

Inhalt

1	Einführung in die Welt der Werkstoffe	9
1.1	Überblick über die Welt der Werkstoffe	9
1.2	Aufbau des Atoms & Periodensystem der Elemente	10
1.3	Bindungsarten	12
1.3.1	Die Elektronenpaarbindung	12
1.3.2	Ionenbindungen	13
1.3.3	Metallbindungen	13
1.4	Gittertypen und -fehler von Kristallstrukturen	14
1.4.1	Elementarzelle	15
1.4.2	Idealkristall und Realkristall	16
1.4.3	Gitterfehler	17
1.4.4	Gleitebenen / Gleitsysteme	19
1.5	Zerstörende Werkstoffprüfung	20
1.5.1	Zugversuch	21
1.5.2	Kerbschlagbiegeversuch	23
1.6	Lernkontrollfragen	24
2	Nomenklatur von Stählen	25
2.1	Einführung in die Nomenklatur	25
2.2	Was ist Stahl?	26
2.3	Nomenklatur nach Kurznamen	27
2.3.1	Gruppe 1	27
2.3.2	Gruppe 2	29
2.4	Nomenklatur nach Werkstoffnummern	32
2.5	Lernkontrollfragen	33
3	Zweistoffsysteme	35
3.1	Metallgefüge	35
3.2	Zustandsschaubilder	37
3.2.1	Einführung in die Zustandsschaubilder	37
3.2.2	Löslichkeit im flüssigen Zustand	38
3.2.3	Zweistoffsystem mit vollständiger Löslichkeit im festen Zustand	39
3.2.4	Zweistoffsystem mit vollständiger Unlöslichkeit im festen Zustand	46
3.2.5	Zweistoffsystem mit begrenzter Löslichkeit im festen Zustand	49
3.3	Lernkontrollfragen	51

4	Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm	53
4.1	Zweistoffsystem Eisen / Kohlenstoff	53
4.2	Eisen-Kohlenstoff-Diagramm	55
4.2.1	Stabiles System	55
4.2.2	Metastabiles System	56
4.2.3	Genauere Betrachtung der Teilbereiche des metastabilen Systems	58
4.2.4	Umwandlung im festen Zustand	60
4.3	Stahleigenschaften und Kohlenstoffanteil	62
4.4	Lernkontrollfragen	64
5	Härte	67
5.1	Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubilder	67
5.1.1	Martensitisches und bainitisches Gefüge	67
5.1.2	Kontinuierliche ZTU-Schaubilder	69
5.1.3	Einflussgrößen	72
5.1.4	Isotherme ZTU-Schaubilder	72
5.1.5	Abkühlparameter	73
5.2	Härteprüfung	74
5.2.1	Brinellprüfung	75
5.2.2	Vickersprüfung	76
5.2.3	Rockwellprüfung	76
5.2.4	Stirnabschreckversuch	77
5.3	Lernkontrollfragen	79
6	Wärmebehandlung	81
6.1	Einführung in die Wärmebehandlung	81
6.2	Glühverfahren	83
6.2.1	Diffusionsglühen	84
6.2.2	Normalglühen	84
6.2.3	Weichglühen	85
6.2.4	Spannungsarmglühen	86
6.2.5	Rekristallisationsglühen	87
6.3	Härten und Vergüten	88
6.3.1	Härten / Martensitbildung	89
6.3.2	Randschichthärten durch thermische Verfahren	92
6.3.3	Randschichthärten durch thermochemische Verfahren	93
6.3.4	Vergüten	94
6.4	Lernkontrollfragen	96
7	Stähle	97
7.1	Metalllegierungen	97
7.2	Einteilung der Stähle	99
7.2.1	Stähle für allgemeine Verwendung	99
7.2.2	Baustähle für höhere Festigkeit	99
7.2.3	Stähle mit besonderen Eigenschaften	100
7.2.4	Stähle für bestimmte Fertigungsverfahren	101
7.2.5	Stähle für bestimmte Formteile	101
7.2.6	Werkzeugstähle	102

7.3	Hochlegierte nichtrostende Stähle	102
7.3.1	Werkstoffnummern	102
7.3.2	Gefüge hochlegierter Stähle	103
7.3.3	Nichtrostende ferritische Stähle	104
7.3.4	Nichtrostende martensitische Stähle	105
7.3.5	Nichtrostende austenitische Stähle	105
7.3.6	Nichtrostende austenitisch-ferritische Stähle	106
7.3.7	Hitzebeständigkeit	107
7.3.8	Einfluss der Legierungselemente	107
7.3.9	Physikalische Eigenschaften hochlegierter nichtrostender Stähle	108
7.4	Lernkontrollfragen	108
8	Korrosion	109
8.1	Einführung in die Korrosion	109
8.1.1	Chemische Korrosion	110
8.1.2	Elektrochemische Korrosion	111
8.1.3	Metallphysikalische Korrosion	111
8.2	Korrosionsarten	112
8.2.1	Gleichmäßige Flächenkorrosion	112
8.2.2	Lochkorrosion	112
8.2.3	Kontaktkorrosion	113
8.2.4	Interkristalline Korrosion	115
8.2.5	Mikrobiologische Korrosion	116
8.2.6	Sulfidierung	116
8.2.7	Spannungsrissskorrosion	116
8.2.8	Schwingungsrissskorrosion	117
8.2.9	Korrosion durch strömende Medien	118
8.3	Korrosionssystem	118
8.4	Lernkontrollfragen	119
9	Nichteisenmetalle	121
9.1	Einteilung der Nichteisenmetalle	121
9.2	Aluminium	122
9.3	Weitere Leichtmetalle	127
9.3.1	Magnesium	127
9.3.2	Titan	127
9.4	Nickel	128
9.5	Kupfer	130
9.6	Eigenständige Kupferlegierungen	132
9.6.1	Messing	132
9.6.2	Bronze	134
9.7	Zink	135
9.8	Lernkontrollfragen	138
10	Nichtmetalle	139
10.1	Kunststoffe	139
10.1.1	Kettenkonfiguration	139
10.1.2	Kettenkonformation	145
10.1.3	Melt Flow Index	145
10.1.4	Amorpher Zustand	145

