

# Anhang und Ergänzungen

## 1 Eisenwerkstoffe

Generell lassen sich Eisenmetalle in Stähle und Gusseisen einteilen.

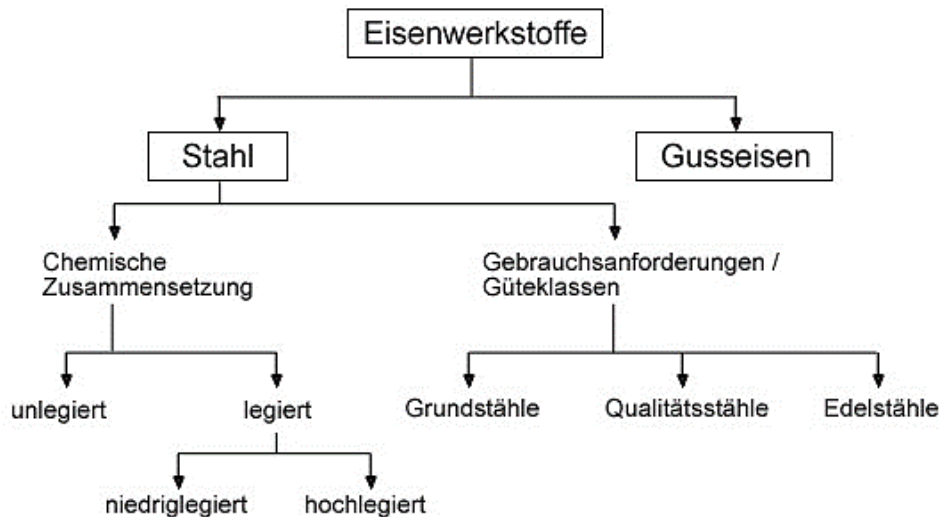


Abb. 1: Gliederung der Eisenwerkstoffe<sup>1</sup>

- a) Eisenwerkstoffe mit eutektischem Grundgefüge und einem Kohlenstoffgehalt von 2.06-6.67 % bilden beim Erstarren eine Kristallgemischlegierung und werden als **Gusseisen** bezeichnet.
- b) Eisenwerkstoffe mit eutektoidem Grundgefüge und einem Kohlenstoffgehalt von weniger als 2.06 % bilden beim Erstarren eine Mischkristalllegierung und werden als **Stahl** bezeichnet.

Tab. 1: Kohlenstoffgehalte von Eisenwerkstoffen in Masse-%	
Weicheisen	$C < 0.02 \%$
untereutektoide Stähle	$0.02 \% < C < 0.8 \%$
eutektoider Stahl	$C = 0.8 \%$
übereutektoide Stähle	$0.8 \% < C \leq 2.06 \%$
untereutektisches Gusseisen	$2.06 \% < C < 4.3 \%$
eutektisches Gusseisen	$C = 4.3 \%$
übereutektisches Gusseisen	$4.3 \% < C \leq 6.67 \%$

<sup>1</sup> <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/stahl-eisen/>

## 1.1 Eisen

### 1.1.1 Eisenerz

Eisen kommt in der Natur meist in Form von Erz vor, welches sowohl im Boden (Skandinavisches Rasenerz) als auch tief im Erdreich zu finden ist. Im Eisenerz sind auch andere Elemente (sog. Eisenbegleiter) wie Kohlenstoff, Phosphor, Schwefel, Mangan usw. enthalten. Das aufbereitete Eisenerz wird im Hochofen zu Roheisen verarbeitet. Die dabei anfallende Schlacke wird als Hüttensand in der Zementindustrie verwendet. Dem Roheisen muss durch sog. Frischen ein Teil des aufgenommenen Kohlenstoffs sowie ein Grossteil des aufgenommenen Phosphors und Schwefels entzogen werden, bevor es zu Gusseisen und diversen Stahlsorten weiterverarbeitet werden kann.

### 1.1.2 Reineisen

Das Schaubild zeigt die unterschiedlichen Phasen beim Abkühlen von Eisen. An charakteristischen Punkten im Abkühlungsverlauf, den sog. Haltepunkten, verweilt die Temperatur eine gewisse Zeit, bis die Phasenumwandlung abgeschlossen ist.

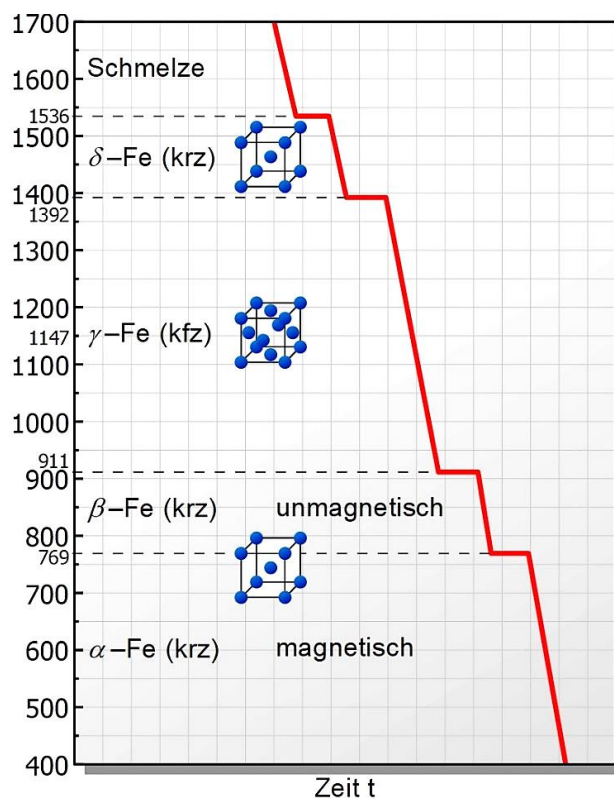


Abb. 2: Phasen von Eisen beim Abkühlen<sup>2</sup>

Reineisen ist ferromagnetisch bis zur Curie-Temperatur von 769 °C, oberhalb dieser Temperatur verliert es seine ferromagnetischen Eigenschaften und wird paramagnetisch. Es handelt sich um einen quantenphysikalischen Effekt, der mit dem Elektronenspin in Verbindung steht.

Früher wurde von  $\alpha$ -Eisen und  $\beta$ -Eisen gesprochen. Aufgrund derselben Kristallstruktur ist in der neueren Fachliteratur nur noch von  $\alpha$ -Eisen die Rede, welches sich bei einer Temperatur  $\geq 911$  °C in  $\gamma$ -Eisen umwandelt.

Eisen ohne Kohlenstoff bildet ein ferritisches Gefüge, dass aus unregelmässig geformten Kristalliten (Körnern) besteht. Reineisen kommt bei Temperaturen geringer als 911 °C als  $\alpha$ -Eisen mit einer kubisch-raumzentrierten Kristallstruktur vor. Oberhalb von 911 °C bildet sich  $\gamma$ -Eis-

<sup>2</sup> <https://www.tec-science.com/de/werkstofftechnik/eisen-kohlenstoff-diagramm/gefugeentstehung-waehrend-der-erstarrung/>

en (Austenit) mit einer kubisch-flächenzentrierten Struktur und einer geringfügig höheren Dichte. Eine weitere Strukturänderung erfolgt bei 1'390 °C durch Umwandlung in ferritisches  $\delta$ -Eisen mit erneut kubisch-raumzentrierter Struktur.

$\alpha$ -Eisen (Ferrit) bildet bei Raumtemperatur einen kubisch-raumzentrierten Kristallwürfel aus 9 Fe-Atomen. Ab 911 °C wandelt es sich in  $\gamma$ -Eisen (Austenit) mit kubisch-flächenzentrierten Elementarzellen aus 14 Fe-Atomen. Beim langsamen Abkühlen entsteht aus dem Austenit wieder Ferrit.

- a)  $\alpha$ -Eisen (Ferrit)                      b)  $\gamma$ -Eisen (Austenit)  
kubisch-raumzentriert (krz)              kubisch-flächenzentriert (kfz)

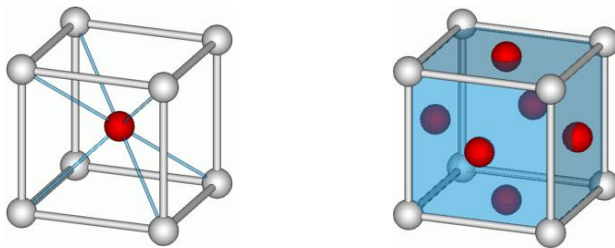


Abb. 3: Gitterstruktur von Eisen<sup>3</sup>

Austenit ist ein Gefüge mit gelöstem Kohlenstoff, das bei Raumtemperatur als auch hohen Temperaturen stabil ist. Austenit kann durch schnelle Abkühlung, bei der die Bildung von Perlit unterdrückt wird, erzeugt werden.

### 1.1.3 Schmiedeeisen

Schmiedeeisen (Wrought iron) ist kohlenstoffarm und deswegen besonders gut schmiedbar. Es wurde im 19. Jahrhundert im "Puddelverfahren" (Flammofenfrischen) hergestellt. Häufig besitzt dieses Eisen aber einen erhöhten Phosphor- und Schwefelgehalt.

a) ARMCO® Eisen mit einem Reinheitsgehalt von über 99,85 % wurde 1909 von der American Rolling Mill Company entwickelt.

b) Sog. Buttereisen hat mit ca. 0.03 % einen geringfügig höheren Kohlenstoffgehalt als Reineisen und ist auch etwas zäher, aber deutlich weicher als Baustahl. Es lässt sich leicht strecken und spalten und lochen ohne einzureissen und auch sehr gut feuerverschweißen.

Wenn beim Erstarren einer Eisenschmelze genügend Silizium vorhanden ist, wird der Kohlenstoff nicht als Zementit, sondern elementar als Graphit ausgeschieden.

