sind alle weiteren Schichten aufgebaut (► Bild 1 a). Aus der zunächst dreieckigen Grundform kann, wie auf ► Bild 1 a und 1 b gezeigt, eine sechseckige Säule isoliert werden, die insgesamt 17 Kugeln enthält: 7 in der Basisschicht, 3 in der Zwischenlage, 7 in der oberen Schicht. Diese kleinste Einheit wird als **Elementarzelle** bezeichnet.

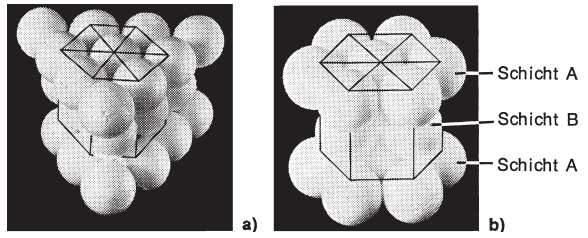


Bild 1 Hexagonal dichteste Kugelpackung.

1 a drei Schichten gemäß Bild 1 gestapelt
1 b sechseckige Säule aus Bild 2 a isoliert

Durch Veränderung des Betrachtungswinkels kann aus der gleichen dreieckigen Grundform auch eine Elementarzelle mit quadratischer Grundfläche herausgenommen werden (► Bild 2). Die Grundfläche wird von vier Kugeln auf den Ecken und einer Kugel im Schnittpunkt der Flächendiagonalen gebildet. Diese Elementarzelle enthält 14 Kugeln: 8 Eckatome und 6 Flächenatome.

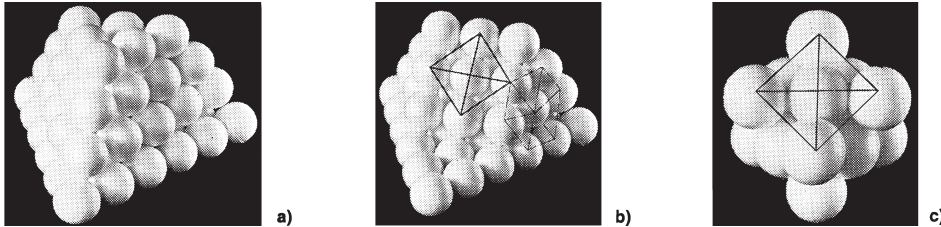


Bild 2 Kubisch dichteste Kugelpackung.

2 a Dichteste Kugelpackung im Raum
2 b quadratische Grundfläche durch Wegnahme einiger Kugeln aus Bild 2 a
2 c kubische Elementarzelle aus Bild 2 a isoliert

Die Sechsecksäule (= hexagonales System) und der Würfel (= kubisches System) sind die Grundformen der Elementarzellen der technisch wichtigen Werkstoffe.

Die folgenden Darstellungen zeigen die wichtigsten Elementarzellen als Kugelpackungen analog ► Bild 3 S. 21 und den Bildern 1 und 2 sowie als Prinzipskizzen beschränkt auf die Atomkerne. Die Verbindungslinien sollen nur die geometrische Gestalt der Elementarzellen verdeutlichen.

Hexagonale Elementarzelle: Gezeigt ist die hexagonale Elementarzelle mit dichtester Kugelpackung (**hdp**). Fehlt die zwischengeschobene Atomlage mit den drei Atomen, liegt eine einfache hexagonale Elementarzelle vor (**hex**). Hexagonal kristallisieren Beryllium, Magnesium, Zink, Cadmium, Cobalt und Titan. Diese Werkstoffe sind parallel zu den sechseckigen Grundflächen gut plastisch verformbar, senkrecht dagegen nur schlecht. Kohlenstoff als Graphit hat eine einfache hexagonale Gitterzelle, jedoch fehlt auch das Zentrumsatom in den Sechseckflächen. Die Bindungskräfte in der Senkrechten sind nur gering, sodass die Sechseckflächen leicht abgesichert werden können. Dadurch ist Graphit ein sehr gutes Schmiermittel.

Einfaches kubisches Gitter: Die Elementarzelle ist ein gleichseitiger, rechtwinkliger Würfel. Diese Elementarzelle ist die Grundform aller kubischen Systeme. Allerdings kristallisiert kein Metall in dieser Form.

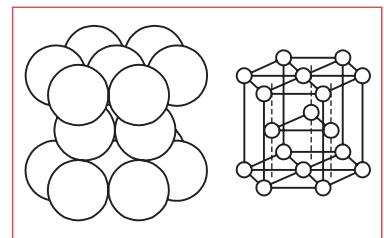


Bild 3 Hexagonale Elementarzelle mit dichtester Kugelpackung (hdp)

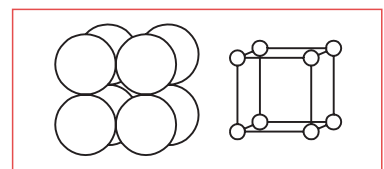


Bild 4 Einfache kubische Elementarzelle

4 Eisenbasismetalle

4.1 Roheisengewinnung

4.1.1 Eisenerze

Eisenerze sind eisenhaltige Gesteine, die als Rohstoffe für die Roheisenerzeugung dienen. Sie sind meist Oxide des Eisens mit Beimengungen, z. B. Mangan, Silicium, Phosphor, Schwefel, Kieselsäure, Tonerde, Kalk und Magnesium. Inlanderze sind nicht mehr wettbewerbsfähig. Heute sind nur noch die sog. **Reicherze** mit mehr als 55 % Fe abbauwürdig, die aus einer mittleren Entfernung von 3 500 Seemeilen (aus Venezuela, Brasilien, Liberia, Südafrika und Australien) nach Deutschland transportiert werden und z. T. 60 bis 70 % Fe enthalten. Die bisher bekannten Reicherzlagerrstätten sind in etwa 50 Jahren erschöpft. Eisen hat jedoch einen Anteil von 4,7 % an der Erdkruste, allerdings gebunden in verschiedenen Eisenoxiden, sodass die gesamten Eisenerzvorräte in absehbarer Zeit als unerschöpflich gelten können.