10.1.5 Kristalliner Zustand	148
10.1.6 Struktur und Eigenschaften	149
10.2 Verbundwerkstoffe	150
10.3 Anorganisch niedermolekulare Gläser	154
10.4 Keramik	156
10.5 Lernkontrollfragen	158
11 Weiterführende Fragen	161

Leitfaden für dieses Lernheft

Die Werkstoffkunde bildet die Grundlage eines jeden Ingenieurstudiums! Mit diesem *Lernheft* (zugegeben, vom Umfang könnte man durchaus von einem Lehrbuch sprechen) bist du auf dem besten Weg, deine Prüfungen im Bereich der Werkstoffkunde erfolgreich zu bestehen.

Damit du im Lernheft nicht den Überblick verlierst, haben wir uns verschiedene Boxen überlegt:

Beispiel X-Y: Name des Beispiels

Anhand dieser Gestaltung kannst du Beispiele erkennen, in denen ich Inhalte mit konkretem Bezug nochmals näherbringe.

Definitionen und relevante Erkenntnisse, die du dir merken solltest, sind mit einem solchen Kasten markiert, damit dir das Wichtigste direkt ins Auge fällt.

Ja, es ist sicher nicht ganz so einfach zu lesen. Dies liegt daran, dass es sich hierbei um Anmerkungen handelt, die zusätzliche Informationen bereitstellen, von denen dein Lernerfolg nicht abhängt. Daher klein.

Immer wieder findest du in diesem Heft an der Seite **QR-Codes**, die du mit deinem Smartphone oder Tablet¹ einscannen kannst. Damit gelangst du immer zu einem passenden YouTube-Video von mir. Auch hier gibt es wieder einen kleinen Unterschied:

- QR-Codes ohne Untertitel sind fortlaufend eingebracht, um den Abschnitt, den du gerade liest, auch nochmal in Videoform zur Verfügung zu haben.
- QR-Codes mit Untertiteln verweisen auf konkrete Passagen in diesen Videos, bei denen Inhalte außerhalb des aktuellen Abschnitts ins Gedächtnis gerufen werden können.



Werkstoffkunde
Playlist auf YT

Bist du zum Beispiel in Kapitel 4 und es wird an einer Stelle Wissen vorausgesetzt, das in Kapitel 3 vermittelt worden ist, kannst du schnell den QR-Code an der Seite scannen und nochmal zu der Stelle in dem Video aus Kapitel 3 springen.

Am Ende jeden Kapitels steht eine Reihe an **Lernkontrollfragen** zur Verfügung. Zusätzlich folgen auf das letzte Kapitel noch weiterführende Fragen, die das Niveau der Lernkontrollfragen zum Teil deutlich übersteigen und die Inhalte der verschiedenen Kapitel kombinieren. Wenn du diese beantworten kannst, solltest du, unter Vorbehalt der jeweiligen Vorlesungsinhalte, auch komplizierte Klausuraufgaben erfolgreich bearbeiten können. Die jeweiligen Lösungen können online unter dem nebenstehenden QR-Code abgerufen werden.



Lösungen

Ich freue mich, dir mit Rat und Tat zur Seite zu stehen und wünsche dir viel Erfolg in deinem Studium und vor allem natürlich eine super Note in Werkstoffkunde!

— Prof. Dr.-Ing. Martin Bonnet

¹ Hast du dieses Lernheft als digitale Version (E-Book), kannst du die QR-Codes einfach anklicken!

1 Einführung in die Welt der Werkstoffe

In diesem Kapitel lernst du...

- wie ein Atom aufgebaut ist, welche Elemente es gibt und was für Bindungsarten zwischen ihnen wirken,
- welche Arten von Gittertypen und -fehlern existieren und
- was die beiden wichtigsten zerstörenden Werkstoffprüfverfahren sind.

1.1 Überblick über die Welt der Werkstoffe

Die Werkstofftechnik beschäftigt sich mit den Eigenschaften und dem Einsatz von Werkstoffen. Um eine erste Übersicht über diese zu erhalten, dient Abbildung 1.

