TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.

# Lehrunterlagen zur Vorlesung

# Wärmebehandlung und Randschichttechnik I

zusammengestellt von:

**Prof. Dr.-Ing. habil. Anja Buchwalder**
**Dr.-Ing. Philipp Hengst**
TU Bergakademie Freiberg, Institut für Werkstofftechnik

**Stand 10/2023**

***Vorlesungsunterlagen nur zum persönlichen Gebrauch!***
***Nicht zitier fähig!***

## Inhaltsverzeichnis

**1 EINFÜHRUNG IN DIE TECHNOLOGIE DER WÄRMEBEHANDLUNG ... 4**
**1.1 Geschichte der Wärmebehandlung ... 4**
**1.2 Aufgaben und Zielstellung der Wärmebehandlung ... 4**
**1.3 Temperatur-Zeit-Verlauf der Wärmebehandlung ... 4**
**1.4 Umwandlungsschaubilder für die praktische Wärmebehandlung ... 6**
1.4.1 Zeit-Temperatur-Austenitisierungs (ZTA)-Schaubilder für die Erwärmung ... 6
1.4.2 Umwandlungsschaubilder für die Abkühlung (ZTU-Schaubilder) ... 7
**1.5 Systematisierung und Einteilung der Wärmebehandlungsverfahren ... 8**

**2 GRUNDLAGEN VON WÄRMEBEHANDLUNGSPROZESSEN ... 10**
**2.1 Thermische Transportvorgänge ... 10**
2.1.1 Wärmeübergang ... 10
2.1.2 Wärmeleitung in Festkörpern ... 12
2.1.3 Erwärmen, Halten und Abkühlen von Bauteilen bei der Wärmebehandlung ... 12
2.1.3.1 Erwärmen ... 13
2.1.3.2 Halten ... 13
2.1.3.3 Abkühlen / Abschrecken ... 14
**2.2 Stofftransport ... 15**
**2.3 Spannungen sowie Maß-/Formänderungen infolge einer Wärmebehandlung ... 16**
2.3.1 Definition, Einteilung und Entstehung von Eigenspannungen ... 17
2.3.2 Maß- und Formänderungen durch Umwandlungs- und Wärmespannungen ... 17
2.3.3 Maßnahmen zur Vermeidung von Verzug ... 18

**3 FERTIGUNGSGERECHTE BZW. -BEDINGTE WÄRMEBEHANDLUNG – GLÜHEN ... 19**
**3.1 Umwandlungsverhalten der Stähle unter Gleichgewichts- bzw. gleichgewichtsnahen Bedingungen ... 20**
3.1.1 Umwandlungsverhalten bei langsamer Erwärmung ... 20
3.1.2 Umwandlungsverhalten bei langsamer Abkühlung ... 21
**3.2 Diffusionsglühen ... 22**
**3.3 Grobkornglühen ... 22**
**3.4 Normalglühen ... 23**
**3.5 Weichglühen ... 24**
**3.6 Spannungsarmglühen ... 25**
**3.7 Rekristallisationsglühen ... 26**
**3.8 Erholungsglühen ... 27**
**3.9 Dehydrieren ... 27**
**3.10 Blankglühen ... 28**
**3.11 Andere Glühverfahren ... 28**
**3.12 Zusammenfassung ... 28**

**4 BEANSPRUCHUNGSGERECHTE WÄRMEBEHANDLUNG ... 29**
**4.1 Umwandlungsverhalten der Stähle unter Nichtgleichgewichts-Bedingungen ... 29**
4.1.1 Umwandlungsverhalten bei rascher Erwärmung ... 29
4.1.2 Umwandlungsverhalten bei rascher Abkühlung ... 29
**4.2 Härten nach Volumenerwärmung und Anlassen ... 30**
4.2.1 Härten ... 30
4.2.1.1 Erwärmen und Halten (Austenitisieren) ... 31
4.2.1.2 Abkühlen bzw. Abschrecken ... 31
4.2.1.3 Gefüge/Eigenschaften nach dem Härten ... 32
4.2.1.4 Stirnabschreckversuch ... 34
4.2.2 Isothermisches Umwandeln (Bainitisieren) ... 35
4.2.3 Tiefkühlen ... 36
4.2.4 Anlassen ... 36
4.2.4.1 Anlassvorgang ... 37
4.2.4.2 Anlassverhalten der Stähle ... 38
4.2.4.3 Anlassversprödung und Eigenspannungen ... 38
4.2.5 Härten und Anlassen ... 39
4.2.5.1 Temperatur-Zeit-Verläufe beim Härten und Anlassen ... 39
4.2.5.2 Gefüge/Eigenschaften nach Härten und Anlassen ... 39

4.2.6 Vergüten ... 41
4.2.7 Aushärten ... 44
**4.3 Randschichttechnik ... 45**
4.3.1 Randschichthärten ... 46
4.3.1.1 Flammhärten ... 47
4.3.1.2 Induktionshärten ... 47
4.3.1.3 Strahlhärten ... 48
4.3.1.4 Verfahrensvergleich ... 48
4.3.2 Thermochemische Verfahren ... 49
4.3.2.1 Nichteisenmetall-Diffusionsverfahren ... 49
4.3.2.1.1 Aufkohlen (Einsatzhärten) ... 49
4.3.2.1.2 Nitrieren ... 53
4.3.2.1.3 Borieren ... 56
4.3.2.2 Metall-Diffusionsverfahren ... 58
4.3.2.3 Beschichten ... 58
**5 WÄRMEBEHANDLUNG VON AUSGEWÄHLTEN WERKSTOFFGRUPPEN ... 60**
**5.1 Wärmebehandlung von austenitischen Stähle ... 60**
5.1.1 Austenitische Stähle ... 60
5.1.2 Wärmebehandlung von Cr-Ni-Stählen ... 60
5.1.3 Wärmebehandlung von Mn-Stählen ... 60
**5.2 Wärmebehandlung von Gusseisenwerkstoffen ... 61**
5.2.1 Einteilung der Gusseisenwerkstoffen ... 61
5.2.2 Möglichkeiten der Wärmebehandlung ... 62
5.2.3 Spannungsarmglühen ... 64
5.2.4 Weichglühen (Ferritisieren, Graphitisieren) ... 64
5.2.5 Perlitglühen (Perlitisieren, Normalglühen) ... 65
5.2.6 Härten und Vergüten ... 65
5.2.7 ADI-Gusswerkstoffe (Austempern) ... 66
**6 WÄRMEBEHANDLUNGSTECHNIK ... 68**
**6.1 Anforderungen und Klassifikation an Wärmebehandlungsanlagen ... 68**
**6.2 Standöfen ... 68**
**6.3 Durchlauföfen ... 69**
**6.4 Zusatzeinrichtungen ... 69**
**6.5 Integration von Wärmebehandlungsanlagen in Fertigungsprozessabläufe ... 69**
**7 ANHANG ... 71**
**7.1 Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (EKD) ... 71**
**8 QUELLENVERZEICHNIS ... 73**

# 1 EINFÜHRUNG IN DIE TECHNOLOGIE DER WÄRMEBEHANDLUNG

## 1.1 Geschichte der Wärmebehandlung

## 1.2 Aufgaben und Zielstellung der Wärmebehandlung

→ DIN EN 10052 Begriffe der Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen

**► Wärmebehandlung**

ist die Folge von Wärmebehandlungsschritten (Erwärmen, Halten, Abkühlen), in deren Verlauf ein Werkstück ganz oder teilweise Zeit-Temperatur-Folgen unterworfen wird, um eine Änderung seines Gefüges und/oder seiner Eigenschaften herbeizuführen.
Gegebenenfalls kann während der Behandlung die chemische Zusammensetzung des Werkstoffes geändert werden (thermochemische Behandlung).

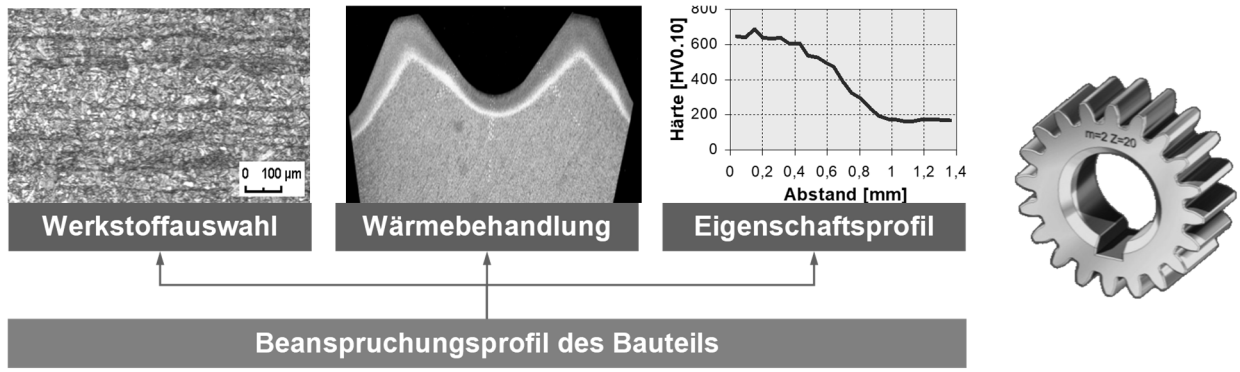



*Abb. 1-1 Zielfunktion der Wärmebehandlung [nach Spies]*

## 1.3 Temperatur-Zeit-Verlauf der Wärmebehandlung

**► Anwärmen (DIN EN 10052):**

Wärmen eines Werkstückes bis zum Erreichen der vorgegebenen Temperatur an der Oberfläche.

**► Durchwärmen (DIN EN 10052):**

Wärmen eines Werkstückes nach dem Erreichen der vorgegebenen Temperatur an der Oberfläche bis zum Erreichen dieser Temperatur im gesamten Querschnitt (Volumen !)

**► Erwärmen (DIN EN 10052):**

Erwärmen = Anwärmen + Durchwärmen
Wärmen eines Werkstückes bis zum Erreichen der vorgegebenen Temperatur im gesamten Querschnitt (Volumen!).

**► Halten (DIN EN 10052):**

Teil einer Zeit-Temperatur-Folge, bei dem die Temperatur ($T_{soll}$) konstant gehalten wird.

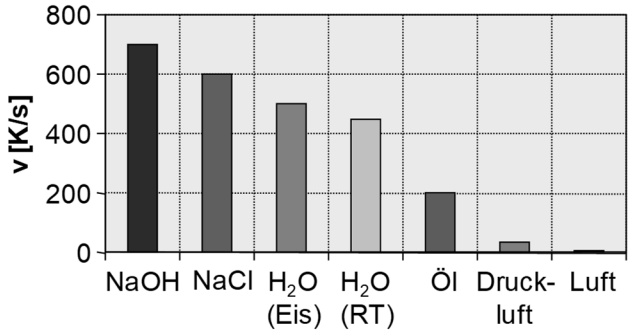
**► Abkühlen (DIN EN 10052):**

Senken der Temperatur eines Werkstückes (in einem oder mehreren Schritten).

**► Abschrecken (DIN EN 10052):**

Abkühlen eines Werkstückes mit größerer Geschwindigkeit als an ruhender Luft.

→ ***Selbstabschrecken:*** Wärmefluss in das kältere Volumen des Werkstücks (Hochenergieerwärmung)




*erreichbare Abkühlgeschwindigkeiten verschiedener Abschreckmedien*

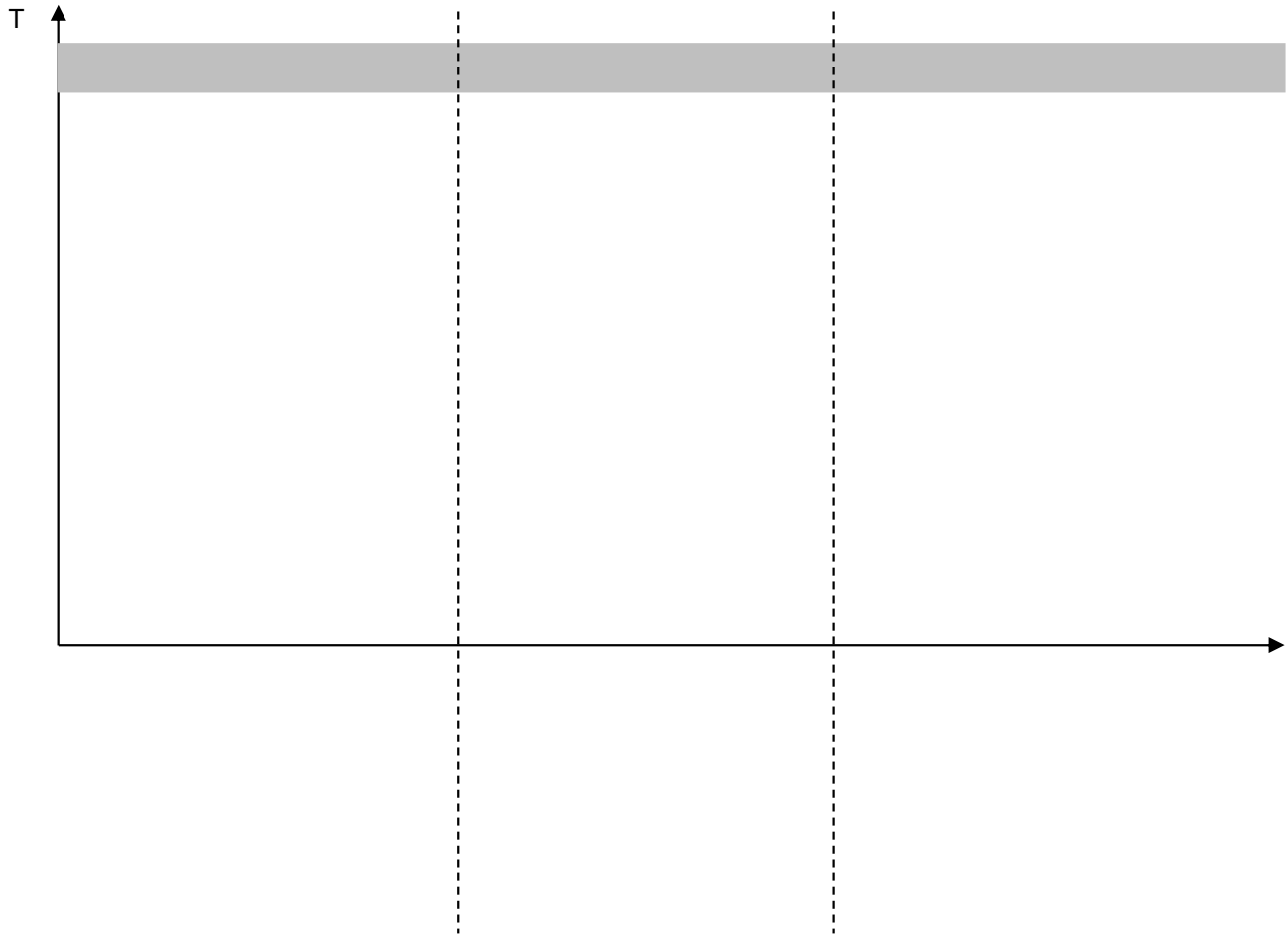



*Abb. 1-2 allgemeiner T-t-Verlauf bei der Wärmebehandlung*

## 1.4 Umwandlungsschaubilder für die praktische Wärmebehandlung

### 1.4.1 Zeit-Temperatur-Austenitisierungs (ZTA)-Schaubilder für die Erwärmung

**► isothermes ZTA**

▪ gibt Auskunft über die Austenitbildung nach einem definierten, technisch sinnvollen, zügigen Aufheizen und einer anschließenden isothermen (T = const.) Versuchsführung
▪ Ablauf der Umwandlung wird parallel zur Zeitachse abgelesen

**► kontinuierliches ZTA**

▪ gibt Auskunft über die Austenitbildung in Abhängigkeit von der Aufheizgeschwindigkeit bei kontinuierlicher Erwärmung
▪ Schaubild enthält Temperaturverlaufskurven für unterschiedliche Geschwindigkeiten

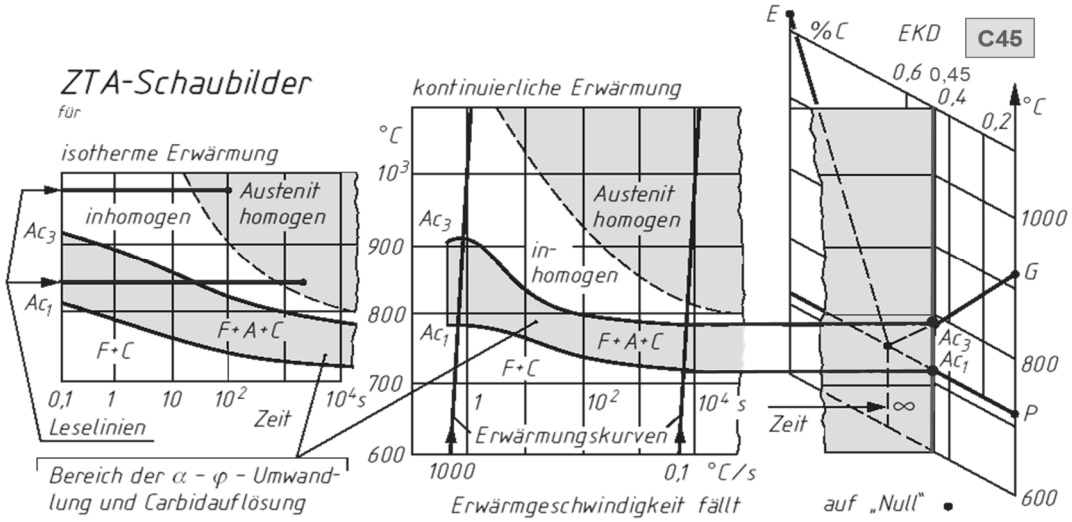
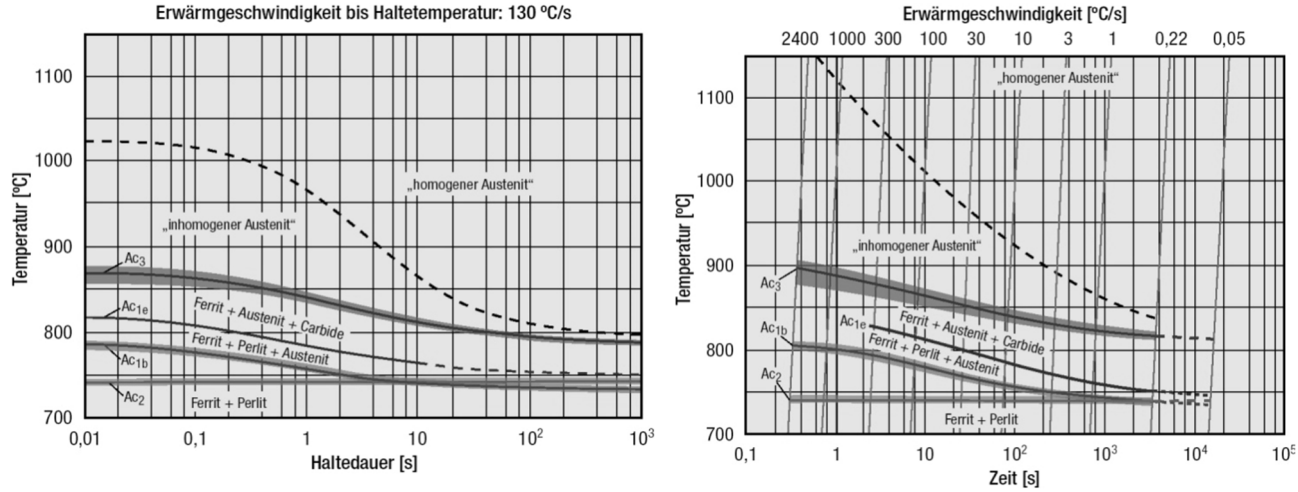
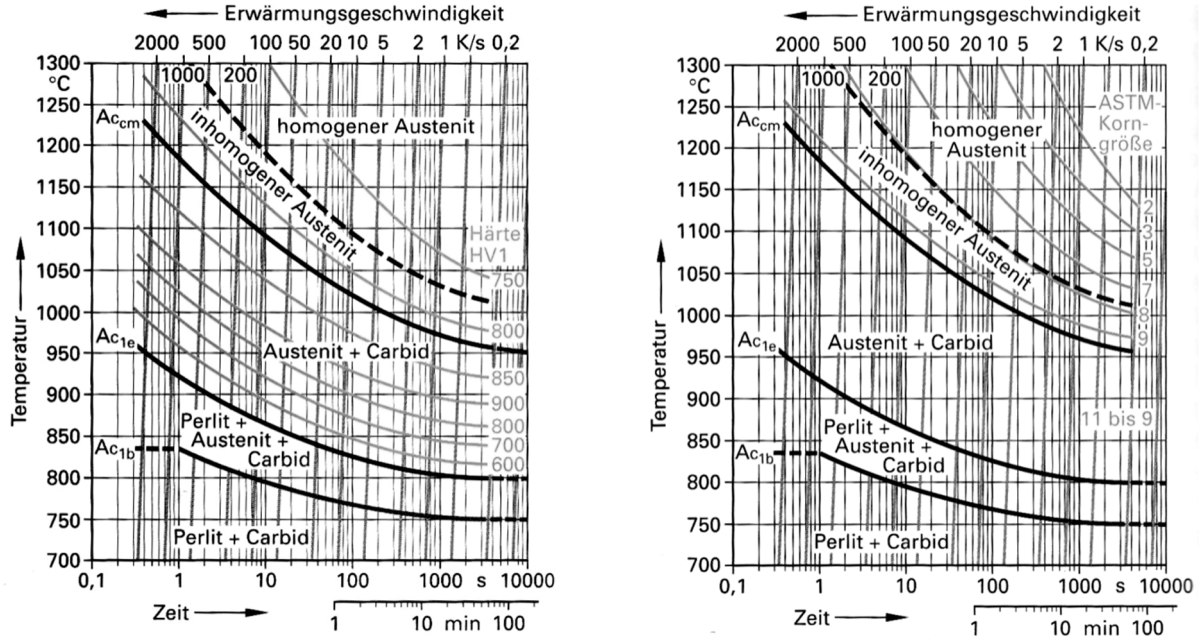



