

# STAHLFIBEL



# STAHLFIBEL

Herausgegeben vom  
Stahlinstitut VDEh

Autoren:

Dipl.-Ing. Ralf Bartos

Dr.-Ing. Stefanie Brockmann

Dr.-Ing. Reinhard Fandrich

Dipl.-Ing. Gerhard Endemann

Sabine Heinzel, M.A.

Dr.-Ing. Christoph Keul

Dipl.-Ing. Karsten Letz

Dr.-Ing. Hans Bodo Längen

Dipl.-Ing. Günther Moninger

Marten Sprecher, M.Sc.

Dipl.-Ing. Ulrike Stellmacher

Dr.-Ing. Hans-Joachim Wieland

Dr. rer. pol., Dipl.-Kfm. Reinhard Winkelgrund

Dipl.-Ing. Horst Wöckner

Titelbilder:

ThyssenKrupp Steel Europe AG | SMS group |

Stahl-Zentrum, Dr. Stefanie Brockmann | lap-consult, © Straßenbauamt Leipzig |

Siemens AG, München/Berlin | © BWE, Christian Hinsch

© 2015 Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und Einspeicherung und/oder Verarbeitung in elektronischen Systemen, insbesondere Datenbanken und Netzwerke.

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

In diesem Buch wiedergegebene Gebrauchsnamen, Handelsnamen und Warenbezeichnungen dürfen nicht als frei zur allgemeinen Benutzung im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung betrachtet werden.

Inhalte, die auf Verordnungen, Vorschriften oder Regelwerken basieren, dürfen nur unter Berücksichtigung der jeweils neuesten Ausgabe in Originalfassung verwendet werden.

Ergänzungen, wichtige Hinweise oder Korrekturen, die nach Veröffentlichung bekannt werden, sind im Internet zu finden unter: [www.stahleisen.de/errata](http://www.stahleisen.de/errata)