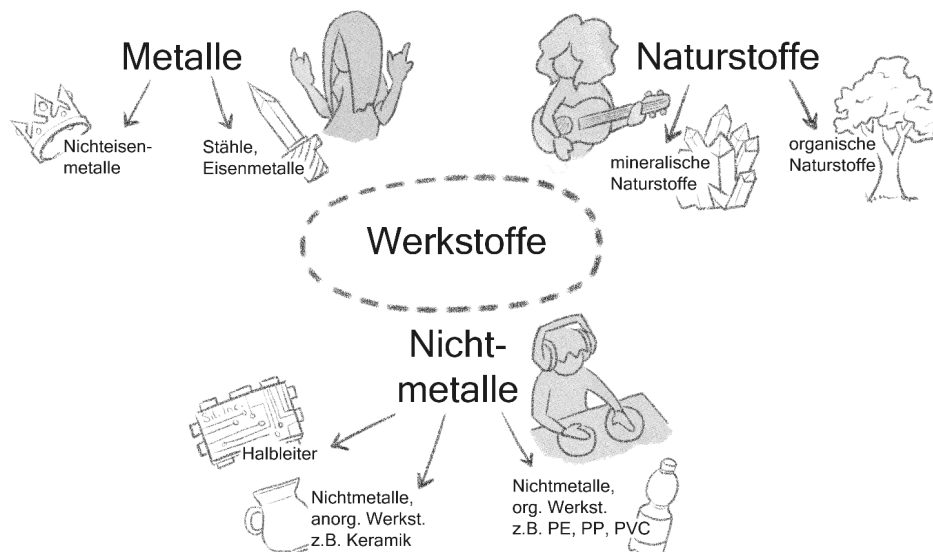


Abb. 1: Einteilung der Werkstoffe

Werkstoffe können grob in drei Kategorien unterteilt werden: Naturstoffe, Nichtmetalle und Metalle. Die Naturstoffe lassen sich wiederum in mineralische und organische Naturstoffe unterteilen.

Während mineralische Naturstoffe nicht so bekannt sind (ein Beispiel wäre Saponit), sind organische Naturstoffe, wie beispielsweise Holz, in nahezu jedem Haushalt vertreten. Die Nichtmetalle unterteilen sich in drei Unterkategorien: Den Halbleitern (wie Silizium), den nichtmetallischen anorganischen Werkstoffen (wie Keramik) und den nichtmetallischen organischen Werkstoffen (wie Polyethylen, Polypropylen und weiteren Polymeren).

Die Wichtigkeit von Metallen fällt bei der Namensgebung sofort auf, ebenso die des Metalls Eisen. Die Unterkategorie von Metallen teilt sich in Nichteisenmetalle (Kupfer, Aluminium etc.) und Stähle bzw. Eisenmetalle, die eine gewöhnungsbedürftige Nomenklatur besitzen (S235, X50CrMoV15), die wir in diesem Lernheft gemeinsam erarbeiten werden.

1.2 Aufbau des Atoms & Periodensystem der Elemente

Bevor wir in die Welt der Werkstoffe eintauchen, müssen zunächst ein paar chemische Grundlagen besprochen werden. Dabei hilft uns die in Abbildung 2 aufgeführte Darstellung eines Atoms.

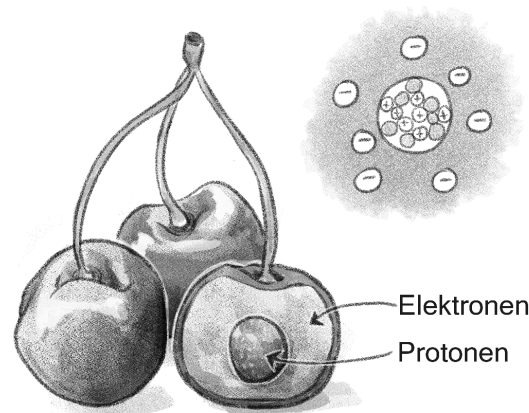


Abb. 2: Aufbau eines Atoms

Der Kern des Atoms besteht aus positiv geladenen Teilchen (**Protonen**) und Teilchen ohne Ladung (**Neutronen**). Der Kern wird von negativ geladenen Teilchen (**Elektronen**) umkreist. Ein Atom verfügt standardmäßig über die gleiche Anzahl von Protonen und Elektronen und auch ähnlich viele Neutronen. Die Anzahl der Elektronen (und damit auch Protonen) die in einem Atom vorzufinden ist, definiert die Zuordnung zu einem Element. Während die Protonen dichtgepackt im Kern verweilen, bewegen sich die Elektronen auf unterschiedlichen Schalen. Diese kann man sich als Ansammlung von Bahnen vorstellen, die einen unterschiedlichen Abstand zum Kern haben. Die Anzahl der Elektronen, die auf einer Schale Platz haben, berechnet sich zu:

$$2 \cdot n^2$$

Damit finden auf der innersten Schale zwei Elektronen Platz, auf der zweiten acht Elektronen und so weiter. Die Schalen werden nach Möglichkeit immer vollständig besetzt. Auf der äußersten Schale können sich maximal acht Elektronen aufhalten. Ausnahme ist natürlich Helium, da es nur eine Schale besitzt, die maximal 2 Elektronen aufnehmen kann.

Beispiel 1-1: Elektronenverteilung

Verfügt ein Atom über 11 Elektronen, ist es nicht möglich, dass auf der ersten (innersten) Schale ein Elektron, auf der zweiten sieben Elektronen und auf der dritten drei Elektronen verteilt sind. In diesem Beispiel wären zwei Elektronen auf der ersten Schale, acht Elektronen auf der zweiten Schale und ein Elektron auf der dritten Schale.

Alle Atome sind bestrebt, die äußerste Schale komplett aufzufüllen. Atome mit komplett gefüllter Außenschale befinden sich in der Edelgaskonfiguration. Das Ziel die Edelgaskonfiguration zu erreichen führt dazu, dass es Reaktionen zwischen den Atomen gibt. Dafür sind die Atome in der äußersten Schale (Außenelektronen) von besonderer Relevanz. Bevor man jedoch die Reaktionstypen bespricht, sollte man erstmal eine Übersicht über die unterschiedlichen Atome bekommen, die im Periodensystem der Elemente in Abbildung 3 aufgeführt sind.