*Abb. 1-3 Vergleich ZTA-Schaubilder (=f(T, t)) und Fe-C-Diagramm (t → ∞) für 0,45 %C*




*a) isotherm* *b) kontinuierlich*

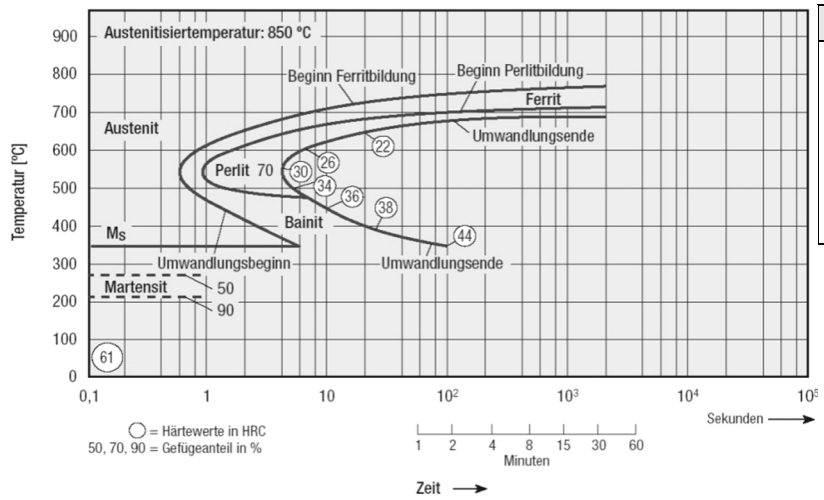
*Abb. 1-4 ZTA-Diagramme des untereutektoiden Stahles 34CrMo4*




*a) ZTA-Abschreckhärte-Diagramm* *b) ZTA-Austenitkornwachstum-Diagramm*

*Abb. 1-5 kontinuierliche ZTA-Diagramme des übereutektoiden Stahles 100Cr6 [7]*

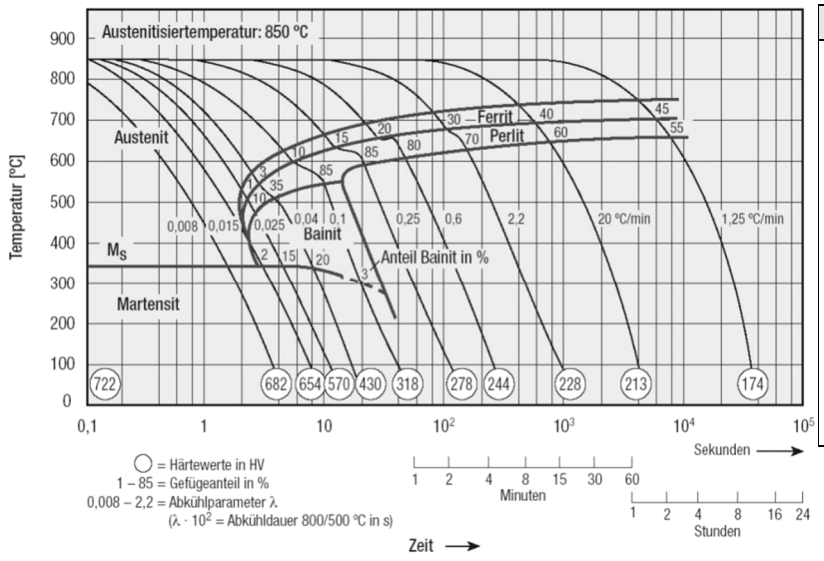
### 1.4.2 Umwandlungsschaubilder für die Abkühlung (ZTU-Schaubilder)




**► isothermes ZTU**

▪ hierbei wird aus dem Austenit auf eine vorgegebene Temperatur schnell abgekühlt und anschließend bei isothermer Versuchsführung Beginn und Ende der Umwandlung verfolgt

*a) isothermes ZTU*

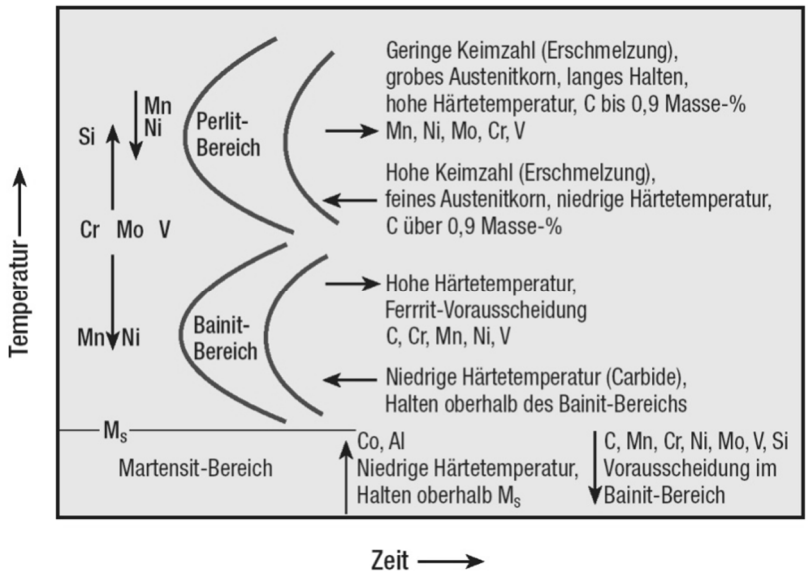



**► kontinuierliches ZTU**

▪ gibt Auskunft über den Beginn und das Ende der Austenitumwandlung in Abhängigkeit von bestimmten Abkühlgeschwindigkeiten
▪ Temperaturverlaufskurven für unterschiedliche Geschwindigkeiten
▪ Vorhersage des Gefügezustandes (Angabe zu Gefügeanteilen) und der Härte (Angabe in HRC) bzw. den zu erwartenden Eigenschaften für konkrete Abkühlbedingungen (Angabe Abkühlparameter)

*b) kontinuierliches ZTU*

*Abb. 1-6 ZTU-Schaubilder (34CrMo4)*




→ jeder Stahl bzw. jede Schmelze hat eigenes charakteristisches ZTA / ZTU-Schaubild

*Abb. 1-7 Einfluss der Legierungselemente im ZTU-Schaubild [3]*

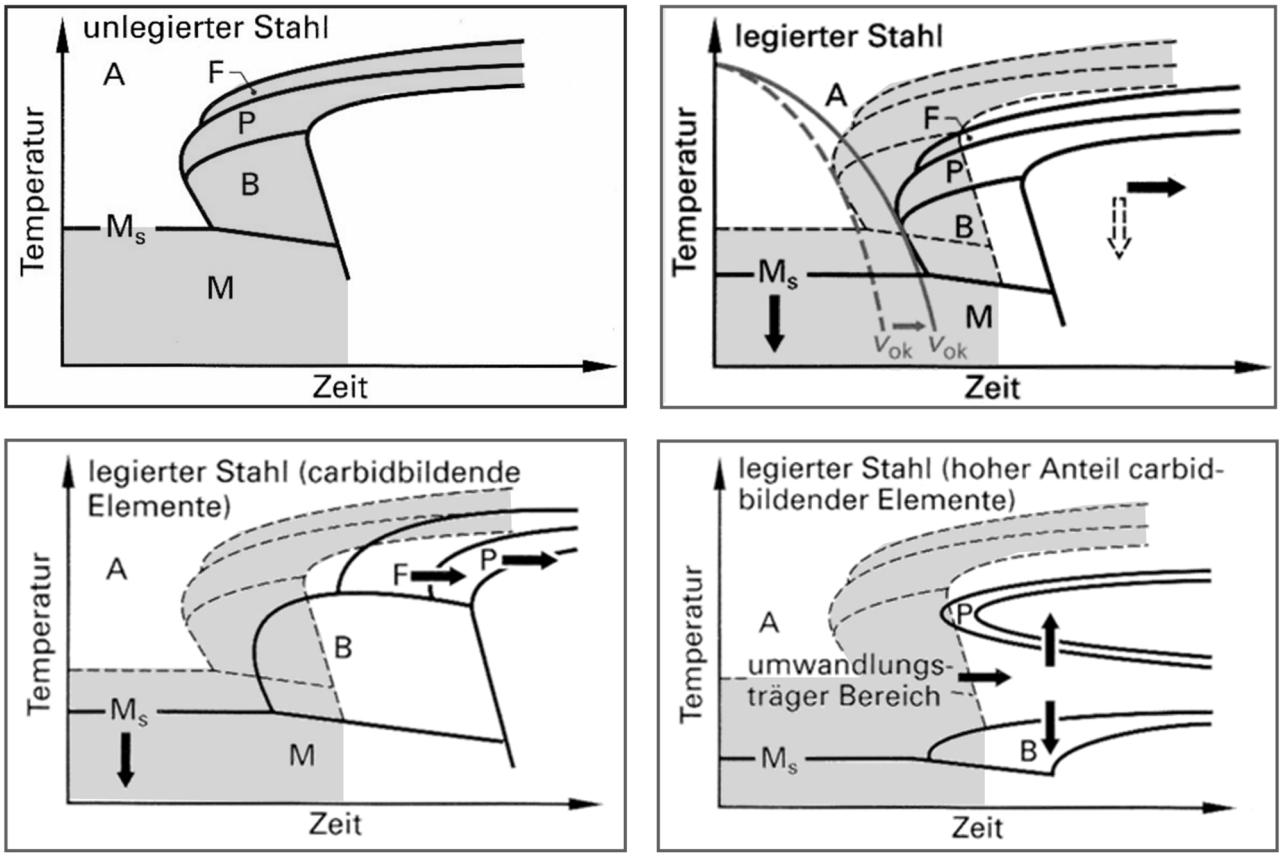



*Abb. 1-8 Verschiebung der Gefügefelder im ZTU-Schaubild für verschiedene Stähle im Vergleich zum unlegierten Stahl (grauer Bereich)*

## 1.5 Systematisierung und Einteilung der Wärmebehandlungsverfahren

**► Stoffeigenschaft ändern (HG 6 in DIN 8580)**

Fertigen durch Verändern der Eigenschaften des Werkstoffes, aus dem ein Werkstück besteht; dies geschieht u. a. durch Veränderungen im submikroskopischen bzw. atomaren Bereich, z.B. Diffusion von Atomen, Erzeugung und Bewegung von Versetzungen im Atomgitter, chemische Reaktionen.
Unvermeidbar auftretende Formänderungen gehören nicht zum Wesen dieser Verfahren.

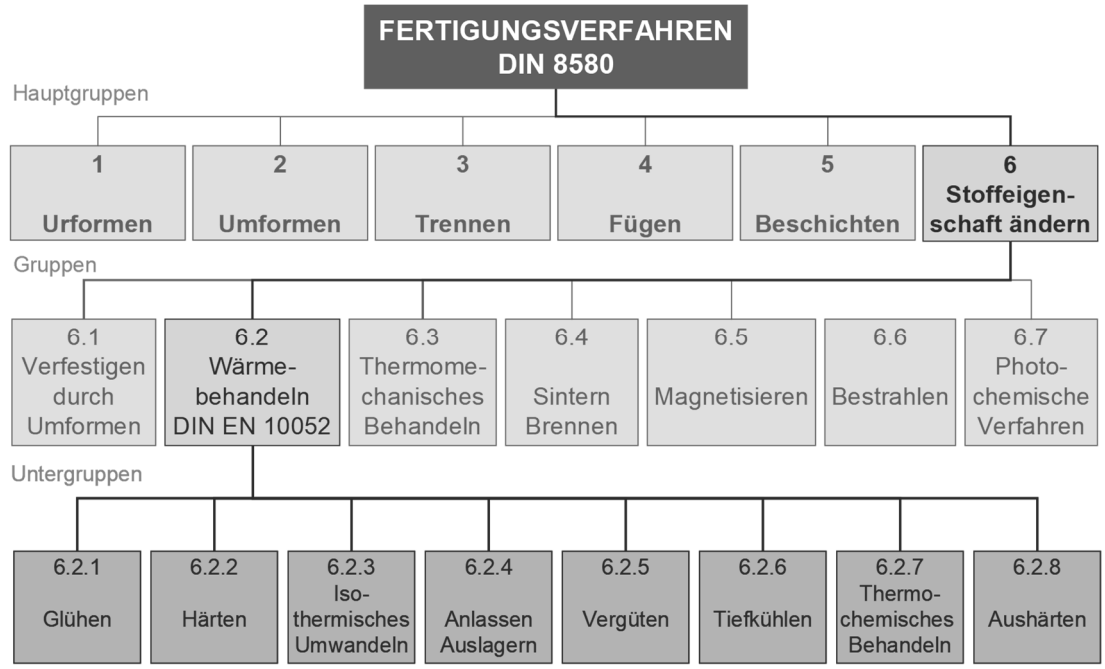



*Abb. 1-9 Einordnung der Wärmebehandlung in die Fertigungsverfahren nach DIN 8580*

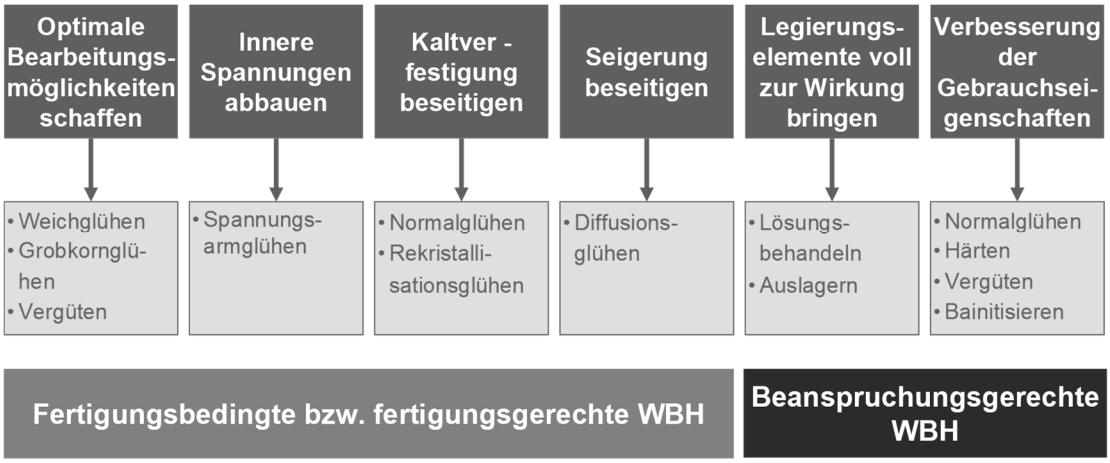



*Abb. 1-10 Ziele der Wärmebehandlung*

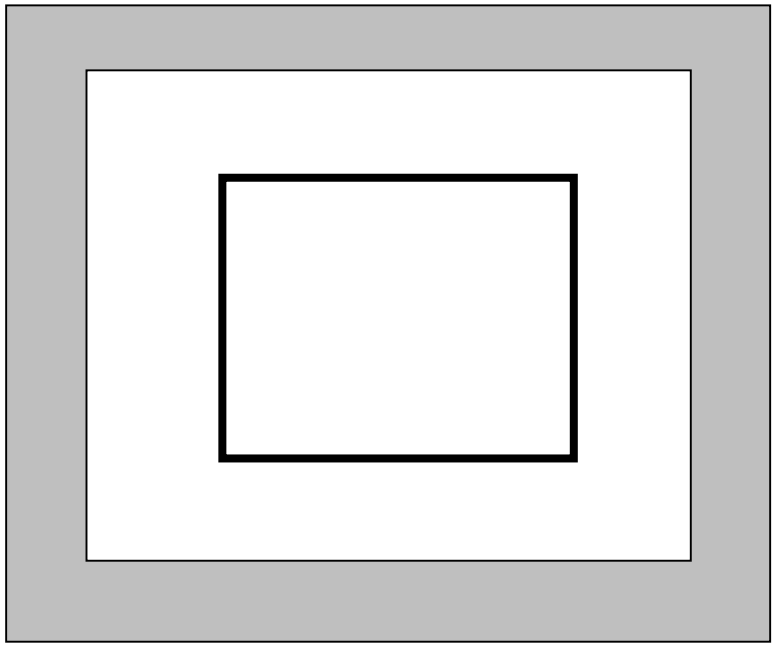
# 2 GRUNDLAGEN VON WÄRMEBEHANDLUNGSPROZESSEN

## 2.1 Thermische Transportvorgänge

### 2.1.1 Wärmeübergang



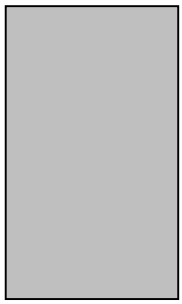

*Abb. 2-1 Wärmezufuhr und -austausch*



$T_K$ …Anfangs(körper)temperatur
$T_U$ …Umgebungstemperatur
$\lambda$ …Wärmeleitfähigkeit
$\rho$ …Dichte
$C_p$ …spez. Wärme bei $\rho$ = const.
$Q_Ü$ …ausgetauschte Wärmemenge
$j_Ü$ …Wärmestromdichte
$\alpha$ …Wärmeübergangszahl

*Abb. 2-2 Wärmeübergang*

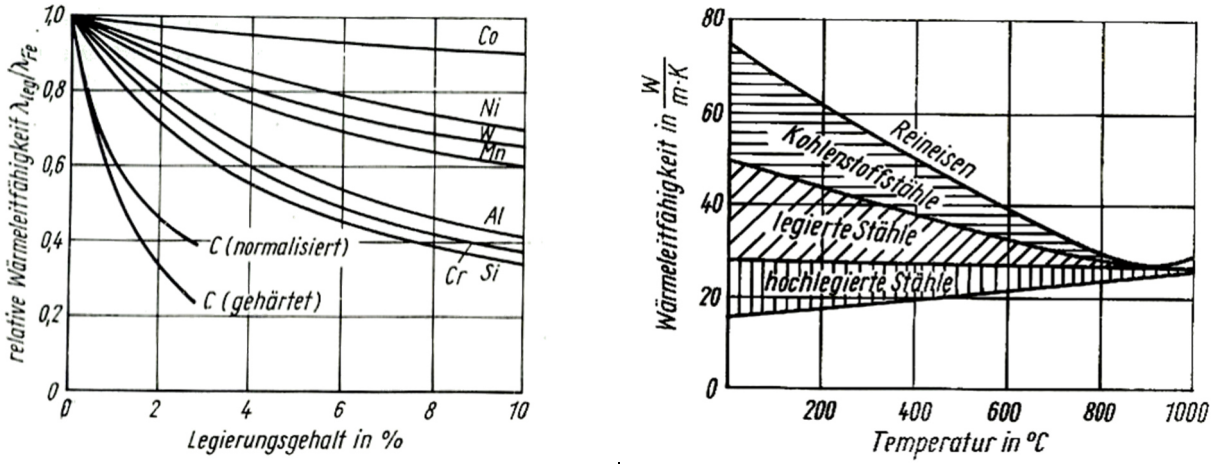
*Tab. 2-1 Mechanismen des Wärmeübergangs (Bedingung: $T_1 > T_2$)*

| Wärmeleitung | Konvektion | Strahlung |
|---|---|---|
|  |  |   |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