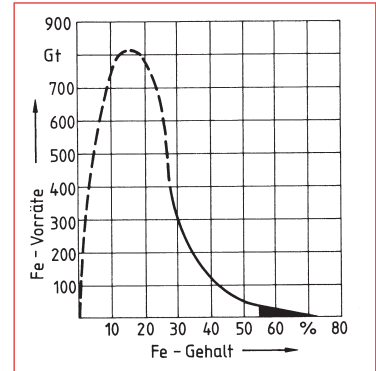


Bild 1 Gesamt-Weltvorräte an Eisenerz
(1 Gt = 10⁹ t)

Die *Aufbereitung* der Reicherze erfolgt an ihren Lagerstätten. Dabei werden grobe Stücke gebrochen und Feinerze durch Sintern oder Pelletisieren stückig gemacht. In Pelletieranlagen entstehen durch Mahlen, Mischen mit Bindemitteln und Brennen kugelförmige feste Stücke von etwa 1 cm Durchmesser, sog. **Pellets**¹, die eine geringe Behinderung der Gasströme im Hoch-/Schachtofen gewährleisten.

4.1.2 Hochofen

4.1.2.1 Aufgaben und Beschickung des Hochofens

Aufgabe des Hochofens ist die *Roheisen-Gewinnung*, dabei verlaufen folgende Prozesse:

1. Reduktion des Eisens aus den Oxiden der Erze;
2. Aufschmelzung und Aufkohlung des reduzierten Eisens;
3. Aufschmelzung der erdigen Bestandteile der Erze, der sog. Gangart², der Zuschläge und der Koksasche zu einer gut fließenden Schlacke.

Beschickung: *Einsatzstoffe* sind der sog. *Möller* und *Koks* als Reduktionsmittel. Möller nennt man die Mischung aus Erzen und Zuschlägen, die den Ablauf des Schmelzprozesses ermöglichen (s. Schlacke). Erzmischungen ohne Zuschläge werden *Gattierung* genannt.

4.1.2.2 Vorgänge im Hochofen

Die Einsatzstoffe wandern im Hochofenschacht unter dem Einfluss der Schwerkraft allmählich nach unten. Die eingeblasene Heißluft steigt gegen den Strom der Feststoffe nach oben.

Die Reduktion der Eisenoxide, s. Sauerstoffabbau, ► Bild 2 S. 59, erfolgt durch die aufsteigenden Gase und durch den Koks-kohlenstoff. In der Verbrennungszone, etwa in Höhe der Heißluftzufuhr, erfolgen CO₂-Bildung und Umsetzung des CO₂ mit Koks-kohlenstoff nach:



¹ Pellets = Tabletten

² Gang = mit Erz gefüllte Spalten im Gestein. Die nichtmetallischen Mineralien der Erzgänge kennzeichnen die Gangart.

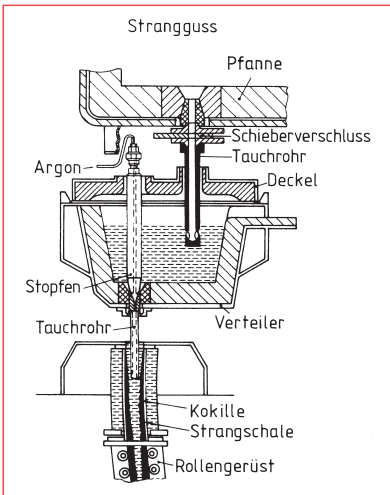


Bild 1 Schematische Darstellung des Stranggießens.

Seit einigen Jahren findet das **endformnahe Gießen** Verwendung, bei dem Dünnbrammen von 40 bis 50 mm Dicke erzeugt werden, die das direkte Auswalzen in einer Kompaktwalzstraße ermöglichen. Diese Technologie spart gegenüber Standardstrangguss- und -walzanlagen etwa 20 bis 30 % Investitionskosten und bis zu 50 % Energiekosten je Tonne erzeugten Warmbandes.

Vorteile des Stranggießens: Durch die hohe Erstarrungsgeschwindigkeit werden Seigerungen weitgehend vermeiden. Die globulare Zone (► S. 37) ist klein. Die Strangquerschnitte können dem Walzfertigerzeugnis angepasst werden. Dadurch wird die Verformungsarbeit beim Walzen deutlich verringert.

Schmieden und Walzen sind Druck- bzw. Druck-Zug-Umformungsprozesse (► Bild 2). Man unterscheidet zwischen Warmwalzen, d.h. die Werkstücktemperatur liegt über der Rekristallisationstemperatur, und Kaltwalzen, d.h. die Werkstücktemperatur liegt unterhalb der Rekristallisationstemperatur.

