

Joachim Schlegel

Die Welt des Stahls

Zur Geschichte,
Herstellung und
Verwendung eines
Basiswerkstoffes

SACHBUCH

 Springer



Die Welt des Stahls

Joachim Schlegel

Die Welt des Stahls

Zur Geschichte, Herstellung und
Verwendung eines Basiswerkstoffes

Joachim Schlegel
Hartmannsdorf, Deutschland

ISBN 978-3-658-33915-9 ISBN 978-3-658-33916-6 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-33916-6>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2021

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung der Verlage. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

© Fotonachweis Umschlag: © stock.adobe.com_279817196

Umschlaggestaltung: deblik Berlin

Planung/Lektorat: Frieder Kumm

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

*Das Schönste, was wir erleben können,
ist das Geheimnisvolle.*

Albert Einstein

Geleitwort

Der Werkstoff Stahl mit seinen vielseitigen Eigenschaften und einer nahezu unüberschaubaren Fülle an Einsatzgebieten begleitet uns den ganzen Tag – und das bereits seit vielen Generationen.

Möglicherweise rühren wir gerade beim Lesen dieser Zeilen unseren Kaffee mit einem Löffel aus Edelstahl um und betrachten die Zahlenkombination 18/10 auf dessen Rückseite. Die exakte Bezeichnung lautet X5CrNi18-10, im Einkauf wird er unter der Nummer 1.4301 geführt und in der Werkstatt heißt er V2A. Und schon sind wir mittendrin in der Welt des Stahls, worin uns das Sachbuch „Die Welt des Stahls“ mit einem unverkennbaren und angenehmen Schreibstil begleitet und uns aufzeigt, dass die Lehre über Stahl gar nicht so schwer verständlich und weit entfernt von uns ist, wie wir es in der grauen Theorie vielleicht meinen oder gar befürchten.

Eine große Stärke dieses Buches liegt in einer gelungenen Mischung aus fachlich gut verständlichen Inhalten und einem großen Praxisbezug. Dadurch ist dieses Buch vor allem für den Anwender, für die Grundlagenlehre (Werkstoffkunde und Fertigungstechnik) sowie für ein Aufbaustudium, basierend auf einem betriebswirtschaftlichen Abschluss, sehr gut geeignet.

Der Autor Dr.-Ing. Joachim Schlegel führt uns neben der Grundlagenvermittlung immer wieder in die Historie des Werkstoffes Stahl, spannt dabei einen Bogen zu den neuesten Anwendungen und versetzt uns mit der Frage „Wussten Sie schon ...?“ in Staunen.

Das Buch „Die Welt des Stahls“ wird seinen Platz einnehmen als Bindeglied zwischen Theorie und Praxis, besonders bei jenen, die Freude am interessanten, anschaulichen und praxisnahen Lernen und Lehren haben.

Dazu wünsche ich dem Autor und seinem Werk einen vollen Erfolg.

Prof. Dr.-Ing. Andreas Zilly
Professor für Werkstoffkunde an der Dualen
Hochschule Baden-Württemberg

Vorwort

Eine Edelstahlspüle in der modernen Küche ist uns allgegenwärtig; auch das Edelstahlbesteck und die oft verwendete Stahlwolle, um Töpfe zu reinigen. Auf Stahlkufen gleitet der Bob im Eiskanal dem Ziel entgegen. Gern spielt man Boule, aus dem Französischen übersetzt „Kugel“, die heute aus Stahl besteht. Nadeln für das Stricken, Weben, Filzen, Kämmen und Nähen, ob für die Hausfrau oder für den Einsatz in Textilmaschinen, werden aus Spezialstählen hergestellt. Und will man im eigenen Heim etwas bauen, freut man sich, wenn geeignete Werkzeuge mit haltbarem Werkzeugstahl, z. B. ein Spiralbohrer, eine Stichsäge, ein Meißel oder Hammer zur Verfügung stehen. Stahlstempel prägen Münzen oder formen Medizin zu Pillen. In Wunderkerzen steckt ein verkupferter Stahldraht. Bowdenzüge am Fahrrad zur Betätigung der Bremsen bis hin zu Trageseilen für Schwebbahnen oder Hängebrücken sind aus hochfestem Stahldraht gefertigt. Auch wenn man ihn nicht sieht, steckt in modernen Betonbauten viel Stahl. Stahlschienen für Eisenbahnen und Straßenbahnen sichern unsere Mobilität. An Stahlgittermasten sind die Stromleitungen befestigt. Stahlträger tragen Lasten, und moderne Autos bestehen aus vielen verschiedenen Stahlsorten. Egal, wo wir uns gerade befinden und was wir tun, in unserem Leben ist der Werkstoff Stahl immer dabei, bei der Arbeit oder in unserer Freizeit, manchmal auch als Kunstwerk. Stahl ist unverzichtbar, wiederverwertbar und hat eine ganz besondere Bedeutung: In unserer modernen Industriegesellschaft ist Stahl der Basiswerkstoff für alle wichtigen Industriebereiche, wie Automobil- und Schiffbau, Luft- und Raumfahrtindustrie, Apparate- und Maschinenbau, Brücken- und Stahlhochbau, Energie- und Umwelttechnik, Verpackungsindustrie, Haushalts- und Sportindustrie, Medizintechnik, Roboter- und IT-Technik u. v. a. Auch alle globalen Megathemen von heute, wie Energieversorgung, Mobilität, Gesundheitswesen, Umwelt- und Klimaschutz, sind ohne Stahl nicht lösbar und nicht zu bewältigen.

Die großtechnische Herstellung und Verarbeitung von Stahl ist heute Stand der Technik und die Vielzahl der entwickelten Stähle beeindruckend: Bereits über 2500 Stahlsorten sind im Register europäischer Stähle aufgelistet. Und beeindruckend ist auch die schon über 3000 Jahre währende Geschichte des Eisens und der Stahlerzeugung. Die Welt des Stahls entwickelt sich ständig weiter und ist inzwischen erstaunlich vielfältig, ja so komplex geworden, dass sie in der Praxis nicht leicht zu überblicken ist. Dem

Leser soll diese Welt etwas nähergebracht werden, von der Stahlerzeugung, der Weiterverarbeitung mit dem Block- und Strangguss, dem Umformen und der mechanischen Bearbeitung bis hin zur Fertigstellung, Prüfung und Verpackung der Produkte, den dabei vorwiegend genutzten Verfahren und Anlagen einschließlich der umweltgerechten Verwertung und Entsorgung von Abfällen. Dabei wird auch auf interessante und neuartige Techniken und Anwendungen hingewiesen.

Nicht hochwissenschaftlich und allumfassend, aber informativ und spannend, strukturiert, vor allem verständlich und mit konkreten Beispielen aus der Praxis, teils auch mit historischen Bezügen – so soll ein Blick in die Welt des Stahls gewährt werden. Eine Zeittafel informiert über wichtige Eckpunkte der Eisen- und Stahlerzeugung im zeitlichen Abgleich zu gesellschaftlichen und technischen Ereignissen. Und in einem Glossar werden abschließend Begriffe und Abkürzungen aus der Praxis der Stahlmetallurgie, der Stahlverarbeitung und der Werkstoffprüfung erklärt, um sich in der Welt des Stahls schneller zurecht zu finden.