Printed in Germany  
ISBN 978-3-514-00815-1

# Inhalt

<b>1. Stahl – der Werkstoff von heute und morgen</b> .....	<b>2</b>	<b>6. Vergießen des Stahls</b> .....	<b>79</b>	<b>8.7 Trennen von Stahl</b> .....	<b>128</b>
<b>1.1 Stahl – der innovative Werkstoff</b> .....	<b>2</b>	<b>6.1 Strangguss</b> .....	<b>80</b>	<b>8.8 Fügen von Stahl</b> .....	<b>129</b>
<b>1.2 Grundlagen</b> .....	<b>5</b>	<i>Ablauf des Stranggießverfahrens.</i> .....	81	<i>Schweißen</i> .....	129
<b>1.3 Die verschiedenen Stahlsorten.</b> .....	<b>9</b>	<i>Bauarten von Stranggießanlagen.</i> .....	82	<i>Kleben</i> .....	132
<i>Allgemeine Einteilungen.</i> .....	9	<i>Automatisierung.</i> .....	83	<i>Mechanisches Fügen.</i> .....	133
<i>Bezeichnungssysteme für Stähle.</i> .....	10	<i>Endabmessungsnahes Gießen.</i> .....	84	<b>8.9 Korrosionsschutz von Stahl durch Korrosionsschutz-Schichten</b> ..	<b>134</b>
<i>Kurznamen</i> .....	10	<i>Horizontalstranggießen</i> .....	87	<i>Organische Beschichtungen</i> .....	135
<i>Werkstoffnummern.</i> .....	12	<b>6.2 Blockguss</b> .....	<b>88</b>	<i>Anorganische Beschichtungen</i> ..	137
<i>Stahlgruppen</i> .....	12	<b>6.3 Sprühkompaktieren</b> .....	<b>89</b>	<i>Metallische Überzüge.</i> .....	139
<b>2. Ausgangsstoffe für die Eisen- und Stahlerzeugung.</b> .....	<b>16</b>	<b>7. Eisen und Stahl als Gusswerkstoffe</b> .....	<b>90</b>	<i>Umwandlungsüberzüge</i> .....	142
<b>2.1 Eisenerze</b> .....	<b>16</b>	<b>7.1 Gusseisen</b> .....	<b>90</b>	<b>8.10 Wärmebehandlung von Stahl</b> ..	<b>143</b>
<i>Eisenerzarten</i> .....	17	<i>Gusseisen mit Lamellengrafit.</i> .....	90	<i>Glühen</i> .....	144
<i>Qualitätsanforderungen und Beurteilung der Erze.</i> .....	18	<i>Gusseisen mit Kugelgrafit</i> .....	91	<i>Härten</i> .....	144
<i>Vorbehandlung der Erze</i> .....	20	<i>Gusseisen mit Vermiculargrafit</i> ..	91	<i>Anlassen.</i> .....	145
<b>2.2 Schrott</b> .....	<b>24</b>	<i>Temperguss</i> .....	91	<i>Vergüten.</i> .....	145
<b>2.3 Reduktionsmittel</b> .....	<b>25</b>	<b>7.2 Stahlguss</b> .....	<b>91</b>	<i>Kontrollierte Abkühlung</i> .....	145
<b>2.4 Zuschläge</b> .....	<b>26</b>	<b>8. Formgebung von Stahl</b> .....	<b>93</b>	<b>9. Werkstoffprüfung</b> .....	<b>146</b>
<b>2.5 Feuerfeststoffe</b> .....	<b>26</b>	<b>8.1 Grundlagen des Walzens von Stahl</b> <b>93</b>	<b>93</b>	<b>9.1 Überblick</b> .....	<b>146</b>
<b>3. Wege vom Erz zum Stahl</b> .....	<b>28</b>	<i>Umformen</i> .....	93	<b>9.2 Verfahren der Werkstoffprüfung</b> .....	<b>148</b>
<b>3.1 Verfahrensrouten Hochofen – Konverter</b> .....	<b>28</b>	<i>Das Walzen</i> .....	94	<b>10. Qualitätsmanagement</b> .....	<b>159</b>
<i>Koksmetallurgie</i> .....	28	<b>8.2 Walzstahlerzeugnisse</b> .....	<b>97</b>	<b>11. Anlagenmanagement</b> .....	<b>161</b>
<i>Kohlemetallurgie</i> .....	29	<b>8.3 Walzwerkseinrichtungen</b> .....	<b>101</b>	<b>12. Nachhaltige Ressourcennutzung durch Umweltschutz und Energiewirtschaft</b> .....	<b>164</b>
<b>3.2 Verfahrensrouten Lichtbogenofen</b> <b>29</b>	<b>29</b>	<i>Bezeichnung von Walzgerüsten</i> ..	101	<i>Stahl als Beitrag zum Klimaschutz</i> .....	165
<i>DRI-Metallurgie</i> .....	29	<i>Walzwerkswalzen</i> .....	103	<i>Nachhaltige Produkte.</i> .....	165
<i>Schrottmetallurgie</i> .....	30	<i>Walzwerke</i> .....	103	<i>Stahlkreislauf</i> .....	166
<b>3.3 Sekundärmetallurgie</b> .....	<b>30</b>	<i>Walzstraßen</i> .....	104	<i>Multirecycling in der Lebenszyklusanalyse</i> .....	167
<b>3.4 Sonderentwicklungen</b> .....	<b>30</b>	<i>Zurichtung (Adjustage)</i> .....	106	<i>Qualität des Werkstoffes bleibt erhalten</i> .....	168
<b>4. Reduktion der Eisenerze</b> .....	<b>31</b>	<b>8.4 Verfahrenswege des Warmwalzens von Stahl</b> .....	<b>107</b>	<i>Schlacke und andere Nebenprodukte</i> .....	168
<b>4.1 Roheisenerzeugung</b> .....	<b>31</b>	<i>Walzen von Halbzeug.</i> .....	107	<i>Stäube und Schlämme.</i> .....	169
<i>Hochofenanlage</i> .....	31	<i>Walzen von Fertigerzeugnissen</i> ..	107	<i>Energie.</i> .....	170
<i>Vorgänge im Hochofen</i> .....	35	<b>8.5 Weitere Formgebungsverfahren für Stahl</b> .....	<b>112</b>	<i>CO<sub>2</sub>-Emission</i> .....	170
<i>Erzeugnisse des Hochofens.</i> .....	38	<i>Herstellung nahtloser Stahlrohre</i> ..	112	<i>Luftreinhaltung</i> .....	171
<i>Stoff- und Mengenbilanz des Hochofens</i> .....	39	<i>Herstellung geschweißter Stahlrohre.</i> .....	113	<i>Gesellschaft und Ökonomie in der Nachhaltigkeit</i> .....	172
<i>Prozesssteuerung</i> .....	39	<i>Schmieden und Pressen</i> .....	114	<i>Fazit</i> .....	174
<i>Ausblick</i> .....	40	<i>Freiformschmieden</i> .....	114	<b>13. Stahlanwendung</b> .....	<b>175</b>
<b>4.2 Verfahren der Direktreduktion</b> ..	<b>41</b>	<i>Radial-Axial-Ringwalzen</i> .....	118	<b>13.1 Vielfalt der Anwendungsbereiche</b> .....	<b>175</b>
<i>Gasreduktionsverfahren</i> .....	42	<i>Gesenkschmieden</i> .....	120	<b>13.2 Mobilität</b> .....	<b>177</b>
<i>Feststoffreduktionsverfahren</i> .....	45	<i>Strangpressen</i> .....	120	<b>13.3 Stahl im Bauwesen</b> .....	<b>183</b>
<b>4.3 Schmelzreduktionsverfahren</b> ..	<b>48</b>	<i>Presshärten</i> .....	120	<b>13.4 Energietechnik</b> .....	<b>194</b>
<b>4.4 Roheisenvorbehandlung</b> .....	<b>52</b>	<b>8.6 Kaltumformen von Stahl</b> .....	<b>121</b>	<b>13.5 Maschinen, Anlagen und Apparate</b> .....	<b>197</b>
<b>5. Stahlerzeugung</b> .....	<b>53</b>	<i>Kaltwalzen</i> .....	121	<b>13.6 Medizintechnik</b> .....	<b>202</b>
<b>5.1 Einsatzstoffe</b> .....	<b>53</b>	<i>Kopplung von Beize und Tandemstraße</i> .....	124	<b>13.7 Alltag und Lifestyle</b> .....	<b>204</b>
<b>5.2 Sauerstoffblasverfahren</b> .....	<b>54</b>	<i>Walzen von Tailor Rolled Blanks – Flexibles Walzen.</i> .....	124	<b>13.8 Stahl in der Kunst.</b> .....	<b>205</b>
<b>5.3 Elektrostahlverfahren</b> .....	<b>61</b>	<i>Blankstahl.</i> .....	124	<b>14. Aus der Geschichte der Eisenhüttentechnik</b> .....	<b>209</b>
<b>5.4 Siemens-Martin-Verfahren</b> .....	<b>69</b>	<i>Gleitziehen von Hohlkörpern</i> .....	127	<b>Tafel: Wege zum Stahl.</b> .....	<b>219</b>
<b>5.5 Sekundärmetallurgie</b> .....	<b>69</b>	<i>Sonstige Kaltumformungsverfahren von Stahl (Beispiele)</i> ..	127		
<b>5.6 Ausblick</b> .....	<b>75</b>				