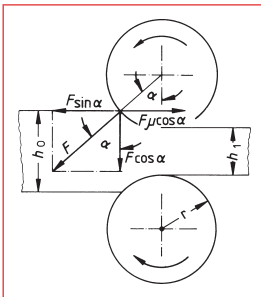


Bild 2 Walztheorie.

α = Walzwinkel; $\cos \alpha = 1 - \frac{h_0 - h_1}{2r}$; F = Druckkraft der Walzen;

$\mu \cdot F \cdot \cos \alpha$ = Reibkraft, die den Werkstoff zwischen die Walzen zieht. Für das Durchziehen des Werkstoffes muss $F \sin \alpha < \mu F \cos \alpha$ oder $\tan \alpha < \mu$, der Walzwinkel kleiner als der Reibwinkel sein. Bei gleichbleibendem Walzwinkel α und gleicher Dickenabnahme $h_0 - h_1$ ist für abnehmende Dicke h_0 ein abnehmender Walzendurchmesser erforderlich.

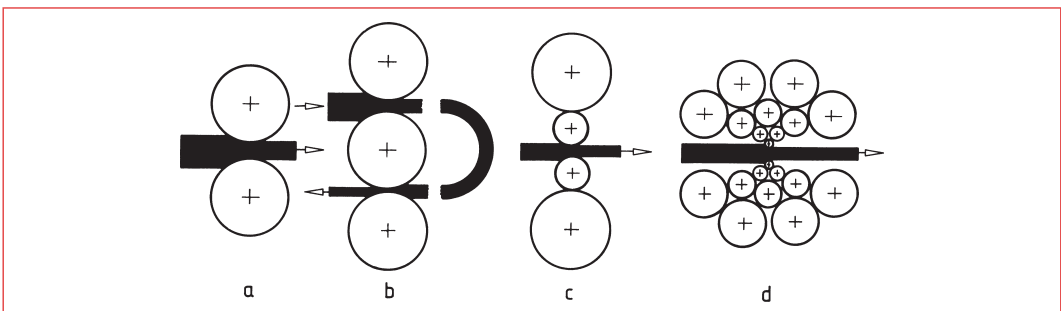


Bild 3 Walzgerüste.

- a) *Duo-Umkehr-Gerüst*. Vor dem Rücklauf des Walzgutes (z. B. in eine andere Rille), nach jedem sog. Stich, wird die Drehrichtung der Walzen geändert.
- b) *Trio-Gerüst* mit gleich bleibender Drehrichtung der Walzen. Anwendung a) und b): zum Warmwalzen von Blöcken, Stab- und Formstählen.
- c) *Quarto-Gerüst* zum Warmwalzen von Flachzeug.
- d) *Sendzimirwalzwerk* zum Walzen von dünnen Breitbänden (Blechen). Um eine Durchbiegung der dünnen Arbeitswalzen zu verhindern, werden diese von einem System von Rollen und Walzen gestützt.

Warmgewalzte Fertigerzeugnisse

In modernen Anlagen werden das endabmessungnahe Stranggießen und der Warmwalzprozess miteinander gekoppelt.

Nichtrostende Stähle

- Nichtrostende Stähle enthalten höchstens 1,2 % Kohlenstoff und mindestens 10,5 % Chrom. Sie werden weiter unterteilt nach dem Nickelgehalt (weniger als 2,5 % oder mehr als 2,5 %) bzw. nach ihren Haupteigenschaften in korrosionsbeständig, hitzebeständig oder warmfest.

Andere legierte Stähle

- **Legierte Qualitätsstähle** sind Stähle, für die Anforderungen bestehen hinsichtlich Zähigkeit, Korngröße, Umformbarkeit und/oder weitere Eigenschaften. Sie sind im Allgemeinen nicht zum Vergüten oder Oberflächenhärten vorgesehen.
- **Legierte Edelmetalle** Stähle, denen durch eine genaue Einstellung der chemischen Zusammensetzung sowie der Herstellungs- und Prüfbedingungen die unterschiedlichsten Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften – häufig in Kombination miteinander und in eingegrenzten Grenzen – verliehen werden. Hierzu zählen nicht die nichtrostenden Stähle, die hitzebeständigen Stähle, die warmfesten Stähle, Wälzlagerstähle, Werkzeugstähle sowie Stähle für den Stahl- und Maschinenbau.

4.7.2 Bezeichnungssysteme für Stähle nach DIN EN 10027-1: 2017

Nach den Regeln der europäischen Normungsgremien (CEN/CENELEC Internal Regulations – Part 3, 2003-10) werden Bezeichnungssysteme grundsätzlich nach dem in Bild 1 gezeigten Schema gebildet.

Benennungsblock		Identifizierungsblock	
EN-Nummernblock		– Merkmaleblock	
		– Hauptsymbol	Zusatzsymbol + Zusatzsymbol
Stahl	EN 10025	– S235	JR + C

Bild 1 Schema der Bezeichnungssysteme nach CEN/CENELEC¹ Internal Regulations – Part 3, 2003-10; Annex E, Kap. F.3 Designation Systems

Der Benennungsblock wird aus einem kurzen Begriff gebildet, der den genormten Gegenstand im Klartext bezeichnet. Der Identifizierungsblock besteht aus der Nummer der Erzeugnisnorm und dem Merkmaleblock, der eine nach bestimmten Regeln verschlüsselte Bezeichnung enthält.