### 1.1.4 Gusseisen

a) Eutektisches Gusseisen mit einem Kohlenstoffgehalt von 4.3 % besitzt einen relativ niedrigen Schmelzpunkt von 1'147 °C und bildet ein Gefüge aus fein verteiltem Austenit und Zementit, welches unmittelbar nach der Erstarrung als **Ledeburit I** bezeichnet wird. Da bei weiterer Abkühlung die Löslichkeit für Kohlenstoff abnimmt, scheiden die Austenitkristalle permanent Zementit aus. Schließlich ist bei 723 °C so viel Kohlenstoff aus dem Austenit ausgeschieden, dass dieser die eutektoide Zusammensetzung von 0.8 % C erreicht hat. Nun beginnen sich die Austenitkristalle des Ledeburit I bei konstanter Temperatur in Perlit zu wandeln. Dieses eutektische Phasengemisch aus Perlit und Zementit wird aufgrund seiner Struktur als

<sup>3</sup> [https://de.wikibooks.org/wiki/Werkstoffkunde\\_Metall/\\_Innerer\\_Aufbau/\\_Struktur](https://de.wikibooks.org/wiki/Werkstoffkunde_Metall/_Innerer_Aufbau/_Struktur)

**Ledeburit II** bezeichnet.

b) Bei untereutektischem Gusseisen scheiden sich bei Erreichen der Liquiduslinie lediglich Austenit-Primärkristalle aus der Schmelze aus, wodurch der Kohlenstoffgehalt in der Restschmelze zunimmt. Ist der Kohlenstoffgehalt bei 1'147 °C auf 4.3 % angestiegen, so kristallisiert die Restschmelze bei konstanter Temperatur zum Eutektikum resp. **Ledeburit I**. Unmittelbar nach der Erstarrung besteht das Gefüge folglich aus dem Eutektikum und den zuvor primär ausgeschiedenen Austenitkristallen. Sowohl der Primäraustenit als auch die im Ledeburit I enthaltenen Austenitkristalle scheiden aufgrund der sinkenden Löslichkeit des Kohlenstoffs mit fortschreitender Abkühlung Zementit aus. Bei 723 °C ist die eutektoide Zusammensetzung erreicht (sowohl in den Primärkristallen als auch im Eutektikum). Während sich das Ledeburit I dabei zu Ledeburit II wandelt, zerfallen die Primär-Austenitkörner zu Perlitkörnern. Das abgekühlte untereutektische Gusseisen besteht bei Raumtemperatur aus **Ledeburit II** und Perlit sowie dem aus den Austenitkristallen ausgeschiedenen Zementit.

c) Bei übereutektischem Gusseisen kristallisiert während der Erstarrung zunächst nur Primärzementit mit einer streifenförmigen Struktur. Aufgrund der damit verbundenen Kohlenstoffausscheidung aus der Restschmelze sinkt dort der Kohlenstoffgehalt. Ist schließlich die eutektische Zusammensetzung von 4.3 % Kohlenstoff bei 1'147 °C in der Restschmelze erreicht, erstarrt diese zum Eutektikum resp. **Ledeburit I**. Unmittelbar nach der Erstarrung besteht das Gefüge folglich aus dem primärausgeschiedenen Streifenzementit, der im umgebenden Ledeburit I eingebettet ist. Der im Eutektikum enthaltene Austenit unterliegt bei weiterer Temperaturabnahme der fortschreitenden Zementitausscheidung. Ist bei 723 °C der Kohlenstoffgehalt im Austenit auf 0.8 % gesunken, so beginnt sich dieser in Perlit zu verwandeln. Aus dem eutektischen Ledeburit I entsteht so das Ledeburit II. Das abgekühlte übereutektische Gusseisen besteht bei Raumtemperatur aus den primär ausgeschiedenen Zementitstreifen, die sich im Eutektikum des **Ledeburits II** einbetten.

### 1.1.5 Stahl

In Stählen kommt Kohlenstoff gebunden als Eisenkarbid ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) vor, das **Zementit** genannt wird und hart und spröde ist. Je grösser der Zementitanteil im Gefüge ist, desto härter und spröder ist der Stahl. Bei geringem Kohlenstoffgehalt kommt Zementit in Form von dünnen Streifen (Streifenzementit) vor, welche die Ferritkörner durchziehen. Metallurgisch wird zwischen Primärzementit (primäre Kristallisation aus der Schmelze), Sekundärzementit (Ausscheidung aus dem Austenit) und Tertiärzementit (Ausscheidung aus dem Ferrit) unterschieden.

a) In eutektoidem Stahl mit einem Kohlenstoffgehalt von 0.8 % sind alle Ferritkörner mit Streifenzementit durchzogen. Dieses Gefüge wird infolge seines perlmuttartigen Aussehens im Schlibfbild als **Perlit** bezeichnet.

b) Untereutektoide Stähle mit einem Kohlenstoffgehalt von weniger als 0.8 % enthalten wenig Kohlenstoff, um ein Gefüge nur aus Perlitkörnern auszubilden. Es ergibt sich ein **ferritisch-perlitisches** Gefüge aus Ferrit- und Perlitkörnern.

c) Übereutektoide Stähle mit einem Kohlenstoffgehalt über 0.8 % enthalten dagegen genügend Kohlenstoff, damit sich zusätzlich zum Streifenzementit im Perlit auch Zementit an den Korngrenzen (Korngrenzenzementit) ablagert. Das derart gebildete Gefüge wird **Perlit-Zementit** genannt.

Bei rascher Abkühlung kann anstelle von Perlit auch **Bainit** bzw. bei sehr schneller Abkühlung **Martensit** auskristallisieren.

### 1.1.6 Résumé Gefügearten

Abhängig vom jeweiligen Kohlenstoffgehalt bilden Eisenwerkstoffe bei Raumtemperatur unterschiedliche Gefüge.

- a) Eisen mit weniger als 0.02 % Kohlenstoff besteht aus einem Gefüge von Ferritkristallen.
- b) Eisen mit einem Kohlenstoffgehalt über 0.02 % besteht aus einem Gefüge aus Ferrit und Perlit.
- c) Eisen mit 0.8 % Kohlenstoff besteht aus Perlit (einem eutektoiden Phasengemisch aus Zementitlamellen in einem Ferritgefüge).
- d) Eisen mit einem Kohlenstoffgehalt zwischen 0.8-2.06 % besteht aus Perlit und Korngrenzenzementit.
- e) Eisen mit einem Kohlenstoffgehalt von 4.3 % besteht aus Ledeburit II (einem eutektischen Phasengemisch aus Perlit und Zementit).
- f) Eisen mit einem Kohlenstoffgehalt von 6.67 % besteht aus hartem und spröden Zementit.

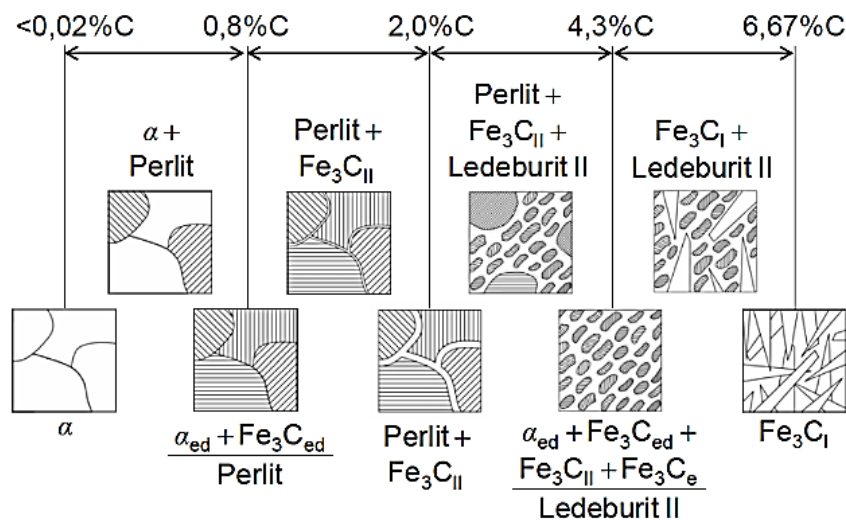


Abb. 4: Gefügearten des metastabilen Eisen-Kohlenstoff-Systems<sup>4</sup>

Wenn beim Erstarren einer Eisenschmelze genügend Silizium vorhanden ist, wird der Kohlenstoff nicht als Zementit, sondern elementar als Graphit ausgeschieden.

<sup>4</sup> Prof. Dr. K. Wegener: Seminarübung Eisen-Kohlenstoff (2015).

## 1.2 Eisen-Kohlenstoff-Diagramm

Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (EKD) ist ein Phasendiagramm für ein binäres System aus den Elementen Eisen (Fe) und Kohlenstoff (C).

a) Der Linienzug ABCD stellt die *Liquiduslinie* dar, oberhalb dieser ist die gesamte Legierung als Schmelze vorhanden. Wird bei Abkühlung die Liquiduslinie unterschritten, beginnt die Primärkristallisation aus der Schmelze.

b) Der Linienzug AECF entspricht der *Soliduslinie*, unterhalb derer die Legierung komplett erstarrt ist. Im Temperaturintervall zwischen Liquidus- und Soliduslinie besitzt das Eisen-Kohlenstoff-System eine breiige Konsistenz, bestehend aus Restschmelze,  $\delta$ -Eisen,  $\gamma$ -Eisen und Zementit in wechselnden Konzentrationen und Mengenverhältnissen.

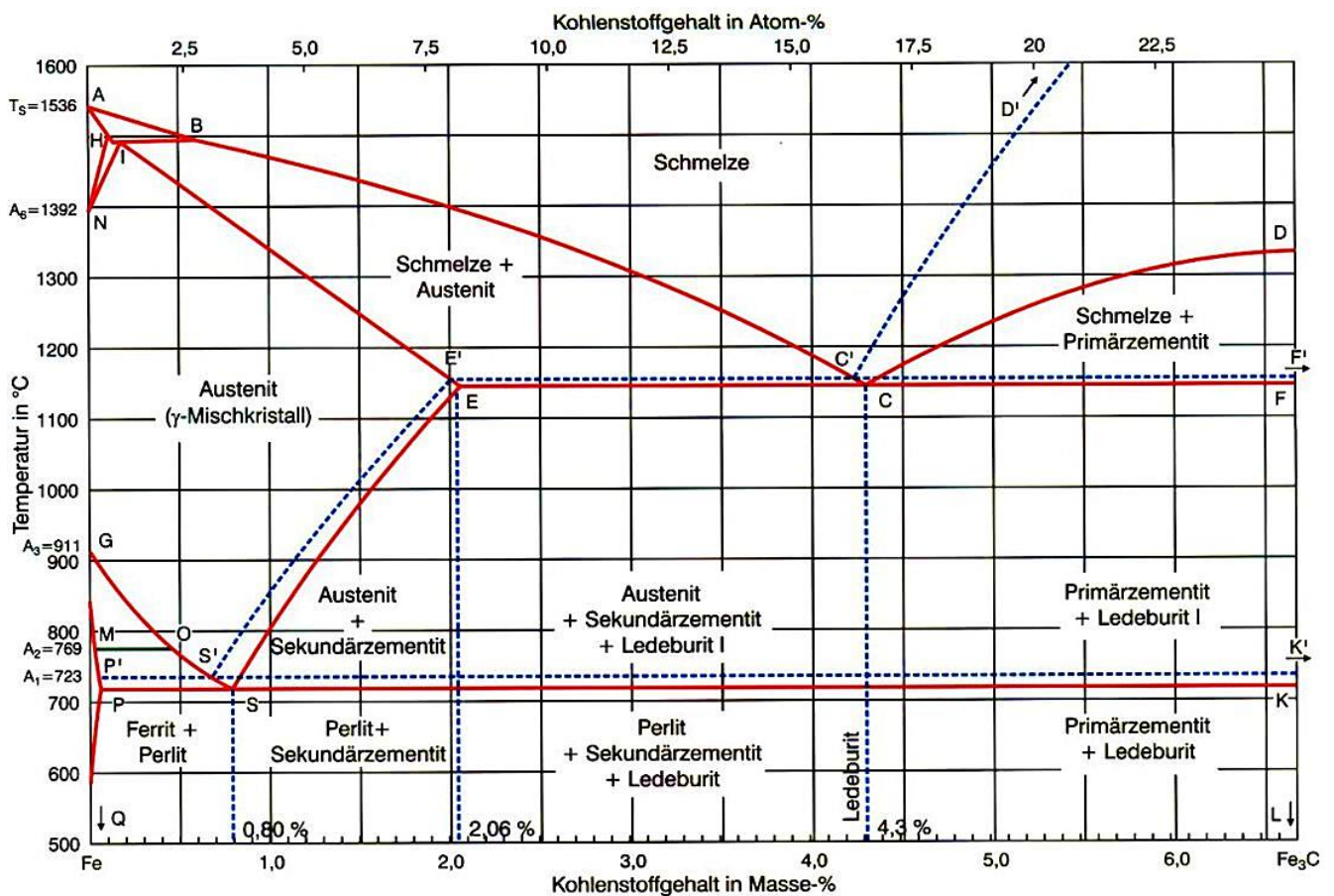


Abb. 5: Eisen-Kohlenstoff-Diagramm<sup>5</sup> (rot = metastabil, blau = stabil)