		Hauptgruppen		Nebengruppen										Hauptgruppen						
		I	II	IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa	VIIIa	Ia	IIa	III	IV	V	VI	VII	VIII			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Periode	1	H																	He	
	2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
	3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
	4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
	5	Br	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
	6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
	7	Fr	Ra	Ac																
Lanthanide		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu					
Actinide		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr					

Abb. 3: Periodensystem der Elemente

Die Hauptgruppen geben dabei die Anzahl der Außenelektronen an, während die Periode die Anzahl der Schalen beschreibt. Die Nebengruppen werden erstmal nicht betrachtet. Für die Einordnung der Elemente in die Gruppe der Metalle, Nichtmetalle und Halbmetalle sind die Anzahl der Außenelektronen und der Schalen wichtig. Metalle haben das Bestreben Elektronen abzugeben, um die Edelgaskonfiguration zu erreichen, denn die äußerste Schale ist meist nur mit wenigen Elektronen gefüllt. Daher nimmt der Metallcharakter zum einen mit abnehmender Anzahl an Außenelektronen zu, da weniger Außenelektronen leichter abgegeben werden können. Zum anderen nimmt der Metallcharakter mit zunehmender Anzahl an Schalen zu, da Elektronen, die sich weiter weg vom Kern befinden, ebenfalls leichter abzugeben sind. Für Nichtmetalle gilt genau das Gegenteil: diese wollen Elektronen aufnehmen und dies ist mit zunehmender Anzahl Außenelektronen bzw. abnehmender Anzahl an Schalen leichter.

Verbindet man die Mittelpunkte der Kugeln miteinander, erhält man die Gitterstruktur des betrachteten Kristalls. Das kleinste sich wiederholende Element eines Kristalls wird als Elementarzelle bezeichnet. Das dargestellte Gitter wird als kubisch primitives Kristallgitter bezeichnet, da die Elementarzelle die einfachste Form eines Würfels (lat. *cubus*) hat.

1.4.1 Elementarzelle

Die Elementarzellen werden, wie in Abbildung 8 dargestellt, durch die Abstände und Winkel der Atome in allen drei Raumdimensionen eindeutig klassifiziert und in sieben verschiedene Kristallsysteme unterteilt.

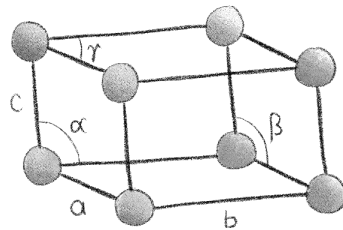


Abb. 8: Beschreibung der Elementarzelle durch Abstände und Winkel

Für Metalle sind drei Kristallsysteme relevant: das kubische ($a = b = c$ und $\alpha = \beta = \gamma$), das tetragonale ($a = b \neq c$ und $\alpha = \beta = \gamma$) und das hexagonale ($a = b \neq c$ und $\alpha = \beta = 90^\circ$ sowie $\gamma = 120^\circ$). Je nach Kristallsystem können sich verschieden viele Atome auf unterschiedliche Arten anordnen, dabei spricht man von Gittertypen. Die wichtigsten Gittertypen sind in Abbildung 9 aufgeführt: das kubisch-raumzentrierte Gitter (**krz**), das kubisch-flächenzentrierte Gitter (**kfz**) und das hexagonale Gitter dichtester Kugelpackung (**hdp**).

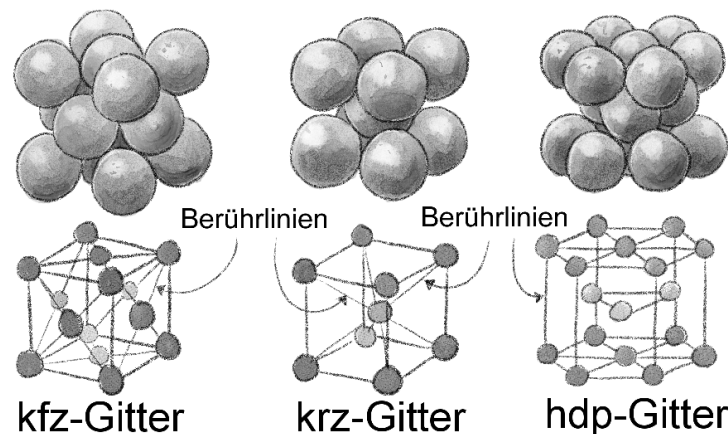


Abb. 9: Visualisierung der drei wichtigsten Gittertypen für Metalle: kfz-, krz- und hdp-Gitter

Beim kfz-Gitter ist zusätzlich zu den Würfecken in jeder Würfelfläche ein Atom platziert. Zu den Elementen, die diesen Gitteraufbau besitzen, gehören Kupfer, Nickel & Aluminium. Beim krz-Gitter ist zusätzlich ein Atom im Zentrum des Würfels angeordnet. Wolfram, Chrom und Molybdän gehören zu den Elementen die ein krz-Gitter besitzen. Die Ober- und Unterseite des hdp-Gitters besteht aus sechseckig angeordneten Atomen mit einem zusätzlichen Atom in der Mitte. Zwischen Ober- und Unterseite ist noch eine dreieckig angeordnete Atomstruktur untergebracht. Das hexagonale Gitter dichtester Kugelpackung besitzen Magnesium, Zink & Cadmium. Es gibt auch Metalle, die mehrere Gittertypen ausprägen können: diese nennt man polymorph. Ein Beispiel hierfür ist Eisen.



ihr Verformungsverhalten stark abhängig von der Temperatur. So treten bei hohen Temperaturen Verformungsbrüche auf (Hochlage), während bei niedrigen Temperaturen ein sprödes Verhalten zu beobachten ist (Tiefelage). Der Übergang vom spröden ins duktile wird typischerweise mit einer Temperatur markiert (Übergangstemperatur), da er für die Werkstoffauswahl wichtig ist. Im Bereich des Steilabfalls, also zwischen Hoch- und Tiefelage, kommt es zu einem plötzlichen Abfall der Duktilität, sodass ein Werkstoff der gerade noch sehr duktil war, plötzlich spröde sein kann.