# 1. Stahl – der Werkstoff von heute und morgen

## 1.1 Stahl – der innovative Werkstoff

In der modernen Industriegesellschaft ist Stahl aufgrund seiner vielseitigen Eigenschaften und seiner Recyclingmöglichkeiten der Basiswerkstoff für eine nachhaltige Entwicklung der Gesellschaft. Er hat eine große Einsatzbreite in fast allen wichtigen Industriesektoren: Apparate- und Maschinenbau, Brückenbau, Stahlhochbau, Energie- und Umwelttechnik, Transport und Verkehr, Verpackungsindustrie etc. Er ermöglicht in vielen Branchen erst die Herstellung von anderen Werkstoffen und Erzeugnissen aus diesen. Die Höhe der Stahlerzeugung und der Stahlverwendung eines Landes bzw. einer Region sind von der Entwicklung der Bevölkerung einerseits sowie vom technischen und wirtschaftlichen Entwicklungsstand andererseits abhängig. Die Weltrohstahlerzeugung stieg von 40 Mio. t im Jahr 1900 auf 1 600 Mio. t im Jahr 2013 an, **Bild 1**. Stahl ist und bleibt auch in diesem Jahrhundert der Werkstoff Nr. 1 mit dem besten Preis-Leistungs-Verhältnis. Stahl wird eine Schlüsselposition weiterhin in einer modernen und zukunftsorientierten Industriegesellschaft innehaben. Einen Überblick über die Welterzeugung von Stahl in den Jahren 1970 und 2013 im Vergleich zu Aluminium und Magnesium sowie Kunststoff und Kohlefasern gibt **Bild 2**, **Bild 3** zeigt den Stahlmarkt in Deutschland und **Bild 4** stellt dazu die verschiedenen Anwendungsbereiche des Stahls dar.

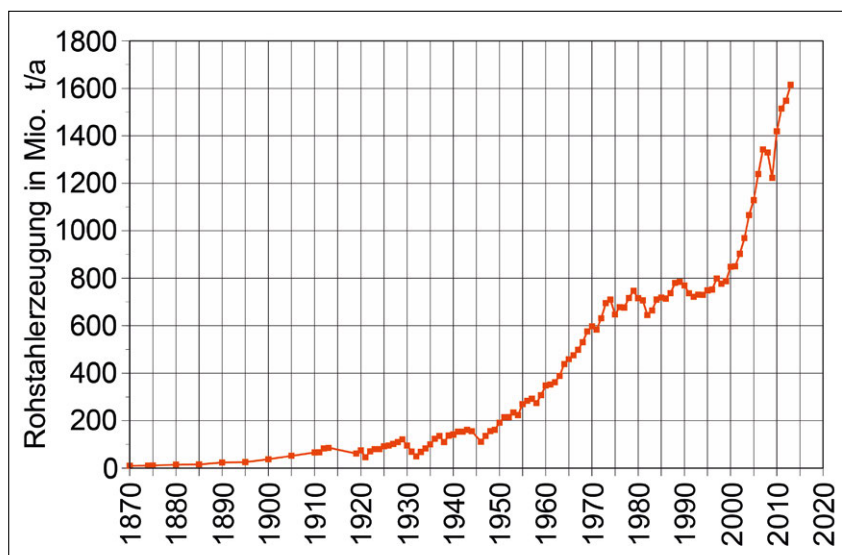
In welchem Maße Stahl seine dominierende Stellung beibehalten wird, hängt auch davon ab, wie sich seine Gebrauchseigenschaften weiterentwickeln lassen.

Stahl ist der mit Abstand wichtigste, vielseitigste und anpassungsfähigste Werkstoff. Hierzu tragen auch die im Vergleich zu anderen Werkstoffen geringen Herstellungskosten bei. So beträgt der Energieaufwand für die Gewinnung von Rohstahl aus Erz nur etwa 10 % des Energiebedarfs für die Erzeugung von Primäraluminium. Die Vielseitigkeit und Anpassungsfähigkeit von Stahl wird durch folgende Aufzählung gekennzeichnet: Stahl ist zum Beispiel

- hoch- und höchstfest
- warm- und kaltumformbar,

- schweißgeeignet,
- spanabhebend bearbeitbar,
- hart, zäh und verschleißfest,
- korrosionsbeständig,
- hitzebeständig, warmfest.