Betrachtet man das EKD en detail, so kann am Beispiel eines eutektoiden Stahls die Gefügebildung veranschaulicht werden. Eine gedachte senkrechte Linie im EKD durch den Punkt S bei 723°C durchläuft bei langsamer Abkühlung unterschiedliche Bereiche mit unterschiedlichen Gitterstrukturen. Bei einem C-Gehalt von 0,8 % findet bei Abkühlung zunächst keine Ausscheidung des Kohlenstoffs statt, da der Austenit bis 723 °C genügend Zwischengitterplätze besitzt. Doch bei 723 °C klappt dieses Gitter in ein kubisch-raumzentriertes Gitter mit einem

<sup>5</sup> [http://wiki.arnold-horsch.de/index.php/Grundlagen\\_der\\_Metallkunde](http://wiki.arnold-horsch.de/index.php/Grundlagen_der_Metallkunde)

erheblich geringeren Lösungsvermögen um. Der nun überschüssige Kohlenstoff verbindet sich mit Eisen zu Zementit resp. Eisenkarbid ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), wobei die benachbarte Zone an Kohlenstoff verarmt und Ferrit ( $\alpha$ -Mischkristalle) bildet. Durch diese Wechselwirkung entstehen die im Gefüge sichtbaren Lamellen aus Ferrit und Zementit, welche Perlit genannt werden. Je mehr Kohlenstoff im Stahl vorhanden ist, desto mehr Perlit bildet sich im Gefüge. Bei der eutektoiden Umwandlung von Austenit entsteht ein Gefüge nur aus Perlit. Bei C-Gehalten über 0.8 % wird der nicht länger lösbare Kohlenstoff in Form von Zementit an den Korngrenzen des Perlits angelagert.

### 1.3 Glossar

- **$\alpha$ -Eisen** (Ferrit) → Mischkristalle mit kubisch raumzentrierter Kristallstruktur im Eisen-Kohlenstoff-System; Ferrit erniedrigt die Festigkeit, verbessert aber Zähigkeit und Dehnung.
- **$\gamma$ -Eisen** (Austenit) → Mischkristalle mit kubisch flächenzentrierter Kristallstruktur im Eisen-Kohlenstoff-System.
- **$\delta$ -Eisen** → Mischkristalle mit kubisch raumzentrierter Kristallstruktur im Eisen-Kohlenstoff-System.

Tabelle 2: Temperaturabhängige Löslichkeit des Kohlenstoffs	
$\alpha$ -Eisen (Ferrit)	bei 20 °C: < 0.0001 % bei 723 °C: 0.02 %
$\gamma$ -Eisen (Austenit)	bei 723 °C: 0.8 % bei 1'147 °C: 2.06 %
$\delta$ -Eisen	bei 1'493 °C: 0.1 %

- **Bainit** → ein Zwischenstufengefüge, das aus Austenit und kohlenstoffgesättigtem Ferrit besteht; das Gemisch wird durch Zugaben von Nickel und Molybdän oder durch eine entsprechende Wärmebehandlung hergestellt.
- **Martensit** → ein nadelig aussehendes Gemisch im Eisen-Kohlenstoff-System mit hoher Härte und hoher Zugfestigkeit.
- **Graphit** → stabile Ausbildung erstarrten Kohlenstoffes, dessen Gefüge (lamellar oder kugelförmig) einen wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften ausübt.
- **Ledeburit I** → das unmittelbar nach der Erstarrung vorliegende eutektische Phasengemisch aus Austenit und Zementit (51.4 % Austenit + 48.6 % Zementit).
- **Ledeburit II** → das bei Raumtemperatur vorliegende eutektische Phasengemisch aus Perlit und Zementit (51.4 % Perlit + 48.6 % Zementit).
- **Perlit** (88.3 % Ferrit + 11.7 % Zementit) → ein eutektisches Phasengemisch aus Zementit-



lamellen in einem Ferritgefüge. Perlit erhöht die Festigkeit, die Dehnung nimmt dagegen etwas ab. Der eutektoide Punkt liegt bei 723 °C und einem C-Gehalt von 0.8 %.

- **Zementit** → ein extrem hartes und sprödes Gefüge aus Eisenkarbid ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) mit einem C-Gehalt von 6.67 %, das die Verschleisseigenschaften und die Festigkeit von Eisenwerkstoffen erhöht; bei langen Glühzeiten oder extrem langsamer Abkühlung zerfällt Zementit in Eisen und Graphit.
- **Eutektikum** → Gefüge einer Verbindung wie bspw. Lötzinn ( $\text{Sn}_{62}\text{Pb}_{38}$ ), deren Bestandteile als Ganzes bei einer bestimmten Temperatur flüssig oder fest werden. Ein Erstarrungsintervall existiert nicht (die Liquidustemperatur ist identisch mit der Solidustemperatur). Ein eutektisches Gemisch besitzt einen niedrigeren Erstarrungspunkt, als die einzelnen seiner Bestandteile.
- **Eutektoid** → Eutektikum, das sich bei einer Gefügeumwandlung bereits im festen Zustand befindet (Umwandlung von fest zu fest).
- **Schmelze** → darunter wird im Kontext die flüssige Eisen-Kohlenstoff-Verbindung verstanden.

## 2 Gusswerkstoffe

Überwiegt während dem Erkalten einer Eisenschmelze mit mehr als 2.06 % Kohlenstoff der Mangananteil, so verbindet sich der Kohlenstoff mit dem Eisen zu Eisenkarbid (Zementit) und es entsteht "weisses Gusseisen" mit einer weissen Bruchfläche (daher der Name). Durch Tempern lässt sich daraus Temperguss erzeugen. Überwiegt nach dem Erkalten der Siliziumgehalt, so entsteht "graues Gusseisen" mit einer grauen Bruchfläche. Im Unterschied zum weissen Gusseisen kommt im Gefüge nun Graphit anstelle von Zementit vor.

Stahlguss	Weisses Gusseisen	Graues Gusseisen	Sondergusseisen
C-Gehalt < 2 %	C-Gehalt 2.4-4.5 %	C-Gehalt 2.5-5 %	C-Gehalt 1.5-3.5 %

### 2.1 Weisses Gusseisen

Das als **Hartguss** (GJN) bekannte weisse Gusseisen mit einem Kohlenstoffgehalt von 2.5 bis 3.8 % besteht bei den unlegierten Sorten aus Ledeburit und Zementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) oder eutektoid zerfallenem Austenit (Perlit). Bei den hochlegierten Hartgusswerkstoffen entstehen Karbide des Chroms, Molybdäns, Vanadiums oder Niobs.

Die Bildung von Hartguss wird durch einen hohen Mangangehalt oder durch schnelles Abkühlen in Eisenformen bewirkt. Hartguss – als ein äusserst verschleissfester Werkstoff – wird für Mahlscheiben, Mischerschaufeln, Erzbrecher und Prallplatten verwendet. Nachteilig erweist sich die schlechte Zerspanbarkeit, so dass Bauteile aus Hartguss in der Regel nur durch Schleifen und Erodieren bearbeitet werden können.



## 2.2 Graues Gusseisen

Graues Gusseisen mit einem Kohlenstoffgehalt von etwa 3.5 Masse-% kommt in zwei unterschiedlichen Gefügearten vor. Ohne besondere Behandlung kristallisiert der in der Schmelze enthaltene Kohlenstoff in Gestalt von Graphitlamellen. Damit sich der Graphit nicht lamellenförmig, sondern kugelförmig ausscheidet, muss die Schmelze vor ihrer Erstarrung gezielt mit Zusätzen wie bspw. Aluminium geimpft werden.

### 2.2.1 Grauguss

**Gusseisen mit Lamellengraphit** (GJL, alte Bezeichnung GG), auch als "Grauguss" bekannt, ist ein korrosionsbeständiger Werkstoff mit hervorragenden Giess- und guten Selbstschmiereigenschaften. Ein Vorteil der Graphitlamellen im Gussgefüge ist ihre schwingungsdämpfende Wirkung. Nachteilig ist aber, dass die Graphitlamellen wie Kerben wirken; dadurch verringert sich die Zugfestigkeit. Aus diesem Grunde sollte Grauguss nicht auf Zug, sondern auf Druck beansprucht werden. Verwendung für Maschinenbette, Motorengehäuse, Getriebekästen, Bremsscheiben und Laufbüchsen.

### 2.2.2 Sphäroguss

**Gusseisen mit Kugelgraphit** (GJS, alte Bezeichnung GGG), auch als "Sphäroguss" bezeichnet, ist ein Werkstoff mit hoher Festigkeit und guter Oberflächenhärte. Durch die kugelförmige Graphiteinlagerung wird die Kerbwirkung der Lamellenstruktur eliminiert. Verwendung für verschleissbeanspruchte Teile bei dynamischer Belastung, wie bspw. Kurbelwellen, Pleuel, Turbinengehäuse oder Radnaben.

### 2.2.3 Vermicularguss

Als Kompromiss zwischen Lamellen- und Sphäroguss bietet sich **Vermicularguss** an. Dabei wird der sich im Gussgefüge formierende Graphit "wurmartig" ausgeschieden (wobei sich bis zu einem gewissen Anteil auch kugelförmiger Graphit bilden kann). Verwendung aufgrund der ausgezeichneten Temperaturwechselbeständigkeit vor allem im Motorenbau.

## 2.3 Temperguss

Beim sogenannten Temperguss (Flockengraphit) formt sich der Kohlenstoff zu einzelnen Flocken aus Graphit. Bevor die flockenförmige Struktur entsteht, erstarrt der Temperrohrguss zunächst graphitfrei. Im Gefüge findet sich anstelle von Graphit lediglich Zementit wie beim weissen Gusseisen. Erst durch eine nachträgliche Wärmebehandlung (Tempern genannt) zerfällt der metastabile Zementit in seine flockenförmige Graphitform. Temperguss kommt in zwei unterschiedlichen Gefügearten als "weisser Temperguss" und als "schwarzer Temperguss" vor.

### 2.3.1 Weisser Temperguss

**Weisser Temperguss** (GJMW) mit Gehalten von 2.8-3.4 % Kohlenstoff (sowie 0.4-0.8 % Silizium, 0.4-0.6 % Mangan, 0.12-0.25 % Schwefel und ca. 0.1 % Phosphor). Aus weissem Temper-

guss werden dünnwandige Bauteile wie Armaturen und Fittings angefertigt.

### 2.3.2 Schwarzer Temperguss

2) **Schwarzer Temperguss** (GJMB) mit Gehalten von 2-2.9 % Kohlenstoff (sowie 1.2-1.5 % Silizium, 0.4-0.6 % Mangan, 0.12-0.18 % Schwefel und ca. 0.1 % Phosphor). Aus schwarzem Temperguss werden belastbare Gegenstände wie bspw. Schraubstöcke hergestellt.

## 2.4 Stahlguss

**Stahlguss** (GS) mit einem Kohlenstoffgehalt von 0.15-0.45 % wird in zwei Formen vertrieben.

- 1) Unlegierter Stahlguss umfasst Eisen-Kohlenstoff-Legierungen mit maximalen Gehalten von 0.6 % Silizium und 1 % Mangan.
- 2) Niedrig- bis hochlegierter Stahlguss enthält in wechselnden Anteilen zusätzliche Legierungselemente wie Chrom, Nickel, Molybdän, Vanadium, Wolfram und andere.