1.6 Lernkontrollfragen



Lösungen

1. Aus welchen Teilchen ist ein Atom aufgebaut und wo halten sich diese auf?
2. Was ist die Edelgaskonfiguration?
3. Gib an, ob es sich bei den Elementen um ein Metall oder Nichtmetall handelt: Sauerstoff (O) und Kalium (K)! Begründe die Antwort. Wenn du dich fit fühlst, kannst du auch mal überlegen, ob du Blei (Pb) den Metallen oder Nichtmetallen zuordnen würdest.
4. Nenne drei Bindungsarten, die Atome eingehen können und gib jeweils ein Beispiel an! Benutze für die Beispiele die Elemente Kalium (K), Brom (Br), Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Aluminium (Al).
5. Was sind die drei für unsere Zwecke wichtigsten Gittertypen und wie ist eine solche Elementarzelle aufgebaut (Skizze oder Beschreibung)?
6. Wie hoch ist die Packungsdichte beim hdp-Gitter?
7. Nenne die Arten von Gitterfehlern, die dir bekannt sind, mit jeweils einem Beispiel!
8. Ordne die Gittertypen krz, kfz und hdp nach ihrer plastischen Verformbarkeit an (beginnend mit der besten plastischen Verformbarkeit) und begründe die Anordnung!
9. In dem folgenden Spannungs-Dehnungs-Diagramm sind zwei Kurven von zwei Materialien angegeben. Gib für jedes der beiden Materialien die Zugfestigkeit, Streck-/Dehngrenze und den E-Modul an!

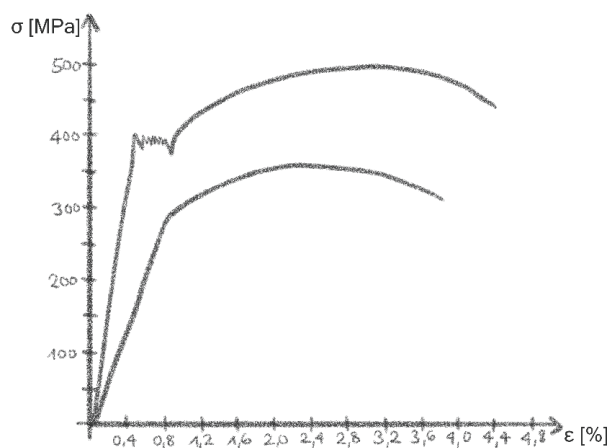


Abb. 20: Aufgabe zum Spannungs-Dehnungs-Diagramm

10. Für ein Bauteil, das eine hohe Zähigkeit besitzen soll, stehen zwei Materialien zur Verfügung: eins mit krz-Gitter und eins mit kfz-Gitter. Die Temperaturen, bei denen das Bauteil zum Einsatz kommt, sind sehr gering. Anhand welches Kennwertes überprüfst du die Verwendbarkeit und welches Material würdest du ohne genaue Angabe der Werte einsetzen?

2.3 Nomenklatur nach Kurznamen

Die DIN 10020 beinhaltet die Nomenklatur nach Kurznamen, also eins der Systeme zur Benennung der Stähle. Dabei werden Buchstaben und Ziffern zur Charakterisierung eingesetzt. Die Kennbuchstaben geben Hinweise auf den Hauptverwendungszweck, mechanische bzw. physikalische Eigenschaften oder die chemische Zusammensetzung. Die Kennzahlen ergänzen diese Angaben durch mechanische Kenngrößen oder Massenanteile.

Grundsätzlich werden die Kurznamen in zwei Hauptgruppen unterteilt:

- **Gruppe 1:** Bezeichnung aufgrund der Verwendung und der mechanischen Eigenschaften des Stahls, z. B. S235J2.
- **Gruppe 2:** Bezeichnung aufgrund der chemischen Zusammensetzung des Stahls, z. B. 42CrMo4.

Die Kurznamen sollen dabei nur so lang sein, dass der Werkstoff charakterisiert und von anderen Werkstoffen unterschieden werden kann.

2.3.1 Gruppe 1

Nach DIN EN 10027 Teil 1 setzen sich die Kurznamen der Gruppe 1 aus Haupt- und Zusatzsymbolen zusammen. Dabei unterteilen sich die Zusatzsymbole nochmal in Zusatzsymbole für Stähle und Zusatzsymbole für Stahlerzeugnisse.

Hauptsymbol für die Stahlgruppe		Zusatzsymbol für Stähle	Zusatzsymbole für Stahlerzeugnisse
Kennbuchstabe für Stahlgruppe	Kennzahl für die Mindeststreckgrenze (in MPa)	Gütegruppe, Desoxidationsart, Verwendungszweck o. Behandlungszustand	Behandlungszustand, Überzug oder besondere Anforderung
S	355	JR	+N

Tab. 1: Erläuterung des Bezeichnungsschlüssels für Kurznamen der Stähle aus Gruppe 1 anhand des Beispielwerkstoffs S355JR+N

Nun stellt sich die Frage was für Symbole und Zahlen für die Tabelle 1 verwendet werden können und was diese bedeuten. Beginnen wir mit den Kennbuchstaben für Stahlgruppen. Die für den Maschinenbau typischerweise relevanten Buchstaben und Gruppen sind in Tabelle 2 dargestellt.