Mein Dank gilt den Gesellschaftern der BGH Edelstahl Gruppe, insbesondere den Herren Rüdiger und Sönke Winterhager, die die Entstehung dieses Buches gefördert haben. Die BGH Edelstahlwerke GmbH stellte freundlicherweise einige Fotos aus der Produktion zur Verfügung und genehmigte die Veröffentlichung von Fotos, die ich während meiner Tätigkeit in den Unternehmen der BGH-Gruppe für Schulungszwecke aufgenommen habe.

Für die fachliche Unterstützung bei der Erarbeitung und Sichtung des Manuskriptes danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Zilly, Professor für Werkstoffkunde an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg, Stuttgart. Wertvolle Hinweise zur Stahlerzeugung und zur Chronik der Eisenherstellung und -verarbeitung gab Herr Dr.-Ing. habil. Bernd Lychatz, Institut für Eisen- und Stahltechnologie der TU Bergakademie Freiberg. Herrn Frieder Kumm M.A., Senior Editor, Lektorat Bauwesen des Verlages Springer Vieweg, gilt mein Dank für die Motivation und die Betreuung während der Entstehung des Manuskriptes und bei der Gestaltung des Buches. Schließlich haben Herr Amose Stanislaus als Projektkoordinator sowie die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Produktion von Springer Nature großen Anteil daran, dass dieses Buch nun so vorliegt und erschienen ist. Meinen Dank dafür.

Meinem Bruder, Dr.-Ing. Christian Schlegel, danke ich für seine Hilfe beim Korrekturlesen des Manuskriptes. Und auch meiner lieben Frau Birgit danke ich herzlich dafür, dass sie mir immer den Rücken freigehalten und auch mit ihren kritischen Bemerkungen zu verständlichen Formulierungen beigetragen hat.

Dr.-Ing. Joachim Schlegel

Inhaltsverzeichnis

1	Systematisierung der Werkstoffe	1
	Literatur	9
2	Stahl – der Werkstoff	11
2.1	Was ist Stahl?	11
2.2	Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm	13
2.3	Bezeichnungssystem und Einteilung der Stähle	15
2.4	Ausgewählte Stähle und Sonderwerkstoffe	25
2.4.1	Qualitätsstähle	25
2.4.2	Nichtrostende Edelstähle	31
2.4.3	Werkzeugstähle (Kaltarbeitsstähle, Warmarbeitsstähle, Schnellarbeitsstähle)	40
2.4.4	Edelbaustähle (Vergütungs-, Einsatz- und Nitrierstähle)	47
2.4.5	Nickel- und Sonderwerkstoffe	53
2.4.6	Sonstige Stähle	58
	Literatur	65
3	Legierungselemente und Stahleigenschaften	67
3.1	Eigenschaften von Stahl	68
3.1.1	Physikalische Eigenschaften	68
3.1.2	Mechanisch-technische Eigenschaften	69
3.1.3	Technologische Eigenschaften	70
3.1.4	Chemisch-technische Eigenschaften	72
3.1.5	Umwelteigenschaften	73
3.2	Grundlagen der Legierungstechnik	73
3.3	Chemische Elemente im Stahl sowie deren Wirkung auf die Stahleigenschaften	78
3.3.1	Gasförmige Elemente	78
3.3.2	Feste Elemente – Nichtmetalle	80

3.3.3	Feste Elemente – Halbmetalle	83
3.3.4	Feste Elemente – Metalle	86
3.3.5	Begleit- bzw. Spurenelemente	107
	Literatur	109
4	Stahlherstellung	111
4.1	Aus der Geschichte des Stahls	111
4.2	Stahlerzeugung	122
4.2.1	Hochofen-Konverter-Route	123
4.2.2	Sonstige Eisenerz-Reduktionsverfahren	125
4.2.3	Elektrostahlerzeugung	126
4.3	Nachbehandlung von Stahl	129
4.3.1	Pfannenmetallurgie	130
4.3.2	Umschmelzverfahren	134
4.4	Urformen/Gießen	138
4.4.1	Grundlagen des Gießens von Stahl	138
4.4.2	Blockguss	141
4.4.3	Strangguss	145
	Literatur	152
5	Umformen	153
5.1	Grundlagen der Metallformung	154
5.2	Umformverfahren	156
5.2.1	Schmieden	158
5.2.1.1	Grundlagen	158
5.2.1.2	Freiformschmieden	166
5.2.1.3	Gesenkschmieden	167
5.2.1.4	Prägen	169
5.2.2	Fließpressen	172
5.2.3	Strangpressen	174
5.2.4	Walzen	176
5.2.4.1	Grundlagen des Walzens	176
5.2.4.2	Walzverfahren	178
5.2.5	Tiefziehen	200
5.2.6	Hydroforming-Verfahren	202
5.2.7	Innen-Hochdruck-Umformen	202
5.2.8	Hochenergie-Umformen	203
5.2.9	Ziehen	204
5.2.9.1	Drahtziehen	205
5.2.9.2	Stabziehen	218
5.2.9.3	Rohrziehen	219
5.2.9.4	Walzziehen	220

5.2.10	Sonderformgebungsverfahren	221
5.2.10.1	Pulvermetallurgie	222
5.2.10.2	Additive Verfahren (3D-Druck)	227
	Literatur	231
6	Wärmebehandlung von Stahl	233
6.1	Vorbemerkung	233
6.2	Wärmebehandlungsarten	238
6.2.1	Normalglühen	238
6.2.2	Weichglühen	240
6.2.3	Rekristallisationsglühen	243
6.2.4	Diffusionsglühen	245
6.2.5	Lösungsglühen	246
6.2.6	Spannungsarmglühen	246
6.2.7	Härten	247
6.2.7.1	Umwandlungshärten	248
6.2.7.2	Anlassen	249
6.2.8	Ausscheidungshärten	251
6.2.9	Kaltverfestigen	252
6.2.10	Presshärten	253
6.3	Anlagen zur Wärmebehandlung	254
	Literatur	258
7	Werkstoffprüfung	259
7.1	Grundlagen	259
7.2	Zerstörende Prüfungen	262
7.2.1	Zugversuch	263
7.2.2	Härteprüfung	267
7.2.3	Kerbschlagbiegeversuch	272
7.2.4	Analysemethoden für Stahl	275
7.2.4.1	Röntgen-Fluoreszenz-Analyse	276
7.2.4.2	Optische Emissions-Spektrometrie	278
7.2.4.3	Verbrennungsanalyse	281
7.2.5	Metallografie	283
7.3	Zerstörungsfreie Prüfungen	286
7.3.1	Ultraschallprüfung	287
7.3.2	Wirbelstromprüfung	293
7.3.3	Sichtprüfung	298
7.3.4	Eindringprüfung	299
7.3.5	Magnetpulverprüfung	300
7.3.6	Rauheitsmessung	303
7.4	Prüfen und Messen	306
	Literatur	310