Stahlguss ist dem Gusseisen dann vorzuziehen, wenn hohe Festigkeit und hohe Zähigkeit verlangt werden. Stahlguss ist gut schweisbar. Nachteilig ist die höhere Schmelztemperatur von ca. 1'600 °C und der mit rund 2 % relativ grosse Schwund beim Erstarren. Desweiteren müssen Stahlgussteile aufgrund ihrer Sprödigkeit und Grobkörnigkeit vor ihrer eigentlichen Nutzung einer Wärmebehandlung unterzogen werden. Verwendung als Konstruktionswerkstoff im Schiffsbau, Fahrzeugbau, Anlagenbau, Maschinenbau usw.

## 3 Stähle

Prinzipiell lassen sich Stähle aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung in zwei Gruppen gliedern.

- 1) Unlegierte Stähle, die ausser Eisen, Kohlenstoff und Mangan keine anderen Elemente in nennenswerter Menge enthalten. Der Anteil einzelner Legierungselemente (Mangan ausgenommen) ist kleiner als 0.5 %. Für Konstruktionen ohne besondere Ansprüche wird vielfach Baustahl verwendet.
- 2) Legierte Stähle, die in zwei Sorten vorkommen:
  - a) Niedriglegierte Stähle (der Anteil einzelner Legierungselemente ist kleiner als 5 %).
  - b) Hochlegierte Stähle (der Anteil eines oder mehrerer Legierungselemente ist  $\geq 5$  %).

### 3.1 Unlegierte Stähle

Unlegierte Stähle mit einem Kohlenstoffgehalt über 0.3 % werden als Carbonstähle bezeichnet. Obwohl auch Kohlenstoff ein Legierungselement ist, werden Carbonstähle für gewöhnlich als unlegiert bezeichnet. Aus Carbonstählen mit einem Kohlenstoffgehalt von 0.4-1.4 % werden aufgrund ihrer Härte verschiedenste Schneidwerkzeuge (Messer, Beile, Äxte, Stechbeitel) angefertigt.

Beispiele:

- ▶ Gegeben sei ein Stahl mit der Kurzbezeichnung C105 (1.1545). Es handelt sich um einen Carbonstahl mit einem Kohlenstoffgehalt von  $\approx 1\%$  für eine harte, schnitthaltige und im Kern zähe Schneide.
- ▶ Gegeben sei ein Stahl mit der Bezeichnung 1095 (1.1274). Es handelt sich um einen Carbonstahl hoher Härte und Festigkeit mit einem Kohlenstoffgehalt von  $\approx 1\%$ , einem Mangan-gehalt von 0.45 % sowie Spuren von Phosphor und Schwefel.

<b>Tabelle 3: Grenzwerte für unlegierte Stähle</b> (in Masse-% nach DIN EN 10020)							
Symbol	Element	9/89	Entwurf 8/97	Symbol	Element	9/89	Entwurf 8/97
Al	Aluminium	0,10	0,30	Ni	Nickel	0,30	0,60
B	Bor	0,0008	0,0008	Pb	Blei	0,40	0,40
Bi	Wismut	0,10	0,10	Se	Selen	0,10	0,10
Co	Kobalt	0,10	0,30	Si	Silizium	0,50	0,60
Cr	Chrom	0,30	0,30	Te	Tellur	0,10	0,10
Cu	Kupfer	0,40	0,40	Ti	Titan	0,05	0,05
La	Lanthanide	0,05	0,10	V	Vanadium	0,10	0,10
Mn	Mangan	1,65	1,65	W	Wolfram	0,10	0,30
Mo	Molybdän	0,08	0,08	Zr	Zirkon	0,05	0,05
Nb	Niob	0,06	0,06				

Anm.: AISI-Bezeichnungen 1050 ... 1095 für Kohlenstoffstähle; die ersten beiden Ziffern beziehen sich auf die im Stahl vorkommenden Hauptelemente (1 = Kohlenstoff, 0 = kein anderes Element vorhanden), die letzten beiden Ziffern auf den durchschnittlichen Kohlenstoffgehalt.<sup>6</sup>

### 3.2 Niedrig legierte Stähle

Für die Herstellung von Messern werden vielfach niedriglegierte Kohlenstoffstähle verwendet, bei denen die Summe der Legierungselemente 5 Masseprozent nicht überschreitet. Solche Stähle zeichnen sich durch gute Schnitthaltigkeit und erhöhte Zähigkeit aus, sind aber nicht rostbeständig und bedürfen daher der regelmässigen Pflege mit einem Klingenöl.

Beispiele:

- ▶ Gegeben sei ein Stahl mit der Kurzbezeichnung 42CrMo4 (1.7225). Dieser Stahl mit hoher Festigkeit und hoher Zähigkeit setzt sich aus  $\approx 0.4\%$  Kohlenstoff, 1 % Chrom und ein wenig

<sup>6</sup> AISI = American Iron und Steel Institute.

Molybdän zusammen.

► Gegeben sei ein Stahl mit der Kurzbezeichnung 72NiCrMo4-2 (1.2703). Es handelt sich um einen niedriglegierten Kohlenstoffstahl mit  $\approx 0.7\%$  Kohlenstoff, 1 % Nickel, 0.5 % Chrom und etwas Molybdän, der eine gute Verschleissfestigkeit und Härte besitzt.

Die vorangesetzte Zahl zeigt den mittleren Kohlenstoffgehalt in Hunderstel, anschließend folgen die Legierungselemente und ihre Mittelwerte gemäss nachfolgendem Schlüssel.

Multiplikator bei Co, Cr, Mn, Ni, Si, W = x 4

Multiplikator bei Al, Cu, Mo, Ti, V, Nb, Ta, Be, Pb, Zr = x 10

Multiplikator bei N, P, S, Ce = x 100

Multiplikator bei B = x 1000

### 3.3 Hochlegierte Stähle

Stähle bei denen ausser Kohlenstoff der Gehalt eines Legierungselementes 5 Masseprozent übersteigt, werden als hochlegierte Stähle mit einem X vor der ersten Zahl bezeichnet. Die nach den Elementesymbolen folgenden Zahlenwerte entsprechen den mittleren Masseprozenten der Legierungselemente.

Bei den hochlegierten Stählen sind wiederum zwei Gruppen zu unterscheiden, nämlich:

- a) Nicht rostträge hochlegierte Stähle.
- b) Rostträge (korrosionsbeständige) hochlegierte Stähle.

Beispiele:

► Gegeben sei ein Stahl mit der Kurzbezeichnung X50CrMoV8-1 (1.2360). Es handelt sich um einen hochlegierten, aber nicht rostträgen Stahl mit 0.5 % Kohlenstoff, 8 % Chrom und 1 % Molybdän sowie etwas Vanadium (auch als Chipper-Steel bekannt).

► Gegeben sei ein Stahl mit der Kurzbezeichnung X100CrMoV5-1 (1.2363). Es handelt sich um einen hochlegierten, aber nicht rostträgen Kaltarbeitsstahl mit 1 % Kohlenstoff, 5 % Chrom, 0.9 bis 1.2 % Molybdän sowie etwas Vanadium.

► Gegeben sei ein Stahl mit der Kurzbezeichnung X5CrNi18-10 (1.4301), auch als V2A<sup>7</sup> bekannt. Es handelt sich um einen rostträgen austenitischen Stahl mit  $\approx 0.05\%$  Kohlenstoff, 18 % Chrom und 10 % Nickel, der gelegentlich für die relativ weichen Aussenlagen von Sanmai-Klingen verwendet wird.

► Gegeben sei ein Stahl mit der Kurzbezeichnung X105CrCoMo18-2 (1.4528). Es handelt sich um einen rostträgen martensitischen Stahl hoher Verschleissfestigkeit mit  $\approx 1\%$  Kohlenstoff,

---

<sup>7</sup> **V2A** (1.4301) und **V4A** (1.4401) wurden 1912 bei Krupp als Bezeichnungen für austenitische Chrom-Nickel-Stähle eingeführt (V bedeutet "Versuchsschmelze").

17 % Chrom, 1.5 % Kobalt und 1.1 % Molybdän, der für rostträge Klingen, Werkzeuge und chirurgische Schneiden hoher Schnitthaltigkeit verwendet wird.

Anm.: Stähle mit einem Chromgehalt von  $\geq 10.5$  % verhalten sich aufgrund der sich an ihrer Oberfläche bildenden Passivierungsschicht rostträge. In der Regel beträgt der Chromgehalt min. 12 %. Zugaben von Molybdän verbessern den Korrosionswiderstand.

### 3.4 Schnellarbeitsstähle

Eine besondere Gruppe bilden die Schnellarbeitsstähle<sup>8</sup> (HS), die sich durch eine hohe Verschleiss- und Anlassbeständigkeit und eine Warmhärte bis 600 °C auszeichnen. Der Kohlenstoffgehalt liegt in der Regel zwischen 0.8 bis 1.4 %, einige Sorten haben Gehalte bis 2 %. Schnellarbeitsstähle werden für Räumnadeln, Spiralbohrer, Gewindebohrer, Fräswerkzeuge und Drehmeissel verwendet. Die Bezeichnung erfolgt mit dem Kennbuchstaben HS und nachfolgenden Zahlen, die in der Reihenfolge Wolfram, Molybdän, Vanadium und Kobalt die jeweiligen Massenprozentage in ganzen, gerundeten Zahlen angeben.

Beispiele:

- ▶ Gegeben sei ein ein Fräser mit der Bezeichnung HS2-10-1-8 (1.3247) mit 2 % Wolfram, 10 % Molybdän, 1 % V Vanadium und 8 % Kobalt.
- ▶ Gegeben sei ein Schnittwerkzeug mit der Bezeichnung HS6-5-2-5, in dem 6 % Wolfram, 5 % Molybdän, 2 % Vandium und 5 % Kobalt enthalten sind.

## 4 Nichteisenmetalle

Bei der Messerfertigung sind verschiedene Buntmetalle (Kupfer, Messinge, Bronzen) von Interesse. Dazu kommen Leichtmetalle wie Aluminium und Sondermetalle wie Titan und deren Legierungen.

Grundsätzlich wird zwischen Knetlegierungen und Gusslegierungen unterschieden. Knetlegierungen sind aufgrund ihrer Duktilität fürs Umformen (Walzen, Schmieden, Pressen) geeignet. Im Gegensatz zu Gusswerkstoffen zeigen Knetlegierungen ein feineres Gefüge.

### 4.1 Legierungen auf Kupferbasis

#### 4.1.1 Messing

Messing ist eine Kupfer-Zink-Legierung von goldgelb glänzender Farbe mit 60-70 % Kupfer und 30-40 % Zinn.

- a) Schmiedemessing (CuZn40) mit 60 % Kupfer und 40 % Zink.
- b) Automatenmessing (CuZn40Pb2), das zwecks besserer Zerspanbarkeit 2 % Blei enthält.
- c) Instrumentenmessing (CuZn30), das sich sehr gut kaltumformen lässt.

---

<sup>8</sup> Alte Benennung als Hochleistungsschnellschnittstahl oder Hochleistungsschnellarbeitsstahl; engl. High Speed Steel (HSS).

d) Gussmessing (G CuZn25Al5), das eine hohe Zugfestigkeit von  $750 \text{ Nm/mm}^2$  besitzt.