Die Anpassungsfähigkeit von Stahl wird durch die große Anzahl von Norm- und Regelstählen dokumentiert. Insgesamt sind dies in der vom Stahlinstitut VDEh in Zusammenarbeit mit der Europäischen Stahlregistrator herausgegebenen Stahl-Eisenliste rd. 2 400 Sorten; etwa 1 500 hiervon entfallen auf den Bereich der Edelmetalle. Zu den genormten Stahlsorten kommen nicht genormte Stahlsorten und Varianten, die speziell auf die besonderen Bedürfnisse von Kunden zugeschnitten sind, hinzu. Auch deren Herstellung mit



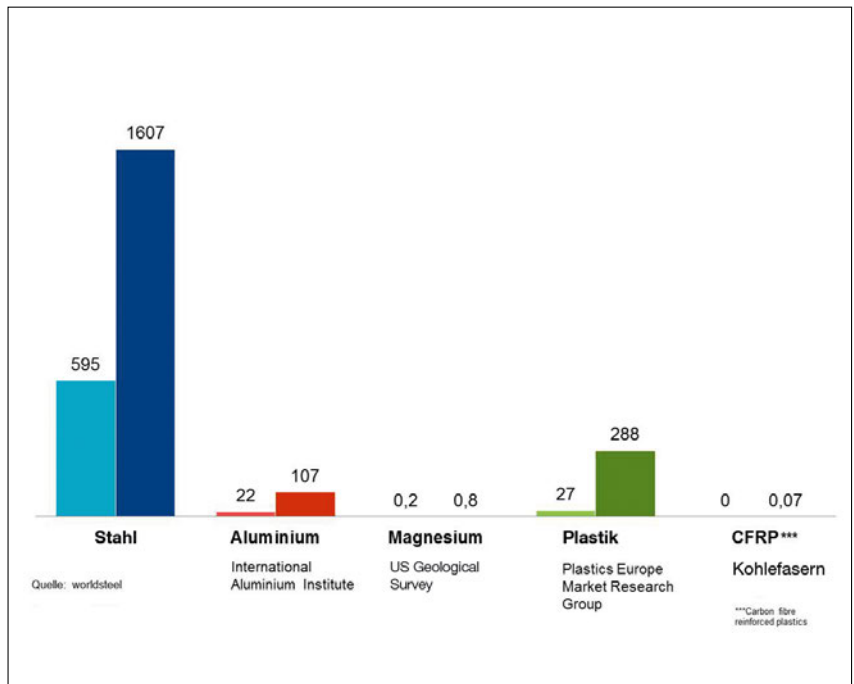
**Bild 1** Rohstahlerzeugung der Welt

der sicheren Einstellung definierter Eigenschaften erfordert ein umfangreiches technisches Know-how, wie es nur in hochtechnisierten Ländern vorhanden ist. Hier besteht das Potenzial zur ständigen Weiterentwicklung des Werkstoffes Stahl.

Die hohe Bedeutung, die der Werkstoff Stahl und die Eisenwerkstoffe auch in Zukunft haben werden, ist durch folgende Voraussetzungen gegeben:

- Die als wirtschaftlich gewinnbar erachteten Roherzreserven belaufen sich auf rd. 170 Mrd. t; damit haben die Eisenwerkstoffe eine sichere Rohstoffbasis.
- Im Vergleich zu anderen Elementen lässt sich der Werkstoff Stahl mit verhältnismäßig geringem Energieaufwand herstellen.
- Die verschiedenen Stahl- und Eisenwerkstoffe lassen sich kostengünstig in gleichbleibender Qualität herstellen.
- Stahl ist umweltfreundlich. Dies gilt für seine Herstellung, Verarbeitung und besonders für seine 100%ige Wiederverwertbarkeit.
- Die gewünschten Gebrauchseigenschaften sind durch abgestimmte Legierungstechnik, Umformung und Wärmebehandlung sicher und gezielt einstellbar.
- Die Verarbeitbarkeit von Stahl durch Umformen, Fügen und Zerspanen ist anwendergerecht und flexibel.

Die allgemeine Fortentwicklung des Werkstoffes Stahl nutzt konsequent alle Schritte der Erzeugung und Verarbeitung von Stahl unter Einbeziehung

