

Hans Berns  
Werner Theisen

# Eisenwerkstoffe

Stahl und Gusseisen

4. Auflage

 Springer

# Eisenwerkstoffe - Stahl und Gusseisen

4. bearbeitete Auflage

Hans Berns · Werner Theisen

# Eisenwerkstoffe - Stahl und Gusseisen

4. bearbeitete Auflage

 Springer

Professor Dr.-Ing. Hans Berns  
Professor Dr.-Ing. Werner Theisen  
Ruhr-Universität Bochum  
Lehrstuhl Werkstofftechnik  
44780 Bochum  
Deutschland  
Email: berns@wtech.rub.de  
wth@wtech.rub.de

ISBN 978-3-540-79955-9 (Hardcover)

ISBN 978-3-642-31923-5 (Softcover)

ISBN 978-3-540-79957-3 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-540-79957-3

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

© 2008, 2006, 1993, 1991 Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Softcover 2013

Die Autoren übernehmen keine Gewähr für die Aktualität, Korrektheit, Vollständigkeit oder Qualität der bereitgestellten Informationen. Haftungsansprüche gegen den Autor, welche sich auf Schäden materieller oder ideeller Art beziehen, die durch die Nutzung oder Nichtnutzung der dargebotenen Informationen bzw. durch die Nutzung fehlerhafter oder unvollständiger Informationen verursacht wurden, sind grundsätzlich ausgeschlossen, sofern seitens der Autoren kein nachweislich vorsätzliches oder grob fahrlässiges Verhalten vorliegt.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk- sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

*Satz:* Digitale Druckvorlage der Autoren

*Herstellung:* le-tex publishing services oHG

*Einbandgestaltung:* eStudioCalamar S.L., F. Steinen-Broo, Girona, Spain

Gedruckt auf säurefreiem Papier

9 8 7 6 5 4 3 2 1

springer.com

---

## Vorwort

Die Weltjahresproduktion von Eisenwerkstoffen ist in den letzten zehn Jahren um mehr als 60 % auf rund 1.3 Milliarden Tonnen angestiegen. Sie übertrifft die Summe der Erzeugung aller anderen metallischen Werkstoffe um mehr als eine Größenordnung. Die Bedeutung der Eisenwerkstoffe beruht unter anderem auf der Vielzahl unterschiedlicher Eigenschaften, die sich durch Legieren und Verarbeiten einstellen lassen. Diese Zusammenhänge sollen im vorliegenden Buch dargestellt werden, und zwar für Stahl und Gusseisen gemeinsam. Im Teil A werden die Grundlagen durch die Kapitel *Konstitution*, *Gefüge*, *Wärmebehandlung* und *Eigenschaften* vorgestellt. Der umfangreichere Teil B befasst sich mit der Verarbeitung und Anwendung von Normwerkstoffen und neueren Entwicklungen. Es geht um *unlegierte* und *hochfeste Werkstoffe*, um *Werkstoffe für die Randschichtbehandlung* und für *Werkzeuge*, sowie um *chemisch beständige*, *warmfeste* und *Funktionswerkstoffe*.

Das Buch richtet sich an Ingenieurinnen und Ingenieure, die mit Eisenwerkstoffen zu tun haben, ihre Kenntnisse vertiefen möchten oder einen Rat suchen. Die Autoren schaffen aufgrund ihrer langjährigen Industrietätigkeit die nötige Praxisnähe. Aber auch Studierende greifen zu diesem Buch, wie die vorangehenden Auflagen gezeigt haben.

Die Redaktion bis zur druckfähigen L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X-Version wurde im Lehrstuhl Werkstofftechnik von Herrn Dr.-Ing. Markus Karlsruhn geleitet. Ihm und weiteren Mitwirkenden wie Dipl.-Ing. Stephan Huth, Dipl.-Ing. Tanja Macher und cand.-ing. Marius Weber danken wir von Herzen.

Bochum, Frühjahr 2008

*Hans Berns*

*Werner Theisen*

Hinweis: Soweit nicht anders angegeben, stehen die Legierungsgehalte in % für Masseprozent.