Kennbuchstabe	Stahlgruppe
S	Stähle für Stahlbau
P	Stähle für Druckbehälter
L	Stähle für Leitungsrohre
E	Maschinenbaustähle

Tab. 2: Kennbuchstaben der für den Maschinenbau relevanten Stahlgruppen der Gruppe 1

4.2 Eisen-Kohlenstoff-Diagramm

Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm ist das Zustandsschaubild des Zweistoffsystems Eisen-Kohlenstoff und in Abbildung 45 zu erkennen.

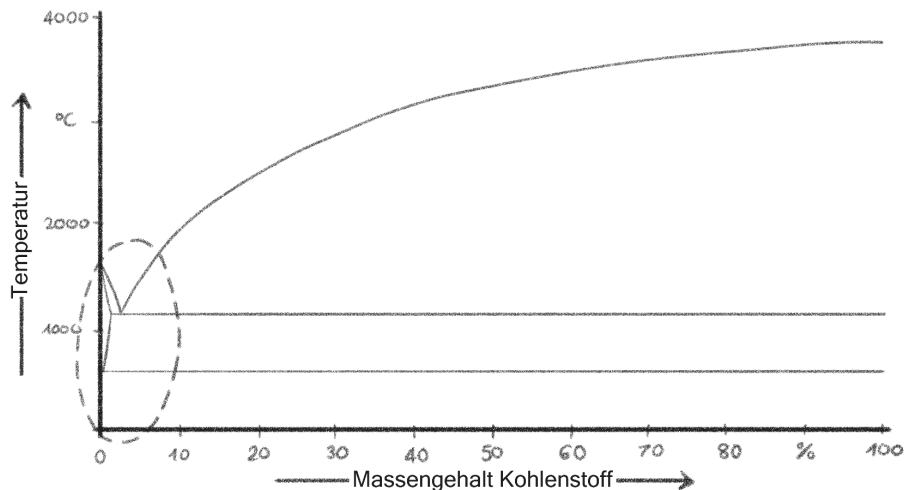


Abb. 45: Vollständiges Eisen-Kohlenstoff-Diagramm

Bei hohem Kohlenstoffgehalt besteht der Werkstoff aus dem sehr spröden Grafit, welches für technische Anwendung keinerlei Bedeutung hat. Da nur eine Kohlenstoffkonzentration bis 6,67% praxisrelevant ist, wird typischerweise der markierte Ausschnitt betrachtet.

4.2.1 Stabiles System

Das Teilschaubild Eisen-Kohlenstoff ist in Abbildung 46 im stabilen System dargestellt. Dies bedeutet, dass von einem theoretisch nahezu unendlichen langsamen Abkühlvorgang ausgegangen wird. Das stabile System ist vor allem für Gusseisenanwendungen interessant.

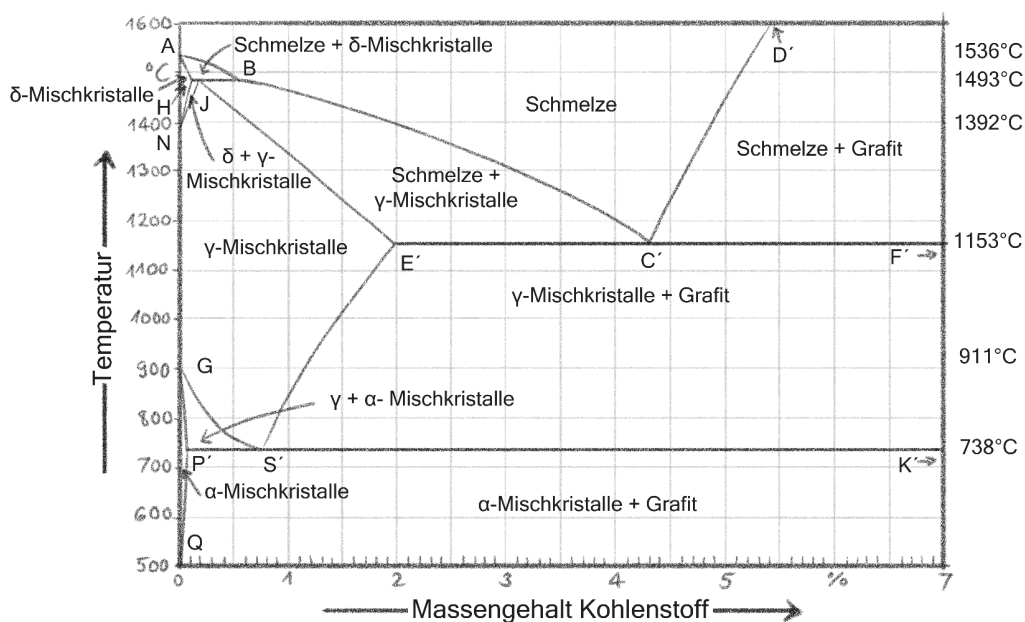


Abb. 46: Stabiles System des Teilschaubilds-Eisen-Kohlenstoff

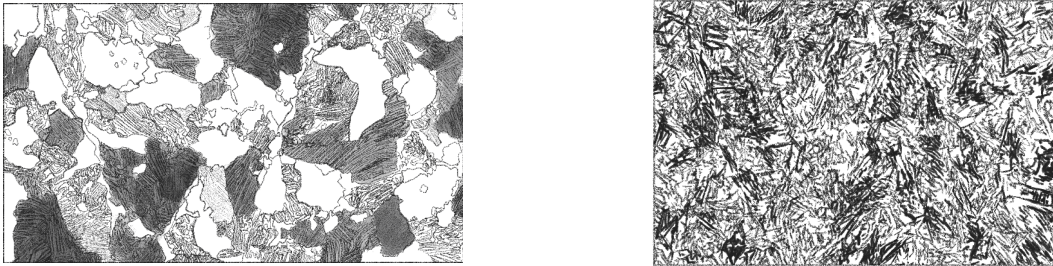


Abb. 60: Gegenüberstellung zweier Gefüge desselben Stahls (C45) bei unterschiedlicher Abkühlung