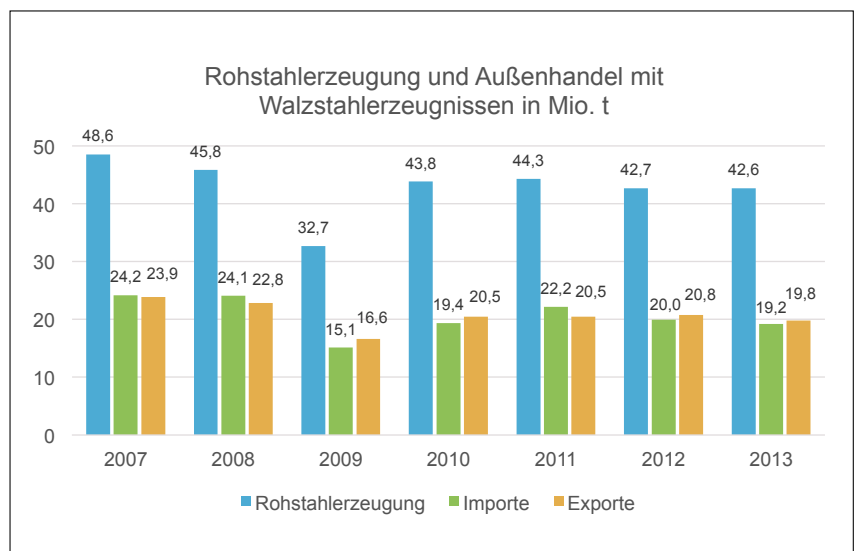


**Bild 2** Welterzeugung von Stahl 1970/2013

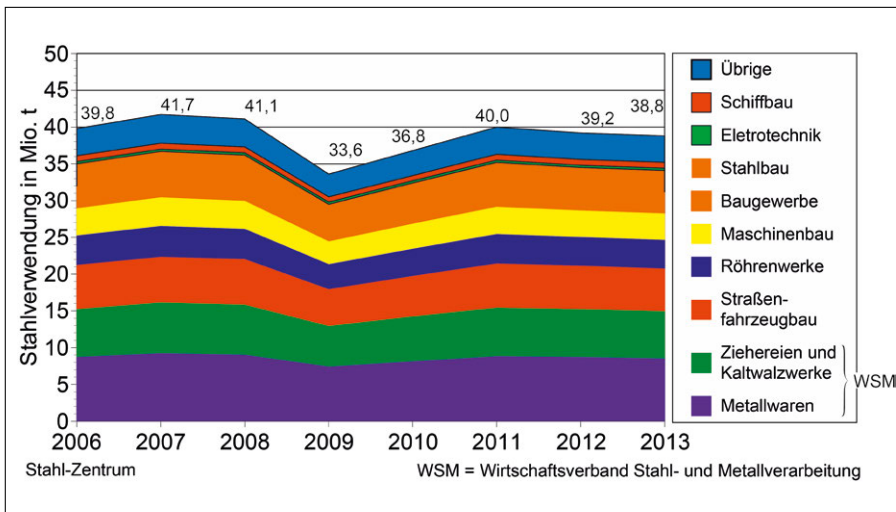
der angepassten Verfahren der Wärmebehandlung. Wichtigste Grundlage aller Entwicklungen ist die Metallurgie; die erreichten und künftig angestrebten Verbesserungen beziehen sich auf

- enge Grenzen der chemischen Zusammensetzung,
- einen hohen Reinheitsgrad und die

- Gleichmäßigkeit des Gefüges,
- Art und chemische Zusammensetzung der beteiligten Phasen,
- Anteile und Verteilung der Phasen im Gefüge sowie
- auf die für die Anforderungen genau eingestellten Korngrößen.



**Bild 3** Der Stahlmarkt in Deutschland



**Bild 4**  
 Stahlverwendung in Deutschland (EGKS-Erzeugnisse)

Die Korngröße spielt bei Stählen, die im Bereich normaler und tiefer Temperaturen eingesetzt werden, eine entscheidende Rolle. Mit Verringerung der Korngröße lassen sich Festigkeit und Zähigkeit steigern. Daher besitzen die Maßnahmen zur Erzielung eines feinkörnigen Gefüges eine besondere Bedeutung. Im Gegensatz zu konventionellen Stählen werden bei Mehrphasenstählen, die hauptsächlich in der Automobilindustrie eingesetzt werden, durch komplexe Gefügestrukturen, d. h. durch eine Kombination aus weichen und harten Phasen, eine bessere Festigkeits-Duktilitäts-Kombination erreicht, was zu einer verbesserten Kaltumformbarkeit führt.

Die Ziele der Weiterentwicklung des Werkstoffs Stahl bestehen allgemein in verbesserten Verarbeitung- und Gebrauchseigenschaften bei guter Anpassung an den jeweiligen Verwendungszweck.

Die weiteren Perspektiven der Werkstoffentwicklung von Stahl bestehen in der Verfeinerung des Gussgefüges von Stahl durch sehr rasche Erstarrung. Ein sehr feines Gussgefüge lässt sich erzielen, wenn durch ein „Sprühgießen“

das gewünschte Profil aus Schmelztropfen aufgebaut wird. Mit dem Verfahren des „Schmelzspinnens“ und der „Schmelzverdüsung“ werden Bänder bzw. Pulverteilchen mit so hoher Geschwindigkeit abgeschreckt, dass bestimmte Legierungen, z. B. Eisen mit Zusätzen von Bor und Silicium, in mikrokristalliner Struktur oder ohne Kristallisation in glasiger Form erstarren. Auf diese Weise erzeugte Werkstoffe besitzen neuartige magnetische und mechanische Eigenschaften, die sich technisch nutzen lassen.

Zur Erschließung neuer Anwendungsgebiete für den Stahl ist sein Einsatz als Komponente von Verbundwerkstoffen zu sehen. Stahl kann als Matrix die Übertragung von Kräften auf die lasttragende Faser übernehmen. Wichtige Beispiele für bereits eingesetzte Verbundstoffe aus Stahl sind Spannbeton sowie beschichtete und plattierte Bleche.