# Inhaltsverzeichnis

<b>A Grundlagen der Eisenwerkstoffe</b>	<b>3</b>
H. BERNIS	
A.1 Konstitution . . . . .	3
A.1.1 Reines Eisen . . . . .	5
A.1.2 Eisen-Kohlenstoff . . . . .	9
A.1.2.1 System Eisen-Zementit . . . . .	11
A.1.2.2 System Eisen-Graphit . . . . .	13
A.1.3 Legiertes Eisen . . . . .	14
A.2 Gefüge . . . . .	21
A.2.1 Gleichgewichtsnahes Gefüge . . . . .	26
A.2.1.1 Stahl . . . . .	26
A.2.1.2 Gusseisen . . . . .	31
A.2.2 Gleichgewichtsfernes Gefüge . . . . .	36
A.2.2.1 Formgebung . . . . .	37
A.2.2.2 Austenitumwandlung . . . . .	38
A.2.2.3 Morphologie nach Abschrecken . . . . .	42
A.2.2.4 Wiedererwärmen von Abschreckgefügen . . . . .	48
A.2.3 Morphologie von Zementit und Graphit . . . . .	53
A.3 Wärmebehandlung . . . . .	57
A.3.1 Glühverfahren . . . . .	58
A.3.1.1 Wasserstoffarmglühen . . . . .	58
A.3.1.2 Spannungsarmglühen . . . . .	58
A.3.1.3 Weichglühen von Stahl . . . . .	59
A.3.1.4 Weichglühen von Gusseisen . . . . .	60
A.3.1.5 Normalglühen . . . . .	62
A.3.1.6 Temperglühen von Gusseisen . . . . .	63
A.3.1.7 Lösungsglühen . . . . .	63
A.3.1.8 Diffusionsglühen . . . . .	63
A.3.2 Härten und abgeleitete Verfahren . . . . .	64
A.3.2.1 Härten . . . . .	64
A.3.2.2 Anlassen . . . . .	68
A.3.2.3 Vergüten . . . . .	69
A.3.2.4 Umwandeln in der Bainitstufe . . . . .	70
A.3.3 Randschichtbehandlung/Beschichtung . . . . .	71

## VIII Inhaltsverzeichnis

A.3.4	Nebenwirkungen . . . . .	73
A.3.4.1	Thermische Nebenwirkungen . . . . .	73
A.3.4.2	Thermochemische Nebenwirkungen . . . . .	74
A.4	Eigenschaften . . . . .	79
A.4.1	Mechanische Eigenschaften . . . . .	79
A.4.1.1	Beanspruchung . . . . .	79
A.4.1.2	Verhalten von Stahl . . . . .	82
A.4.1.3	Verhalten von grauem Gusseisen . . . . .	99
A.4.1.4	Verhalten von weißem Gusseisen . . . . .	102
A.4.2	Tribologische Eigenschaften . . . . .	103
A.4.2.1	Reibung . . . . .	104
A.4.2.2	Verschleiß . . . . .	105
A.4.3	Chemische Eigenschaften . . . . .	109
A.4.3.1	Nasskorrosion . . . . .	109
A.4.3.2	Hochtemperaturkorrosion . . . . .	115
A.4.4	Besondere physikalische Eigenschaften . . . . .	118
A.4.4.1	Magnetische Eigenschaften . . . . .	118
A.4.4.2	Wärmeausdehnung . . . . .	120
A.4.4.3	Leitfähigkeit . . . . .	121
<b>B</b>	<b>Eisenwerkstoffe und ihre Anwendung</b>	<b>125</b>
B.1	Werkstoffe für allgemeine Verwendung . . . . .	125
B.1.1	Unlegierte Baustähle . . . . .	125
H. BERNS		
B.1.1.1	Eigenschaften . . . . .	126
B.1.1.2	Sorten und Anwendungen . . . . .	134
B.1.2	Gusseisen . . . . .	144
W. THEISEN		
B.1.2.1	Zusammensetzung von grauem Gusseisen . . . . .	144
B.1.2.2	Gusseisen mit Lamellengraphit . . . . .	147
B.1.2.3	Gusseisen mit Kugelgraphit . . . . .	150
B.1.2.4	Gusseisen mit Vermiculargraphit . . . . .	152
B.1.2.5	Temperguss . . . . .	154
B.1.2.6	Verarbeitung und Anwendung von Gusseisen . . . . .	157
B.2	Höherfeste Werkstoffe . . . . .	165
B.2.1	Schweißgeeignete Walzstähle . . . . .	165
H. BERNS		
B.2.1.1	Feinkornstähle . . . . .	165
B.2.1.2	Mehrphasenstähle . . . . .	168
B.2.1.3	Anwendung der schweißgeeigneten Stähle . . . . .	175
B.2.1.4	Leichte Stähle . . . . .	182
B.2.1.5	Perlitische Walzstähle . . . . .	184
B.2.2	Stähle wärmebehandelt aus der Schmiedehitze . . . . .	184
B.2.2.1	Martensitische Stähle . . . . .	185
B.2.2.2	Ferritisch-perlitische Stähle . . . . .	188