Zwischen dem bekannten perlitischen und dem neu kennengelernten martensitischen Gefüge kann sich bei schneller Abkühlung (jedoch keiner Abschreckung) ein weiteres Gefüge ausprägen. Es wird Zwischenstufengefüge oder Bainit genannt. Dabei kommt es im Gegensatz zur Martensitbildung zu Umwandlungsvorgängen in den Kristallgittern und zu Diffusionsvorgängen des Kohlenstoffs. Das Gefüge ist von der Optik her nicht besonders charakteristisch, da es wie Perlit aus Ferrit und Zementit besteht. Trotz Unterschieden in Form, Größe und Verteilung kann ein Laie es in metallografischen Untersuchungen nicht vom Perlit unterscheiden.

5.1.2 Kontinuierliche ZTU-Schaubilder

Da die Abkühlgeschwindigkeit schwer messbar ist, wird typischerweise auf die Abkühldauer zurückgegriffen. Dabei ist die Zeitachse logarithmisch aufgetragen, um sowohl schnelle als auch langsame Abkühlvorgänge betrachten zu können. Bei kontinuierlichen ZTU-Schaubildern werden die Stähle mit verschiedenen Abkühlmedien (z. B. Öl, Wasser, Luft) abgekühlt. Dementsprechend kann das Schaubild nur anhand der eingezeichneten Abkühlkurven abgelesen werden. Die Gefügeuntersuchungen für die ZTU-Schaubilder erfolgen metallografisch. Die Punkte, bei denen es zur Gefügeumwandlung kommt, werden mithilfe von Längenänderungen der Proben (dilatometrisch) bestimmt. Die Verbindung der Umwandlungspunkte erzeugt das ZTU-Schaubild.

Beispiel 5-1: Kontinuierliche ZTU-Schaubilder

Um erstmal eine Vorstellung davon zu bekommen, wie ZTU-Schaubilder aussehen und wie wir sie lesen, schauen wir uns vier Beispiele für kontinuierliche ZTU-Schaubilder an.

- a) Wir beginnen mit dem kontinuierlichen ZTU-Schaubild des unlegierten Stahls C15, bei dem wir die Abkühlkurven verstehen, indem wir die Schnittpunkte mit den Gefügen in Abbildung 61 betrachten.

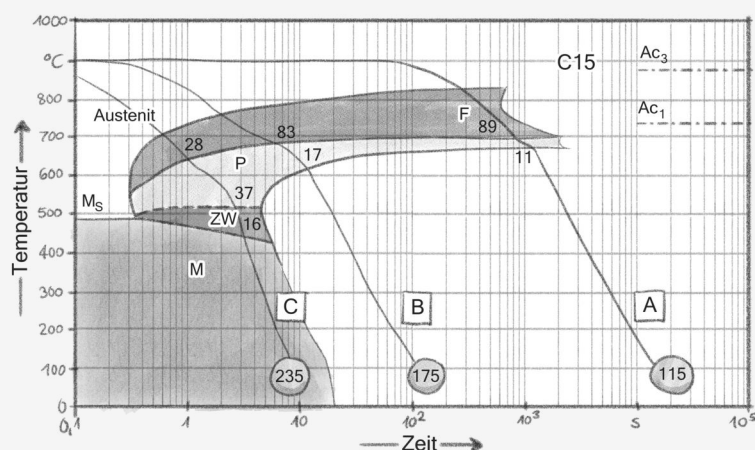


Abb. 61: Kontinuierliches ZTU-Schaubild eines C15

5.2.1 Brinellprüfung

Die Brinellprüfung wird vornehmlich für weiche bis mittelharte Materialien (z. B. Einsatzstahl) und Werkstoffe mit heterogenem Gefüge (z. B. Gusseisen) angewendet. Dabei wird eine Hartmetallkugel mit einem Durchmesser von 1 bis 10 mm verwendet. Die Größe orientiert sich an der Werkstückdicke. Für die Prüfung wird, wie in Abbildung 69 dargestellt, die Kugel mit einer definierten Kraft in eine plan geschliffene Fläche des zu überprüfenden Werkstückes gedrückt. Die aufgebrauchte Prüfkraft orientiert sich an der zu erwartenden Härte. Im Anschluss an den Eindruck der Kugel wird diese Stelle ausgemessen.

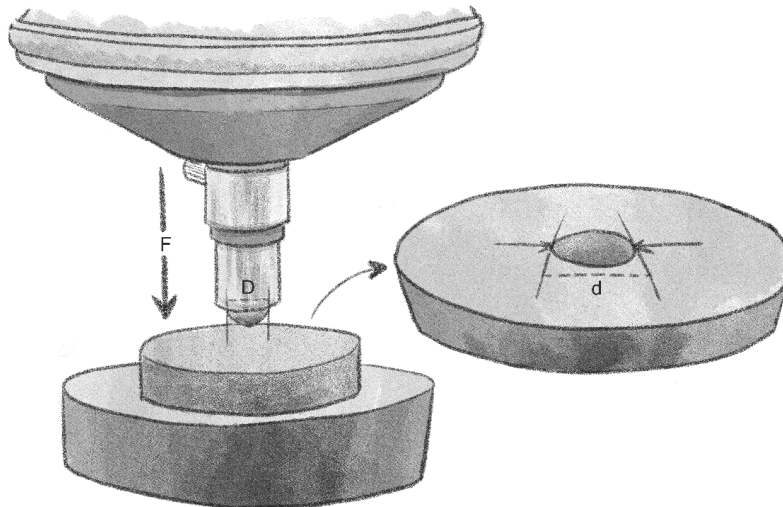


Abb. 69: Härteprüfung nach Brinell

Die Brinellhärte ist als das Verhältnis von Prüfkraft zur Eindruckoberfläche definiert.