*Tab. 2-2 Wärmeübergangszahlen für verschiedene Kühlmittel [2]*

| Medium | α [W/m²K] |
|---|---|
| Ofen | 15 |
| Luft (ruhend, bewegt, Pressluft) | 30…60…70 |
| Stickstoff (1…6 bar) | 100…400 |
| Wasserstoff (6 bar) | 450-600 |
| Salzbad (500 - 700°C) | 350-450 |
| Salzbad (160 - 550°C) | 600-800 |
| Flüssiges Blei | 1200 |
| Öl (ruhend…umgewälzt) | 1000…2200 |
| Wasser (15-25°C, umgewälzt) | 3000…3500 |

## 2.1.2 Wärmeleitung in Festkörpern




*a) in Abhängigkeit von den LE* *b) in Abhängigkeit von der Temperatur*

*Abb. 2-3 Wärmeleitfähigkeit [2]*

## 2.1.3 Erwärmen, Halten und Abkühlen von Bauteilen bei der Wärmebehandlung

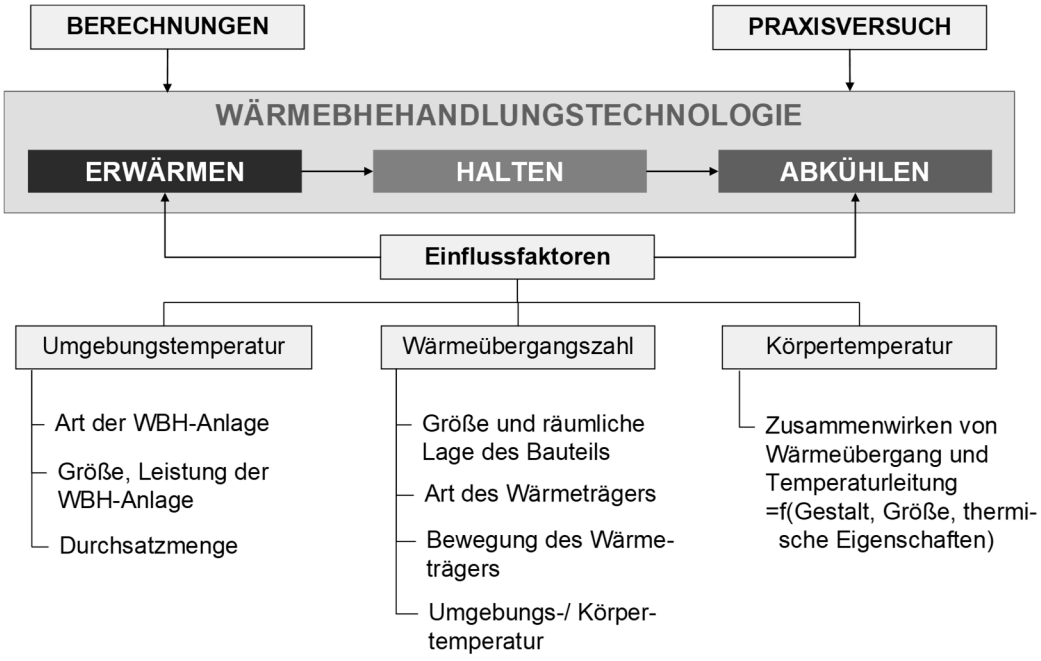
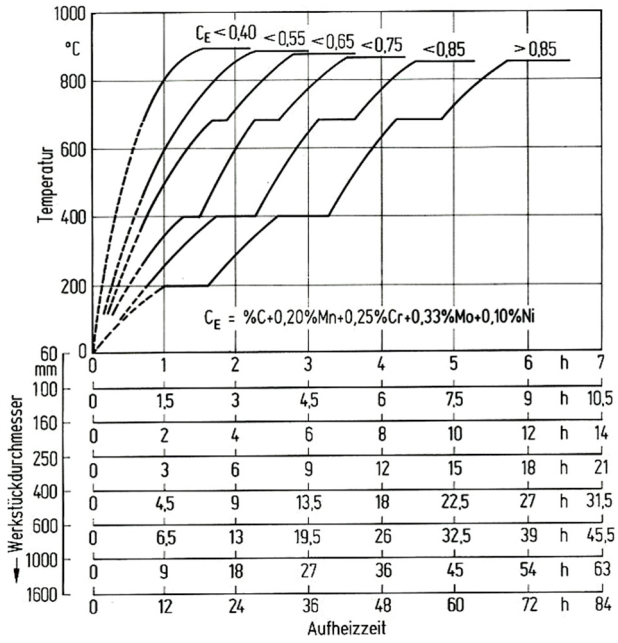
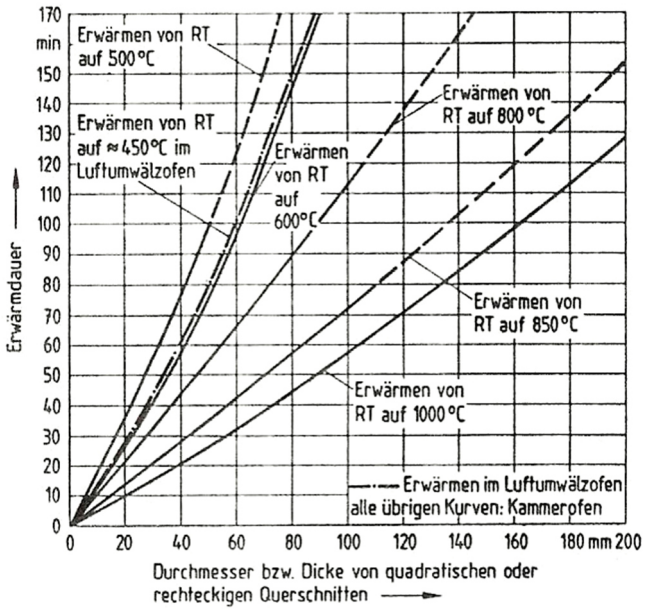



*Abb. 2-4 Einflussfaktoren auf die Teilschritte der WBH-Technologie*

### 2.1.3.1 Erwärmen




*a) für unterschiedliche Werkstückdurchmesser in Abhängigkeit vom Kohlenstoffäquivalent $c_E$ [%]*




*b) nach DIN 17022 und DIN 17350 (Beiblatt), insbesondere für hochlegierte Stähle*

*Abb. 2-5 Erwärmdauer (Anwärm- + Durchwärmdauer)*

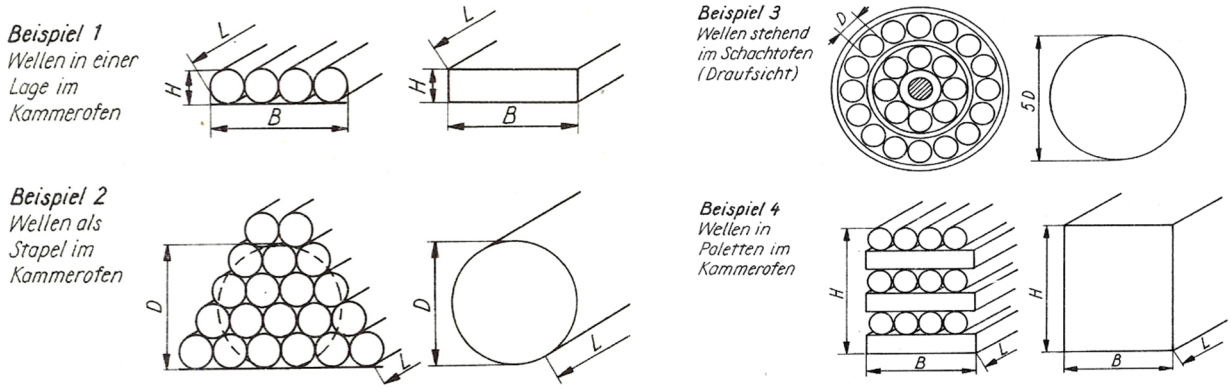



*Abb. 2-6 Erwärmen einer Charge (linkes Bild): Berücksichtigung eines Ersatzkörpers (rechtes Bild)*

### 2.1.3.2 Halten

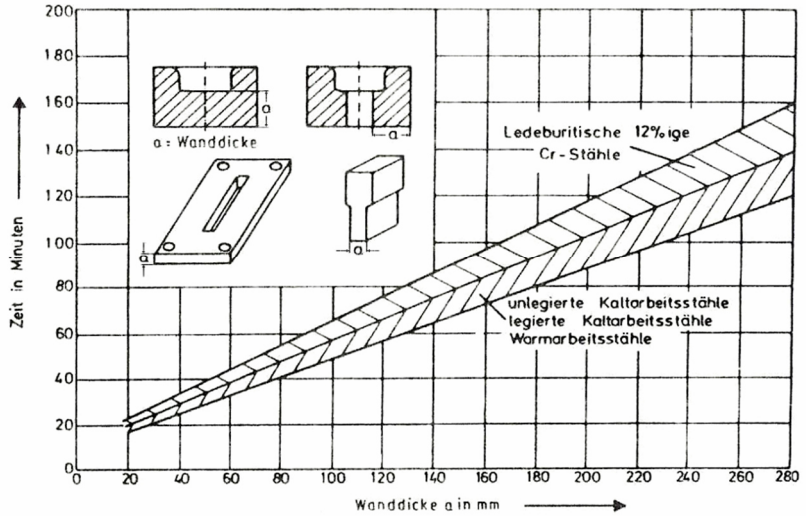



*Abb. 2-7 Richtwerte für die Haltedauer in Abhängigkeit von der Wanddicke [DIN 17350]*

### 2.1.3.3 Abkühlen / Abschrecken

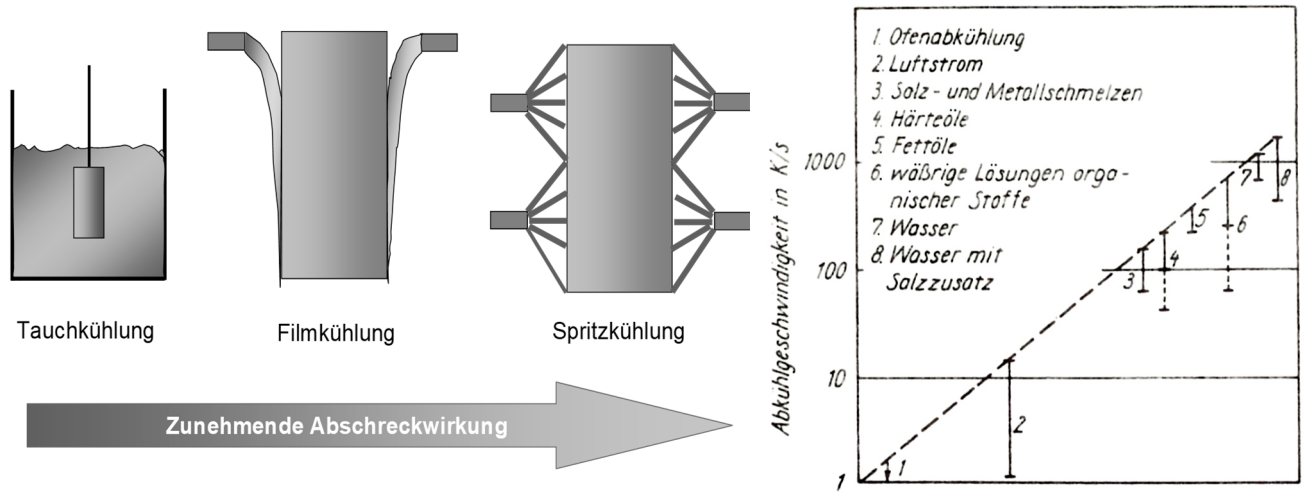



*Abb. 2-8 Abkühlverfahren und Wirkung verschiedener Medien*

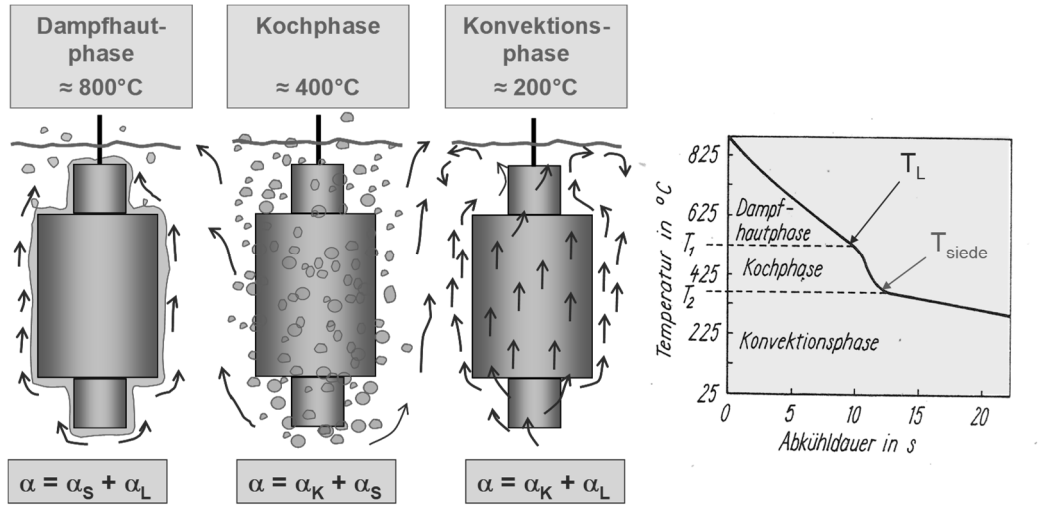
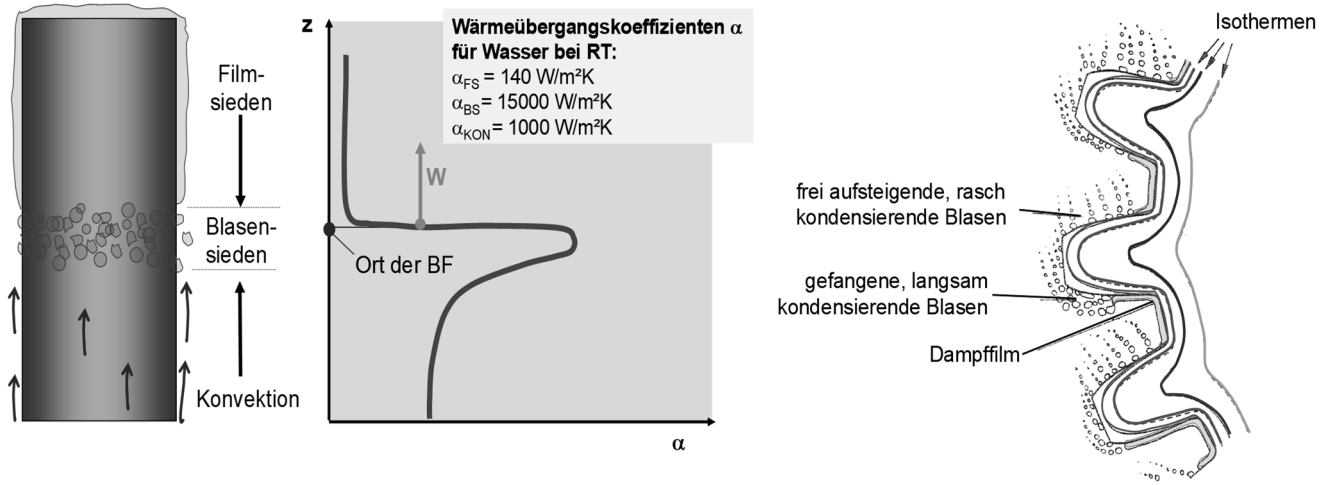



*Abb. 2-9 Abkühlphasen beim beschleunigten Abkühlen in wässrigen Medien und Ölen (nach [2])*