8	Verfahren der Fertigungstechnik	311
8.1	Fügen	312
8.1.1	Stoffschlüssige Verbindungen	312
8.1.2	Kraftschlüssige Verbindungen	315
8.1.3	Formschlüssige Verbindungen	317
8.1.4	Fügen durch Einpressen, Gießen, Umformen	318
8.2	Beschichten	321
8.2.1	Nichtmetallische Beschichtungen	324
8.2.2	Metallische Beschichtungen	325
8.2.2.1	Schmelztauchbeschichten	326
8.2.2.2	Galvanisieren	327
8.2.2.3	Thermisches Spritzen	329
8.2.2.4	Aufdampfen (Sputtern)	332
8.2.2.5	Plattieren	333
8.3	Spanende Bearbeitung	333
8.3.1	Grundlagen	334
8.3.2	Drehen	340
8.3.3	Fräsen	344
8.3.4	Hobeln, Stoßen	346
8.3.5	Schälen	347
8.3.6	Schleifen	349
8.3.7	Bohren	354
8.3.8	Erodieren	358
8.3.9	Feinbearbeiten	360
8.3.10	Bearbeiten von Stabenden	363
8.4	Trennen	365
8.4.1	Schneiden	366
8.4.2	Sägen	367
8.4.3	Trennschleifen	367
8.4.4	Wasserstrahlschneiden	369
8.4.5	Thermisches Trennen	370
	Literatur	373
9	Adjustage	375
9.1	Oberflächenbehandeln	376
9.2	Richten	378
9.3	Fertigmachen, Verpacken und Versand	382
	Literatur	386
10	Nebenprodukte und Abfälle	387
10.1	Grundlagen	387
10.2	Abgas	390
10.3	Schrott	390

10.4 Schlacke	394
10.5 Sonstige Wertstoffe und Abfälle	398
Literatur	403
11 Stahl im Alltag	405
Literatur	425
12 Stahl in der Zukunft	427
Literatur	429
13 Zeittafel zu Eisen und Stahl	431
Literatur	434
Glossar	435
Weiterführende Literatur	503
Stichwortverzeichnis	505



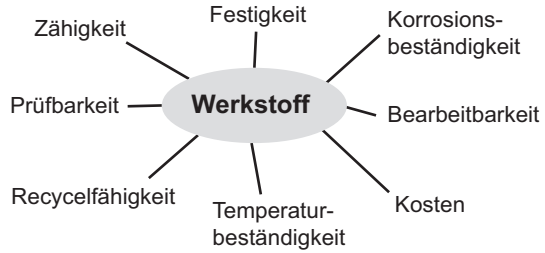
- ▶ Die Geschichte der Menschheit ist eng mit der Entwicklung und dem Einsatz von Werkstoffen verbunden. Diese prägten sogar verschiedene Zeitperioden wie die Steinzeit, Bronzezeit und Eisenzeit. Es war ein mühsamer, langer Weg: vom Faustkeil aus Stein über die Nutzung bearbeiteter, gediegener Metalle wie Gold, Silber und Kupfer, die Entdeckung der ersten Legierung Bronze bis hin zur heutigen gezielten Werkstoffentwicklung. Metallurgische Verfahren und Anlagen, Verarbeitungstechnologien und Nutzungskonzepte mussten erarbeitet und umgesetzt werden. Die Triebkraft hierfür war der mit dem Fortschritt der Menschheit einhergehende, ständig zunehmende Bedarf an Werkstoffen.

„Werkstoffe nach Maß“ – belastbar, nachhaltig, leicht, aber hochfest, recyclebar, ja intelligent – solche sind heute schon herstellbar. Die Anforderungen jedoch steigen weiter. Dabei müssen die komplexen Eigenschaften eines Werkstoffes gemäß Abb. 1.1 für seinen künftigen Verwendungszweck betrachtet werden (Weißbach et al., 2018), z. B.:

- *Zustand des Werkstoffes*
- *Reaktionen bei der Einwirkung anderer Stoffe*
- *Verhalten unter mechanischer Beanspruchung*
- *Verhalten bei der Fertigung (Umformung, mechanische Bearbeitung, Beschichtung usw.)*
- *Verhalten unter Umwelteinflüssen*

Die sehr komplexen Anforderungen führten dazu, dass die Werkstoffe vorwiegend nach chemischen Gesichtspunkten eingeteilt wurden. Denn diese sind im Wesentlichen auch

Abb. 1.1 Allgemeine Eigenschaften und Anforderungen an Werkstoffe



verantwortlich für die charakteristischen Eigenschaften des betreffenden Werkstoffes (Briehl, 2014; Kutz, 2013). Heute werden Werkstoffe in die Hauptgruppen metallische Systeme, Halbleiter und nichtmetallische Systeme gegliedert (Abb. 1.2).

Die wichtigsten Werkstoffgruppen werden nachfolgend nach ihren Eigenschaften charakterisiert.

Metalle (75 % aller chemischen Elemente).

Metalle weisen eine metallische Bindung auf, sind meist glänzend, plastisch umformbar, schmelzbar, legierbar, hart oder zäh, schweißbar und recycelbar.

Wichtigste Werkstoffe:

Stähle, Gusseisen, Aluminium-, Kupfer-, Nickel-, Titanlegierungen, Edelmetalle, Sonderlegierungen, Nickel-Basislegierungen.

Beispiele:

Stahl- und Metallbau, Leichtbau, Werkzeugbau, Maschinen- und Anlagenbau, Fahrzeugbau, Schiffsbau, Medizintechnik, Textilmaschinenbau, Elektrotechnik, Elektronik, Hydraulik/Pneumatik u. v. a. m.

Metalle finden sich in allen Bereichen unseres Lebens. Die Abb. 1.3 zeigt als Beispiel eine interessante Stahlkonstruktion, die Überdachung des Sony-Centers am Potsdamer Platz in Berlin mit Stoffbahnen und 105 t Sicherheitsglas.

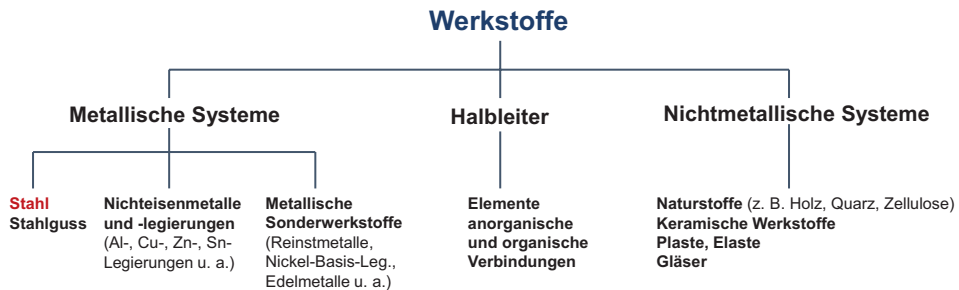


Abb. 1.2 Einteilung der Werkstoffe in Hauptgruppen



Abb. 1.3 Stahlkonstruktion zur Überdachung des Sony-Centers am Potsdamer Platz, Berlin. (Foto: Schlegel, J.)

Halbleiter

Es sind diejenigen Werkstoffe der Elektrotechnik, Elektronik und Informatik, die hinsichtlich der Leitfähigkeit zwischen den metallischen Leitern und den isolierenden Keramiken bzw. Polymerwerkstoffen stehen. Sie gelten als Funktionswerkstoffe mit den größten sozialen Auswirkungen auf die Menschheit.

Wichtigste Werkstoffe:

Silizium, Germanium, Galliumarsenide.