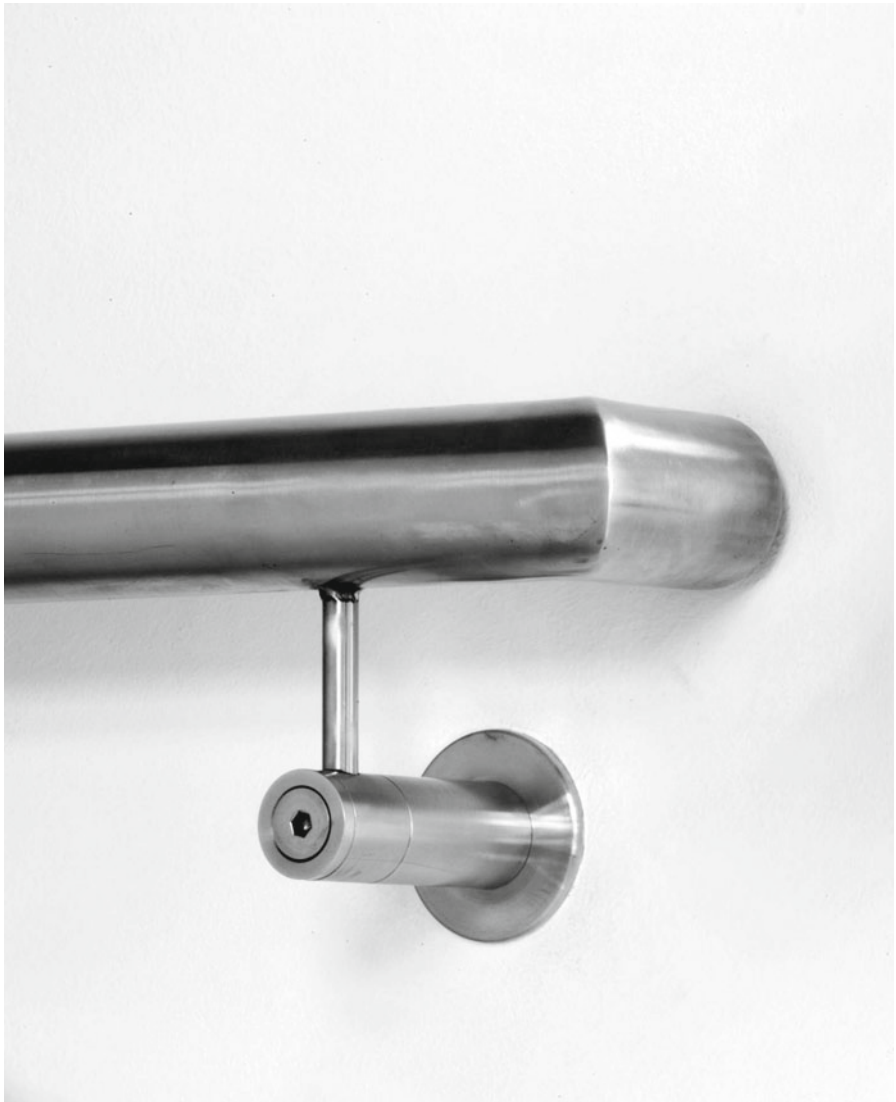
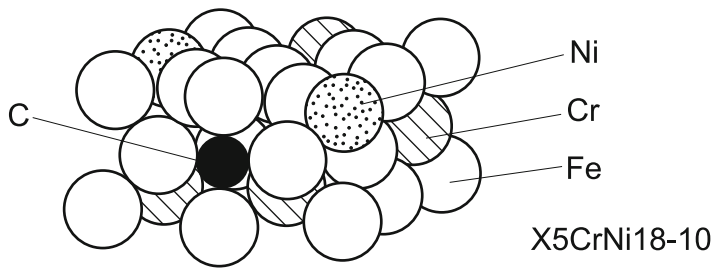