*a) Benetzung beim Eintauchen in Wasser* *b) Abkühlphasen an einem Zahnrad*

*Abb. 2-10 Benetzungsablauf*

## 2.2 Stofftransport

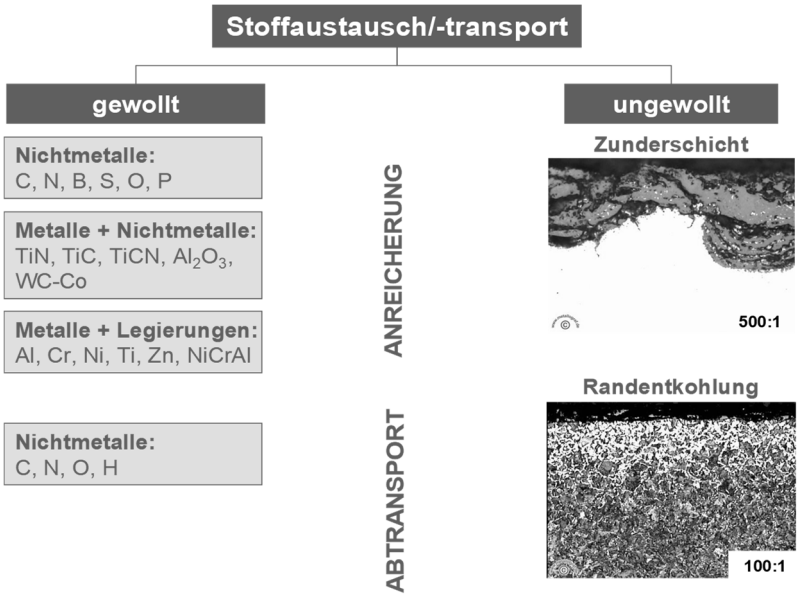



*Abb. 2-11 Arten des Stofftransportes*

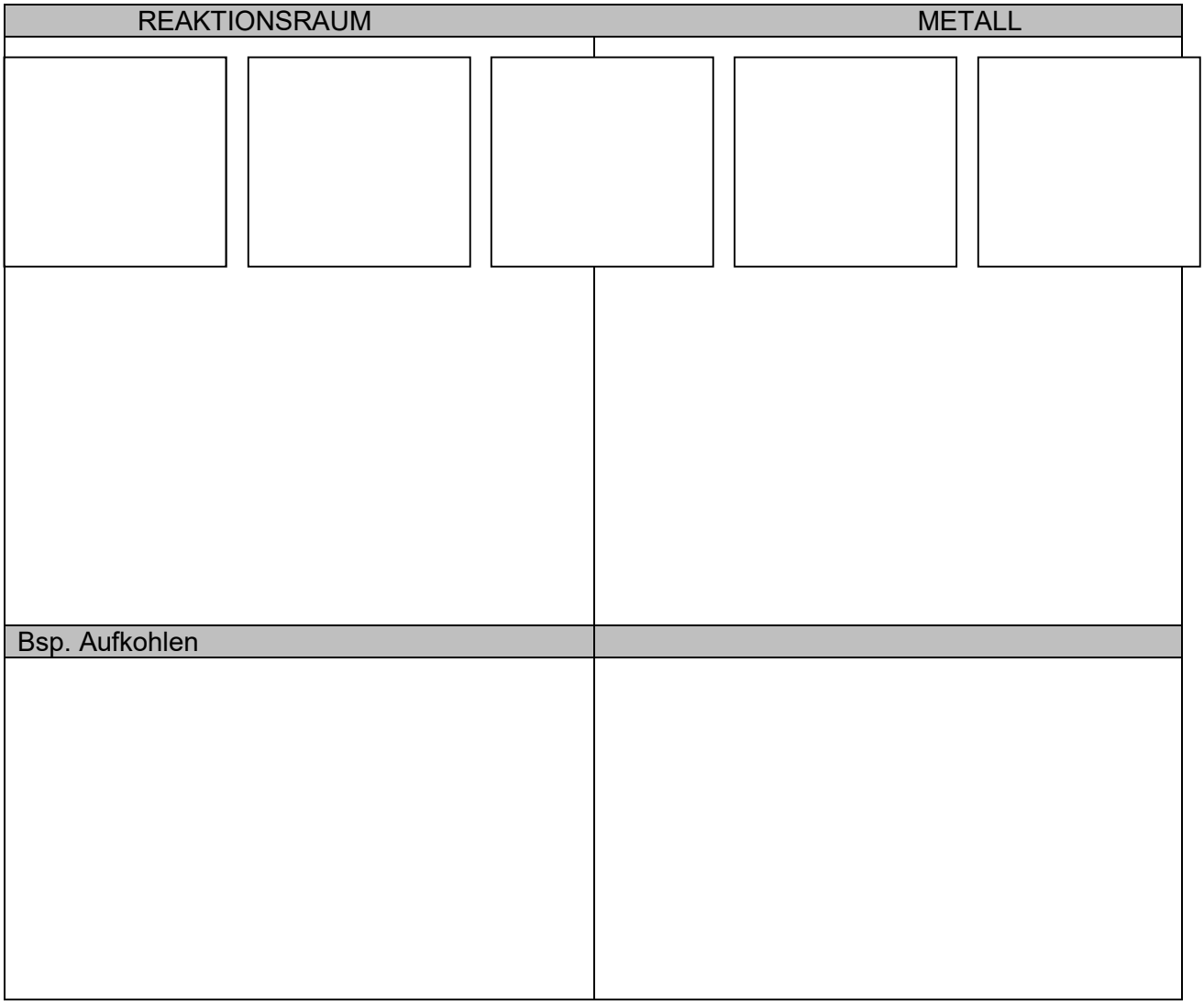



*Abb. 2-12 Ablauf und Teilschritte des Stofftransportes am Bsp. des Aufkohlens*

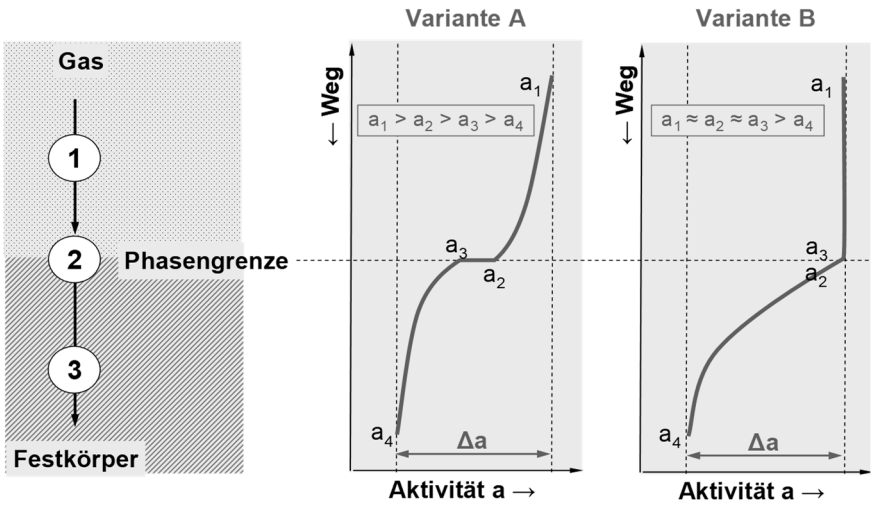
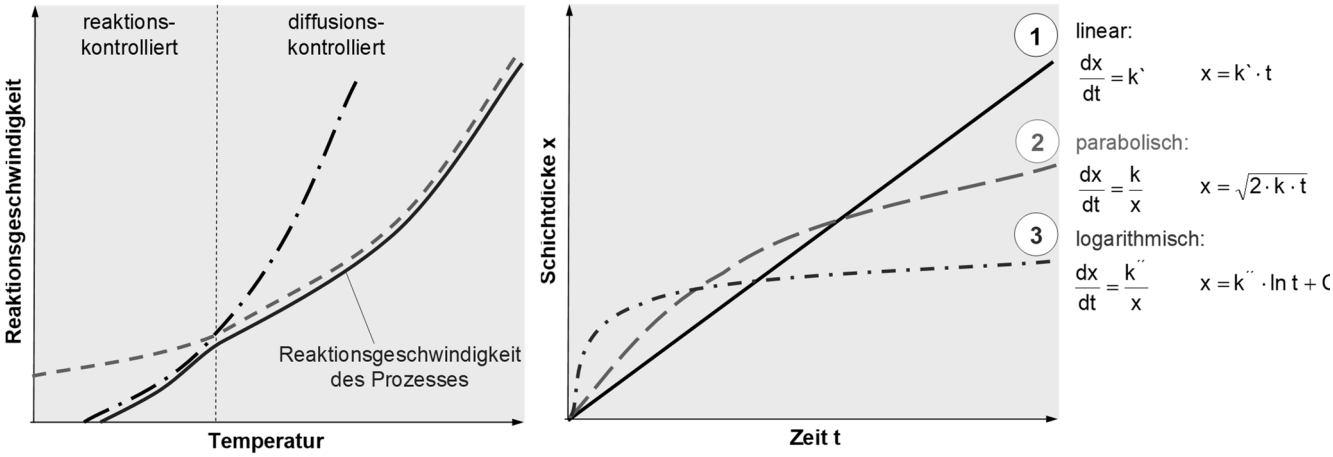



*Abb. 2-13 Teilschritte eines Stofftransportsystems*




*a) geschwindigkeitsbestimmender Vorgang b) Zeitgesetze bei der thermochemischen Behandlung*

*Abb. 2-14 Stofftransport*

## 2.3 Spannungen sowie Maß-/Formänderungen infolge einer Wärmebehandlung

**► Verzug (DIN EN 17014)**

ist die Änderung der Maße und der Form eines Werkstückes durch Wärmebehandlung. Die Maßänderung ist nur die Änderung der Maße ohne Formänderung. Maß- und Formänderungen können einzeln auftreten, sind jedoch meist überlagert.

**► Formänderung**

Veränderung von Winkelbeziehungen und Krümmungen am Bauteil

**► Maßänderung**

Änderung der Maße eines Werkstückes ohne Formänderung

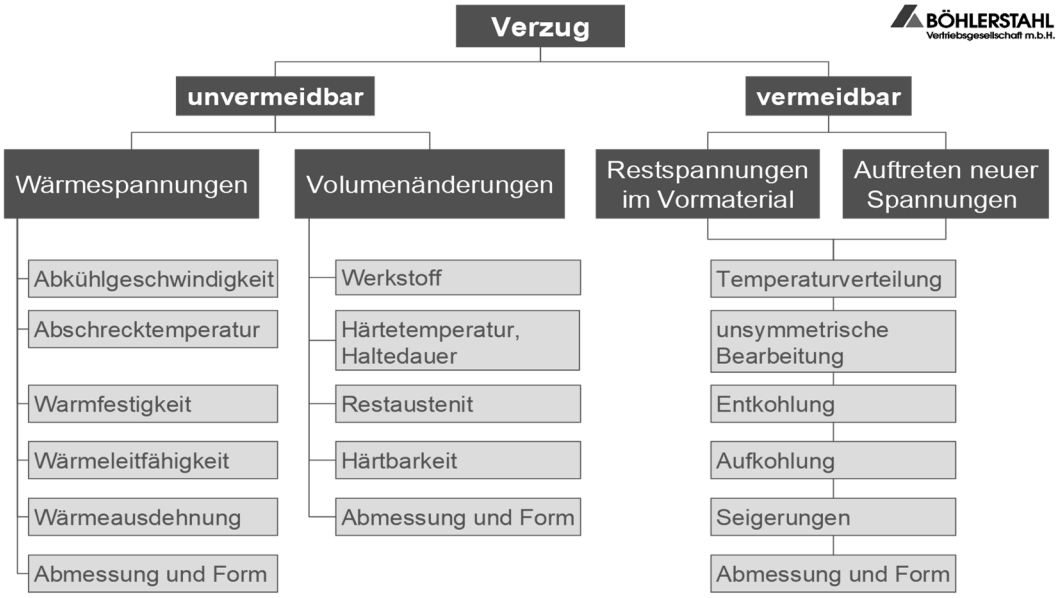



*Abb. 2-15 Verzugsarten und Ursachen*

### 2.3.1 Definition, Einteilung und Entstehung von Eigenspannungen

**► Eigenspannungen**

sind Spannungen, die in einem Bauteil/Probekörper vorhanden sind, ohne dass äußere Kräfte und Momente einwirken. Dadurch hervorgerufene Kräfte und Momente stehen im mechanischen Gleichgewicht, so dass die Summe aller Kräfte und Momente aufgrund von Eigenspannungen jeweils Null ist.

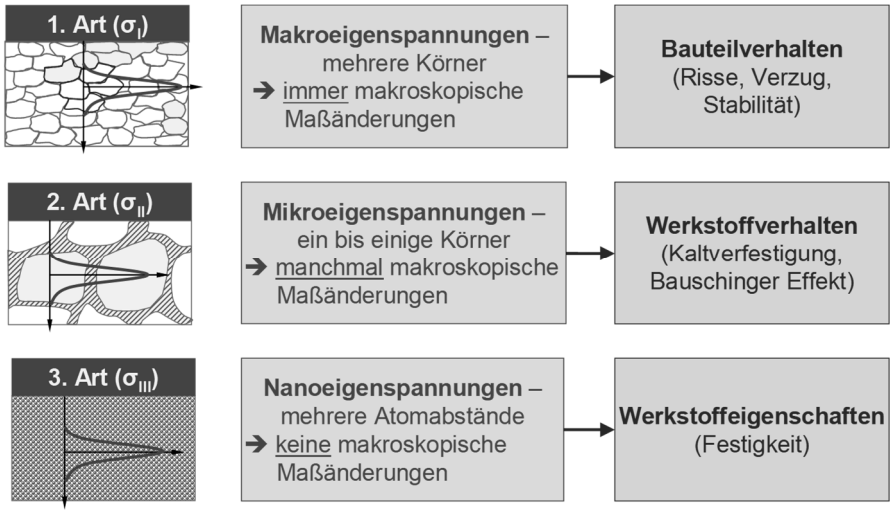



*Abb. 2-16 Arten von Eigenspannungen*

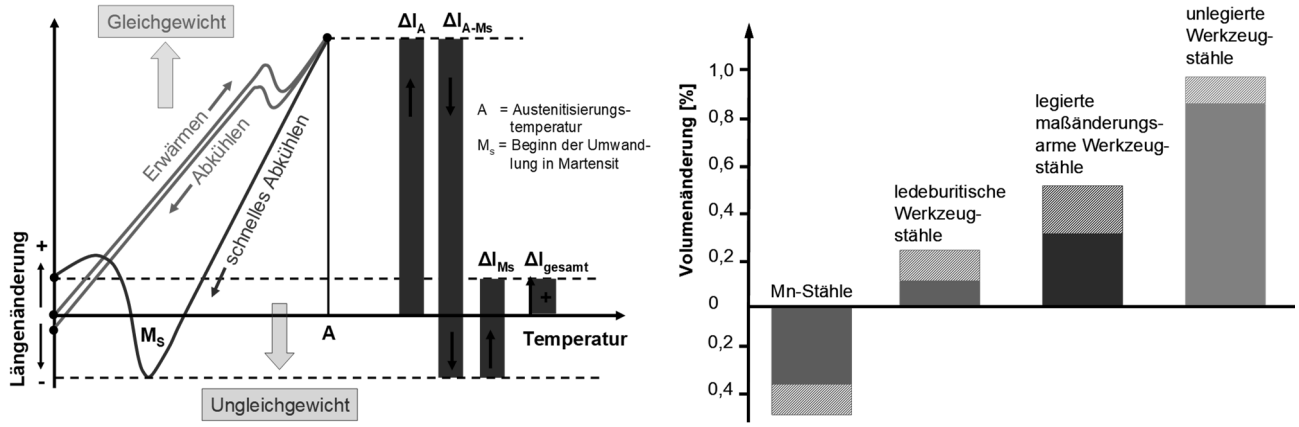
### 2.3.2 Maß- und Formänderungen durch Umwandlungs- und Wärmespannungen

**► Umwandlungsspannungen**

sind Spannungen, die durch Volumenänderung infolge der Gefügeumwandlung bei der Wärmebehandlung entstehen.

**► Wärmespannungen**

sind Spannungen, die durch Temperaturunterschiede bei der Wärmebehandlung (beim Erwärmen und insbesondere beim Abkühlen) entstehen.




*a) Dilatometerkurve und Längenänderungen* *b) Volumenzunahme beim Volumenhärten*

*Abb. 2-17 Umwandlungsspannungen*

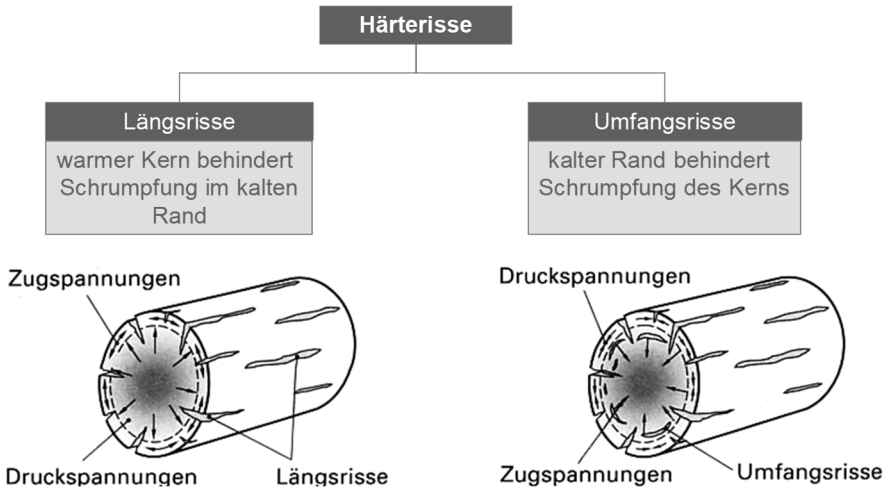
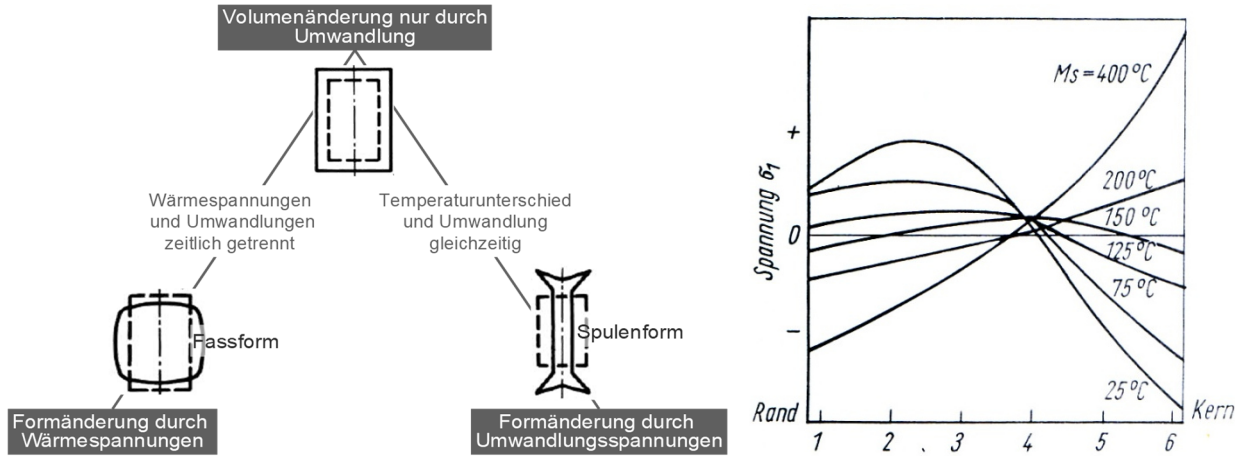



*Abb. 2-18 Auswirkungen von Wärmespannungen*




*a) Auswirkungen unterschiedlicher Spannungsüberlagerungen auf die Werkstückgeometrie* *b) Eigenspannungsverteilung über den Querschnitt = f($M_S$)*

*Abb. 2-19 Auswirkungen einer Überlagerung von Umwandlungs- und Wärmespannungen*

### 2.3.3 Maßnahmen zur Vermeidung von Verzug

unsymmetrischer Spannungszustand infolge von:

- Restspannungen durch Abkühlung nach Umformen, Bearbeiten oder Schweißen
- Wärmebehandlungsspannungen
- Unterschiede im Werkstoff
- Geometrie

# 3 FERTIGUNGSGERECHTE BZW. -BEDINGTE WÄRMEBEHANDLUNG – GLÜHEN

**► Glühen (DIN EN 10052)**

Wärmebehandlung bestehend aus Erwärmen auf eine bestimmte Temperatur, Halten und Abkühlen in der Weise, dass der Zustand des Werkstoffes bei Raumtemperatur dem Gleichgewichtszustand näher ist.