Es kann als gesichert angesehen werden, dass der Werkstoff Stahl eine gute Zukunft hat, wenn er das weiterhin in ihm steckende Entwicklungspotenzial sowie die Chancen in den verschiedenen volkswirtschaftlich bedeutenden Anwendungsbereichen

nutzt. So sind neue Möglichkeiten erkannt oder erkennbar, um auf dem alten Weg der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften durch Verfeinerung der Legierungstechnik und des Gefüges zu neuen hochwertigen und angepassten Stahlsorten zu gelangen. Bei anderen Entwicklungen wird sich der Stahl mit anderen Werkstoffen zu hochleistungsfähigen Verbundwerkstoffen verbinden. Zum Beispiel bei Sandwichblechen erreicht der extrem biege- und beulsteife Stahl-Polymer-Verbund annähernd das niedrige Gewicht von Aluminiumlösungen, kostet aber nach Herstellerangaben „bedeutend weniger“. Im Rahmen der Konstruktion von komplexen Bauteilen, z. B. einer Automobilkarosserie, gewinnt ein sinnvoller Mix aus unterschiedlichen Werkstoffen immer mehr an Bedeutung. Multi-Material-Design verlangt aber auch neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Fügetechnologien. Neben den konventionellen Schmelzschweißverfahren werden mechanische und klebtechnische Fügeverfahren immer wichtiger. In wieder anderen Bereichen kann das Element Eisen als Teil neuer Werkstoffe etwas in den Hintergrund treten.

## Stahl

Als Stahl werden Werkstoffe bezeichnet, deren Massenanteil an Eisen größer ist als der jedes anderen Elementes und die im allgemeinen weniger als 2 % C aufweisen sowie andere Elemente enthalten. Einige Chromstähle enthalten mehr als 2 % C. Der Wert von 2 % wird jedoch im allgemeinen als Grenzwert für die Unterscheidung zwischen Stahl und Gusseisen betrachtet (DIN EN 10020)

- kubisch-raumzentriert ( $\alpha$ -Eisen; **Bild 5**)
- kubisch-flächenzentriert ( $\gamma$ -Eisen; **Bild 6**)

Bei Raumtemperatur und beim Erhitzen bis 911 °C liegt das Eisen als  $\alpha$ -Eisen vor. Bei 911 °C klappt das Gitter um, die Atome springen schnell in die Kristallform des  $\gamma$ -Eisens. Damit werden die Kristallwürfel größer und enthalten mehr Atome. Die Würfelmittle des Kristallgitters wird frei. Wird die Temperatur bis 1392 °C erhöht, klappt das Gitter wieder in das des  $\alpha$ -Eisens um; zur Unterscheidung spricht man nun von  $\delta$ -Eisen. Nach weiterer Erwärmung schmilzt das Eisen bei 1536 °C und das Raumgitter zerfällt. Wird die Schmelze wieder abgekühlt, so erfolgen die Umwandlungen zu  $\delta$ -,  $\gamma$ - und

## 1.2 Grundlagen

Das chemische Element Eisen gehört zu den Metallen und ist kristallin aufgebaut. Es kommt in der Natur nicht in reiner Form vor, sondern in Verbindung mit anderen Elementen; deshalb wird es zu den unedlen Metallen gezählt.

Die Zahl 55,85 gibt das „Atomgewicht“ bzw. die „Relative Atommasse“ an; die Zahl 26 definiert die „Ordnungszahl“ und damit die Stellung des Elements Eisen im „Periodensystem der Elemente“; die Zahlen 2+ und 3+ zeigen die möglichen „Wertigkeiten“ des Eisens an. Der ebenfalls metallische Werkstoff „Stahl“ ist eine Legierung (= Mischung) des Elements Eisen mit anderen nichtmetallischen oder metallischen Elementen. Nichtmetallische Legierungselemente sind beispielsweise Kohlenstoff, Silicium, Phosphor und Schwefel; metallische Legierungselemente sind Mangan, Chrom, Nickel, Molybdän und andere. Wichtigstes Legierungselement für den Werkstoff Stahl ist der Kohlenstoff. Durch Menge und Art der Legierungselemente lassen sich erwünschte Gebrauchseigenschaften erreichen und weniger erwünschte Eigenschaften unterdrücken.

Die Begriffe Eisen, Eisenwerkstoffe und Stahl sollten klar voneinander abgegrenzt werden.

Unter Eisen wird einmal das Element und zum anderen der Werkstoff mit einem Reinheitsgrad von 99,8 bis 99,9 % Fe verstanden; der Rest besteht aus Verunreinigungen. Reinstes Eisen ist nur schwer herzustellen.

Zu den Eisenwerkstoffen zählen alle diejenigen Metalllegierungen, bei denen der mittlere Massenanteil an Eisen höher liegt als der jedes anderen Elements.

Ursprünglich wurde allgemein als wesentliches Merkmal für den Begriff Stahl die Härtheit angegeben. Dieses Kriterium wird in diesem Sinne heute nicht mehr benutzt und man bezeichnet als Stahl alle Eisenwerkstoffe, deren Massenanteil an Eisen größer ist als der jedes anderen Elements. Mit Ausnahme einiger chromreicher Stähle enthält Stahl höchstens rd. 2 % C, der ihn vom Gusseisen unterscheidet (EN 10001 und DIN EN 10020). Stahl weist im Übrigen eine allgemeine Eignung zum Warmumformen auf.