$$HB = \frac{\text{Prüfkraft}}{\text{Eindruckoberfläche}}$$

Die Parameter der Berechnung sind:

- **Kugeldurchmesser** (D)
- **Prüfkraft** (F)
- **Eindruckdurchmesser** (d)

Da die Kraft zur Zeit der Einführung der Brinellprüfung in Kilopond gemessen wurde, muss die heute in Newton gemessene Prüfkraft mit dem Faktor 0,102 multipliziert werden, um den Wert in Kilopond zu erhalten.

Es ergibt sich die nachfolgende Formel zur Berechnung der **Härte nach Brinell**:

$$HB = \frac{2 \cdot 0,102 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

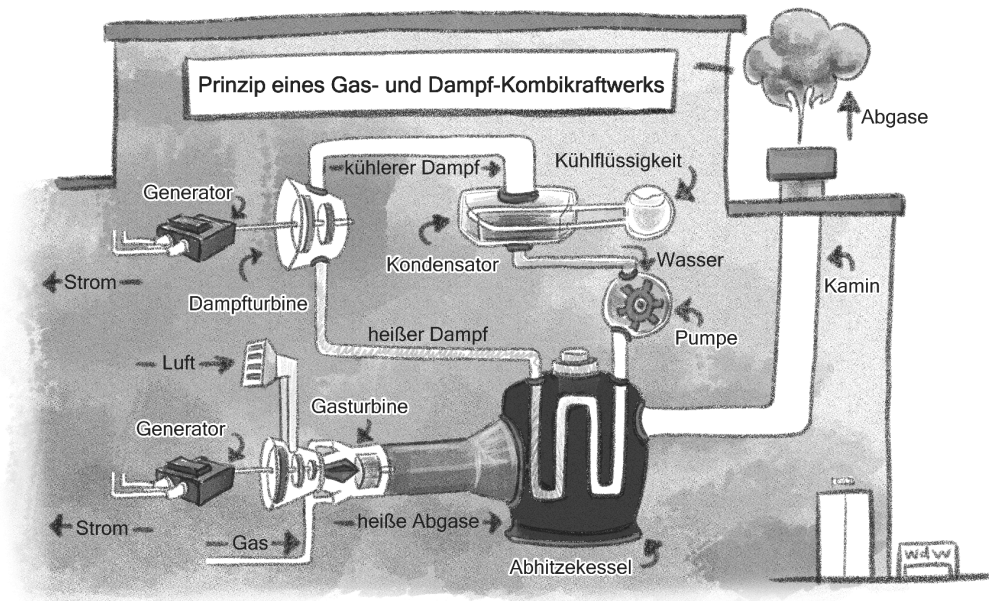


Abb. 115: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Gas- und Dampf-Kombikraftwerks

In den vergangenen zweihundert Jahren gab es eine starke Verbesserung bei der Effizienz der Stromerzeugung / Energiegewinnung. Während Kolbendampfmaschinen Wirkungsgrade von ca. 1% erreicht haben, können mit Steinkohlekraftwerken Wirkungsgrade von ca. 40% erreicht werden. Moderne Gas- und Dampf-Kombikraftwerke können ihren Wirkungsgrad auf bis zu 60% steigern. Aber was hat das mit Werkstofftechnik zu tun? Dafür müssen wir das in Abbildung 115 dargestellte Prinzip der Gas- und Dampf-Kombikraftwerke verstehen.

Gasturbinen arbeiten bei ca. 1500°C und erzeugen sehr heiße Abgase. Die Wärmeenergie der Abluft wird dafür verwendet, um Wasser zu verdampfen, das in Form von Wasserdampf eine Dampfturbine antreibt. Um die hohen Nutzungsgrade und einen reduzierten CO₂-Ausstoß zu ermöglichen, wurden die Temperaturen und Drücke bei den Energieerzeugungsprozessen immer weiter erhöht, wodurch die Anforderungen an die Materialien ebenfalls gestiegen sind. Dabei werden vor allem die Schaufeln der Turbinen mit hohen Temperaturen und Kräften beaufschlagt. Um all diesen Anforderungen gerecht zu werden, setzt man aktuell bei solchen Anwendungen Nickellegierungen ein.

9.5 Kupfer

Kupfer und Kupferlegierungen sind für ihre sehr gute elektrische und thermische Leitfähigkeit bekannt. Zudem sind diese Werkstoffe sehr korrosionsbeständig. In Tabelle 28 sind unter anderem die mechanischen Eigenschaften aufgeführt, aus denen wir weitere Materialeigenschaften ableiten können. Wir erkennen, dass Kupferwerkstoffe über geringe Festigkeiten verfügen, die genau wie der E-Modul unter denen von Stahl liegen.

Durch die kubisch flächenzentrierte Gitterstruktur können Kupferwerkstoffe sehr gut umgeformt werden. Einige Kupferlegierungen haben gute Gießeigenschaften und lassen sich mit Löt- und Schweißverfahren fügen. Jedoch neigen sie beim Schweißen zur Wasserstoffaufnahme, wodurch es zu Schäden am Werkstück kommen kann. Für spanende Fertigungsverfahren sind Kupferwerkstoffe nicht gut geeignet.