Beispiele:

Bauelemente für die Elektrotechnik und Elektronik, Optoelektronik, LED-lichttechnik, Mobilfunktechnik u.v.a.m., erzeugt unter Einsatz von Halbleiterwerkstoffen. Die Abb. 1.4 zeigt hierzu ein Monitor-Modul mit Bauelementen aus Halbleiterwerkstoffen.

Kunststoffe

Deren Eigenschaften sind abhängig von der Fertigung, von den Zusatzstoffen und den Temperaturbedingungen: isolierend, leicht, gut formbar, chemisch beständig, geringe Temperaturbeständigkeit, durchfärbbar, transparent bis lichtundurchlässig, gummiartig bis spröde, große Wärmeausdehnung, schlecht recycelbar, geringe Festigkeit und meist preiswert.

Wichtigste Werkstoffe:

Polyvinylchlorid, Polyethylen, Polypropylen, Polystyrol, Polyamid, Polyethylen-terephthalat.

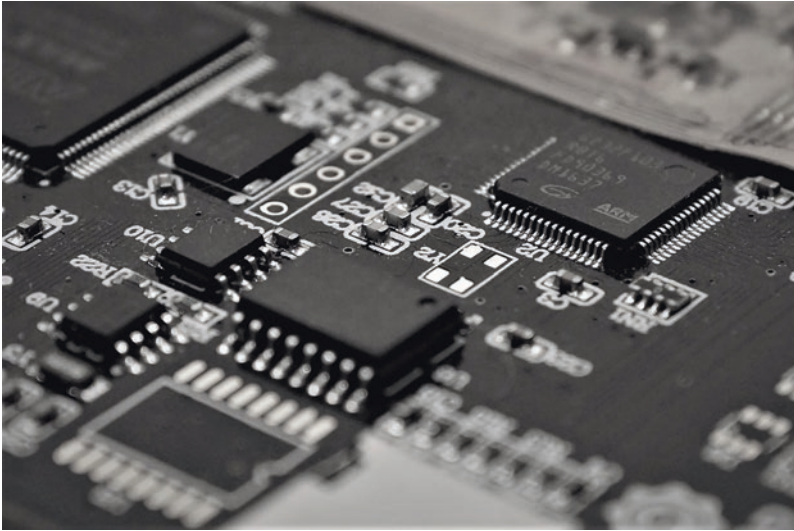


Abb. 1.4 Blick auf ein Monitor-Modul. (Foto: Schlegel, St.)

Beispiele:

Kunststoff ist in unserem täglichen Leben überall anzutreffen und ein Werkstoff für unzählige, ja fast alle Industriebereiche, für die Bereiche Haushalt, Freizeit, Sport u. v. a. Deshalb erübrigt sich eine Aufzählung. Ein schönes Beispiel zeigt die Abb. 1.5 in Form eines Kinderspielgerätes.



Abb. 1.5 Feuerwehr-Drehleiter aus Kunststoff. (Foto: Schlegel, J.)

Gläser und Keramiken

Glas und Keramik werden meist zusammen erwähnt, da sie ähnliche Eigenschaften aufweisen: isolierend, schwer, hart, verschleißfest, spröde, chemisch und temperaturbeständig, transparent bis undurchsichtig und ungiftig.

Wichtigste Werkstoffe:

Tonminerale, Silizide, Oxide, Karbide, Nitride, Boride, Hartstoffe

Beispiele für Glasanwendungen:

Verglasungen am Bau (Fenster, Türen, Fassaden, Überdachungen, sonstige Verglasungen), Fahrzeugindustrie, Haushaltswaren, Getränkeindustrie, Kunstwerke u. v. a. Ein Beispiel für einen einmaligen und besonders kreativen Glaseinsatz ist die Hundertwassertoilette in Kawakawa auf der Nordinsel Neuseelands. Sie besitzt eine Glas-Flaschenwand, erkennbar in Abb. 1.6. Im Mauerwerk hat der berühmte Künstler *Friedensreich Hundertwasser* (1928–2000) bunte Glasflaschen eingelassen, eine fantasievolle Eigenart, wie er sie in seiner Architektur gepflegt hat.

Abb. 1.6 Ausschnitt aus der Glas-Flaschenwand von der Hundertwassertoilette in Kawakawa, Neuseeland, 1999 errichtet. (Foto: Schlegel, J.)



Abb. 1.7 Typische Keramikübertöpfe für Pflanzgefäße (Foto: Schlegel, J.)



Beispiele für Keramikanwendungen:

Schneidwerkstoffe, Teile und Auskleidungen für Anlagen und Apparate der Chemieindustrie, Isolatoren, Verschleißteile, Beschichtungen und viele andere Teile in der Elektrotechnik/Elektronik. Auch im Haushalt sind fast immer Keramikwaren zu finden, z. B. in Form von Geschirr, Vasen und Übertöpfen (Abb. 1.7).

Verbundwerkstoffe

Als Verbundwerkstoffe werden Strukturwerkstoffe nach Maß und mit ungewöhnlichen, multifunktionalen Eigenschaftskombinationen betrachtet. Sie besitzen eine hohe Festigkeit und Steifigkeit, sind leicht, beständig, meist teuer, schwer zu reparieren und schlecht recycelbar.

Arten von Verbundwerkstoffen:

- Faser-Verbundwerkstoffe
- Teilchen-Verbundwerkstoffe
- Schicht-(Sandwich-)Verbundwerkstoffe

Die Abb. 1.8 zeigt schematisch diese drei Arten von Verbundwerkstoffen.

Arten von Verbundwerkstoffen



Abb. 1.8 Schematische Darstellung des Aufbaus von Verbundwerkstoffen

Die heute bekannten und wichtigsten Verbundwerkstoffe sind:

- glasfaserverstärkte Kunststoffe
- kohlefaserverstärkte Kunststoffe
- Metallmatrix-Verbundwerkstoffe
- ständig neue Werkstoffkombinationen

Beispiele:

Teile (meist Leichtbau) für den Fahrzeug-, Flugzeug- und Schiffsbau, Weltraumtechnik, Motorsport, Modellbau, Sportgeräte, Medizintechnik u. v. a. m.

Betrachtet man zu diesen Werkstoffgruppen auch die Naturstoffe, wie z. B. Leder, so kommt man schnell zu einem Produkt, das alle genannten Werkstoffgruppen in einer ingenieurtechnisch herausragenden, mehr oder weniger nachhaltigen, schönen und sehr mobilen Form millionenfach vereint: unser Automobil („Selbstbeweger“, Kraftwagen).

Die genannten Werkstoffe Metalle, Kunststoffe, Glas und Keramik weisen zwei unterschiedliche feste Zustände auf, siehe Abb. 1.9. Diese hängen von den Bedingungen bei der Erstarrung ab, d. h. vom Temperaturgradienten beim Übergang vom flüssigen in den festen Zustand (Hornbogen et al., 2019).

Der kristalline Zustand: Metalle, kristalline Keramik, teilkristalline Kunststoffe.

Im Gefügestand *kristallin* liegt eine regelmäßige Anordnung der Bausteine (Atome) vor, und es ist ein stabiler Zustand. Die Erstarrung erfolgt sprunghaft mit einem Phasenübergang bei einem definierten Schmelzpunkt (Temperatur der Umwandlung flüssig – fest).