Nebst den genannten gibt es noch ein Dutzend anderer Messingsorten. Messing ist Härter als Kupfer (aber nicht so hart wie Bronze) und wird für Blechblasinstrumente, Armaturen, Formstücke und Gleitlager verwendet.

#### 4.1.2 Rotguss

Rotguss (Maschinenbronze) ist eine Kupfer-Zinn-Zink-Blei-Legierung von rötlichgelber Farbe. Bekannt ist bspw. Rotguss Rg7 (CuSn7ZnPb) aus 82 % Kupfer und 7 % Zinn (der Rest verteilt sich auf Zink und Blei in unterschiedlichen Gehalten). Rotguss ist korrosionsbeständig, verschleissfest und besitzt gute Gleitlaufeigenschaften und wird für Gleitlager, Lagerbuchsen, Zahnräder und Fittinge verwendet.

#### 4.1.3 Bronze

Bronze ist ein Oberbegriff für Legierungen aus Kupfer und Zinn mit einem Cu-Anteil von min. 60 %.

a) Zinnbronze enthält 8-40 % Zinn und ist elastisch, zäh und korrosionsbeständig; Verwendung für Zahnräder, Glocken und Schlagzeugbecken.

b) Sinterbronze ist als "poröse Zinnbronze" ideal für selbstschmierende, wartungsfreie Gleitlager.

c) Aluminiumbronze mit 5-12 % Aluminium und 3.5-7 % Eisen ist seewasserbeständig, verschleissfest, elastisch und leicht magnetisch; Verwendung für Federbleche, Waagebalken und Schiffspropeller.

d) Bleibronze besitzt gute Gleit- und Notlaufeigenschaften. Bekannt ist bspw. CC496K (CuSn7Pb15-C) mit 74-80 % Kupfer, 6-8 % Zinn, 13-17 % Blei sowie 0.5-2 % Nickel.

e) Phosphorbronze mit 7 % Zinn und 0.5 % Phosphor besitzt eine hohe Dichte und Festigkeit; Verwendung für zähfeste Maschinenteile und Achsenlager.

f) Leitbronze enthält Magnesium, Cadmium und Zink (insgesamt 3%) und besitzt elektrische Eigenschaften ähnlich wie Kupfer, ist aber zugfester; Verwendung für Freileitungsverbindungen und Starkstromkontakte.

#### 4.1.4 Neusilber

Neusilber (German Silver) ist eine silberweiß glänzende Legierung aus 47-64 % Kupfer, 10-25 % Nickel, 15-42 % Zink (möglicherweise mit Beimischungen von Blei, Zinn, Mangan oder Eisen). Neusilber ist hart und verschleissfest und findet Verwendung für Essbestecke, feinmechanische Geräte, Blasinstrumente, Federn, Steckverbinder, Schlüssel und Schliesszylinder.

## 4.2 Aluminium-Legierungen

Aluminium mit einer Dichte von  $2.7 \text{ g/cm}^3$  (etwa ein Drittel derjenigen von Stahl) und einer Zugfestigkeit von  $90 \text{ N/mm}^2$  gehört zu den Leichtmetallen. Reinaluminium (EN AW-1050A)

besteht zu 99.5 % aus Aluminium und wird in der Lebensmittelindustrie für Dosen, Fässer, Tuben, Behälter und Folien<sup>9</sup> genutzt.

► Aluminium-Gusslegierungen werden mit **AC** (Aluminium Cast) bezeichnet, z.B. EN AC-47100 (AlSi12Cu1(Fe)), ein Werkstoff mit ausgezeichneten Gieseigenschaften und hoher Warmrissbeständigkeit.

► Aluminium-Knetlegierungen werden mit **AW** (Aluminium Wrought) bezeichnet, z.B. EN AW-6082 (AlSi1MgMn), ein häufig verwendeter Werkstoff mit erhöhter Festigkeit und geringer Korrosionsanfälligkeit.

Allgemein bekannt sind folgende Werkstoffe auf Aluminiumbasis:

a) Aldrey (E-AlMgSi), bestehend aus 99 % Aluminium, 0.5 % Magnesium und 0.5 % Silizium; Verwendung für Freileitungen und Antennenmasten.

b) Duraluminium (Dural), eine harte und hochfeste Aluminiumlegierung mit geringen Beigaben von Magnesium, Mangan, Silizium sowie 2.5-5.5 % Kupfer mit einer Zugfestigkeit bis 450 N/mm<sup>2</sup>; Verwendung im Flugzeugbau und in der Raumfahrt.

c) Aluminium-Magnesium-Legierungen als mittelfeste und naturharte Legierungen; Verwendung u.a. als Werkstoff für Druckgussgehäuse.

Nebst den oben genannten Beispielen gibt es eine grosse Anzahl weiterer Aluminiumlegierungen, darunter bspw.:

Tabelle 4: Aluminiumsorten				
Sorte	Legierung	Bez.	WNr.	Eigenschaften
Knet-Legierungen	AlMgSi0.5	AW 6060	3.3206	Profilwerkstoff, gut schweisssbar
	AlMg3	AW 5754	3.3535	Blechwerkstoff, gut schweisssbar
	AlMg4.5	AW 5083	3.3547	sehr gut schweisssbar
Guss-Legierungen	AlSi12(Fe)	AC 44300	3.2582	eutektische Druckgusslegierung
	AlSi10Mg(Fe)	AC 43400	3.2382	Druckgusslegierung für hohe Beanspruchung
	AlSi8Cu3	AC 46200	3.2163	Universallegierung, sehr gut giessbar

## 4.3 Nickel-Legierungen

### 4.3.1 Hastelloy

a) Hastelloy B (NiMo28) enthält einen hohen Molybdänanteil (bis 30 %) und zählt zur Gruppe der Nickel-Chrom-Molybdän-Legierungen mit hoher Korrosionsbeständigkeit auch bei erhöhten Temperaturen; Verwendung für chemische und pharmazeutische Apparate, Abwasser- aufbereitungsanlagen, Eindampfanlagen und Kristallisatoren, für Konstruktionsteile in

<sup>9</sup> Alu-Folie ist ungeachtet des ähnlichen Aussehens nicht dasselbe wie Stanniol (Zinnfolie).



Müllverbrennungs- und Rauchgasentschwefelungsanlagen.

b) Hastelloy C wurde ursprünglich als Werkstoff für Düsentriebwerke entwickelt. Infolge seiner hohen Temperaturbeständigkeit wird es auch in anderen Bereichen genutzt; Verwendung für Reaktoren, Rohrleitungen und Ventilen in der chemischen und pharmazeutischen Industrie oder für Druckbehälter in Kernkraftwerken.

#### 4.3.2 Monel

Monelmetall (NiCu33Fe) – auch Alloy 400 genannt – ist eine Nickel-Kupfer-Legierung mit ca. 65 % Nickel, 33 % Kupfer und 2 % Eisen mit einer hohen Zugfestigkeit. Monel ist korrosionsbeständig gegenüber Meerwasser und vielen Säuren und Laugen und wird im Schiffsbau und für Ventile, Pumpen und als Brillendraht (lässt sich gut verlöten) verwendet.

### 4.4 Titan-Legierungen

1) Titan wurde einst als "Metall der Götter" bezeichnet. Dichte, Festigkeit und Betriebstemperatur liegen zwischen denen von Aluminium und Stahl. Bei Kontakt mit Sauerstoff bildet sich an der Oberfläche eine dünne Oxidschicht, welche den Werkstoff schützend umhüllt und ihn beständig gegen äussere Einflüsse macht. Eine bekannte Titanlegierung ist Ti64 (Ti-6Al-4V) mit Beigaben von 6 % Aluminium und 4 % Vanadium.

Titanlegierungen werden aufgrund ihrer hohen Festigkeit, guten Korrosionsbeständigkeit und hohen Wärmebeständigkeit in der Medizinaltechnik (Hüft- und Knieprothesen), in der Luft- und Raumfahrt sowie in der Uhrenindustrie und im Motorenbau verwendet.

2) Titan spielt zudem eine wichtige Rolle bei der Beschichtung von Werkzeugen, darunter auch Messerklingen.

- Titan-Nitrid (TiN), goldgelb
- Titan-Niob-Nitrid (TiNbN), messinggelb
- Titan-Carbon-Nitrid (TiCN), kupferfarben
- Titan-Aluminium-Nitrid (TiAlN), dunkelviolett bis schwarz glänzend

Beim PVD-Verfahren (Physical Vapour Deposition) wird das Schichtmaterial durch Verdampfen oder durch Zerstäuben (Sputtern) erzeugt. Gleichzeitig wird Stickstoff als Reaktivgas zugeführt. Zusammen kondensieren diese Stoffe auf den Bauteilen, um eine dünne und kratzfeste Oberfläche auszubilden. Eine einheitliche Schichtdicke wird erreicht, indem die Teile bei konstanter Geschwindigkeit auf einem Träger rotieren.

## 5 Wärmebehandlung von Stählen

Durch Bearbeitung und Gebrauch eines Stahls verändert sich sein Gefüge. Mit unterschiedlichen Glühprozessen lässt es sich neu ordnen. Je nach Gefügestand sind dazu verschiedene Schritte erforderlich.

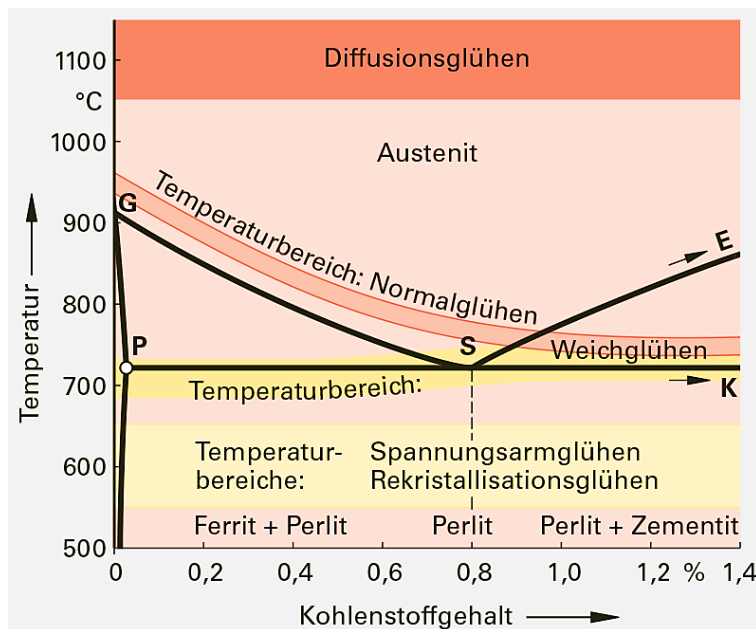


Abb. 6: Glühtemperaturen unlegierter Stähle<sup>10</sup>

Die Tabelle enthält einige der im Kontext relevanten Glühverfahren.

Tabelle 5: Glühverfahren	
Diffusionsglühen (1'050-1'300 °C)	Ausgleich von Konzentrationsunterschieden bei Legierungen
Normalglühen (oberhalb GSK-Linie)	Kornneuorientierung und Kornfeinung
Weichglühen (PSK-Linie)	Verbesserung von Zerspanbarkeit und Kaltumformbarkeit
Spannungsarm glühen (550-650 °C)	Abbau von Eigenspannungen ohne Gefügeumklappung
Härten (oberhalb GSK-Linie)	Steigerung der Härte

Eine korrekt durchgeführte Wärmebehandlung ist entscheidend für die Güte einer Messerklinge.