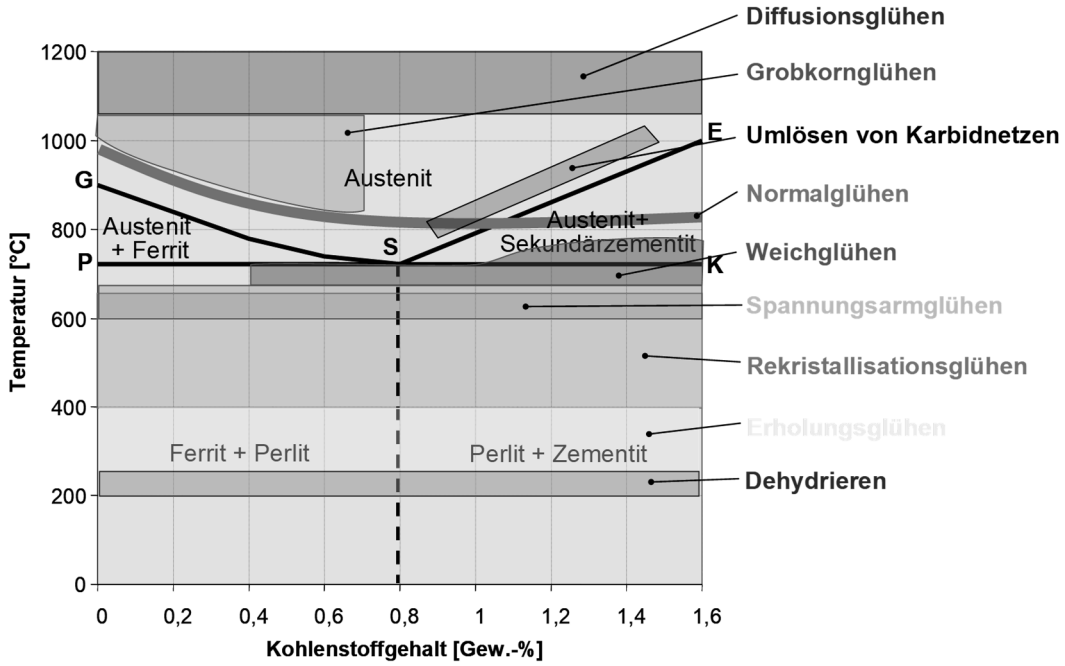



*Abb. 3-1 Temperaturbereiche einiger WBH-Verfahren*

*Tab. 3-1 für bestimmte Werkstoffgruppen übliche fertigungsgerechte WBH mit Kennbuchstaben nach DIN Normen*

| Stahlgruppe | DIN | mögliche fertigungsgerechte WBH | Kennbuchstabe |
|---|---|---|---|
| schweißgeeignete Feinkornbaustähle | EN 10113 | unbehandelt,<br>normalgeglüht bzw. normalisierend gewalzt | +TU<br>+TN |
| Vergütungs-<br>Nitrierstähle,<br>Stähle zum Flamm-<br>u. Induktionshärten | EN 10083,<br>EN 10085, | unbehandelt,<br>behandelt auf Scherbarkeit,<br>weichgeglüht,<br>normalgeglüht,<br>vergütet | +TU<br>+TS<br>+TA<br>+TN<br>+TQ+T |
| Einsatzstähle | EN 10084 | unbehandelt,<br>behandelt auf Scherbarkeit,<br>weichgeglüht,<br>behandelt auf Festigkeit (normalgeglüht u. angelassen)<br>behandelt auf Ferrit-Perlit-Gefüge | +TU<br>+TS<br>+TA<br>+TNT<br><br>- |
| Wälzlagerstähle | EN ISO 683-17 | behandelt auf Scherbarkeit,<br>behandelt auf Festigkeit, (angelassen)<br>weichgeglüht,<br>vergütet,<br>geglüht auf kugelige Karbide<br>kaltverformt | +TS<br>+TT<br>+TA<br>+TQ+T<br>+TAC<br>+THC |

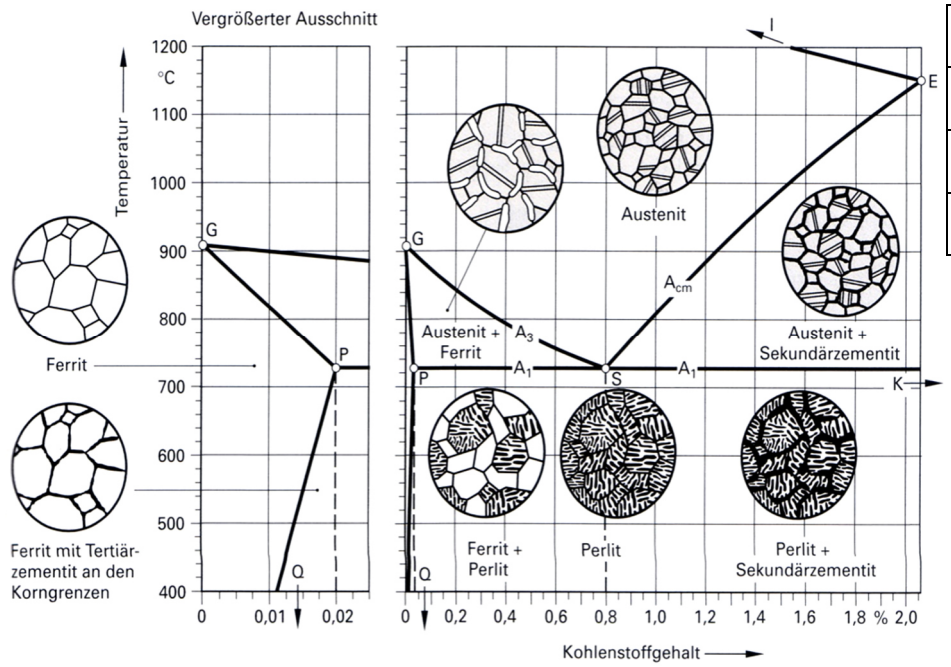
## 3.1 Umwandlungsverhalten der Stähle unter Gleichgewichts- bzw. gleichgewichtsnahen Bedingungen

**► Umwandlungsverhalten**

Gesamtheit der bei der Umwandlung ablaufenden Vorgänge in Verbindung mit den dabei auftretenden strukturellen und/oder Gefügeveränderungen und damit verbundenen Eigenschaftsänderungen.

**► Phase**

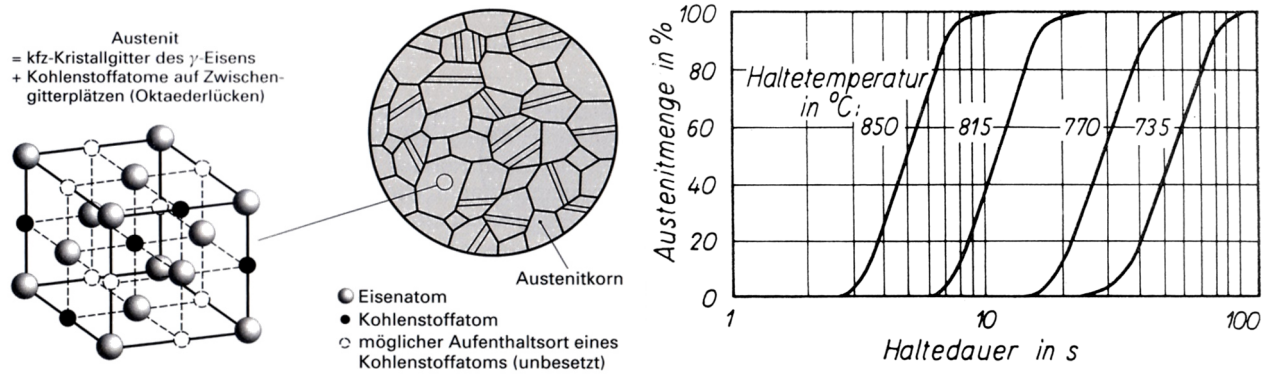
die in einem System vorhandenen Zustandsformen der Stoffe (einer oder mehrere) mit räumlich konstanten Merkmalen (Eigenschaften).




| Kristallgitter | Kohlenstofflöslichkeit |
|---|---|
| α-Eisen (Ferrit) | 0,02% (723°C)<br>< $10^{-5}$% (RT) |
| γ-Eisen (Ferrit) | 2,06% (1147°C)<br>0,80% (723°C) |
| δ-Eisen (δ-Ferrit) | 0,1% (1493°C) |

*Abb. 3-2 Stahlecke des metastabilen Fe-C-Zustandsdiagramms (Fe-$Fe_3C$) mit Gefüge [21]*

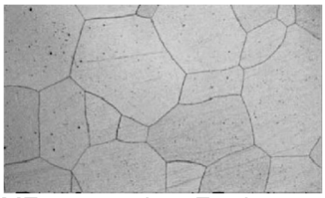
### 3.1.1 Umwandlungsverhalten bei langsamer Erwärmung



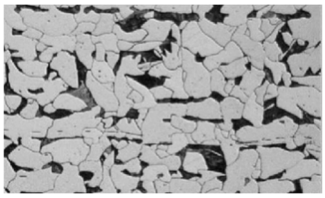

*a) Austenit [21]* *b) Modell der Austenitbildung nach Schmidtmann und Brandis (0,5%C)*

*Abb. 3-3 Austenitbildung*

### 3.1.2 Umwandlungsverhalten bei langsamer Abkühlung



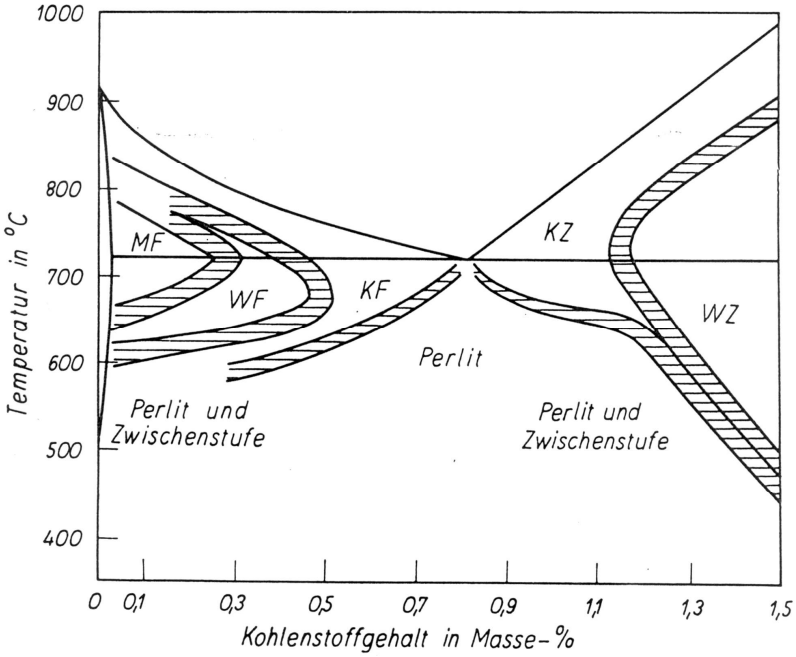
MF …massiver Ferrit



KF …Korngrenzen-Ferrit

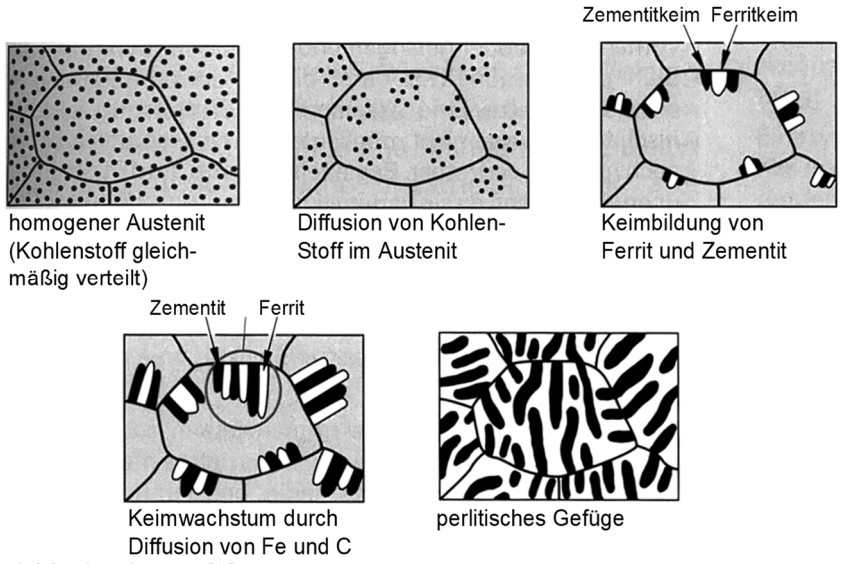


WF …Widmannstätten-Ferrit

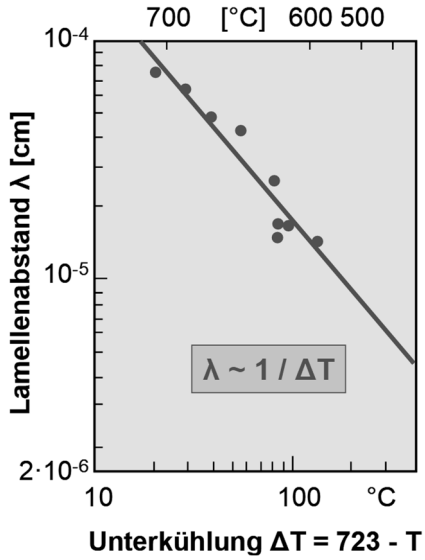



KZ …Korngrenzen-Zementit WZ …Widmannstätten-Zementit

*Abb. 3-4 Erscheinungsformen des voreutektoiden Ferrits (untereutektoide Stähle) und Karbids/Zementits (übereutektoide Stähle)*




*a) Mechanismus [3]*



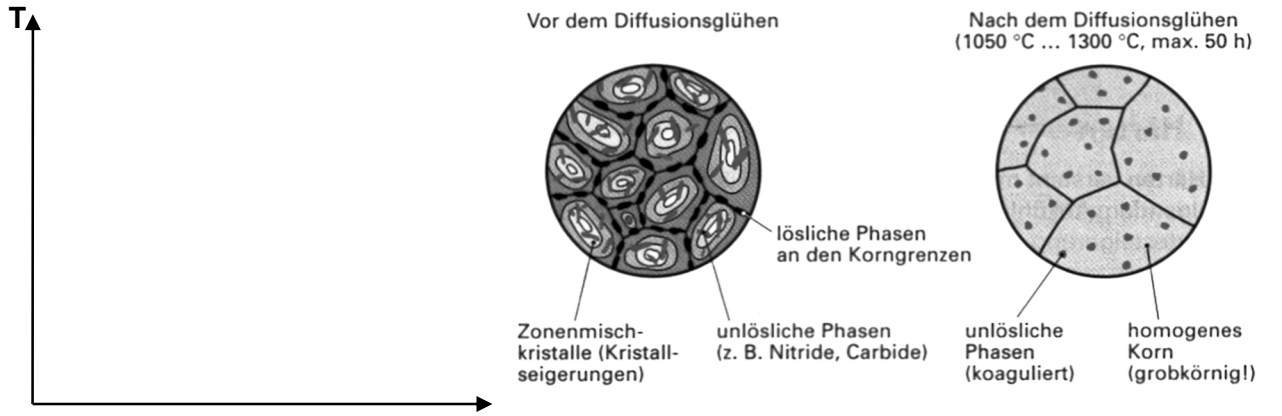

*b) Lamellenabstand = f(ΔT; LE)*

*Abb. 3-5 Perlitbildung (eutektoider Stahl)*

## 3.2 Diffusionsglühen

**► Diffusionsglühen (DIN EN 10052)**

Glühen bei hoher Temperatur mit ausreichend langem Halten, um örtliche Unterschiede der chemischen Zusammensetzung infolge Seigerungen durch Diffusion zu verringern.



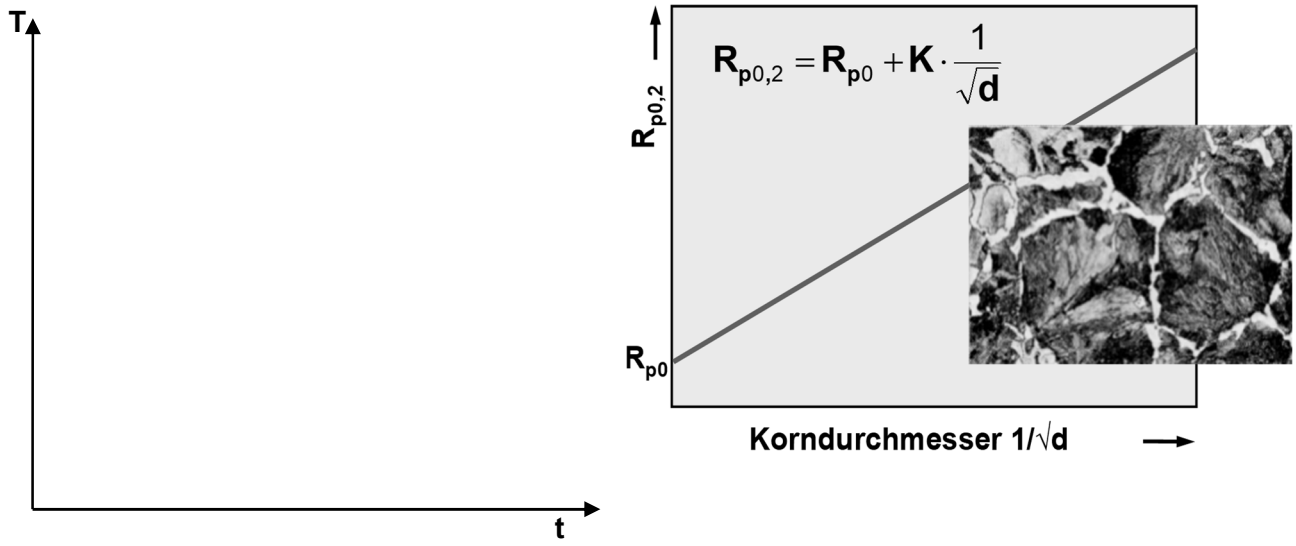

*a) T-t-Verlauf* *b) Gefüge*

*Abb. 3-6 Diffusionsglühen*

## 3.3 Grobkornglühen

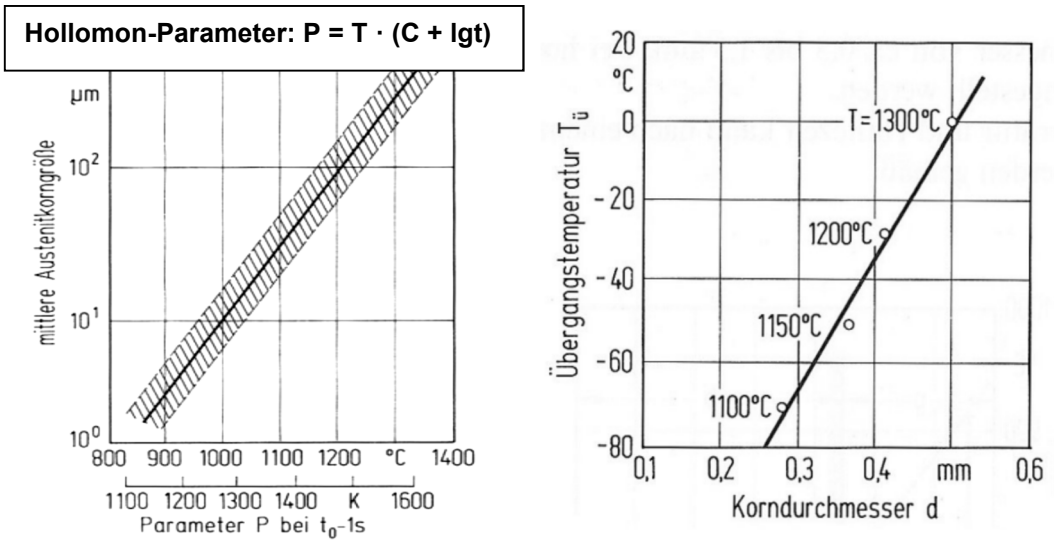
**► Grobkornglühen (DIN EN 10052)**

Glühen bei einer Temperatur meist beträchtlich oberhalb $A_{c3}$ mit ausreichend langem Halten, um grobes Korn zu erzielen.




*a) T-t-Verlauf* *b) Gefüge*

*Abb. 3-7 Grobkornglühen*



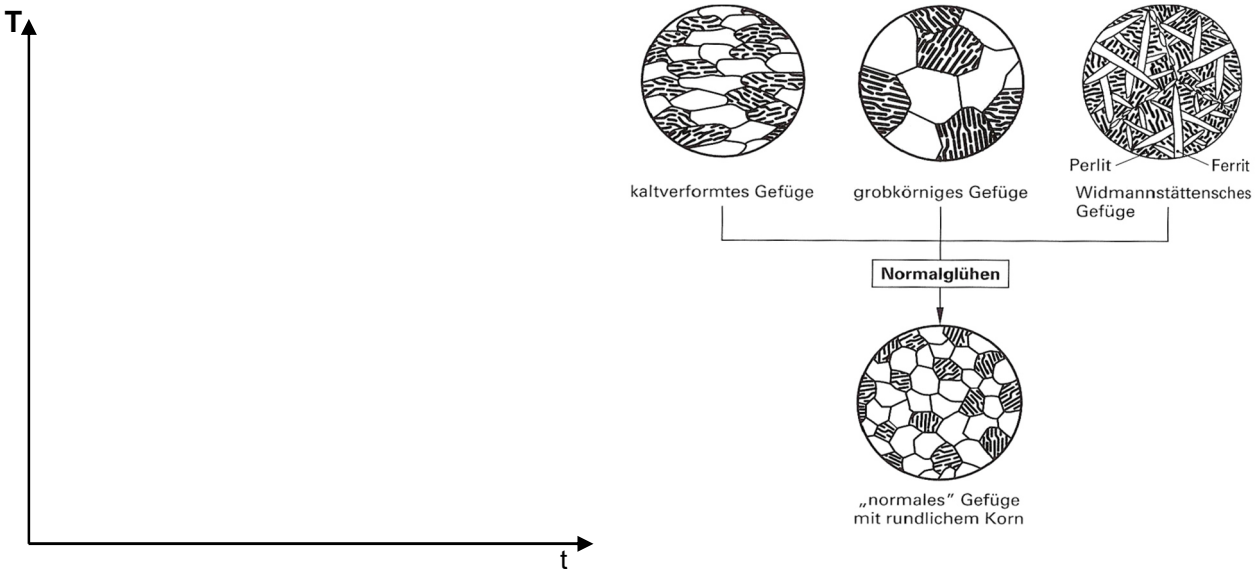

*a) mittl. Austenitkorngröße in Abhängigkeit vom Hollomon-Parameter (C15)* *b) Abhängigkeit der Übergangstemperatur von der Korngröße*

*Abb. 3-8 Erzeugung und Eigenschaften einer bestimmten Korngröße*

## 3.4 Normalglühen

**► Normalglühen (DIN EN 10052)**

WBH bestehend aus Austenitisieren und anschließendem Abkühlen an ruhender Luft.