Der amorphe Zustand: Glas, Kunststoffe, metallische Gläser

Ein Zustand *amorph* ist als „unterkühlte Schmelze“ zu verstehen (wie z. B. beim Glas). Die Atome befinden sich in einer regellosen Anordnung. Die Dichte dieses Zustandes ist geringer als beim kristallinen Zustand.

Abb. 1.9 Darstellung der Werkstoffzustände kristallin und amorph

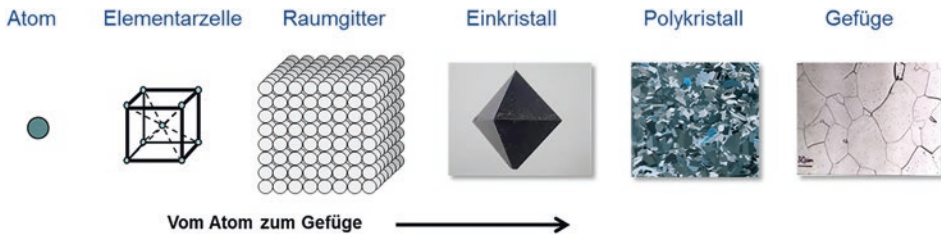
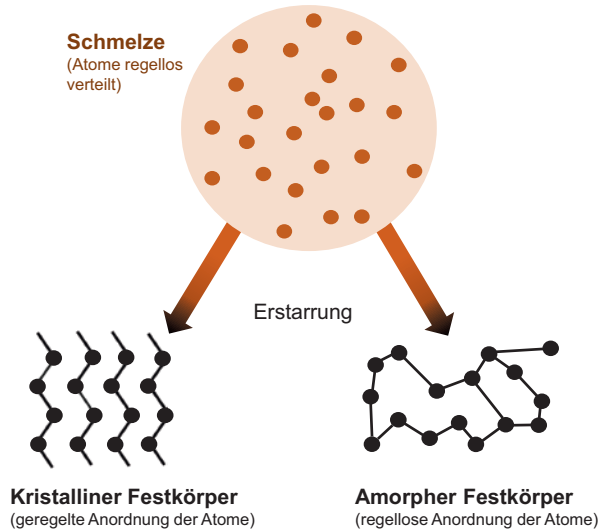


Abb. 1.10 Vom Atom, dem kleinsten Baustein, bis hin zum vielkristallinen Gefüge eines Stahls

Technische Metalle sind fast ausschließlich *vielkristallin* (Eisenkolb, 1958 ff.). Sie bilden im festen Zustand Kristalle, die sich wiederum aus Atomen in unterschiedlichen räumlichen Anordnungen (Gitter) zusammensetzen. Die Kristalle nennt man auch Körner und deren Verband Gefüge. Interessant ist ein Blick ins Innere eines Metalls (Abb. 1.10): Vom Gefüge eines nutzbaren Gegenstandes, z. B. eines Bohrers, einer Motorenwelle oder eines Pleuels, bis hin zu den kleinsten Bausteinen, den Atomen.

Hinweis

Die folgenden Ausführungen beziehen sich nur auf den Werkstoff **Stahl**; und zwar auf den Stahl als das „schmiedbare“, umformbare Eisen mit weniger als 2,06 % Kohlenstoffgehalt (also nicht Gusseisen).

Literatur

Briehl, H. (2014). *Chemie der Werkstoffe*. Springer Vieweg

Eisenkolb, F. (1958). *Einführung in die Werkstoffkunde. Bd. I – Allgemeine Metallkunde, Bd. II – mechanische Prüfung metallischer Werkstoffe, Bd. III – Eisenwerkstoffe*. Verlag Technik Berlin

Hornbogen, E., Warlimont H., & Skrotzki, B. (2019). *Metalle: Struktur und Eigenschaften der Metalle und Legierungen*. Springer Vieweg

Kutz, K.-H. (2013). *Struktur und Eigenschaften – Werkstoffe nach Maß*. Universität Rostock. Zentrum für Qualitätssicherung in Studium und Weiterbildung

Weißbach, W., Dahms, M. et al. (2018). *Werkstoffe und ihre Anwendungen: Metalle, Kunststoffe und mehr*. Springer Vieweg



- ▶ Stähle faszinieren immer wieder mit ihren vielen, oft auch außergewöhnlichen Eigenschaften, mit einem großen Anwendungspotenzial und weltweit zunehmender Erzeugung.
 - Was charakterisiert den Werkstoff Stahl?
 - Wie werden Stähle eingeteilt bzw. unterschieden?
 - Wie sind Stähle zusammengesetzt?
 - Welche Eigenschaften besitzen Stähle und wie können diese beeinflusst werden?
 - Wo werden Stähle hauptsächlich verwendet?

Hierzu soll eine Orientierung gegeben werden mit Erläuterungen zu den Grundlagen des Werkstoffes Stahl, zu den Möglichkeiten der Klassifizierung von Stählen sowie auch mit Kurzporträts zu ausgewählten Stahlsorten.

2.1 Was ist Stahl?

Stahl ist umformbares, schmiedbares Eisen mit einem Kohlenstoffgehalt kleiner als 2,06 Masse-% (meistens mit < 1 Masse-% Kohlenstoff). Bei Gehalten an Kohlenstoff über 2,06 Masse-% spricht man von Gusseisen. Stahl ist also eine Eisen-Kohlenstoff-Verbindung. Diese wird mit anderen metallischen und nicht metallischen Elementen gemischt (legiert), um Stähle mit unterschiedlichen Eigenschaften zu erhalten (Berns & Helmreich, 1980).

Dichte von Stahl: ca. 7,85 bis 7,87 g/cm³.

Schmelzpunkt (Eisen/Stahl): je nach chemischer Zusammensetzung bis zu 1536 °C.

Der Werkstoff Stahl ist vielkristallin, also aus einzelnen Kristallgittern aufgebaut. Deren Modifikationen werden durch das *Basiselement Eisen* bestimmt. Eisen als Hauptbestandteil des Stahls kommt in zwei Typen vor, und zwar als kubisch-raumzentriertes (*krz*) und kubisch-flächenzentriertes (*kfz*) Kristallgitter (Bleck, 2010).

Das kubisch-raumzentrierte Würfelgitter (α -Eisen)

Bei diesem Gittertyp sitzen je ein Eisenatom an den acht Würfecken und ein neuntes Eisenatom genau in der Würfelraummitte (Abb. 2.1).

In einem derartigen α -Eisen, das bei Temperaturen bis 911 °C existiert, können sich maximal 0,018 Masse-% Kohlenstoff lösen. Dieser nun aus Eisen- und Kohlenstoffatomen, also aus verschiedenen Atomen bestehende Kristall wird Mischkristall genannt. Da das Eisen in diesem Fall als kubisch-raumzentriertes Gitter vorliegt (α -Eisen), erhält dieser Mischkristall die Bezeichnung α -Mischkristall und wird auch als *Ferrit* bezeichnet (lat. „Ferrum“, das „Eisen“).

Das kubisch-flächenzentrierte Würfelgitter (γ -Eisen)

Wiederum sitzen an den acht Ecken des Würfelgitters Eisenatome. Die Würfelraummitte bleibt jedoch frei. Weitere Eisenatome sind jeweils in der Mitte der sechs Würfelflächen angeordnet, wie in Abb. 2.2 gezeigt.