Bei Stählen wird der Merkmaleblock aus einem Hauptsymbol nach DIN EN 10027-1: 2017 Tabellen 1 bis 15 gebildet. An das Hauptsymbol können Zusatzsymbole nach DIN EN 10027-1: 2017 Tabellen 16 bis 18 angefügt werden. Die Zusatzsymbole werden unterschieden in „Zusatzsymbole für Stahl“ und „Zusatzsymbole für Stahlerzeugnisse“. Die letztgenannten sind durch ein Pluszeichen (+) von den vorhergehenden Symbolen zu trennen.

Die Kurznamen werden in zwei Hauptgruppen eingeteilt (► Bild 2):

Gruppe 1: Kurznamen, die Hinweise auf die Verwendung und die mechanischen oder physikalischen Eigenschaften der Stähle enthalten (Tabellen 1 bis 11 in DIN EN 10027-1: 2017).

Gruppe 2: Kurznamen, die Hinweise auf die chemische Zusammensetzung der Stähle enthalten (Tabellen 12 bis 15 in DIN EN 10027-1: 2017).

Hauptsymbol nach DIN EN 10027-1:2017			Zusatzsymbole nach DIN EN 10027-1: 2017	
G oder PM (s. 4.7.2.1)	Kennbuchstabe für den Verwendungszweck (s. 4.7.2.2)	Kennzahl für eine mechanische Eigenschaft	Zusatzsymbole für Stahl Gruppe 1 und Gruppe 2 (Tabellen 1 bis 15 in DIN EN 10027-1: 2017)	+ Zusatzsymbole für Stahlerzeugnisse (Tabellen 16 bis 18 in DIN EN 10027-1: 2017)
		Kennzahl für eine physikalische Eigenschaft		
Zeichenfolge zur Kennzeichnung der Legierungszusammensetzung (► Kap. 4.7.2.3)				

Bild 2 Stahlbezeichnungen mit Hauptsymbol und Zusatzsymbolen nach DIN EN 10027-1: 2017

¹ CEN (franz.: *Comité Européen de Normalisation*) Europäisches Komitee für Normung
CENELEC (franz.: *Comité Européen de Normalisation Électrotechnique*) Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung

Hochlegiertes austenitisches Gusseisen mit Kugelgraphit. Durch Zulegieren von bis zu 36 % Nickel und jeweils maximal 7,5 % Silizium, Mangan, Chrom und Kupfer wird Gusseisen vollaustenitisch. Der Kohlenstoffgehalt muss allerdings auf 2,2 % bis maximal 3 % beschränkt werden. Diese Gusseisensorten sind unmagnetisch, korrosionsbeständig, warmfest und hitzebeständig. Sie werden durch den Buchstaben „A“ in der Werkstoffbezeichnung gekennzeichnet: EN-GJSA. Sie sind genormt in der DIN EN 13835: 2012.

Gusseisen mit Kugelgraphit und ferritischer bis perlitischer Matrix sind genormt in der DIN EN 1563: 2012. Diese Sorten sind auch für Innendruck führende Geräte einsetzbar. Die Zugfestigkeiten liegen zwischen 350 MPa und 900 MPa bei Bruchdehnungen zwischen 10 % und 22 % für die niedrigsten Sorten und größer 2 % bei den hochfesten Sorten ($R_m = 700$ bis 900 MPa). Diese Angaben gelten für getrennt gegossene Probestäbe (► Tab. 1 S. 143). Die Werte für angegossene Probestäbe liegen bei größeren Wandstärken etwas niedriger. Die höchstfesten bainitischen Gusseisen mit Kugelgraphit sind in der DIN EN 1564: 2012 zusammengefasst.

Wegen der Vielzahl sind in der ► Tab. 1 S. 143 nur einige ausgewählte Kugelgraphitgusswerkstoffe aufgelistet.

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen, kurz: REM-Aufnahmen, von Gusseisen. Kugel- und Vermiculargraphit von GJS und GGV liegen nicht in Hohlräumen; die dunklen Ränder sind durch Kapillareffekt der Ätzmittel entstanden.

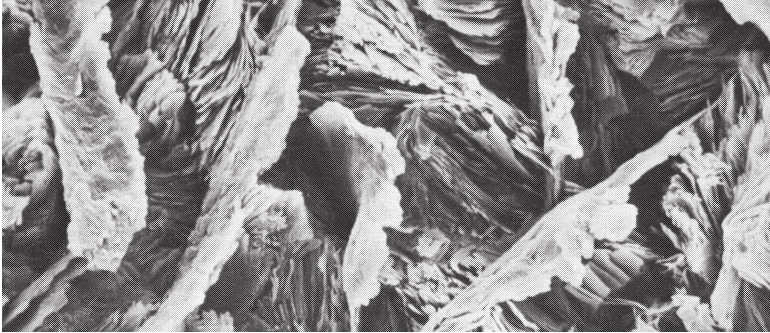


Bild 1 Tiefätzung Gusseisen mit Lamellengraphit. Große Lamellen = Graphit; feine, gebündelte Lamellen = Zementit des Perlit. Der Ferrit ist durch die Tiefätzung herausgelöst.