Das Element Eisen tritt je nach Temperatur in zwei Kristallgittern auf; diese Erscheinung wird als Allotropie bezeichnet. Die Kristallgitterformen des Eisens sind:

### Eisen

1. Element 55,85  
26 Fe 2+, 3+

Fe = (lat. = ferrum), chemisches Zeichen für Eisen  
55,85 = Atomgewicht des Eisens  
26 = positive Kernladungszahl und Platznummer des Elementes Eisen im Periodensystem  
2+, 3+ = die beiden möglichen Wertigkeiten des Eisens (je nach Eisenverbindung)

2. Werkstoff mit Reinheit von 99,8 bis 99,9 % Fe



## Eigenschaften von Metallen (Beispiele)

mechanische:

Streckgrenze  
Zugfestigkeit  
Biegefestigkeit  
Zähigkeit  
Dauerschwingfestigkeit  
Warmfestigkeit  
Härte  
usw.

physikalische:

Dichte  
elektr. Leitfähigkeit  
Wärmeausdehnung  
Temperaturleitfähigkeit  
usw.

technologische:

Umformbarkeit  
Schweißneigung  
Zerspanbarkeit  
usw.

chemische:

Korrosionswiderstand  
usw.

$\alpha$ -Eisen bei fast den gleichen Temperaturen.

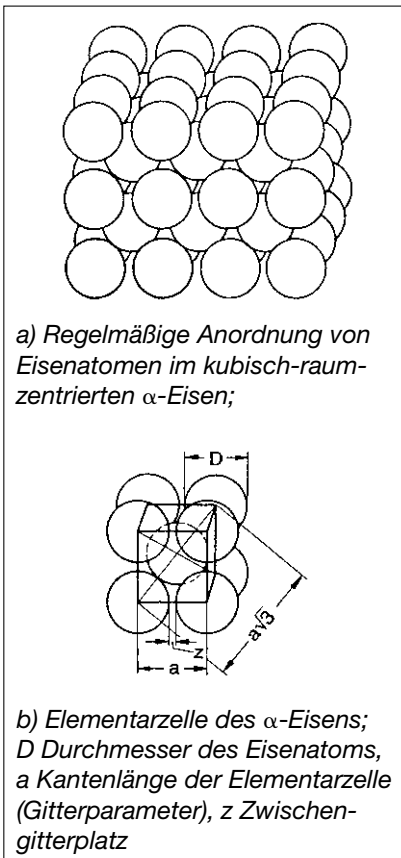
Die Erstarrung aus der Schmelze beginnt an Kristallisationskeimen, deren Gitterrichtungen verschieden

und zufällig angeordnet sind. Durch die Anlagerung weiterer Atome an die Keime wachsen die Raumgitter so lange, bis kein flüssiges Eisen mehr übrig ist und die Raumgitter der so gebil-

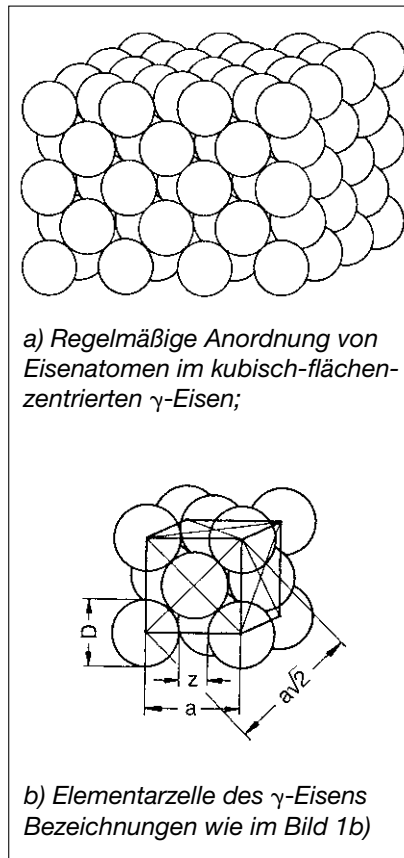
deten Kristallite an den Korngrenzen aneinanderstoßen. Die Körner oder Kristallite sind nicht frei von Gitterfehlern, die in Form von Versetzungslinien und Leerstellen auftreten.

Da es sich bei Stahl nicht um reines Eisen, sondern um eine Legierung von Eisen und anderen Elementen handelt, von denen Kohlenstoff die wichtigste Rolle spielt, können nach der Erstarrung von Stahl Legierungselemente in folgender Form in Raumgitter angeordnet sein:

**Bild 5**

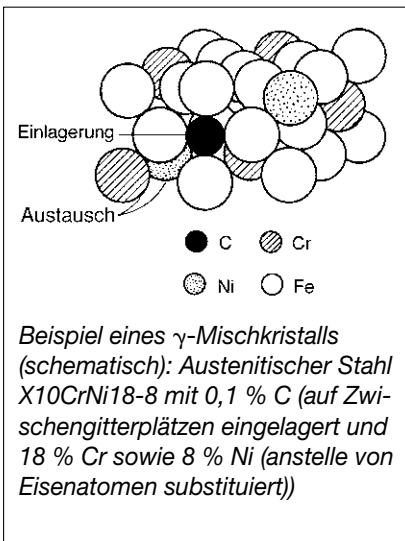


**Bild 6**



- Ersatz von Eisenatomen durch Legierungselemente mit etwa gleich großem Atomdurchmesser (= Austauschmischkristalle, **Bild 7**); z. B. Nickel, Chrom,
- Einlagerung von Legierungselementen mit kleinen Atomdurchmessern in das Gitter (= Einlagerungsmischkristall),
- Formung eines eigenen Raumgitters von Eisen und Legierungselementen in oder zwischen den Atomen des Eisens (= Verbindungs-bildung, **Bild 8**).