B.2.3	Baustähle für durchgreifende Wärmebehandlung . . . .	190
B.2.3.1	Vergütungsstähle . . . . .	190
B.2.3.2	Höchstfeste Stähle . . . . .	200
B.2.3.3	Harte Stähle . . . . .	204
B.2.4	Gusseisen für durchgreifende Wärmebehandlung . . . .	207
W. THEISEN		
B.2.4.1	Vergüten . . . . .	207
B.2.4.2	Umwandlung in der Bainitstufe / ADI . . . . .	208
B.3	Werkstoffe für die Randschichtbehandlung . . . . .	217
H. BERNS		
B.3.1	Werkstoffe für das Randschichthärtens . . . . .	217
B.3.1.1	Verfahrensaspekte des Randschichthärtens . . . . .	217
B.3.1.2	Werkstoff und Randschicht . . . . .	219
B.3.1.3	Anwendungen . . . . .	223
B.3.2	Nitrierstähle . . . . .	224
B.3.2.1	Verfahrensaspekte des Nitrierens . . . . .	224
B.3.2.2	Werkstoff und Randschicht . . . . .	228
B.3.2.3	Anwendungen . . . . .	232
B.3.3	Einsatzstähle . . . . .	234
B.3.3.1	Verfahrensaspekte des Einsatzhärtens . . . . .	234
B.3.3.2	Werkstoff und Randschicht . . . . .	241
B.3.3.3	Anwendungen . . . . .	246
B.4	Werkzeuge für die Mineralverarbeitung . . . . .	251
W. THEISEN		
B.4.1	Beanspruchung und Werkstoffkonzepte . . . . .	251
B.4.1.1	Hartphasen . . . . .	252
B.4.1.2	Metallmatrix . . . . .	254
B.4.2	Werkzeuge aus warmgeformtem Stahl . . . . .	256
B.4.3	Gegossene Werkzeuge . . . . .	259
B.4.3.1	Perlitischer Hartguss . . . . .	260
B.4.3.2	Ledeburitisch-martensitische Gusseisen . . . . .	260
B.4.3.3	Martensitische Chromgusseisen . . . . .	261
B.4.4	Beschichtete Werkzeuge . . . . .	264
B.4.4.1	Auftragschweißen . . . . .	264
B.4.4.2	PM-Beschichten . . . . .	267
B.4.4.3	Verbundgießen . . . . .	270
B.5	Werkzeuge für die Werkstoffverarbeitung . . . . .	273
W. THEISEN		
B.5.1	Kaltarbeitswerkzeuge . . . . .	274
B.5.1.1	Eigenschaften . . . . .	277
B.5.1.2	Beschichtete Werkzeuge . . . . .	283
B.5.1.3	Anwendungen von Kaltarbeitswerkzeugen . . . . .	288
B.5.2	Werkzeuge für die Kunststoffverarbeitung . . . . .	292
B.5.3	Warmarbeitswerkzeuge . . . . .	294
B.5.3.1	Eigenschaften . . . . .	294