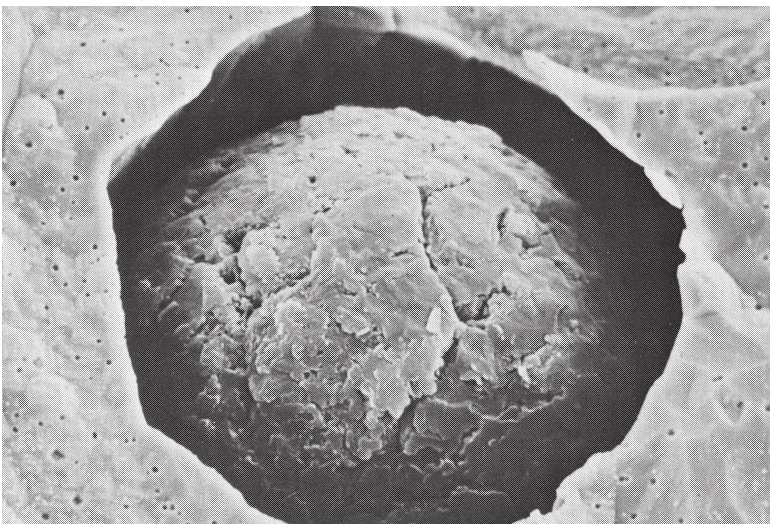


Bild 2 Tiefätzung einer Probe aus Gusseisen mit Kugelgraphit (Gusszustand). Deutlich zu erkennen ist der schichtige Aufbau der Graphitkugel.

Die Leistung eines Werkzeuges aus Schnellarbeitsstahl wird durch die beim Halten auf Härtetemperatur erfolgende Auflösung der Sekundärcarbide entscheidend beeinflusst.

Steigende Carbidauflösung hat erhöhte Anlassbeständigkeit und Warmhärte und verringerte Zähigkeit zur Folge.

Durch eine Haltezeit auf Härtetemperatur von etwa 150 s wird das Lösungsvermögen der Stähle für die Sekundärcarbide nahezu vollkommen erreicht. Erhöhung (Erniedrigung) der Härtetemperatur um etwa 12 °C bewirkt die gleiche Carbidauflösung mit der halben (doppelten) Haltezeit.

Die ausgezogene Linie in ► Bild 1 gibt die Tauchzeiten für einfache, quadratische/angenähert quadratische oder auch runde Querschnitte bei ein- und zweistufiger Vorwärmung wieder. Diese Tauchzeiten setzen sich aus der Vorwärmzeit und einer Haltezeit auf Härtetemperatur von etwa 80 s zusammen.

Die gestrichelte Linie entspricht der vorher erläuterten Haltezeit von rd. 150 s. Ihre Anwendung soll auf Sonderfälle beschränkt bleiben.

Zu lange Haltezeiten auf Härtetemperatur sind hinsichtlich der Carbidauflösung ohne Einfluss. Sie führen aber, ebenso wie falsche Härtetemperaturen, zu den in ► Bild 2 dargestellten Nachteilen.

Das erste Gefügebild zeigt vielfältig verzahnte kleine Körner als Zeichen der richtig gewählten Härtetemperatur. In die aus Grundmasse bestehenden Körner sind die Doppelcarbide eingebettet (dunkle Flecke).

Bei zu langer Erwärmung entsteht ein Gefüge nach dem mittleren Gefügebild. Die Grundmasse besteht aus groben Körnern, die den Stahl spröde machen. An den Korngrenzen hat sich aus den Doppelcarbiden Ledeburit gebildet, ein Zustand, der nur durch Einschmelzen rückgängig gemacht werden kann. Der Gehalt der Grundmasse an schneidfähigen Doppelcarbiden hat sich verringert, der Stahl an Schneidfähigkeit verloren.

Das dritte Gefügebild zeigt das Gefüge eines zu hoch erhitzten, verbrannten Schnellarbeitsstahls.

Er besteht nur noch aus grobkörniger Grundmasse ohne Doppelcarbide mit Ledeburit in den Korngrenzen. Verbrannter Stahl hat nur Schrottwert.

Bei verbrannten Kohlenstoffstählen bilden sich in den Korngrenzen Oxide; die Körner werden kohlenstoffärmer, ihr Zusammenhalt geht verloren.

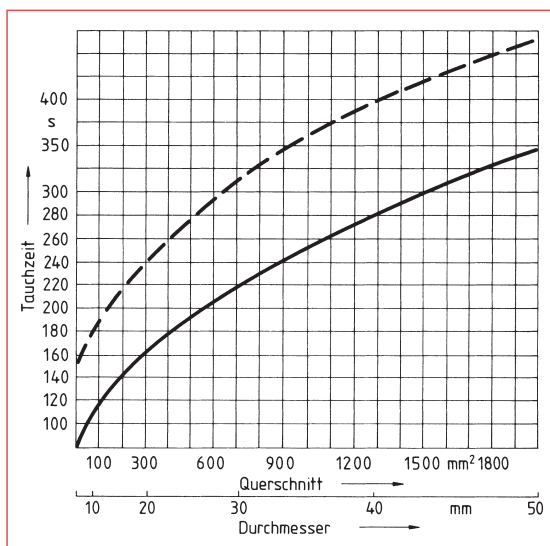


Bild 1 Tauchzellen für die Härtung von Werkzeugen aus Schnellarbeitsstählen mit rundem oder nahezu rundem Querschnitt bei zweistufiger Vorwärmung auf 850 °C und 1050 °C.