- untereutektoider Stahl → T ≈ 30 - 50K > $A_{c3}$
- übereutektoider Stahl → T ≈ 30 - 60K > $A_{c1}$
- legierter Stähle → T ≈ 50 - 100K > $A_{c3}$

*a) T-t-Verlauf* *b) Gefüge*

*Abb. 3-9 Normalglühen*

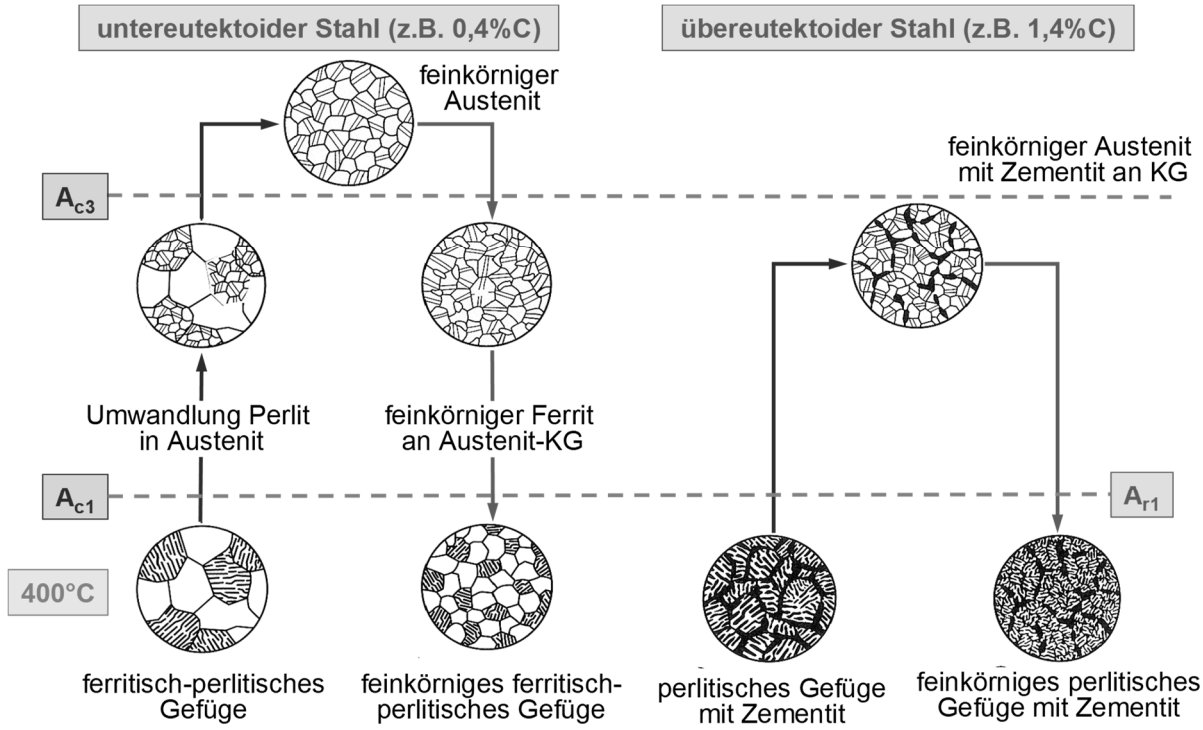



*Abb. 3-10 Einfluss der Austenitisierungstemperatur auf die Gefügeausbildung nach dem Normalglühen*

## 3.5 Weichglühen

**► Weichglühen (DIN EN 10052)**

WBH zum Vermindern der Härte eines Werkstoffes auf einen vorgegebenen Wert.

**► GKZ-Glühen (DIN EN 10052)**

Glühen mit dem Ziel einer Einformung der Carbide. Es umfasst im Allgemeinen ein längeres Halten auf einer Temperatur bei $A_{c1}$, gegebenenfalls ein Pendeln um diese Temperatur.

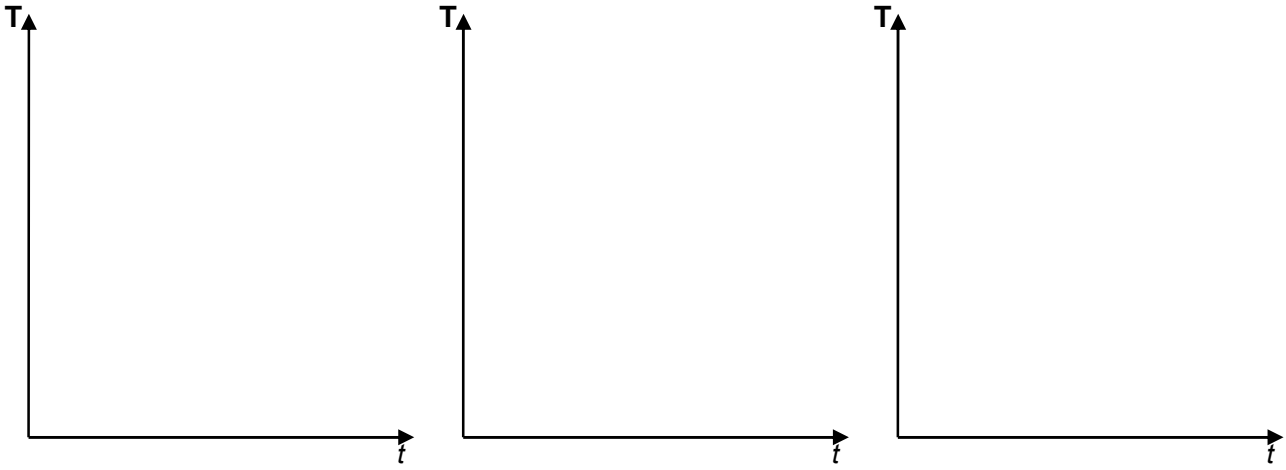
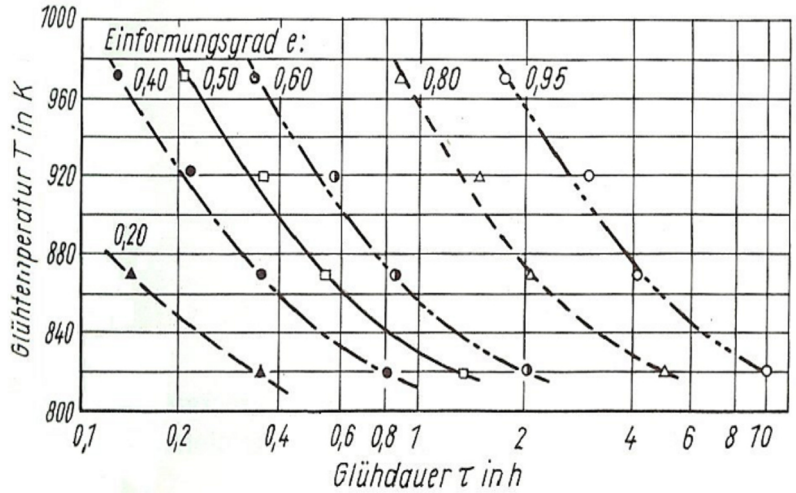



*Abb. 3-11 Weichglühen*

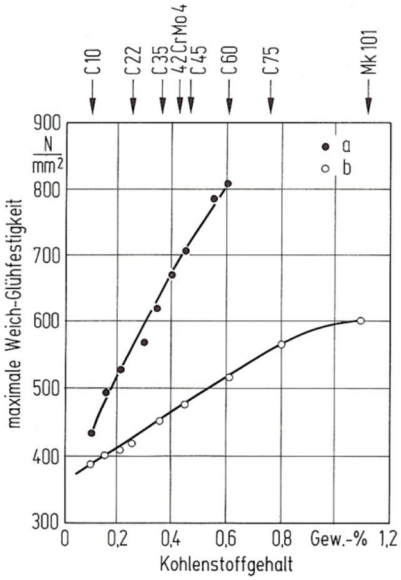


*a) lamellarer Perlit b) Einformung der Carbidlamellen c) kugelig eingeformter Zementit*

*Abb. 3-12 Veränderung der Carbid- und Gefügestruktur (Koagulation)*




*a) Zeit-Temperatur-Einformungs-Schaubild vom Stahl C35*



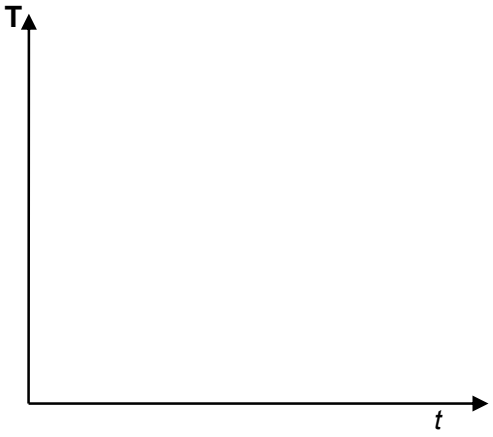

*b) max. Glühfestigkeit = f(%C; Carbid)*
*a …Werte nach DIN*
*b …garantierte Glühfestigkeit einiger Stahllieferanten (TAC-Glühen)*

*Abb. 3-13 Einfluss der Glühparameter auf die Gefügeausbildung und Eigenschaften*

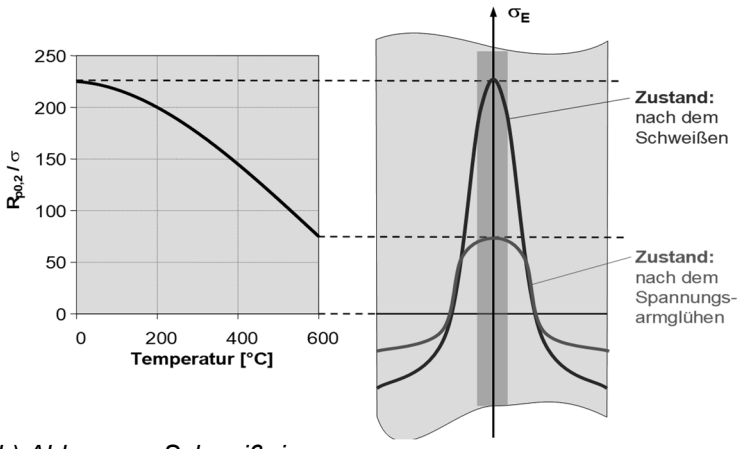
## 3.6 Spannungsarmglühen

**► Spannungsarmglühen (DIN EN 10052)**

Wärmebehandlung, bestehend aus Erwärmen und Halten bei ausreichend hoher Temperatur und anschließendem zweckentsprechenden Abkühlen, um innere Spannungen ohne wesentliche Änderung des Gefüges weitgehend abzubauen.

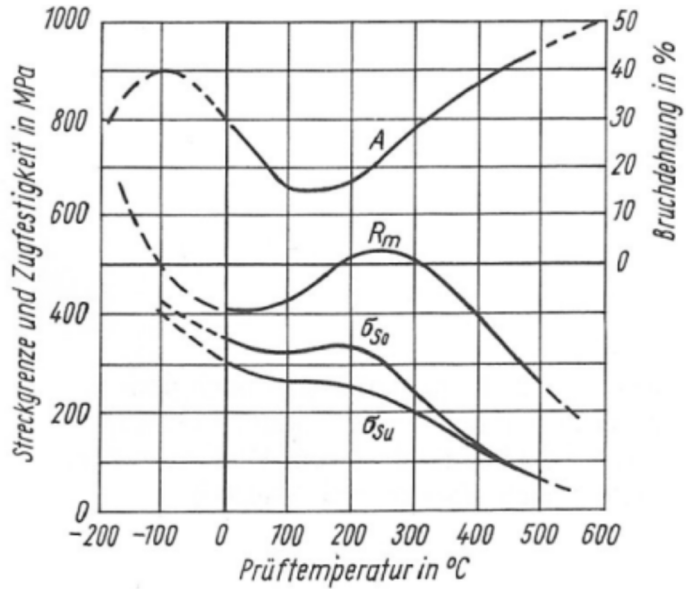



*a) T-t-Verlauf*

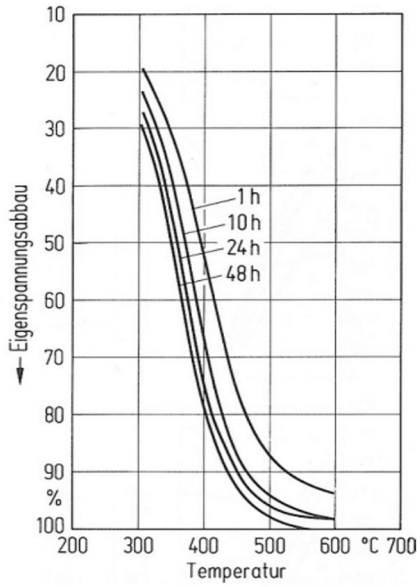



*b) Abbau von Schweißeigenspannungen*

*Abb. 3-14 Spannungsarmglühen*




*a) Streckgrenze, Zugfestigkeit = f(T)*




*b) Hollomon-Jaffe-Parameter*

*Abb. 3-15 Einfluss der Glühparameter auf die Eigenschaften*

## 3.7 Rekristallisationsglühen

**► Rekristallisationsglühen (DIN EN 10052)**

Wärmebehandlung mit dem Ziel, durch Keimbildung und Wachstum ohne Phasenänderung eine Kornneubildung in einem kaltumgeformten Werkstück zu erreichen.

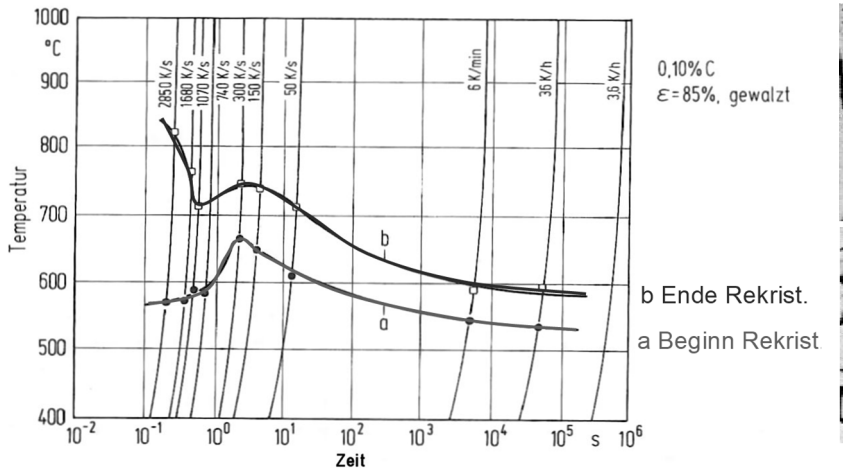


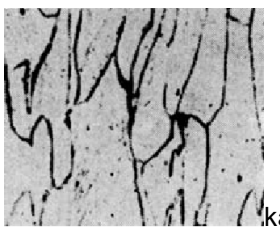

**Temperatur-Zeit-Verlauf hängt ab vom:**

**→ siehe Rekristallisationsschaubilder**

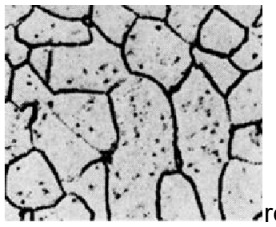
- Werkstoff: Glühen dicht oberhalb der Rekristallisationstemperatur
- Verformungsgrad: je höher, desto niedriger Glühtemperatur

*Abb. 3-16 Temperatur-Zeit-Verlauf beim Rekristallisationsglühen*



kaltverformt



rekristallisiert

*Abb. 3-17 ZTR-Schaubild eines C-armen, ausscheidungsfähigen Stahles*

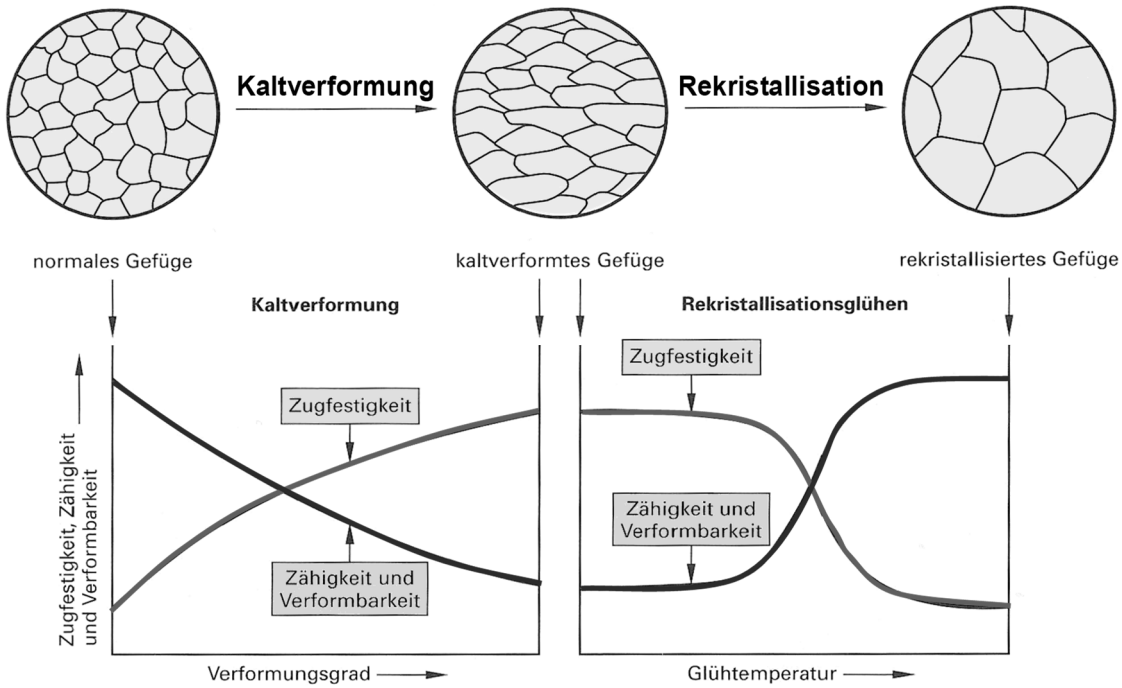
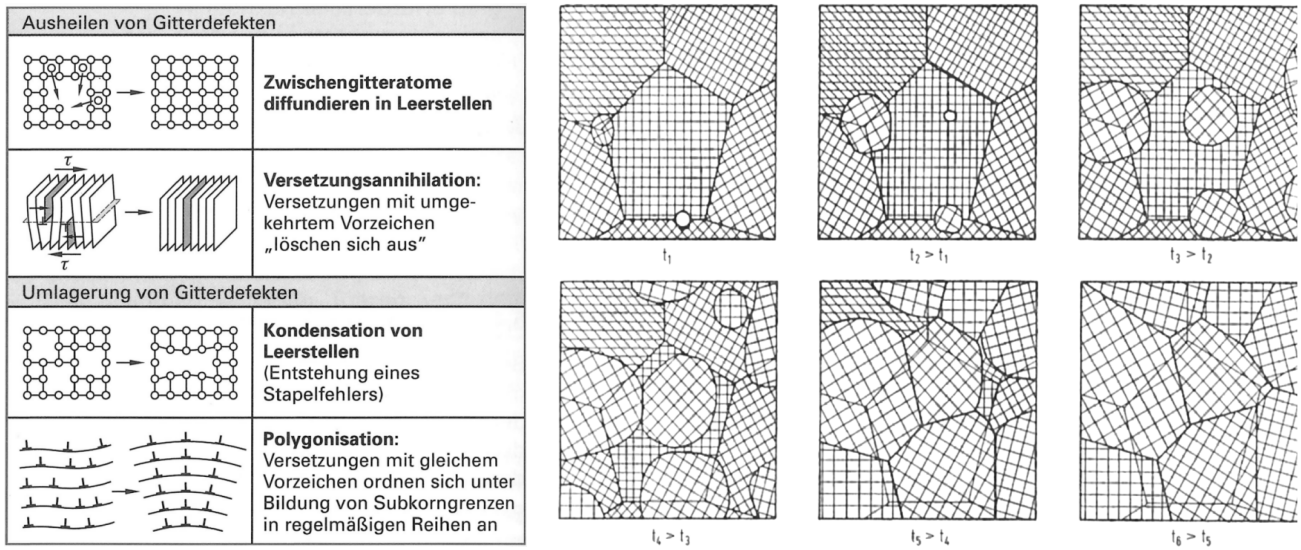



*Abb. 3-18 Gefüge-Eigenschafts-Veränderungen*




*a) Kristallerholung (kont.; $T < T_R$)* *b) Rekristallisation (diskont. Keimbildung und -wachstum; $T \geq T_R$)*

*Abb. 3-19 Vorgänge im Gefüge*

## 3.8 Erholungsglühen

**► Erholungsglühen (DIN EN 10052)**

Wärmebehandlung eines kaltumgeformten Werkstückes, um die vor dem Kaltumformen vorhandenen mechanischen und physikalischen Eigenschaften zumindest teilweise wiederherzustellen, ohne das Gefüge nennenswert zu ändern.