X      **Inhaltsverzeichnis**

B.5.3.2	Anwendungen . . . . .	297
B.5.4	Werkzeuge für die spanende Bearbeitung . . . . .	300
B.5.4.1	Eigenschaften . . . . .	301
B.5.4.2	Anwendungen . . . . .	304
B.6	Chemisch beständige Werkstoffe . . . . .	309
H. BERNIS		
B.6.1	Allgemeine Hinweise . . . . .	309
B.6.1.1	Legierungskonzept . . . . .	309
B.6.1.2	Matraxeigenschaften . . . . .	311
B.6.2	Nichtrostende Stähle . . . . .	317
B.6.2.1	Eigenschaften . . . . .	319
B.6.2.2	Anwendung . . . . .	332
B.6.3	Hitzebeständige Stähle . . . . .	337
B.6.3.1	Eigenschaften . . . . .	337
B.6.3.2	Anwendung . . . . .	340
B.6.4	Gusseisen . . . . .	342
B.6.4.1	Ferritische Gusseisen . . . . .	343
B.6.4.2	Austenitische Gusseisen . . . . .	344
B.6.4.3	Weißes Gusseisen / karbidreiche Stähle . . . . .	346
B.7	Warmfeste Werkstoffe . . . . .	349
H. BERNIS		
B.7.1	Eigenschaften . . . . .	352
B.7.1.1	Normalgeglühte und vergütete Stähle . . . . .	352
B.7.1.2	Austenitische Stähle . . . . .	358
B.7.1.3	Gusseisen . . . . .	360
B.7.2	Anwendungen . . . . .	361
B.7.2.1	Dampfkraftwerk . . . . .	361
B.7.2.2	Gasturbine . . . . .	362
B.7.2.3	Lebensdauerabschätzung . . . . .	363
B.7.2.4	Petrochemie . . . . .	365
B.7.2.5	Ventile . . . . .	366
B.8	Funktionswerkstoffe . . . . .	369
H. BERNIS		
B.8.1	Weichmagnetische Werkstoffe . . . . .	369
B.8.2	Hartmagnetische Werkstoffe . . . . .	373
B.8.3	Nichtmagnetisierbare Werkstoffe . . . . .	374
B.8.4	Werkstoffe mit besonderer Wärmeausdehnung . . . . .	375
B.8.5	Werkstoffe mit Formgedächtnis . . . . .	378
B.8.6	Heizleiterlegierungen . . . . .	380
<b>C</b>	<b>Anhang</b>	<b>383</b>
C.1	Bezeichnung von Stahl und Gusseisen . . . . .	383
W. THEISEN		
C.1.1	Regelwerke . . . . .	383
C.1.2	Bezeichnung für Stahl und Stahlguss . . . . .	384

Unlegierte Stähle . . . . .	386
Legierte Stähle . . . . .	386
Hochlegierte Stähle . . . . .	387
Schnellarbeitsstähle . . . . .	387
C.1.3 Bezeichnung von Gusseisen . . . . .	388
C.2 Zur Geschichte des Eisens . . . . .	392
H. BERNIS	
C.2.1 Vom Renn- zum Schachtofen . . . . .	392
C.2.2 Die Ausbreitung der Eisengewinnung . . . . .	395
C.2.3 Gusseisen und Frischfeuer . . . . .	395
C.2.4 Flussstahl . . . . .	397
C.2.5 Eisenwerkstoffe . . . . .	397
C.3 Schriftumsangaben zu Bildern und Tabellen . . . . .	400
<b>Schlagwortverzeichnis</b>	<b>403</b>
<b>Liste der Legierungs- und Begleitelemente</b>	<b>415</b>



Handlauf aus nichtrostendem austenitischem Stahl

# Grundlagen der Eisenwerkstoffe

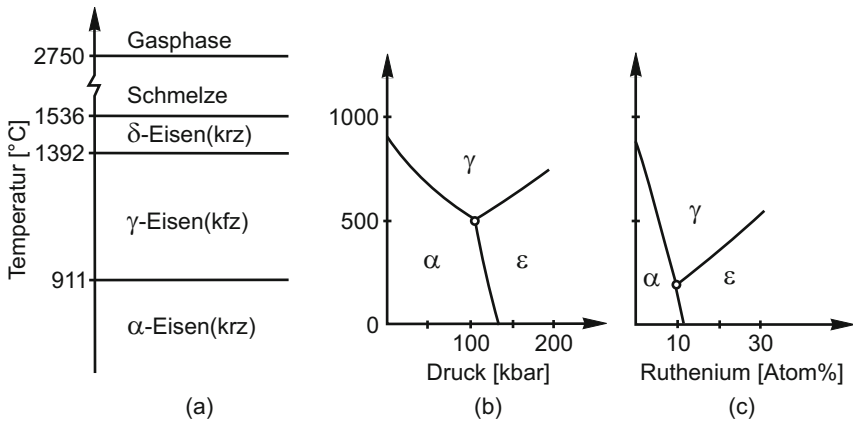
## A.1 Konstitution

Dieses Kapitel beschreibt, in welcher Verfassung bzw. in welchem Zustand sich Eisenwerkstoffe befinden können. Gemeint ist der Ordnungszustand der Atome. Oberhalb der Siedetemperatur schwirren sie im gasförmigen Zustand ungeordnet und weit voneinander entfernt durch den Raum. Zwischen Siede- und Erstarrungstemperatur bewegen sie sich im flüssigen Zustand ungeordnet aber eng beieinander. Unterhalb der Erstarrungstemperatur liegen sie im festen Zustand kristallin geordnet vor und ihre Bewegung ist auf Schwingungen um Fixpunkte im Kristallgitter begrenzt. Es gibt mehr als nur eine kristalline Anordnung der Atome. Bereiche mit einem einheitlichen Ordnungszustand werden als Phase bezeichnet. In Eisenwerkstoffen können gleichzeitig mehrere Phasen auftreten z. B. im Übergang flüssig/fest oder in Form unterschiedlich geordneter Kristallarten. Der Zustand gilt als homogen, wenn nur eine Phase vorliegt und als heterogen, wenn es mehr sind.