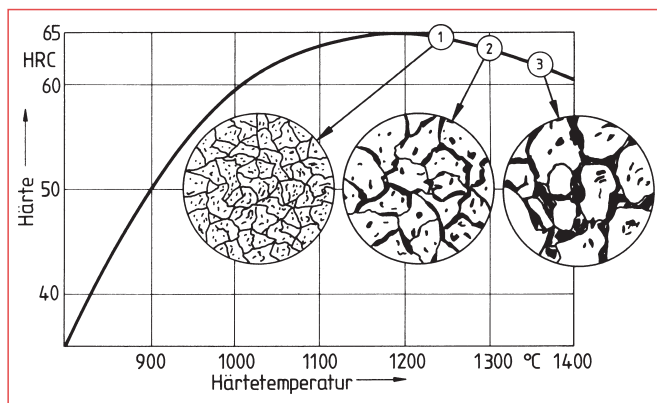


Bild 2 Gefüge und Härte des Schnellarbeitsstahls in Abhängigkeit von der Härtetemperatur

8.1.2 Herstellung von Polymerwerkstoffen

Die Herstellung der Kunststoffe erfolgt:

1. **durch Umwandlung** von makromolekularen Naturstoffen,
2. **vollsynthetisch** aus Monomeren, die unter dem Einfluss von Katalysatoren in Makromoleküle = Polymere übergehen.

Rohstoffe für die umgewandelten Naturstoffe sind Cellulose, Eiweiß, Naturkautschuk und Naturharze, für die vollsynthetischen Polymerwerkstoffe Erdölprodukte (Petrochemie).

Umwandlung von makromolekularen Naturstoffen

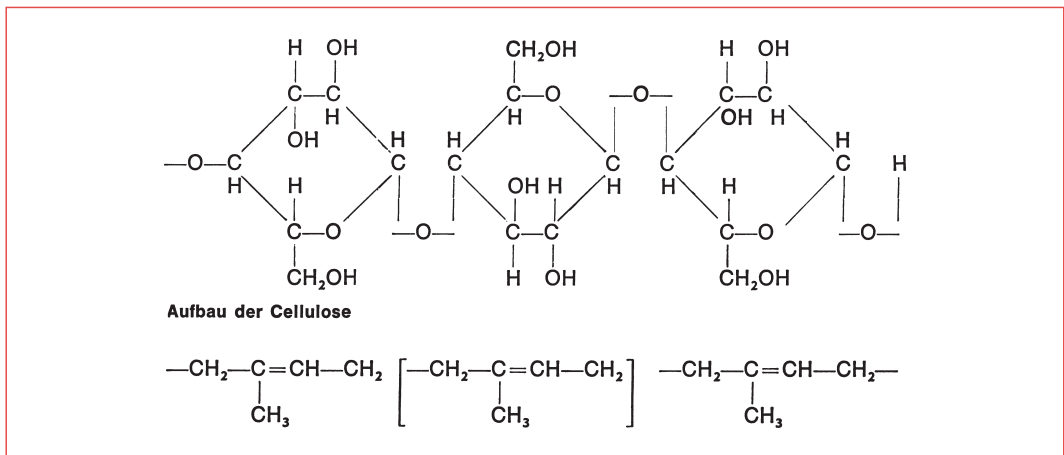


Bild 1 Aufbau des Naturkautschuks

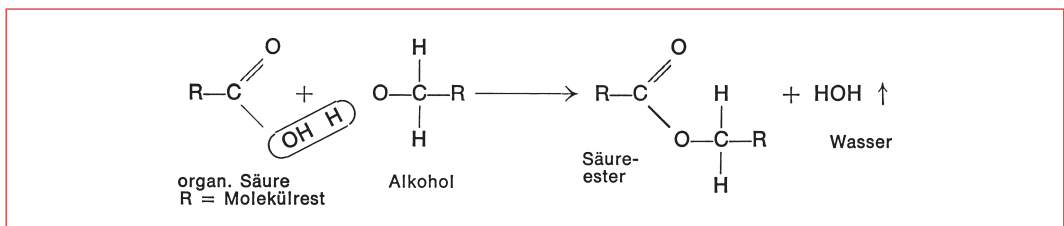
Reaktionsfähige Gruppen in den Makromolekülen der Naturstoffe, z. B. die Hydroxylgruppen = (OH)-Gruppen in der Cellulose und die Doppelbindungen im Naturkautschuk ermöglichen die chemische Umwandlung dieser Stoffe.

Chemische Reaktionen für die vollsynthetische Herstellung von Polymerwerkstoffen

1. **Polykondensation:** mehrfach auftretende Kondensation

Polykondensation ist die Verknüpfung gleicher oder verschiedenartiger Moleküle unter Abspaltung eines niedermolekularen Stoffes.

Einfaches chemisches Beispiel:



Beispiele: Harnstoff-, Melamin- und Phenolharze

11.2 Werkstoffe der additiven Fertigungsverfahren

Der Erfolg der Additiven Fertigungsverfahren basiert auch auf ihrer Fähigkeit, unter Einsatz unterschiedlichster Prozessmodifikationen und Wirkprinzipien aus in fester, flüssiger oder gasförmiger Form vorliegenden Materialien Werkstücke schichtweise aufzubauen. Die Wirkprinzipien beruhen dabei überwiegend auf Verkleben, Verbacken oder Verschmelzen (► Bild 1). Als Materialien können unter anderem Kunststoffe, Metalle und Mineralien eingesetzt werden.