## 3.9 Dehydrieren

**► Dehydrieren; Wasserstoffentzug durch Glühen (DIN EN 10052)**

Wärmebehandlung zum Entziehen des in einem Werkstück eingeschlossenen Wasserstoffs, ohne das Gefüge zu verändern.

## 3.10 Blankglühen

**► Blankglühen (DIN EN 10052)**

Glühen in einem Mittel (Schutz- oder Inertgas oder Vakuum), bei dem das metallische Aussehen erhalten bleibt, also eine Oxidation der Werkstückoberfläche vermieden wird.

## 3.11 Andere Glühverfahren

**► Stabilglühen (DIN EN 10052)**

Glühen zum Ausscheiden oder Einformen feiner Gefügebestandteile, z. B. Carbiden (Ti-, Nb-) in stabilisierten austenitischen Stählen bei ca. 850°C (Wiederherstellung der Korrosionsbeständigkeit)

**► Tempern (DIN EN 10052)**

- Ledeburitisches (Weißes) Gusseisen wird bei hohen Temperaturen sehr lange geglüht – Graphitisierung
- in entkohlender oxidierender Atmosphäre - weißer Temperguss
- in neutraler Atmosphäre - schwarzer Temperguss

**► Umkörnen (DIN EN 10052)**

- kurzes Halten über $A_{C3}$ oder $A_{C1}$ (übereutektoide Stähle)
- anschließendes zweckmäßiges Abkühlen (siehe Normalglühen)
- zur Erzeugung eines feineren gleichmäßigeren Korns

## 3.12 Zusammenfassung

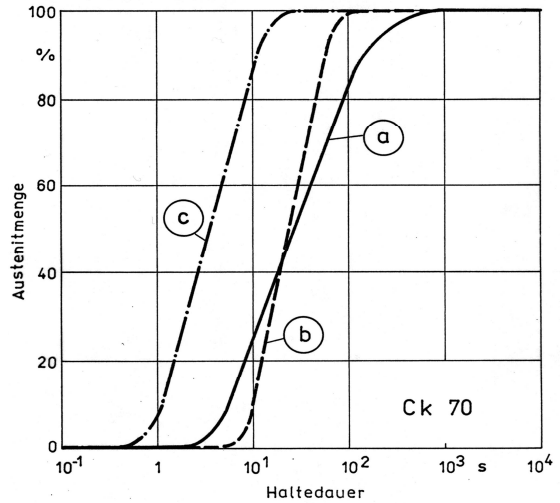
*Tab. 3-2 Einsatz und Anwendung verschiedener WBH-Verfahren*

| Verfahren | Werkstoff | Anwendungszweck |
|---|---|---|
| Diffusionsglühen | Schnellarbeitsstahl | Ausgleich von Inhomogenitäten (Seigerungen) |
| Grobkornglühen | Einsatzstahl | Verbesserung der Zerspanbarkeit (Grobkorn) |
| Spannungsarmglühen | Stähle für große Schmiedestücke | Abbau innerer Spannungen nach dem Schmieden oder Zerspanen |
| Rekristallisationsglühen | Kaltgewalztes Band | Entfestigung vor weiterer Kaltverformung |
| Weichglühen | Wälzlagerstahl | Voraussetzung für Zerspanbarkeit, Härtbarkeit |
| Normalglühen | Vergütungsstahl | Gefüge-/Eigenschaftsverbesserung n. Schmieden/Walzen |
| Ferritisierungsglühen | Gusseisen (GJL) | Verbesserte Zerspanbarkeit |
| Lösungsbehandeln | martensitaushärtbarer Stahl | Erzeugung Martensit als Vorstufe des Auslagerns |
| Bainitisieren | Vergütungs-, Federstahl | Hohe Festigkeit u. Zähigkeit, Elastizität |
| Patentieren | gezogener, unlegierter Federstahldraht | Drähte (0,1…16 mm) mit extrem hoher Festigkeit, Aufzinken mögl. |
| Wiederaufkohlen | Wälzlagerstahl | Wiederherstellung des Rand-C-Gehaltes nach Entkohlung beim metallurgischen Prozess |
| Entkohlen | Relaisstahl | Entfernung von C und Verunreinigungen für günstige magnetische Eigenschaften |
| Dehydrieren | Stähle für große Schmiedestücke | „Flockenfreiglühen“ zum Vermeiden innerer Risse durch eingeschlossenen $H_2$ |

# 4 BEANSPRUCHUNGSGERECHTE WÄRMEBEHANDLUNG

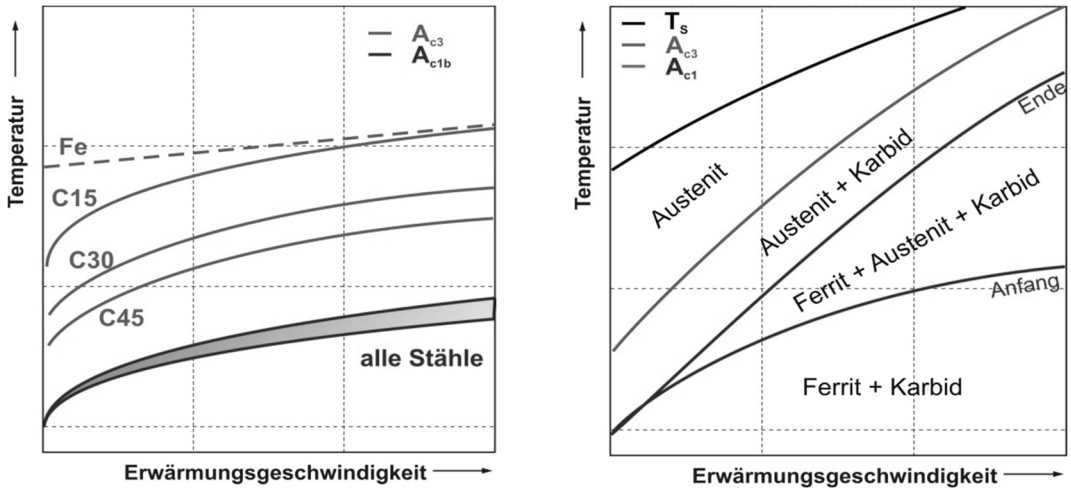
## 4.1 Umwandlungsverhalten der Stähle unter Nichtgleichgewichts-Bedingungen

### 4.1.1 Umwandlungsverhalten bei rascher Erwärmung




a) Ferrit + lamellarer Perlit
b) Ferrit + grobkörniger Zementit
c) Ferrit + feinkörnig ausgeschiedener Zementit (angelassener Martensit)

*Abb. 4-1 Einfluss der verschiedenen Ausgangsgefüge auf die Austenitbildung*




*a) untereutektoide Stähle* *b) übereutektoide Stähle*

*Abb. 4-2 Einfluss der Erwärmungsgeschwindigkeit auf die Umwandlungspunkte ($A_{c1}$; $A_{c3}$)*

### 4.1.2 Umwandlungsverhalten bei rascher Abkühlung

**► Martensit-Starttemperatur $M_S$**

ist die Temperatur bei der die treibende Kraft der Austenitumwandlung die Umwandlungshemmung durch C-Atome überwinden kann und das Austenitgitter diffusionslos umklappt (Zwangsreaktion).

**► martensitische Umwandlung (nach Huhl, D.; Bilby, B.A.; Christian, J.W.)**

ist eine Phasenumwandlung in kristallinen Festkörpern von einem Gittertyp in einen anderen, die diffusionslos abläuft und bei der infolge von kooperativen Atombewegungen (Scherung über große Bereiche) makroskopische Gestaltänderungen auftreten.

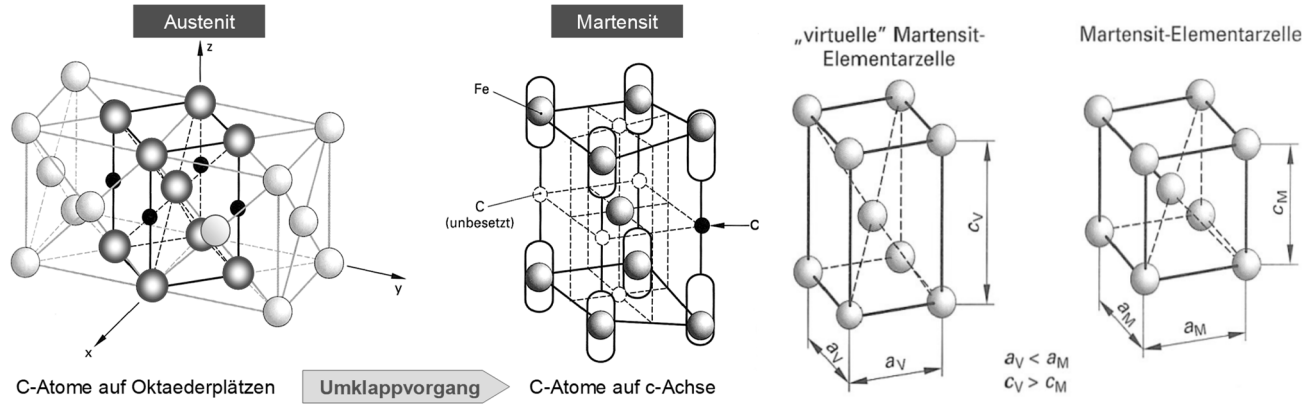
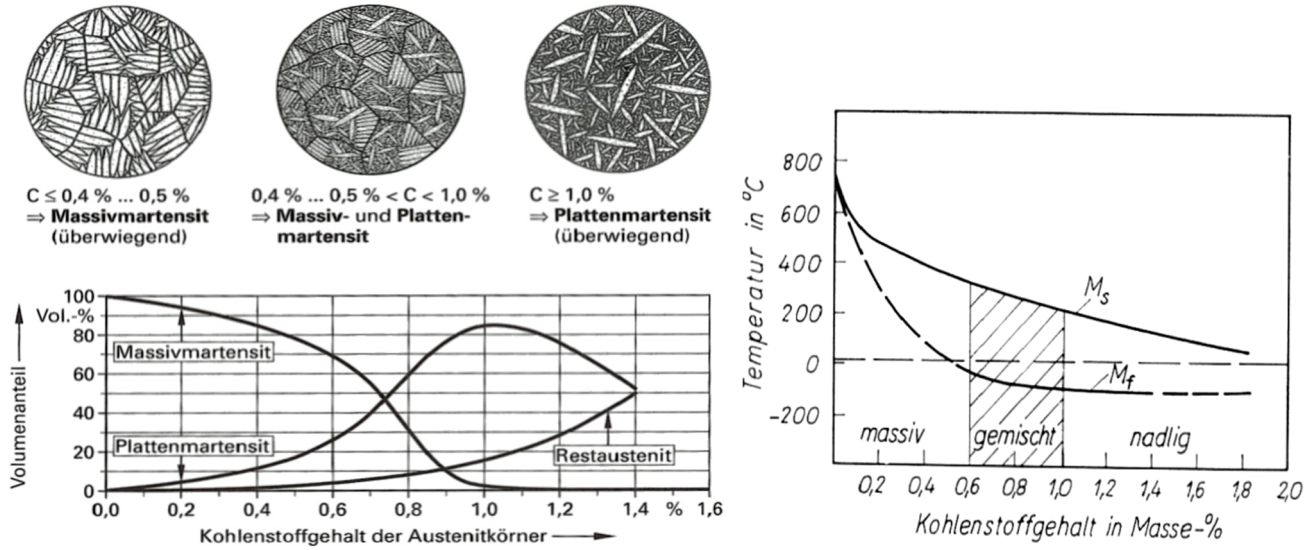



*Abb. 4-3 C-Atome vor und nach diffusionsloser Gitterumklappung*




*a) Erscheinungsformen des Martensits* *b) Einfluss %C auf $M_s$ und $M_f$*

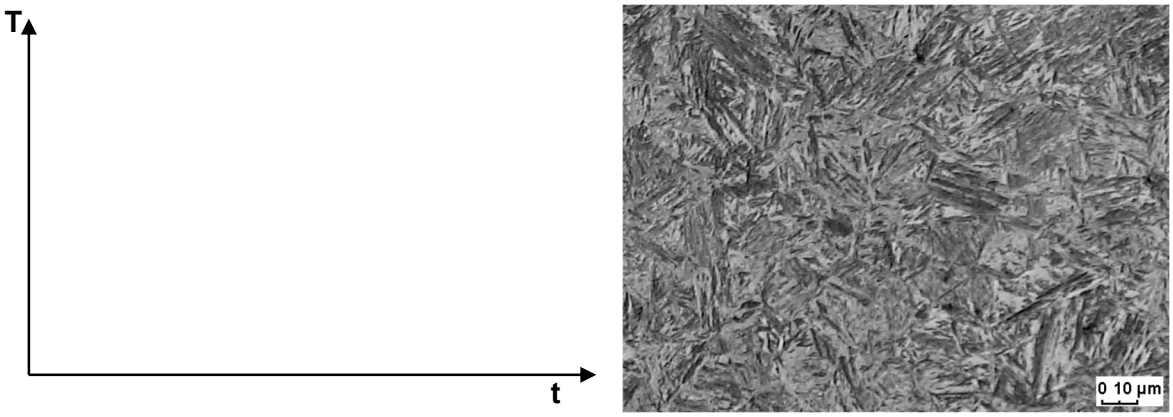
*Abb. 4-4 Martensit = f(%C im Austenit; $M_S$; $M_f$)*

## 4.2 Härten nach Volumenerwärmung und Anlassen

### 4.2.1 Härten

**► (einfaches, direktes) Härten (DIN EN 10052)**

Wärmebehandlung, bestehend aus Austenitisieren und Abkühlen bzw. Abschrecken unter solchen Bedingungen, dass eine Härtezunahme durch mehr oder weniger vollständige Umwandlung des Austenits in Martensit, ggf. Bainit (Zwischenstufe) erfolgt.



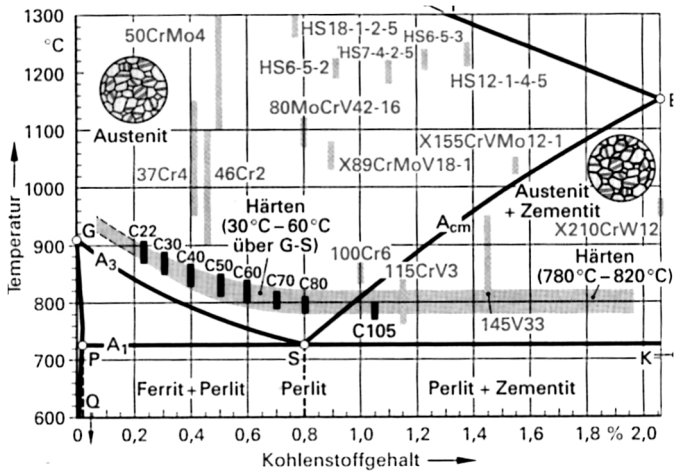

*a) T-t-Verlauf* *b) Gefüge*

*Abb. 4-5 Härten*

### 4.2.1.1 Erwärmen und Halten (Austenitisieren)

**► Austenitisieren (DIN EN 10052)**

Wärmebehandlungsschritt, in dessen Verlauf das Werkstück auf eine Temperatur gebracht wird, bei der die Matrix austenitisch (γ-Fe) wird.
Wenn die Umwandlung von Ferrit in Austenit nicht vollständig erfolgt spricht man von unvollständiger Austenitisierung.




| Werkstoffe | $T_A$ |
|---|---|
| un-/nierdrig legierte Stähle:<br>▪ %C < 0,8<br>▪ %C > 0,8 | $A_{c3}$ + 30…50 K<br>$A_{c1}$ + 100 K |
| Vergütungsstähle | $T_{Ac3}$ = 947-264·√C-8Mn+45Si+5Cr+74Al+10Mo-23Ni+94V [1)] |
| hochleg. Kalt-/ Warmarbeitsstähle | 950 – 1100 °C |
| Schnellarbeitsstähle | 1150 – 1250 °C |
| Gusseisen | 850 – 880 °C |

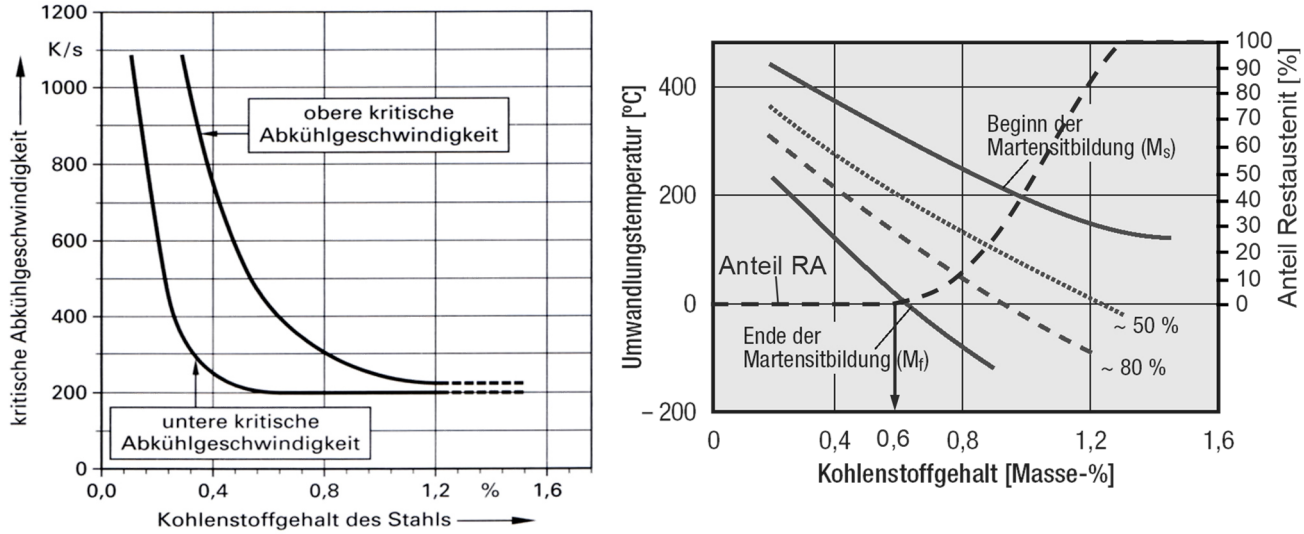
*Abb. 4-6 Austenitisierungstemperatur = Härtetemperaturen = f(%C, %LE)*