Höhere Massenanteile an Kohlenstoff als etwa 0,02 % bewirken, dass der Kohlenstoff nicht mehr eingelagert wird, sondern sich mit dem Eisen oder anderen Elementen zu Carbiden mit eigenem Raumgitter verbindet. Diese sind dann als kleine Kristallite mit eigenem Gitteraufbau auf den Korngrenzen oder in den Ferritkörnern ausgeschieden. Die Verbindungen des Eisens mit dem Kohlenstoff heißen Eisencarbid oder Zementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Von rd. 2 % C an ist die Ausbildung des Zementits so



**Bild 7**

ungünstig für die Formgebung, dass der Werkstoff nur noch durch Gießen in eine bestimmte Form gebracht werden kann. Damit ist auch die bereits früher genannte Grenze zwischen Stahl und Gusseisen gekennzeichnet.

Mit zunehmendem Massenanteil an Kohlenstoff verschieben sich die Temperaturen, bei denen die Umwandlung von  $\alpha$ - zu  $\gamma$ -Eisen erfolgt. Im Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff (**Bild 9** auf Seite 8) sind die für den jeweiligen Kohlenstoff-Massenanteil gültigen Umwandlungstemperaturen zusammengestellt. Mithilfe dieses Schaubilds können auch die zu jedem Kohlenstoff-Massenanteil gehörenden Gefügestände bei Raumtemperatur und bei höheren Temperaturen ermittelt werden.

Die bisherigen Ausführungen gelten für langsames Erwärmen und Abkühlen. Bei raschen Temperaturänderungen hat der Kohlenstoff nicht genügend Zeit zur Diffusion. Über verschiedene hohe Abkühlgeschwindigkeiten lassen sich die Gefügeausbildungen in weiten Grenzen verändern, da die Temperatur, bei der die Umwandlung von  $\gamma$ - zu  $\alpha$ -Eisen erfolgt, zu niedrigeren Werten verschoben wird. Gleichzeitig bilden sich aufgrund der behinderten Kohlenstoffdiffusion Gefügeverzerrungen

aus, die sich in einer Steigerung der Härte ausdrücken.

Die Verfahren der Wärmebehandlung sind gekennzeichnet durch kontrolliertes Erwärmen und Abkühlen mit bestimmter Geschwindigkeit, sodass sich verschiedene Gefüge- und Härtezustände ausbilden. Die wichtigen, anhand des Zustandsschaubildes Eisen-Kohlenstoff und durch die Wärmebehandlung zu definierenden Gefügearten von Stahl sind (**Bilder 10 bis 12**):

- Ferrit,
- Perlit,
- Bainit,
- Martensit,
- Austenit und
- Zementit.

Der als wichtigstes Legierungselement für Stahl bezeichnete Kohlenstoff beeinflusst insbesondere die mechanischen und technologischen Eigenschaften wie Zugfestigkeit, Streck-

### Einteilung der Stähle nach:

chemischer Zusammensetzung  
unlegierter Stahl  
legierter Stahl

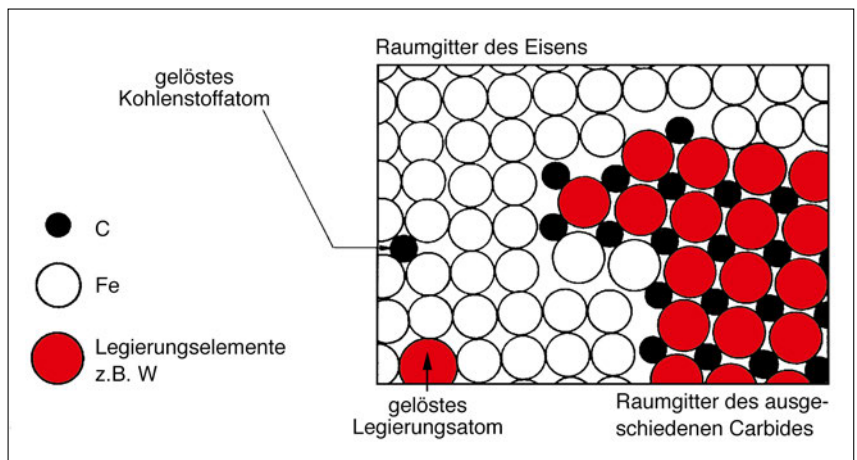
Gebrauchsanforderungen  
Qualitätsstahl  
Edelstahl

Herstellungsverfahren  
Schrott-Route (Elektroofen)  
Roheisen-Route (Hochofen-Sauerstoffblaskonverter)

Verwendungszweck  
Baustahl  
Federstahl  
Werkzeugstahl  
usw.

chemischen oder mechanischen Eigenschaften  
kaltzäher Stahl  
warmfester Stahl  
nichtrostender Stahl  
usw.

grenze, Bruchdehnung, Härte und Verschleißwiderstand sowie Schweiß-eignung und Umformbarkeit.



**Bild 8**

Aus dem Raumgitter des Eisens ausgeschiedenes Carbid eines Legierungselements (schematisch)