Abb. 2.1 Das kubisch-raumzentrierte Würfelgitter (*krz*)

**Kubisch-raumzentriertes Würfelgitter (*krz*)
 α -Eisen**

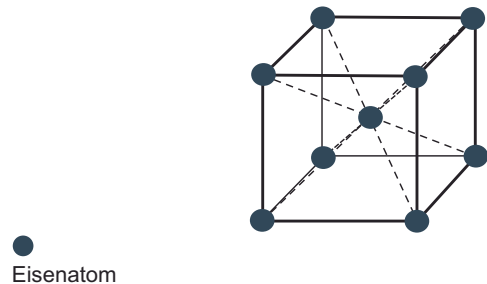
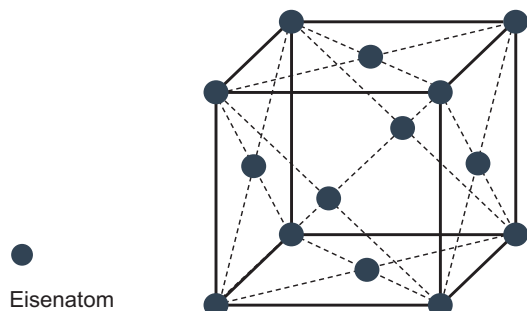


Abb. 2.2 Das kubisch-flächenzentrierte Würfelgitter (*kfz*)

**Kubisch-flächenzentriertes Würfelgitter (*kfz*)
 γ -Eisen**



In diesem γ -Eisen, das nur im Temperaturbereich von 911 bis 1398 °C auftritt, lösen sich max. 2,1 Masse-% Kohlenstoff. Dieser γ -Mischkristall wird *Austenit* genannt, nach Sir *William Chandler Roberts-Austen* (1843–1902). Er war ein britischer Metallurge, der sich mit der Erforschung der physikalischen Eigenschaften von Metallen beschäftigte.

In Eisen-Kohlenstoff-Legierungen wird der Kohlenstoff auf Zwischengitterplätzen des Eisen-Kristallgitters eingelagert. Es entstehen sogenannte Mischkristalle. Diese enthalten im Gitteraufbau Atome verschiedener Legierungselemente. In Abhängigkeit von der Kristallstruktur (krz oder kfz) ist der Kohlenstoff unterschiedlich in begrenztem Umfang in den Eisengittern löslich. Bei einer Erwärmung und langsamen Abkühlung wandern die Eisenatome, und es erfolgt eine Gitterumwandlung (Phasenumwandlung α in γ bzw. γ in α). Dieser Vorgang wird bewusst bei der Wärmebehandlung ausgenutzt, um bestimmte Gefügestrukturen und somit entsprechende Eigenschaften der Stähle zu erzeugen.

- **Hinweis** Es gibt eine Vielzahl von Stählen, die eine Gitterumwandlung aufweisen, aber auch Stähle wie die ferritischen und austenitischen Stähle, die keine derartige Umwandlung zeigen.

2.2 Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm

Das wichtigste Legierungselement im Stahl ist der Kohlenstoff (C). Dieser liegt als Verbindung (Zementit – Fe_3C) vor. Im Allgemeinen wird mit höherem Kohlenstoffanteil der Stahl fester, aber auch spröder. Mit dem bekannten Eisen-Kohlenstoff-Diagramm, wie in Abb. 2.3 dargestellt, wird die Phasenzusammensetzung von Stahl in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt und von der Temperatur beschrieben.

Unten auf der Abszissenachse sind die Masse-Prozente des Kohlenstoffgehaltes aufgetragen, auf der Ordinatenachse nach oben die Temperatur in °C. Für den technischen Gebrauch wird das reine Zweistoffsystem Eisen-Kohlenstoff nur im Bereich bis max. 6,67 Masse-Prozent Kohlenstoff (Zementit – Fe_3C) und bei Normaldruck betrachtet. Dabei wird von einer sehr langsamen Abkühlung mit vollständig ablaufenden Umwandlungsvorgängen ausgegangen.

Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm liefert somit nur Aussagen über Gleichgewichtsverhältnisse. So ist der zu erwartende Zustand eines unlegierten Stahls mit einem bestimmten Kohlenstoffgehalt bei einer konkreten Temperatur bestimmbar. Auch die bei Temperaturänderungen ablaufenden Gefügeänderungen können vorhergesagt werden (Klemm, 1973). Deshalb bildet das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm auch die wichtigste Grundlage für die Wärmebehandlung von Stahl.

Erläuterungen zum Eisen-Kohlenstoff-Diagramm

Linie ACD: *Liquiduslinie*

Oberhalb dieser Linie ist die Legierung flüssig. Unterhalb dieser Linie beginnt die Erstarrung. (Primärkristallisation) der Schmelze.

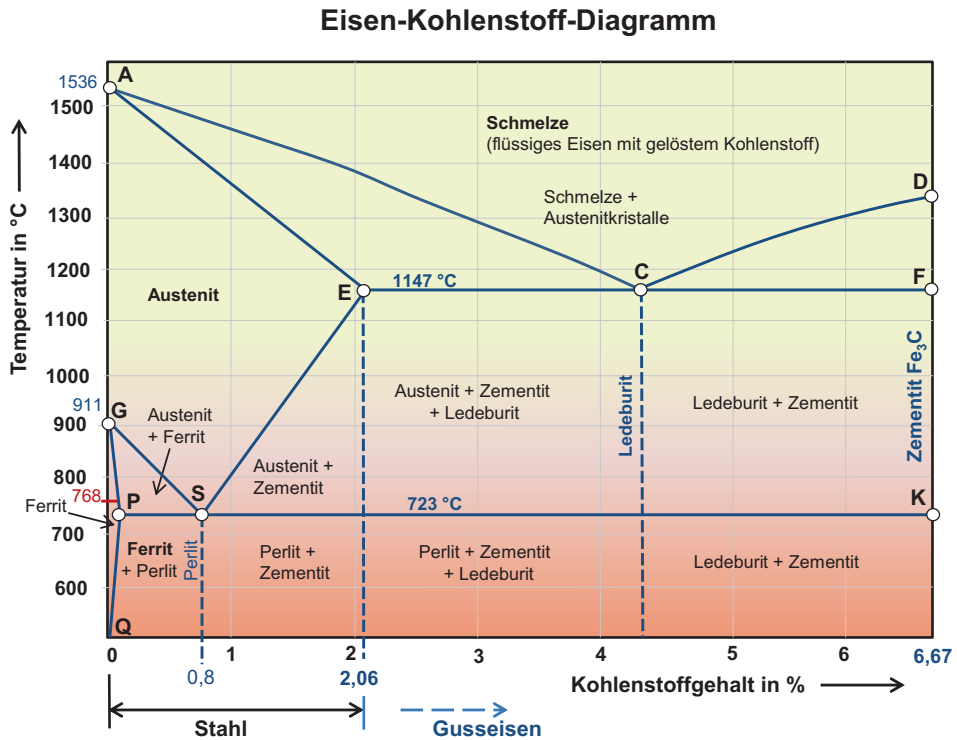


Abb. 2.3 Vereinfachte Darstellung des Eisen-Kohlenstoff-Diagramms

Linie AEFC: *Soliduslinie*

Unterhalb dieses Linienzuges ist die Legierung vollständig erstarrt.