### 5.1 Glühprozesse

#### 5.1.1 Diffusionsglühen

Beim Erstarren von Stählen mit hohen Legierungsanteilen kommt es gelegentlich vor, dass sich die Legierungselemente nicht homogen in den einzelnen Körnern verteilen. Solche Konzentrationsunterschiede werden als *Seigerungen* bezeichnet. Um solche unerwünschten Kon-

<sup>10</sup> Fachkunde Metall (Europa Lehrmittel).

zentrationsunterschiede zu eliminieren, wird der betreffende Rohling beim Diffusionsglühen auf Temperaturen zwischen 1'050 bis 1'300 °C erwärmt. Damit sich ein Ausgleich einstellt, sind Glühzeiten von mehreren Stunden nötig. Nachteilig beim Diffusionsglühen ist die dabei unvermeidliche Grobkornbildung. Aus diesem Grunde muss der Stahl anschliessend mit Normalglühen verfeinert werden.

### 5.1.2 Normalglühen

Das Normalglühen wird vorzugsweise bei untereutektoiden Stählen (C-Gehalt geringer 0.8 %) angewandt, deren Gefügestruktur durch Bearbeitungsvorgänge wie Schmieden, Walzen und Tiefziehen ungünstig verändert wurde. Aus diesem Grunde sollte das Gefüge eines Klingensrohrlings zuerst regeneriert werden, was beim Normalglühen (Homogenisieren) erfolgt. Dazu wird der Stahl ca. 30 °C über die GSK-Linie erwärmt, wo sich das ferritisch-perlitische Gefüge in ein austenitisches umwandelt. Bei der dabei auftretenden Kornregeneration entsteht ein feineres und gleichmässigeres Gefüge. Um die Grobkornbildung zu vermeiden, werden übereutektoiden Stähle (C-Gehalt grösser als 0.8 %) nicht über die SE-Linie erwärmt. Anschliessend lässt man den Rohling im Ofen abkühlen. Dadurch wandelt sich das austenitische Gefüge wieder in ein ferritisch-perlitisches um mit dem Resultat einer Kornfeinung.

### 5.1.3 Weichglühen

Beim Weichglühen werden untereutektoiden Stähle bis an die PS-Linie erwärmt, so dass der lamellare Zementit gerade noch nicht zerfällt. Bei genügend langer Dauer wandelt sich der Zementit durch Diffusion in eine thermodynamisch günstigere rundliche Form. Aus dem Streifen zementit des Perlits entsteht Kugelzementit. Im Gegensatz zu untereutektoiden Stählen werden übereutektoiden Stähle pendelnd an der PSK-Linie geglüht. Danach erfolgt eine langsame Abkühlung. Durch das Weichglühen wird der Stahl weicher und besser verformbar.

Anm.: Durch Hammerschläge oder Biegearbeiten unterliegen Stähle als auch Buntmetalle einer Kaltverfestigung. Besonders ausgeprägt ist dieser Effekt bei Kupferblechen und Kupferrohren, deren Festigkeit und Steifheit während der Bearbeitung zunimmt. Je nach Verwendungszweck muss das Werkstück in solchen Fällen weichgeglüht werden.

### 5.1.4 Spannungsarm glühen

Durch die beim Schleifen freigesetzte Wärme oder durch Schweissarbeiten können sich Eigenspannungen im Gefüge eines Rohlings bilden. Dies kann beim Abschrecken zum Verzug der Klinge und zu Spannungsrissen führen. Um Eigenspannungen abzubauen wird der Rohling auf eine Temperatur zwischen 550 bis 650 °C erwärmt und für 1 bis 2 Stunden auf dieser Temperatur gehalten. Anschliessend lässt man den Rohling im Ofen abkühlen.

## 5.2 Vergüten

Die erzielbare Härte eines Messerstahls ist nebst einem Kohlenstoffgehalt von 0.4 bis etwa 1.4 % von der Wärmebehandlung abhängig. Als Vergüten wird das Härten und anschliessende Anlassen eines Stahls bezeichnet, wodurch Vergütungsstähle die erwünschte Härte und Zä-

higkeit erhalten.

Vergütungsstähle besitzen einen Kohlenstoffgehalt zwischen 0.2-0.6 %. Der im Werkzeugbau oft benutzte Stahl C45E (früher Ck45) bspw. enthält 0.45 % Kohlenstoff und geringe Anteile von Schwefel und Phosphor. Legierte Vergütungsstähle für hohe Beanspruchung wie z.B. der Stahl 34CrNiMo6 enthalten nebst Kohlenstoff weitere Legierungsbestandteile (in diesem Fall 0.34 % Kohlenstoff und 1.25 % Chrom sowie etwas Nickel und Molybdän).

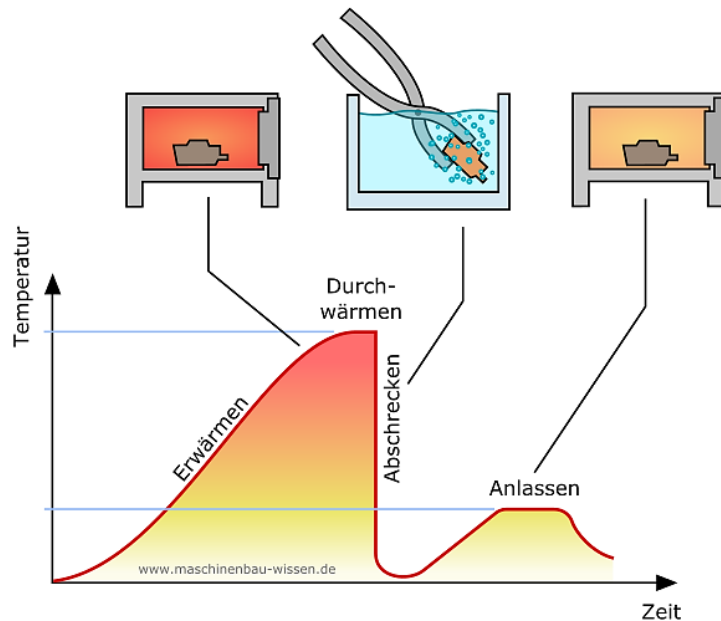


Abb. 7: Härten und Anlassen<sup>11</sup>

### 5.2.1 Härten

1) Bei einem unlegierten Kohlenstoffstahl lässt sich die für das Umwandlungshärten benötigte Temperatur aus dem Eisen-Kohlenstoff-Diagramm ablesen. Die Temperatur liegt wie beim Normalglühen 30-50 °C über der GSK-Linie; bei hochlegierten Stählen sind Temperaturen bis über 1'000 °C möglich. Die für einen legierten Stahl optimale Temperatur muss daher einem Datenblatt entnommen werden. Zur Vermeidung einer späteren Versprödung sollte der empfohlene Wert nicht überschritten werden.

Ein geübter Schmied erkennt die jeweilige Temperatur an der Glühfarbe des Werkstücks.

2) Um eine Durchhärtung zu ermöglichen, muss der Rohling eine bestimmte Zeit auf der Temperatur gehalten werden. Die Haltezeit ( $t_H$ ) ist von der Werkstückdicke ( $s$ ) abhängig und lässt sich mit folgender Faustformel bestimmen:

$$\frac{t_H}{\text{min}} = 20 + \frac{s}{2 \text{ mm}}$$

3) Beim anschließenden Abschrecken in Wasser, Sole oder Öl bleibt der im Austenit gelöste Kohlenstoff infolge der kurzen Umwandlungszeit zwangsgelöst, um anschliessend harten Martensit auszubilden. Das Werkstück sollte im Ölbad bewegt werden, um wegen der sich

<sup>11</sup> <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/>

bildenden Dampfblasen (Leidenfrost-Phänomen) eine möglichst gute Wärmeleitung zu erzielen. Puristen benutzen vorgewärmte Salzbaden. Weil sich im Salzbad keine Dampfblasen bilden, erfolgt die Abkühlung gleichmässiger und mit deutlich geringeren Maß- und Formänderungen.

Anm.: Unlegierte Stähle sind "Wasserhärter", niedrig legierte Stähle "Ölhärter" und hochlegierte Stähle wie bspw. X100CrMoV5-1 (1.2363) "Lufthärter", die durch Abgabe der Wärme an die Luft aushärten. Das Abschrecken in Wasser ist mit Vorsicht anzugehen, weil die Gefahr von Spannungsrissen gross ist. Für Messerklingen wird deswegen ein sanfteres Abschrecken in einem Härteöl (bspw. Durixol V35 oder AAA-DA) empfohlen.

Ob ein Stahl hart genug ist, wird mit dem "Feilentest" festgestellt. Hakt die Feile, so ist der Stahl zu weich und muss nochmals erwärmt werden.

Eine genauere Bestimmung der Härte lässt sich z.B. mit dem "Poldihammer" durchführen.

Ein alternatives Verfahren verwendet Härteprüfheilen mit standardisierten Härten von 40 bis 65 HRC (in 5er-Stufung). Zum Bestimmen der Härte beginnt man mit der 65HRC Feile. Greift die Feile am zu prüfendem Werkstück, so wird die nächst weichere Feile genommen usw. Irgendwann gleitet die Feile am Werkstück ab. Die Härte liegt dann zwischen dieser und der nächsthärteren Feile.

## 5.2.2 Anlassen

Nach dem Abschrecken sind kohlenstoffreiche Stähle hart und spröde und für technische Verwendungen meist ungeeignet. Sie werden deshalb "angelassen", um Zähigkeit und Härte auf die gewünschten Werte einzustellen. Als Anlassen bezeichnet man die auf den Härteprozess folgende Erwärmung des Stahl auf eine Temperatur unterhalb der eutektoiden Temperatur mit anschliessendem Abkühlen an unbewegter Luft.

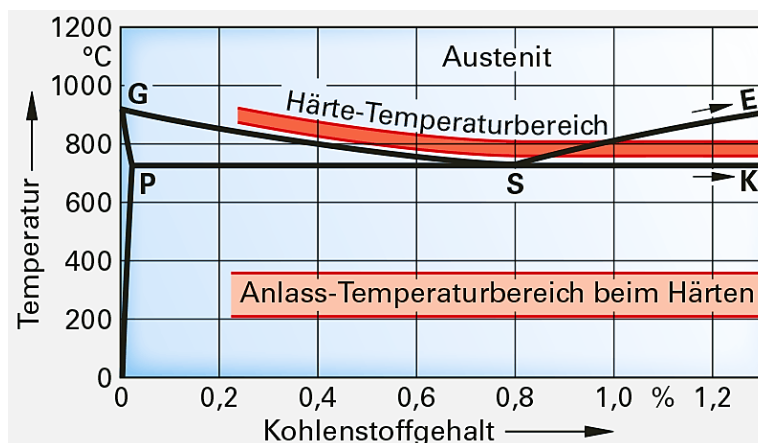


Abb. 8: Temperaturbereich beim Anlassen<sup>12</sup>

Nach dem Abschrecken ist eine erste Anlaßstufe vorteilhaft, um so die "Glashärte" des Werkstücks zu eliminieren. Bis etwa 100 °C verändert sich im Martensitgefüge noch nichts. Ab 150

<sup>12</sup> Fachkunde Metall (Europa Lehrmittel).

°C und darüber wandelt sich der beim Härten gebildete Tetragonalmartensit (Nadelmartensit) unter Ausscheidung von feinen Karbiden in das kubische Martensitgefüge um. Dieses besitzt ein geringeres Volumen und sorgt somit für eine Entspannung des Korngitters.