Welche Phasen sich bilden, hängt von drei Zustandsgrößen ab: Temperatur, Druck und Konzentration. Im Vergleich zur bereits genannten Auswirkung der Temperatur kommt dem Druck auf den ersten Blick weniger Bedeutung zu, da inkompressible flüssige und feste Phasen nur bei hohem Druck mit einer Zustandsänderung antworten, die meisten Fertigungsschritte und Anwendungen jedoch bei rund 1 bar Normaldruck ablaufen. Auf den zweiten Blick sind aber Phasenumwandlungen häufig mit einer Volumenänderung verbunden, die örtlich zu hoher Druckänderung führen kann. Durch steigenden Druck wird die dichtere Phase begünstigt, also stabilisiert. Die kompressible Gasphase reagiert bereits auf eine geringe Druckerhöhung, so z. B. mit einem Anstieg der Siedetemperatur, d. h. mit einer Stabilisierung der dichteren Flüssigphase. In der Umkehrung wird Unterdruck bei der Verdampfung von Oberflächen oder zur Entgasung von Schmelzen genutzt. Trotz dieser Beispiele für einen Einfluss des Druckes auf den Zustand von Eisenwerkstoffen, ist die Annahme eines konstanten Normaldrucks in der Praxis meist gerechtfertigt. Dagegen ist die Konzentration eine ebenso variable

Zustandsgröße wie die Temperatur und vor allem für die Vielfalt fester Phasen verantwortlich. Gemeint ist die Konzentration an Begleit- und Legierungselementen. Die unbeabsichtigten Begleitelemente stammen aus der Erzeugung. Die Legierungselemente werden in der Absicht zugegeben, durch die Einstellung bestimmter Ordnungszustände die Voraussetzungen für gewünschte Eigenschaften zu schaffen. Sieht man von geringfügigen Verunreinigungen wie z. B. Oxiden und Sulfiden ab, so beginnt die Erzeugung mit einer homogenen Schmelze, bestehend aus Eisen und gelösten anderen Elementen, die durch Gießen von Blöcken, Strängen und Formstücken oder durch Zerstäuben zu Pulver und Halbzeug in den festen Zustand überführt wird. Bei gegebener Legierungskonzentration und konstantem Druck hängt die Zustandsänderung während der Erstarrung und der weiteren Abkühlung oder Wiedererwärmung allein von der Temperatur ab.

Voraussetzung für die Ausführungen zur Konstitution der Eisenwerkstoffe ist eine äußerst langsame zeitliche Temperaturänderung, die die Einstellung eines thermodynamischen Gleichgewichts zwischen unterschiedlichen Phasen erlaubt. Es gibt den Atomen Zeit, sich durch Diffusion zu Phasen zusammenzufinden und hält die Waage zwischen Bildung und Rückbildung von Phasen, die zu einer gegebenen Temperatur gehören. Zeit wird auch für die Zu- oder Abführung latenter Wärme benötigt, die mit einem Phasenübergang verbunden ist. Wegen der größeren Bewegungsenergie gasförmiger Atome ist z. B. die Kondensationswärme größer als die Erstarrungswärme. Aber auch



**Bild A.1.1 Konstitution des Eisens:** (a) Ordnungszustand in Abhängigkeit von der Temperatur bei Normaldruck, (b) Einfluss von Druck und Temperatur nach F.P. Bundy, (c) Einfluss von Binnendruck nach H. Schumann, hervorgerufen durch die größeren Atome des zum Eisen homologen, d. h. in der äußeren Elektronenschale vergleichbaren Rutheniums (Atomdurchmesser Ru = 0.268, Fe = 0.248 nm). Durch Außen- und Binnendruck werden die dichter gepackten Eisenphasen kfz- $\gamma$  und hd- $\epsilon$  stabilisiert.