Linie ECF: *Eutektikale*

Oberhalb dieser Linie existieren flüssige und feste Phasen nebeneinander.

Linie PSK: *Eutektoide*

Diese Linie beschreibt die konstante Temperatur 723 °C. Unterhalb dieser Linie sind die Austenit-Mischkristalle vollständig zerfallen.

Linie SE: *Löslichkeits- bzw. Sättigungslinie*

Bei Kohlenstoffgehalten zwischen 0,8 und 2,06 Masse-% wird während der Abkühlung der zu viel gelöste Kohlenstoff als Sekundärzementit (Fe_3C) ausgeschieden.

Linie GPQ: Sie begrenzt das Einphasengebiet Ferrit.

768 °C: *Curie-Temperatur* (magnetische Umwandlung) Bis zu dieser Temperatur ist Eisen ferromagnetisch, oberhalb dieser Temperatur paramagnetisch (unmagnetisch).

Ferrit: α -Mischkristall (max. 0,018 Masse-% Kohlenstoff).

Austenit: γ -Mischkristall (max. 2,06 Masse-% Kohlenstoff).

Perlit und Ledeburit:

Es sind besondere Phasengemische (Gefüge), die nur bei langsamer Abkühlung entstehen. Erfolgt eine rasche Abkühlung, z. B. durch Abschrecken in Wasser, wird aus dem Austenit ein hartes und sprödes Gefüge, *Martensit* genannt.

Zementit Fe₃C:

Es ist eine Gefügephase mit 6,67 Masse-% Kohlenstoff, die in drei unterschiedlichen Formen bei gleicher Zusammensetzung auftreten kann:

Es sind besondere Phasengemische (Gefüge), die nur bei langsamer Abkühlung entstehen. Erfolgt eine rasche Abkühlung, z. B. durch Abschrecken in Wasser, wird aus dem Austenit ein hartes und sprödes Gefüge, *Martensit* genannt.

Primärzementit: primäre Kristallisation aus der Schmelze, Linie CD

Sekundärzementit: Ausscheidung aus dem Austenit, Linie ES

Tertiärzementit: Ausscheidung aus dem Ferrit, Linie PQ

Beispiel

Die Änderung des Gefüges bei reinem Eisen und bei einem Stahl mit 1 Masse-% Kohlenstoff während der Erwärmung und Abkühlung zeigen Abb. 2.4 und 2.5.

2.3 Bezeichnungssystem und Einteilung der Stähle

- So zahlreich und verschieden die Stähle, so vielfältig sind auch die Bezeichnungen: Stahlart, Stahlsorte, Stahlgüte, Stahlqualität, Stahlname, Stahlmarke, Werkstoffnummer, Markenname. Sich hier in der Stahlpraxis zurechtzufinden, ist nicht ganz einfach. Für eine Identifizierung und Zuordnung der Stähle sind in der DIN EN 10.027–1 Regeln für die Bezeichnung mittels Kurznamen sowie in der DIN EN 10.027–2 Regeln für ein Nummernsystem festgeschrieben. Ausführlich wird dieses Bezeichnungssystem zum Beispiel beschrieben im Stahlschlüssel-Taschenbuch (Wegst & Wegst, 2019). Davon ausgehend zeigt die Abb. 2.6 eine zum Verständnis vereinfachte Darstellung des Bezeichnungssystems der Stähle mit Beispielen für verschiedene Stahlgüten.

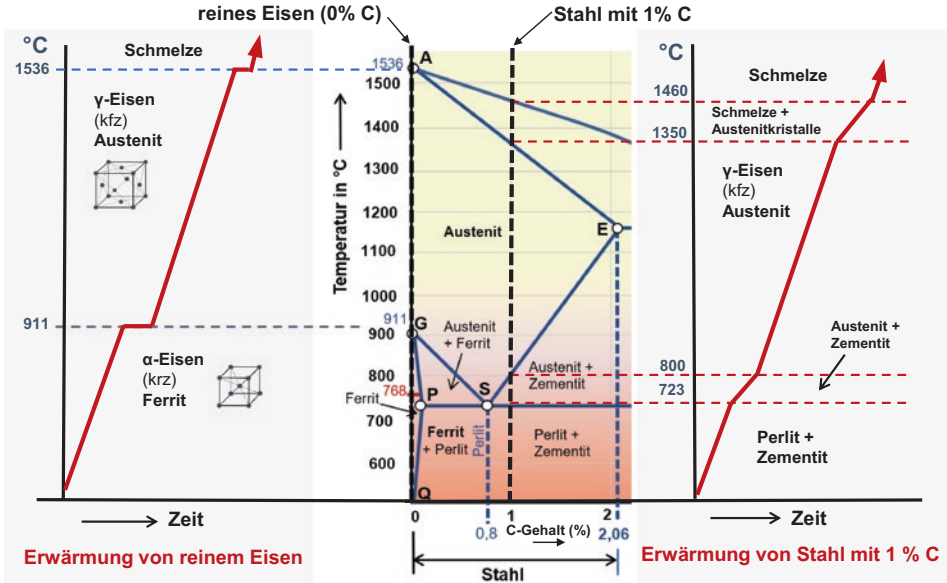


Abb. 2.4 Ablauf der Gefügeänderung bei der Erwärmung von reinem Eisen (0 % Kohlenstoff) und von einem Stahl mit 1 Masse-% Kohlenstoff

Gefügeänderung bei der Abkühlung

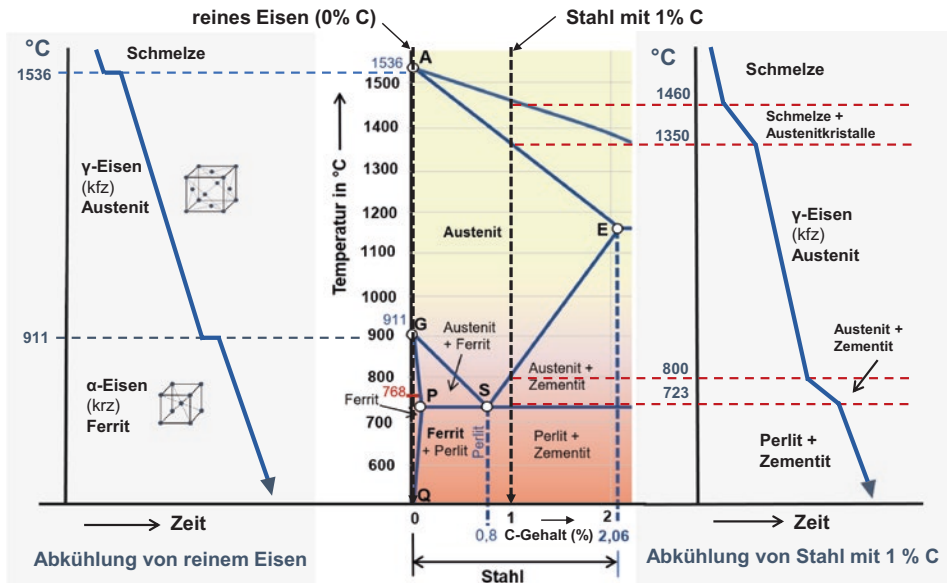


Abb. 2.5 Ablauf der Gefügeänderung bei der Abkühlung von reinem Eisen (0 % Kohlenstoff) und von einem Stahl mit 1 Masse-% Kohlenstoff