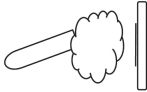
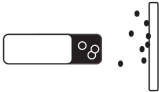

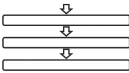
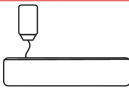

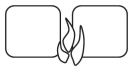
Ausgangszustand des Materials		
gasförmig	Chemisch abscheiden	
	Physikalisch abscheiden	
flüssig	Aushärten	
fest	Aufkleben	
	Auftragen	
	Verbinden	
	Verschweißen	

Bild 1 Wirkprinzipien der additiven Fertigungsverfahren

Da die Parameter der AM-Verfahren nur innerhalb eines vergleichsweise engen Prozessfensters verändert werden können, ist die Entwicklung neuer Materialien langwierig und entsprechend teuer. Deshalb ist die Anzahl der auf dem Markt angebotenen Grundwerkstoffe relativ begrenzt. Da jedoch aufgrund des engen Prozessfensters für die unterschiedlichen Verfahren, Anlagen und Anwendungen individuelle Modifikationen des Grundwerkstoffs mit unterschiedlichen Zuschlagstoffen benötigt werden, ergibt sich auch durch die dann herstellereinspezifischen Produktnamen ein für den Anlagenbetreiber facettenreiches Bild. Daher kann nachfolgend nur ein grober Überblick über die eingesetzten Werkstoffmodifikationen gegeben werden.

Auch aufgrund der strukturellen und geometrischen Vielfalt der auf dem Markt bedienten Anwendungen müssen Baumaterialien in den unterschiedlichen Aggregatzuständen „gasförmig“, „flüssig“ und „fest“ angeboten werden.

Der gasförmige Aggregatzustand ermöglicht das Aufbringen dünnster Schichten vor allem in der Halbleiter- und Elektronikindustrie. Der flüssige Aggregatzustand wird gewählt, wenn feinere Oberflächen erzeugt werden sollen. Beispielsweise wird der schichtweise Aufbau aus dem flüssigen Zustand mittels Stereolithographieverfahren zur Herstellung feinsten Strukturen medizintechnischer Produkte eingesetzt. Der feste Aggregatzustand dient als Grundlage zur Herstellung größerer Werkstücke. Im Bereich der metallischen Werkstoffe sind das draht- oder pulverbasierte Auftragsschweißen oder das pulverbettbasierte Laserschmelzen beispielsweise im Maschinenbau oder in der Luft- und Raumfahrttechnik zu nennen. Im Bereich der Kunststoffe sind das Lasersintern und das Fused-Layer-Modeling-Verfahren von großer Bedeutung.

14.2 Chemische Korrosion

Chemische Korrosion wird durch trockene Gase, Salz- oder Metallschmelzen oder organische Substanzen hervorgerufen. Das Korrosionsmedium enthält keine Ionen, ist also elektrisch schlecht oder nicht leitend.

Typisches Beispiel ist die Oxidation von Stahl bei höheren Temperaturen („Verzundern“): In Abhängigkeit von der Temperatur bilden sich die Oxide FeO , Fe_3O_4 und Fe_2O_3 . Diese Schichten sind insbesondere durch die Volumenvergrößerung des Fe_2O_3 locker und platzen leicht ab. Sie führen dadurch zu einem Materialverlust und zu einer Aufrauung der Oberfläche.

Bei Eisen-Chrom-Legierungen reagieren die Chromatome noch vor den Eisenatomen mit dem Sauerstoff und bilden eine sehr dichte, festhaftende Chromoxidschicht auf der Werkstoffoberfläche. Diese ist für die Reaktionspartner undurchlässig und schützt so die Werkstoffoberfläche vor einem weiteren Angriff.

Die chemische Korrosion tritt wesentlich seltener auf als die elektrochemische Korrosion.

14.3 Elektrochemische Korrosion

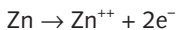
Die elektrochemische Korrosion ist die weitaus häufigste Korrosionsart, der nahezu alle metallischen Werkstoffe in wässrigen Medien ausgesetzt sind.

Die Bedingungen für die elektrochemische Korrosion sind:

- zwei Metalle mit unterschiedlichen elektrochemischen Potentialen (unterschiedliche Stellung in der elektrochemischen Spannungsreihe),
- eine elektronenleitende (elektrisch leitende) Verbindung zwischen den beiden Metallen,
- eine ionenleitende Verbindung zwischen den beiden Metallen (Elektrolyt, der mit beiden Metallen Kontakt hat).

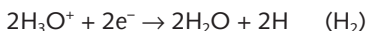
► Bild 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Korrosionselementes am Beispiel des Systems Eisen-Zink. Zu unterscheiden sind die kathodische und die anodische Teilreaktion:

- Anodische Teilreaktion: Oberfläche des elektrochemisch unedleren Metalls Zink. Die Zinkatome geben die Elektronen der äußeren Elektronenschale ab. Sie werden dadurch zu elektrisch positiv geladenen Ionen und gehen in den Elektrolyten über (anodische Metallauflösung):

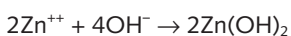
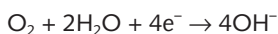


Die freigesetzten Elektronen wandern über die elektronenleitende Verbindung zum elektrochemisch edleren Metall.