Um bei Carbonstählen eine genügende Endhärte für eine Messerklinge zu erhalten, sollte die Temperatur in einer zweiten Anlaßstufe 220-250 °C nicht übersteigen. Bei hochlegierten Stählen dagegen kann die Temperatur deutlich höher liegen. Zu beachten ist zudem die Verweilzeit (Dwell time) auf der benötigten Temperatur. Ausser dem Beizug von Datenblättern spielt hier die persönliche Erfahrung eine wesentliche Rolle.

a) Bei Stählen mit mehr als 0.2 % Kohlenstoff geht in der **ersten Anlaßstufe** (80-200 °C) der tetragonale Martensit über in kubischen Martensit, der eine wesentlich geringere Härte und damit eine höhere Zähigkeit besitzt.

b) In der **zweiten Anlaßstufe** (200-320 °C) zerfällt der vorhandene Restaustenit und es bilden sich Carbide und Ferritbereiche  $\alpha'$ .

c) In der **dritten Anlaßstufe** (320-520 °C) stellt sich ein Gleichgewichtsgefüge aus Ferrit und Zementit ein, woraus eine ersichtliche Reduzierung der Härte folgt. Überschreitet die Temperatur 500 °C, so nimmt die Einformung und Koagulation der Zementitpartikel zu.

d) Bei Warmarbeitsstählen mit Legierungselementen wie Chrom, Molybdän, Vanadium oder Wolfram werden in der **vierten Anlaßstufe** (450-550 °C) Sondercarbide aus den Legierungsbestandteilen ausgeschieden. Bei besonders feiner Verteilung der Sondercarbide erhöht sich die Festigkeit des Werkstoffs.

Anm.: Nach dem Anlassen sollte ein Werkstück auf Raumtemperatur abkühlen, bevor es einer weiteren Umformung ausgesetzt wird (zwischen 250 bis 550 °C besteht sonst die Möglichkeit von Blau- und von Anlassversprödung).

### 5.2.3 Glüh- und Anlassfarben

1) Glühfarben sind nach dem Planck'schen Strahlungsgesetz eine Funktion der Temperatur des Strahlers. Je heisser ein Stahl, desto mehr verschiebt sich seine Farbe von dunkelrot (680 °C) über kirschrot (780 °C) und hellgelbrot (1'000 °C) ins gelbweisse (1'300 °C).


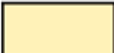
























Das Bestimmen der Glühfarbe muss bei abgedunkelter Beleuchtung erfolgen. Bei wolkenlosem Himmel im Freien geht das nicht besonders gut.

2) Anlassfarben entstehen durch Oxidation der Stahloberfläche. Um die Anlassfarbe zu bestimmen, sollte eine genügend grosse Fläche des Werkstücks blank geschliffen sein.

Oft sind die Farbunterschiede nicht besonders ausgeprägt, so dass eine gewisse Einübung erforderlich ist. Für Carbonstähle ist ein blasses gelb (180-200 °C) erwünscht.

Die in Tabelle 6 angegebenen Anlassfarben gelten für unlegierte Stähle.

**Tab. 6: Glüh- und Anlassfarben<sup>13</sup>**

		Glühtemp. [°C]			Anlasstemp. [°C]
Dunkelbraun		550	Weißgelb		200
Braunrot		630	Strohgelb		220
Dunkelrot		680	Goldgelb		230
Dunkelkirschrot		740	Gelbbraun		240
Kirschrot		780	Braunrot		250
Hellkirschrot		810	Rot		260
Hellrot		850	Purpurrot		270
Gut Hellrot		900	Violet		280
Gelbrot		950	Dunkelblau		290
Hellgelbrot		1000	Kornblumenblau		300
Gelb		1100	Hellblau		320
Hellgelb		1200	Blaugrau		340
Gelbweiß		> 1300	Grau		360

a) Glühfarben b) Anlassfarben

### 5.3 Zwischenstufenvergüten

Eine unter freiberuflichen Messerschmiedern nur wenig bekannte Wärmebehandlung für Stähle und Gusseisen ist das Zwischenstufenvergüten (auch "Bainitisieren" genannt). Durch einen Abschreckprozess, der oberhalb der Martensitstarttemperatur unterbrochen wird und dann in eine "isotherme Prozessführung" übergeht, wird das Bainit-Gefüge erzeugt. Dieses besitzt nebst erhöhter Festigkeit und Härte sehr gute Zähigkeitseigenschaften.

Messerstähle mit einem Gefüge aus Bainit zerbrechen bei Belastung nicht so schnell. Geeignete Stähle zum Bainitisieren sind bspw. 42CrMo4 (1.7225), 34CrNiMo6 (1.6582), 65Cr3 (1.7017), 67SiCr5 (1.7103).

Bei der Wärmebehandlung wird das zu vergütende Werkstück in gleicher Weise wie beim Härten austenitisiert, d.h. es erfolgt eine werkstoffspezifische Behandlung bei Temperaturen von etwa 780-950 °C. Das Abschrecken geschieht in einem Warmbad, z.B. in einer Salzschieme, bei Temperaturen zwischen 250-450 °C. Das Bauteil verweilt solange im Salzbad bei gleichbleibender (isothermer) Temperatur, bis die Gefügeumwandlung von Austenit nach Bainit abgeschlossen ist (was unter Umständen mehrere Stunden dauern kann); dabei bildet sich kein Martensit. Dieses Verfahren hat den Vorteil bestmöglicher Zähigkeit bei gleichzeitig hoher Härte und einer Minimierung des Härteverzugs. Typische Anwendungsbeispiele für das Baini-

<sup>13</sup> Tabellenbuch Metall (Europa-Lehrmittel).



tisieren findet man bei Federn und Messerklingen oder bei Kurbelwellen aus legiertem Guss-  
eisen und allgemein bei dünnwandigen Teilen.

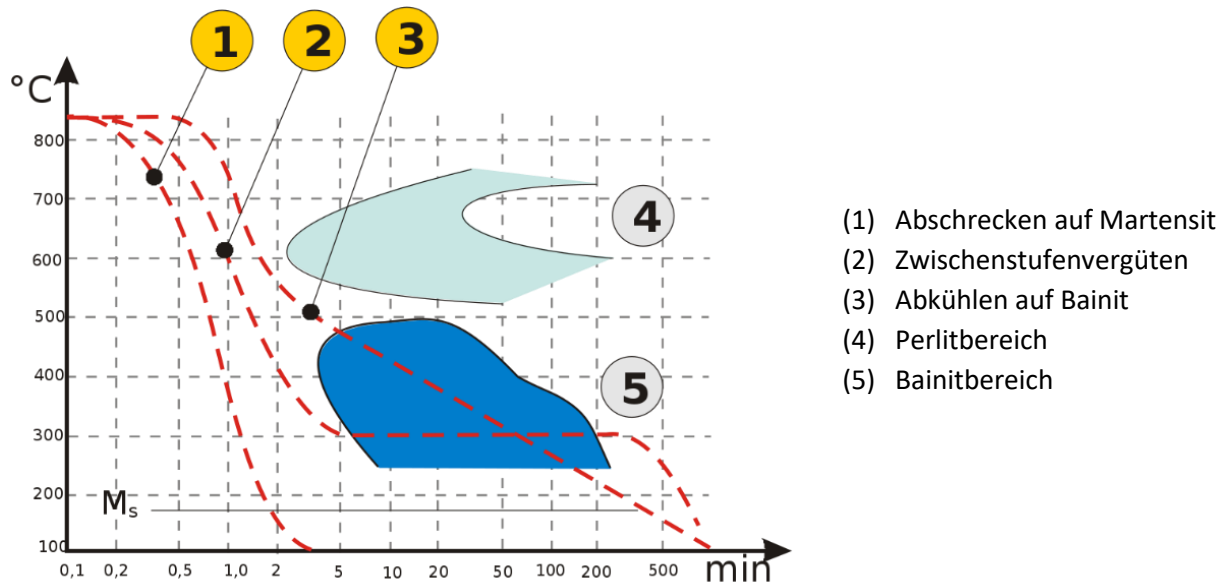


Abb. 9: Bainitisieren<sup>14</sup>

Anm.: Metallurgisch wird zwischen oberem und unterem Bainit unterschieden. Oberer Bainit besteht aus nadelförmigem Ferrit, der in Paketen parallel zur Nadelachse angeordnet ist. Zwischen den Ferritnadeln kommen Schichten aus Carbiden vor. Unterer Bainit besteht aus Ferritplatten, innerhalb derer sich die Carbide unter einem Winkel von  $\approx 60^\circ$  zur Nadelachse ausrichten.

<sup>14</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Bainit>

## 6 Messerstähle

### 6.1 System der Werkstoffnummern

Um Stähle systematisch zu gliedern, wird ihnen im deutschsprachigen Raum nebst einer Kurzbezeichnung eine Werkstoffnummer<sup>15</sup> zugeteilt, deren Bedeutung am Beispiel des rosttränen Stahls X5CrNi18-10 (WNr. 1.4301) erläutert wird.

Tabelle 7: Stahlschlüssel		1	.	43	01	xx
Werkstoff-Nr.	Bedeutung					
1.4301(67)	Werkstoffhauptgruppe					
1.4301(67)	Stahlgruppe (Sortennummer)					
1.4301(67)	Zählnummer (Stahlgewinnungsverfahren)					
1.4301(67)	erweiterte Zählnummer (Behandlungszustand)					

#### ► Werkstoffhauptgruppe

- 0 Roheisen, Ferrolegierungen, Gußeisen
- 1 Stahl, Stahlguß
- 2 Schwermetalle außer Fe (Eisen)
- 3 Leichtmetalle
- 4 Pulvermetalle
- 5-8 nichtmetallische Werkstoffe
- 9 nicht vergeben

#### ► Stahlgruppe (Sortennummern)

##### Massen- und Qualitätsstähle

- 00 Handels- und Grundgütern
- 01-02 allgemeine Baustähle, unlegiert
- 03-07 Qualitätsstähle, unlegiert
- 08-09 Qualitätsstähle, legiert
- 90 Sondersorten, Handels- und Grundgütern

##### Unlegierte Edelmetalle

- 10 Stähle mit besonderen physikalischen Eigenschaften
- 11-12 Baustähle
- 15-18 Werkzeugstähle

##### Legierte Edelmetalle

- 20-28 Werkzeugstähle
- 32-33 Schnellarbeitsstähle

<sup>15</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Werkstoffnummer>

- 34 verschleißfeste Stähle
- 35 Wälzlagerstähle
- 36-39 Eisenwerkstoffe mit besonderen physikalischen Eigenschaften
- 40-45 nichtrostende Stähle
  - 43 rostträger Stahl mit  $\geq 2.5$  % Ni
  - 44 rostträger Stahl mit  $\geq 2.5$  % Ni, mit Mo
- 47-48 hitzebeständige Stähle
- 49 Hochtemperaturwerkstoffe
- 50-84 Bau-, Maschinenbau-, Behälterstahl nach Legierungselementen geordnet
- 85 Nitrierstähle
- 87-89 Bau-, Maschinenbau-, Behälterstahl; hochfest und schweißgeeignet