Stahlsorten	Hauptsymbole		Zusatzsymbole												
	Buchstabe	C-Gehalt													
<i>Unlegierte Stähle mit Mangan-Gehalt $\leq 1\%$</i>															
C35E (1.1181)	C - Kohlenstoff	35 (/100 = 0,35 % C)	E - vorgeschriebener max. S-Gehalt												
<i>Unlegierte Stähle mit Mangan-Gehalt $\geq 1\%$, unlegierte Automatenstähle, legierte Stähle</i>															
28Mn6 (1.1170)		28 (/100 = 0,28 % C)	Mn - Mangan 6 (/4 = 1,5 % Mn) <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th>Elemente</th> <th>Faktor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cr, Co, Mn, Ni, Si, Mn</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Al, Be, Cu, Mo, Nb,</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Pb, Ta, Ti, V, Zr</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>Ce, N, P, S</td> <td>1000</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>1000</td> </tr> </tbody> </table>	Elemente	Faktor	Cr, Co, Mn, Ni, Si, Mn	4	Al, Be, Cu, Mo, Nb,	10	Pb, Ta, Ti, V, Zr	100	Ce, N, P, S	1000	B	1000
Elemente	Faktor														
Cr, Co, Mn, Ni, Si, Mn	4														
Al, Be, Cu, Mo, Nb,	10														
Pb, Ta, Ti, V, Zr	100														
Ce, N, P, S	1000														
B	1000														
<i>Legierte, hochlegierte Stähle</i>															
X5CrNi18-10 (1.4301)	X - legierter Stahl	5 (/100 = 0,05 % C)	CrNi18-10 (18 % Chrom, 10 % Nickel) Kein Faktor!												
<i>Schnellarbeitsstähle</i>															
HS6-5-2 (1.3343)	HS - Schnellarbeitsstahl (high-speed-steel)	6-5-2 (6 % Wolfram, 5 % Molybdän, 2 % Vanadium) Gehalt der Legierungselemente in % in der Reihenfolge: W - Mo - V - Co													

Abb. 2.6 Übersicht zum Bezeichnungssystem der Stähle

Stahlkurznamen

Sie geben Hinweise auf die Verwendung, auf die mechanischen und physikalischen Eigenschaften oder auf die chemische Zusammensetzung der Stähle. Die Stahlkurznamen bestehen aus Haupt- und Zusatzsymbolen, die jeweils Buchstaben (z. B. chemische Symbole) oder Zahlen (für Gehalte der Legierungselemente) sein können. Diese Angaben unterscheiden sich bei unlegierten, legierten und hochlegierten Stählen sowie bei Schnellarbeitsstählen (Langehenke, 2007).

Unlegierte Stähle (Qualitätsstähle) werden mit dem Buchstaben C für Kohlenstoff gekennzeichnet, gefolgt vom Kohlenstoffgehalt. Die hierbei angegebene Zahl für den Kohlenstoffgehalt ist immer mit 100 multipliziert. D. h., um den realen Gehalt zu erkennen, muss diese Zahl durch 100 geteilt werden.

Beispiel:

C15 – ein unlegierter Stahl mit $15/100 = 0,15$ Masse-% Kohlenstoff.

Bei *unlegierten Stählen mit Mangan-Gehalten ≥ 1 Masse-%* wird an erster Stelle der Kohlenstoffgehalt, ebenfalls multipliziert mit dem Faktor 100 angegeben. Und dies im Gegensatz zu den unlegierten Stählen mit Mangan-Gehalten ≤ 1 Masse-% immer ohne den Buchstaben C. Darauf folgen die chemischen Kurzzeichen für die Legierungselemente und die zugehörigen Massegehalte dieser Legierungselemente. Zu beachten ist dabei, dass diese Massegehalte stets mit unterschiedlichen Faktoren multipliziert wurden. Diese Multiplikatoren für die einzelnen Legierungselemente sind folgende:

Faktor 4: Chrom (Cr), Kobalt (Co), Mangan (Mn), Nickel (Ni), Silizium (Si), Wolfram (W)
Faktor 10: Aluminium (Al), Beryllium (Be), Kupfer (Cu), Molybdän (Mo), Niob (Nb), Blei (Pb), Tantal (Ta), Titan (Ti), Vanadium (V), Zirkonium (Zr)

Faktor 100: Cer (Ce), Stickstoff (N), Phosphor (P), Schwefel (S), Kohlenstoff (C)

Faktor 1000: Bor (B)

Also müssen wiederum zum Erkennen der realen Legierungsgehalte die angegebenen Zahlen im Stahlkurznamen durch die zugehörigen Multiplikatoren geteilt werden.

Beispiel:

28Mn6 – ein legierter Stahl mit $28/100=0,28$ Masse-% Kohlenstoff und $6 / \text{Faktor } 4 = 1,5$ Masse-% Mangan.

Hochlegierte Stähle weisen stets einen Masseanteil unterschiedlichster Legierungselemente von gesamt mindestens 5 Masse-% auf. Diese Stähle werden mit einem X am Anfang des Kurznamens gekennzeichnet. Danach folgen der Kohlenstoffgehalt, wieder grundsätzlich multipliziert mit dem Faktor 100, und die weiteren Legierungselemente mit ihren chemischen Kurzzeichen. Dabei erfolgt die Angabe der Legierungselemente in der Reihenfolge beginnend mit dem höchsten Gehalt. Daran schließen sich die jeweils zu den Legierungselementen zugehörigen Masseanteile an. Diese werden jedoch nicht mit einem Faktor multipliziert (typisch für hochlegierte Stähle!).

Beispiel:

X5CrNi18-10 – ein hochlegierter, austenitischer, nicht rostender Edelstahl mit 0,05 Masse-% Kohlenstoff, ca. 18 Masse-% Chrom und 10 Masse-% Nickel. Dieser Stahl ist der erste kommerzielle, nichtrostende Stahl, der auch unter V2A bekannt ist und der Werkstoffnummer 1.4301 entspricht.

Eine Ausnahme bilden die *Schnellarbeitsstähle*. Hier gilt ein besonderes Bezeichnungssystem. An erster Stelle steht die Kennzeichnung HS, gefolgt von den Masseanteilen der Legierungselemente in der festgeschriebenen Reihenfolge Wolfram – Molybdän – Vanadium – Kobalt. Die Masseanteile der einzelnen Legierungselemente werden hierbei in ganzen, gerundeten Zahlen angegeben.

Beispiel:

HS 6-5-2 C – ein Standardschnellarbeitsstahl mit 6 Masse-% Wolfram, 5 Masse-% Molybdän und 2 Masse-% Vanadium (entspricht der Werkstoffnummer 1.3343).

Werkstoffnummern

Sie werden durch die Europäische Stahlregistratur vergeben und bestehen aus der Werkstoffhauptgruppennummer (erste Zahl mit Punkt), den Stahlgruppennummern (zweite und dritte Zahl) sowie den Zählnummern (vierte und fünfte Zahl). Zusätzlich können mit zwei Anhängeszahlen XX das Stahlgewinnungsverfahren und der Behandlungszustand charakterisiert werden. Abb. 2.7 zeigt dieses Nummernsystem am Beispiel des Einsatzstahls 1.5920 – 18CrNi8.