- Kathodische Teilreaktion in sauren, sauerstofffreien Elektrolyten: Oberfläche des elektrochemisch edleren Metalls Eisen: Reduktion von Hydronium-Ionen (H_3O^+) durch die freigesetzten Elektronen zu Wasser und atomarem Wasserstoff, der zu H_2 rekombiniert (**Wasserstoffkorrosion**):



- Kathodische Teilreaktion in neutralen oder alkalischen, sauerstoffhaltigen Elektrolyten: Zunächst werden Sauerstoff- und Wassermoleküle durch Elektronenaufnahme zu Hydroxidionen oxidiert. Diese reagieren dann mit den an der Kathode aufgelösten Zinkionen zu wasserunlöslichem Zinkhydroxid (**Sauerstoffkorrosion**):



Die Sauerstoffkorrosion tritt wesentlich häufiger auf, da die meisten Elektrolyte Sauerstoff enthalten.

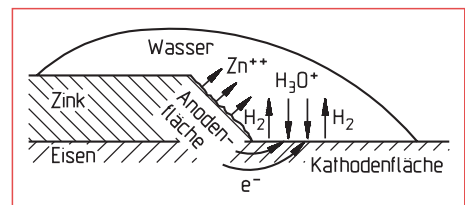


Bild 1 Korrosionselement Eisen-Zink in einem sauren, sauerstoffreichen Elektrolyten (Wasserstoffkorrosion)

realisieren. Daher wurden in Anlehnung an die klassischen Verfahren tragbare Härteprüfgeräte entwickelt.

Die Entwicklung eines tragbaren Härteprüfgerätes bedeutet aber immer auch die Einführung einer neuen Härteskala, da mindestens ein Parameter, meist die Prüfkraft, geändert werden muss.

Mit diesen Geräten können also keine Brinell-, Vickers- oder Rockwellhärtewerte ermittelt werden, weil sie nicht nach den genormten Prüfverfahren arbeiten. Wenn also ein Vergleich erforderlich ist, müssen die Härtewerte dieser Prüfgeräte umgewertet werden mit allen sich daraus ergebenden Einschränkungen. Die heute handelsüblichen tragbaren Härteprüfgeräte haben in der Regel interne Umwertungsformeln gespeichert, die auf umfangreichen Messungen der jeweiligen Hersteller beruhen. Die DIN EN ISO 18265: 2014 kann für diese Verfahren nicht angewendet werden.

15.7.1 Härteprüfung nach Leeb (DIN EN ISO 16859: 2016)

Verfahrensbeschreibung

Bei diesem Verfahren trifft ein Schlagkörper mit einer definierten Geschwindigkeit, d.h. mit einer bestimmten kinetischen Energie, auf die zu prüfende Werkstoffoberfläche. Beim Aufprall wird die kinetische Energie des Schlagkörpers in elastische und in plastische Verformungsarbeit umgewandelt. Da der Schlagkörper nur ein geringes Eigengewicht hat, wird er durch die elastische Rückverformung der Werkstoffoberfläche zurückgeworfen. Die Rückprallgeschwindigkeit ist geringer, da die plastische Verformungsarbeit „verloren“ ist und dementsprechend nichts zum Rückprall beiträgt. Gemessen werden die Geschwindigkeiten des Schlagkörpers vor und nach dem Aufprall. Das Verhältnis der beiden Geschwindigkeiten zueinander ist proportional zur Höhe der plastischen Verformungsarbeit und kann daher als Messgröße für die Härte des Werkstoffs herangezogen werden.

Das **Schlaggerät** (► Bild 1) besteht aus einem Rohr, in dem der Schlagkörper nahezu reibungsfrei gleitet. Zunächst wird die Schlagfeder durch Herunterschieben des Griffstücks vorgespannt. Der Schlagkörper wird dabei durch eine Klemme gefasst und festgehalten. Durch Drücken des Auslöseknopfes wird der Schlagkörper frei gegeben und von der vorgespannten Feder in Richtung der Werkstoffoberfläche beschleunigt.

Schlagkörper

Der **Schlagkörper** besteht aus einem Führungsstück, in das ein Permanentmagnet eingebaut ist, und trägt an der unteren Fläche den eigentlichen Eindringkörper. Je nach Schlaggerät haben die Schlagkörper unterschiedliche Abmessungen und Massen.

Eindringkörper

- Kugel aus Hartmetall mit einem Durchmesser 3 mm (Schlaggeräte D, DC, D+15, DL, C)
- Kugel aus Hartmetall mit einem Durchmesser 5 mm (Schlaggerät G)
- Kugel aus Keramik mit einem Durchmesser 3 mm (Schlaggerät S)
- Kugel aus polykristallinem Diamant (PKD) mit einem Durchmesser 3 mm (Schlaggerät E)

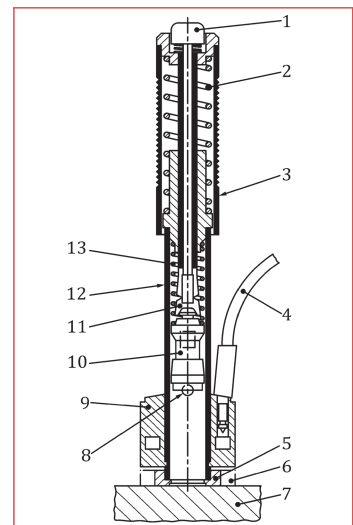


Bild 1 Schlaggerät für die Härteprüfung nach Leeb nach DIN EN ISO 16859: 2016

1. Auslöseknopf, 2. Ladefeder,
3. Laderohr, 4. Kabel zum Anzeigergerät, 5. kleine Anschlagkappe,
6. große Anschlagkappe, 7. Probe,
8. Eindringkörper Kugel, 9. Spule mit Halterung, 10. Schlagkörper,
11. Fangzange, 12. Führungsrohr,
13. Schlagfeder