Tabelle 8: Bezeichnungsbeispiele von Stählen		
Stahlsorte	Kurzzeichen	WNr.
Konstruktionsbaustahl (unlegiert)	S275 JR	1.0044
Automatenstahl (unlegiert)	35S20	1.0726
Einsatzstahl (unlegiert)	C15	1.0401
Vergütungsstahl (niedrig legiert)	34CrNiMo6	1.6582
Werkzeugstahl (hochlegiert)	X100CrMoV51	1.2363
Ferritischer Chromstahl (hochlegiert)	X6Cr17	1.4016

## 6.2 Häufig verwendete Messerstähle

Die Werkstoffnummern werden nach AISI und/oder VDEh vergeben.<sup>16</sup>

Tabelle 9: Messerstähle im Vergleich		
Werkstoffnummer	Härte (HRC)	Anmerkungen
1.2003 (75Cr1)	60	Ein niedrig legierter Werkzeugstahl mit sehr guter Bearbeitbarkeit und Polierbarkeit.
1.2067 (102Cr6)	60	Carbonstahl mit guter Schnitthaltigkeit; auch als <b>L3</b> -Stahl bekannt.
1.2210 (115CrV3)	60 - 64	Ein Kaltarbeitsstahl mit hoher Schnitthaltigkeit und hoher Zähigkeit; auch als Silberstahl bekannt und als gezogene Rund- und Vierkantstangen erhältlich.
1.2235 (80CrV2)	60	Ein niedriglegierter Stahl für schockbeanspruchte Klingen mit guter Schnitthaltigkeit; auch als <b>L2</b> -Stahl

<sup>16</sup> **AISI** = American Iron and Steel Institute; **VDEh** = Gemeinschaftsorganisation der deutschen Stahlindustrie; siehe dazu die Angaben im "Stahlschlüssel" → <http://www.stahlschluessel.de/de.aspx>.

		oder "schwedischer Sägenstahl" bekannt.
1.2360 (X50CrMoV8-1)	59 - 60	Ein robuster Stahl für stark beanspruchte Klingen; auch als "Chipper-Steel" bekannt.
1.2363 (X100CrMoV5-1)	57 - 62	Ein lufthärtender Werkzeugstahl mit hoher Zähigkeit und Härte; auch als <b>A2</b> -Stahl bekannt.
1.2419 (105WCr2)	61 - 63	Ein verschleißfester und schnitthaltiger Carbonstahl hoher Härte für feine Schneidwerkzeuge.
1.2510 (100MnCrW4)	61 - 63	Ein universell verwendbarer Kohlenstoffstahl mit sehr guter Bearbeitbarkeit und Polierbarkeit; auch als <b>O1</b> -Stahl bekannt.
1.2519 (110WCrV)	62	Ein sehr harter und extrem schnitthaltiger Stahl für verschleißfreie Klingen (nicht rostfrei).
1.3505 (100Cr6)	62	Wälzlagerstahl mit hoher Schnitthaltigkeit und Schärfe; verschleißfest und hart, aber nicht spröde.
1.4116 (X50CrMoV15)	56 - 58	Ein rostträger Chromstahl mit guter Eignung für Jagd- und Outdoormesser.
1.4528 (X105CrCoMo18-2)	58 - 60	Ein rostträger martensitischer Chromstahl mit hoher Schnitthaltigkeit.
1.5634 (75Ni8) 15N20	60	Nickellegierter Carbonstahl mit hoher Schärfe und Zähigkeit; zum Schmieden von Damast geeignet.
AISI 304 1.4301 (X5CrNi18-10)	25 - 39	Ein konventionell nicht härtbarer austenitischer Stahl mit sehr guter Korrosionsbeständigkeit. <sup>17</sup>
AISI 420 1.4034 (X46Cr13)	55	Ein rostträger martensitischer Stahl mit sehr guter Polierbarkeit.
AISI 440-A 1.4109 (X70CrMo15)	55 - 57	Ein Stahl mit hohem Chromgehalt, erhöhtem Kohlenstoffgehalt und ausreichender Schnitthaltigkeit.
AISI 440-B 1.4112 (X90CrMoV18)	56 - 58	Ein rostträger und harter Stahl der 440er Gruppe.
AISI 440-C 1.4125 (X105CrMo17)	58 - 60	Ein rostträger sehr harter Stahl der 440er Gruppe.
AISI 440XH	58 - 60	Ein korrosionsbeständiger Stahl mit hohem Kohlenstoffgehalt und Beigaben von Mangan, Molybdän und Nickel.
AISI 1075 1.1248 (Ck75)	59 - 61	Carbonstahl mit guter Schnitthaltigkeit und Härte.
AISI 1084	60	Carbonstahl mit guter Schnitthaltigkeit und Stossfes-

<sup>17</sup> Austenitische Stähle sind gut verformbar und mit einem Chromgehalt von min. 12 % korrosionsbeständig.

		tigkeit.
AISI 1095 1.1274 (C100)	58 - 60	Werkzeugstahl mit hohem Kohlenstoffgehalt für Messerklingen mit guter Schnitthaltigkeit.
AISI 5160	56 - 58	Federstahl (nicht rostfrei) für Messer und Blattfedern; mit hoher Schlagzähigkeit und guter Verschleissfestigkeit.
AISI 8670 1.2703 (72NiCrMo4-2)	60 - 61	Ein härtpbarer und niedriglegierter Kohlenstoffstahl mit guter Härte und Zähigkeit.
Böhler K110 1.2379 (X55CrVMo12-1)	61 - 63	Ein rostträger Werkzeugstahl mit hoher Zähigkeit und grosser Verschleissfestigkeit; auch als <b>D2</b> -Stahl bekannt.
Böhler N360 1.4108	58 (ohne Tiefkühlung)	Ein rostträger martensitischer Stahl mit hoher Zähigkeit und Druckfestigkeit.
Böhler K390 Microclean	58 - 64	Ein pulvermetallurgisch hergestellter Kaltarbeitsstahl mit hohem Verschleisswiderstand und hoher Zähigkeit und Druckfestigkeit.
Böhler K600 1.2767 (45NiCrMo16)	54 - 56	Ein Stahl mit hoher Zähigkeit und guter Schnitthaltigkeit; geeignet zum Damastschmieden.
Böhler N690 1.4528 (X105CrCoMo18-2)	59 - 60	Ein rostträger martensitischer Stahl mit hoher Schneidhaltigkeit für Messer und chirurgische Instrumente.
Böhler N695 1.4125 (X102CrMo17)	57 - 58	Ein rostträger martensitischer Stahl für Klingen und Werkzeuge mit hoher Schneidhaltigkeit.
Böhler K720 1.2842 (90MnCrV8)	60 - 62	Manganlegierter Carbonstahl hoher Härte und guter Polierbarkeit; auch als <b>O2</b> -Stahl bekannt.
BECUT	59	Ein rostträger Stahl mit erhöhter Belastbarkeit und hoher Schnitthaltigkeit für Messerklingen in der Lebensmittelindustrie.
CTS BD1	58 - 60	Ein rostträger Low-End-Edelstahl von Carpenter mit sehr guter Schnitthaltigkeit.
NCV60 und AISI 304	57 - 58 (Kern)	Ein rostträger 3-Lagen-Stahl aus Nitrocut NCV60 als Schneidkern und AISI 304 für die Aussenlagen.
RWL 34	62 - 64	Ein pulvermetallurgischer Stahl von DAMASTEEL mit hoher Härte.
Rex121	69 - 70	Ein hochlegierter pulvermetallurgischer Kohlenstoffstahl mit extremer Härte und guter Zähigkeit.
12C27	54 - 56	Ein rostträger Stahl von Sandvik; auch als "Schwedensstahl" bekannt.

19C27	54 - 61	Ein rostträger Klingenstahl von Sandvik mit einem hohem Kohlenstoffgehalt und einer sehr guten Schnitt-haltigkeit.
14C28N	55 - 62	Ein rostträger und schnitthaltiger Stahl von Sandvik für Küchenmesser, Jagdmesser und Taschenmesser.
CPM-3V	≥ 60	Ein pulvermetallurgischer Stahl von Crucible Indu-stries für Messerklingen mit erhöhter Bruchfestigkeit und grosser Zähigkeit.
Aogami (3 Güteklassen) (blauer Papierstahl)	63 - 66	Ein mit Mangan, Chrom u. Wolfram legierter Carbon-stahl mit einem Kohlenstoffgehalt von 1.2 % für Mes-ser mit hervorragender Schnitthaltigkeit und hoher Verschleissfestigkeit.
Shirogami (3 Güteklassen) (weisser Papierstahl)	63 - 65	Ein unlegierter Carbonstahl mit einem Kohlenstoffge-halt von 1.2 % für Messer mit sehr guter Schnittthal-tigkeit und grosser Härte.
Kigami (gelber Papierstahl)	???	Ein unlegierter Carbonstahl geringerer Qualität mit ei-nem Kohlenstoffgehalt von 0.8 % für preiswerte japa-nische Küchenmesser.
Gingami (silberner Papierstahl)	58	Ein rostträger martensitischer Stahl mit einem Koh-lenstoffgehalt von 1 % für japanische Messer.
AUS-8	57 - 58	Ein rostträger Stahl mit guter Härte, Zähigkeit und Fe-stigkeit.
AUS-10	58 - 60	Ein rostträger Stahl mit erhöhter Härte.
SK-5	57 - 60	Ein unlegierter Kohlenstoffstahl für Handwerkzeuge (Äxte, Hämmer) und grosse Messer.
SLD	63 - 64	Ein rostträger Stahl von Hitach mit grossem Kohlen-stoffgehalt und hoher Schärfe und Schnitthaltigkeit.
VS-1	63 - 64	Ein feinkörniger Stahl mit bläulicher Patina und hoher Schärfe und überdurchschnittlicher Schnitthaltigkeit.
VG-1	58 - 60	Ein Edelstahl von Tafeku mit hoher Härte, Schnitthal-tigkeit, Festigkeit und Rostbeständigkeit.
VG-10 (Goldstahl)	60 - 62	Ein hochwertiger und rostfreier Klingenstahl von Ta-feku mit hoher Härte und Verschleissfestigkeit.

## 7 Verweise

Aufgrund der Schnellebigkeit des World Wide Web ist damit zu rechnen, dass einige der angegebenen Links nach einer gewissen Zeit nicht mehr existieren.

### 7.1 Literatur

- Leopold Scheer: Was ist Stahl (Springer).
- Hans Berns, Werner Theisen: Eisenwerkstoffe (Springer).
- Roman Landes: Messerklingen aus Stahl (Wieland Verlag).
- Volker Läßle: Wärmebehandlung des Stahls (Europa-Lehrmittel).
- John D. Verhoeven: Stahl-Metallurgie für Einsteiger (Wieland Verlag).
- Wolfgang Weißbach et al.: Werkstoffe und ihre Anwendungen (Springer Vieweg).

### 7.2 Weblinks

<http://www.metallograph.de/>

<https://rime.de/de/wiki/gefuege/>

<https://de.wikipedia.org/wiki/Hartguss>

<http://www.formteile.ch/gusseisen.php>

<https://de.wikipedia.org/wiki/Stahlsorte>

<https://de.wikipedia.org/wiki/Messerstahl>

<https://www.stahlportal.com/aisi-klassifikation/>

<http://www.fachlexika.de/technik/mechatronik/>

<https://www.schmiedeglut.de/Alles-ueber-Stahl>

<https://www.giessereilexikon.com/giesserei-lexikon/>

<https://de.wikipedia.org/wiki/Eisen-Kohlenstoff-Diagramm>

<https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/>

<https://www.tec-science.com/de/category/werkstofftechnik/eisen-kohlenstoff-diagramm/>