*a) Überhitzen* *b) Überzeiten* *c) Randentkohlung*

*Abb. 4-7 Fehlermöglichkeiten beim Erwärmen*

### 4.2.1.2 Abkühlen bzw. Abschrecken




*a) unlegierte Stähle = f(%C)* *b) Martensitstart- und -endtemperatur*

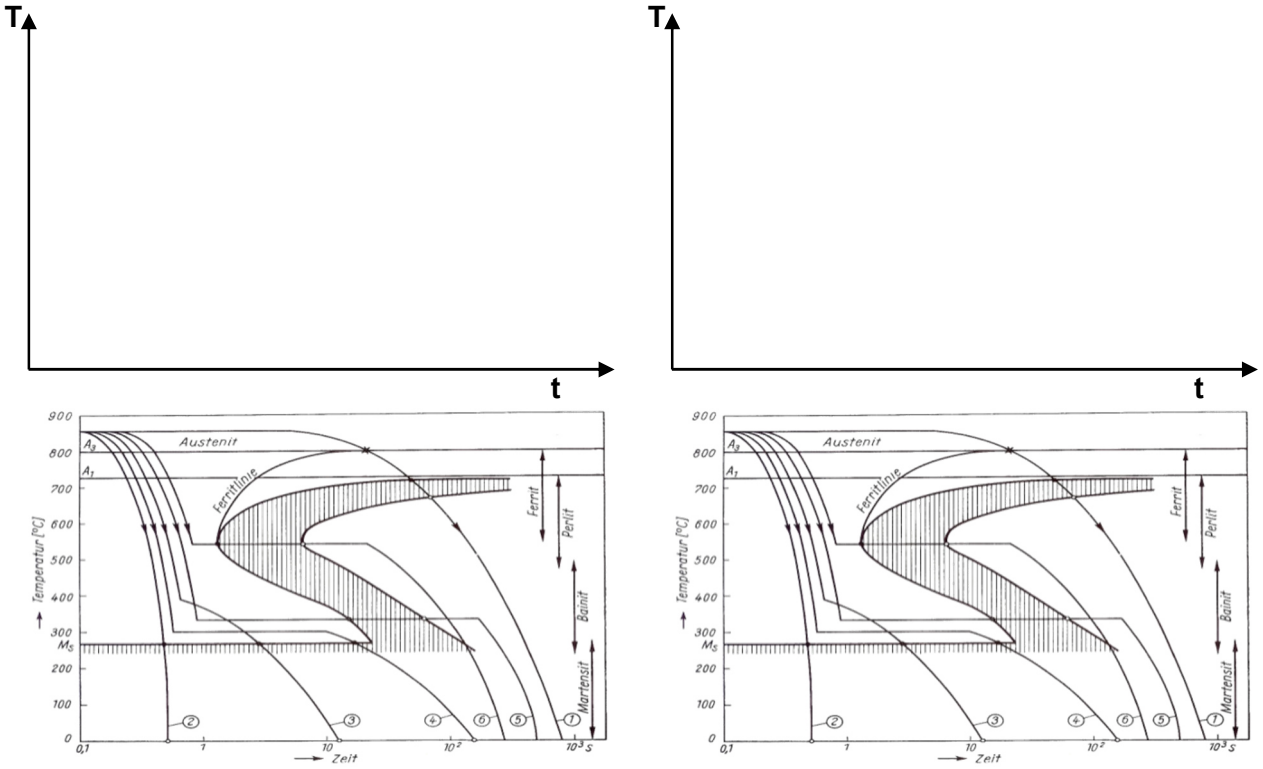
*Abb. 4-8 kritische Abkühlgeschwindigkeit*

**► gebrochenes Abschrecken (Härten) (DIN EN 10052)**

Abschrecken in einem Mittel, das ein schnelles Abkühlen herbeiführt und Abbrechen des Abkühlvorganges, bevor das Werkstück die Temperatur des Abkühlmittels voll angenommen hat

**► gestuftes Abschrecken (Härten) (DIN EN 10052)**

Abschrecken mit Unterbrechen des Abkühlvorganges durch Halten in einem Mittel von zweckentsprechender Temperatur




*a) gebrochenes Härten (3)* *b) gestuftes Härten (4)*

*Abb. 4-9 Vergleich der T-t-Verläufe verschiedener Abschreckmethoden beim Härten*

### 4.2.1.3 Gefüge/Eigenschaften nach dem Härten

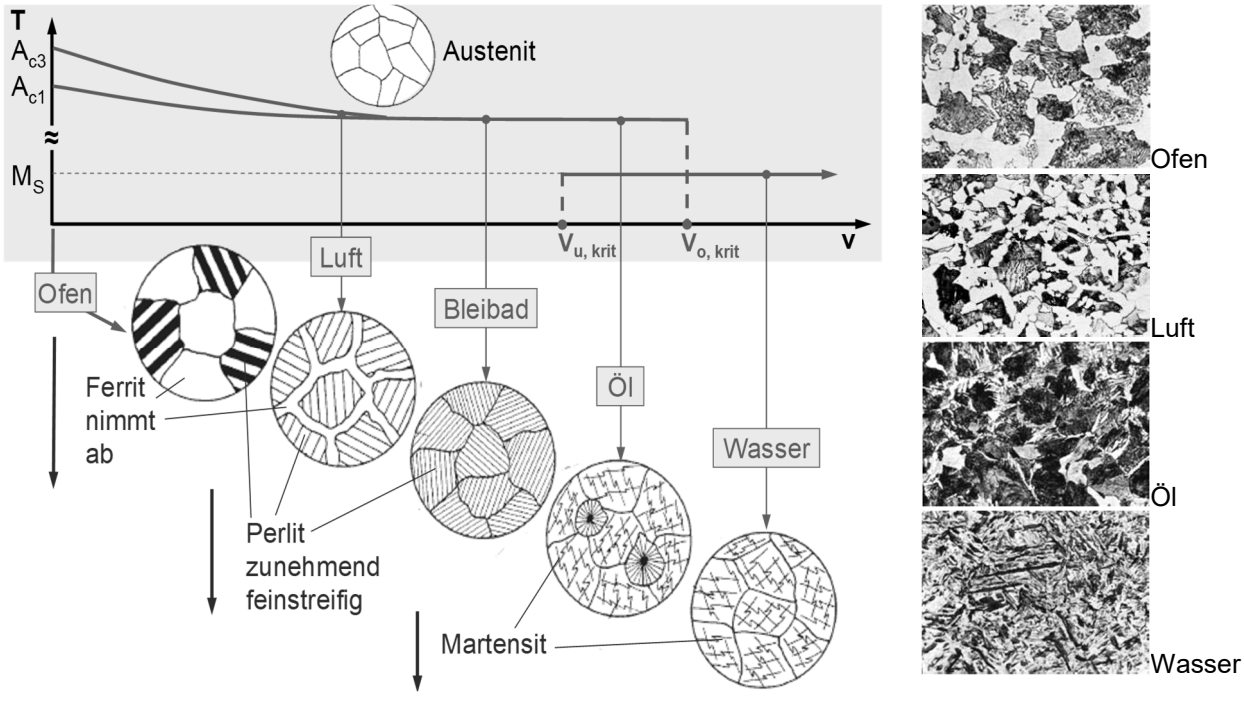



*Abb. 4-10 Gefügeausbildung = f(Abkühlgeschwindigkeit) [4]*

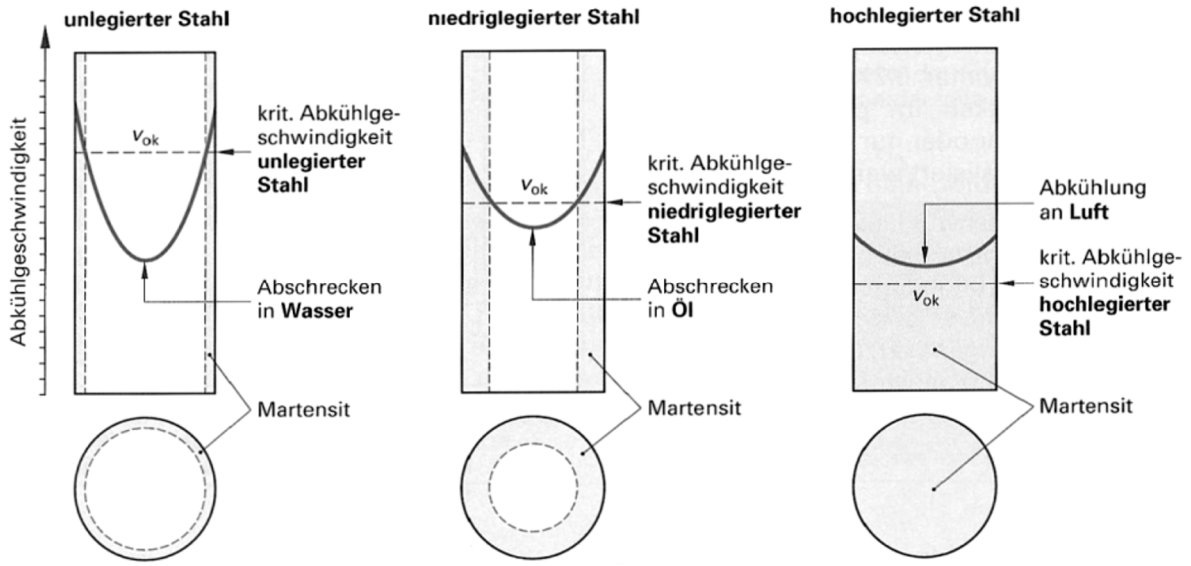



*Abb. 4-11 Einfluss der kritischen Abkühlgeschwindigkeit auf den härtbaren Querschnitt [21]*

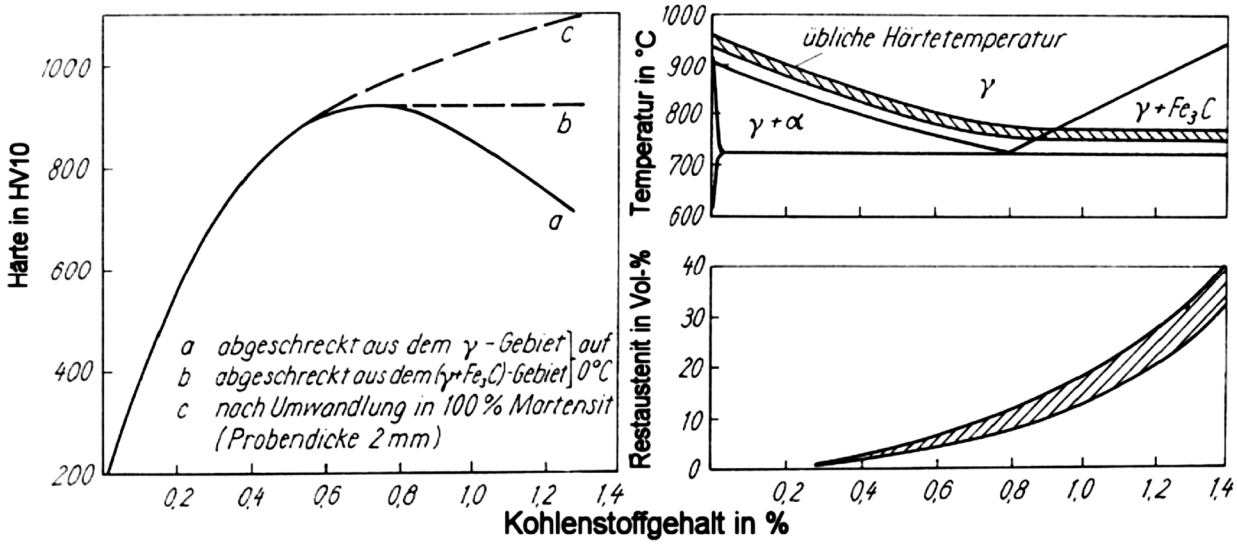



*Abb. 4-12 Martensithärte reiner Fe-C-Legierungen in Abhängigkeit vom C-Gehalt, Austenitisierungs- und Abschrecktemperatur*

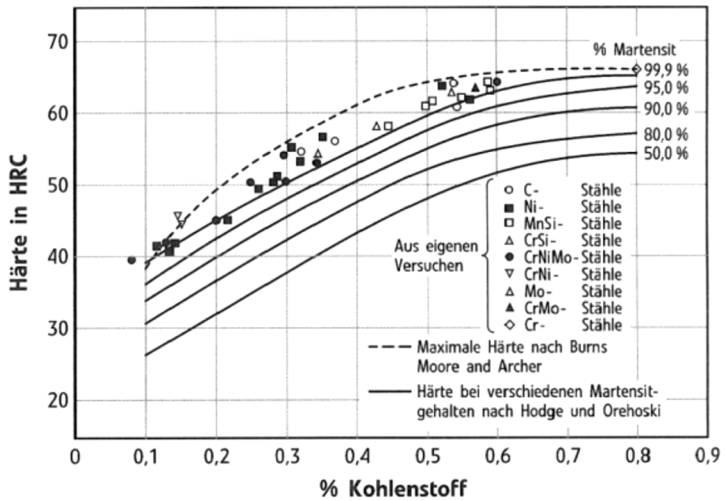
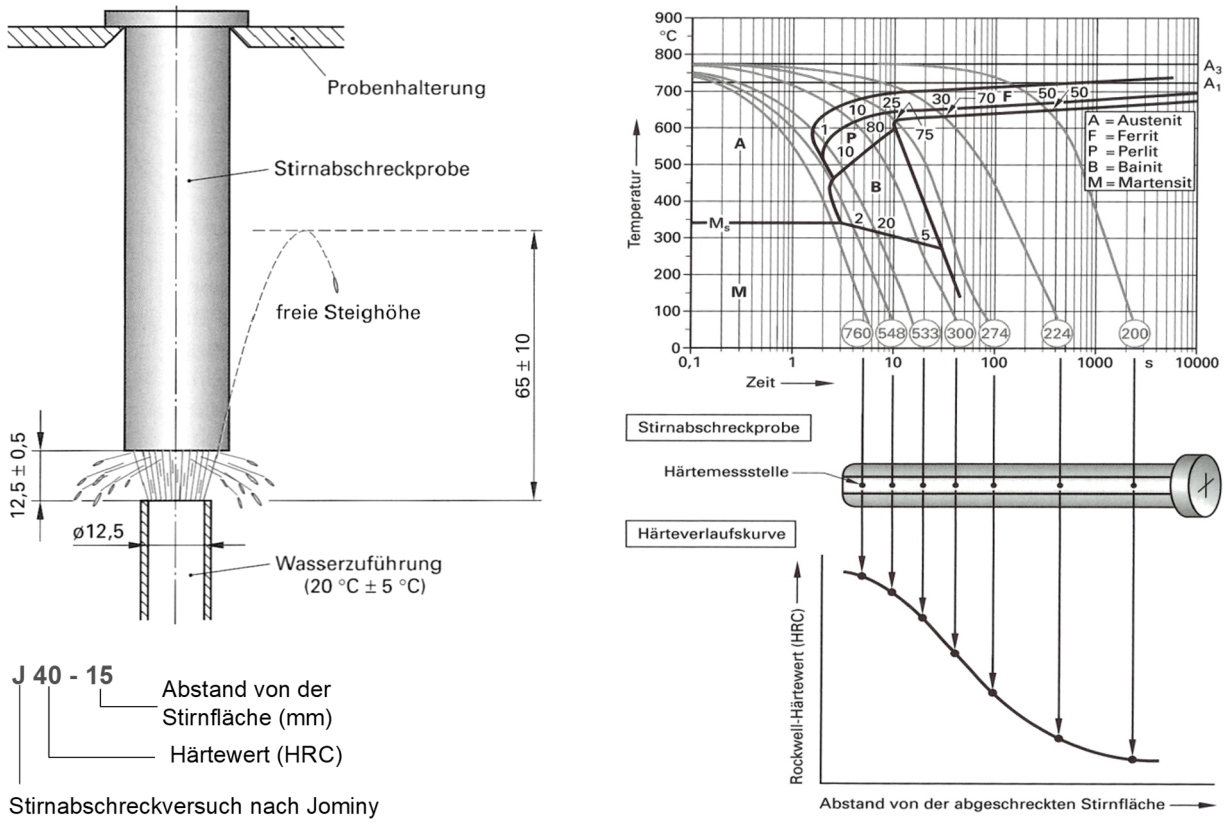



*Abb. 4-13 Einfluss des C-Gehaltes auf die Härte*

### 4.2.1.4 Stirnabschreckversuch

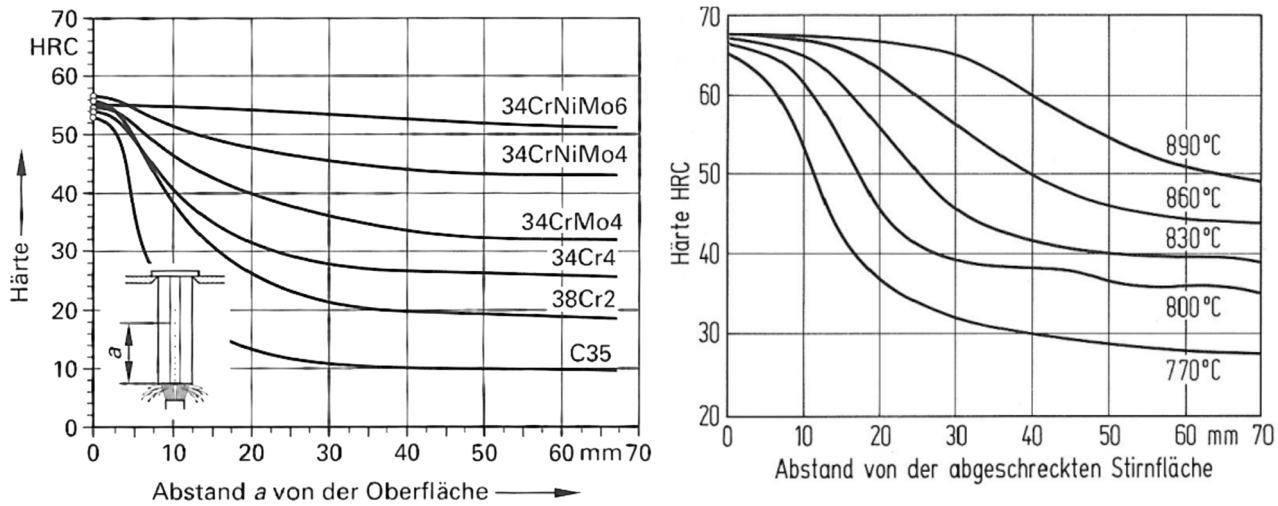
**► Härtbarkeit (DIN EN 10052)**

Fähigkeit eines (härtbaren) Stahles, nach Austenitisieren und Abschrecken in Martensit und/oder Bainit umzuwandeln (und um dadurch bestimmte Härtewerte anzunehmen). Sie beinhaltet sowohl die Aufhärtbarkeit (höchste erreichbare Härte), als auch Einhärtbarkeit (größte Einhärtungstiefe).




*a) Schema Stirnabschreckversuch* *b) kontinuierliches ZTU → äquivalente Aussage*

*Abb. 4-14 Stirnabschreckversuch (Jominy-Versuch, DIN EN ISO 642) [21]*




*a) Legierungselemente [21]* *b) Austenitisierungstemperatur [33]*

*Abb. 4-15 Einflussfaktoren auf die Einhärtbarkeit (Stirnabschreck-Härteverläufe)*

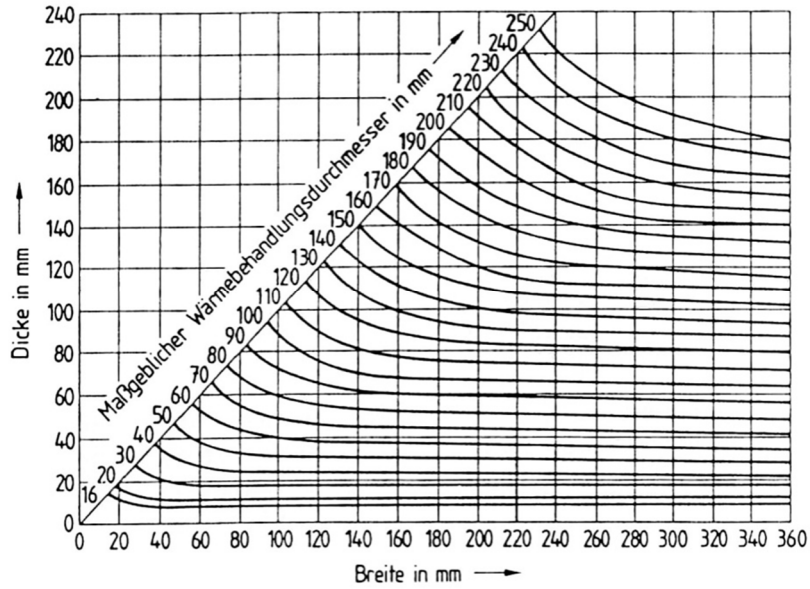



*Abb. 4-16 Bestimmung des maßgeblichen WBH-Durchmessers Bsp. Flachstahl (nach DIN 10083)*

### 4.2.2 Isothermisches Umwandeln (Bainitisieren)

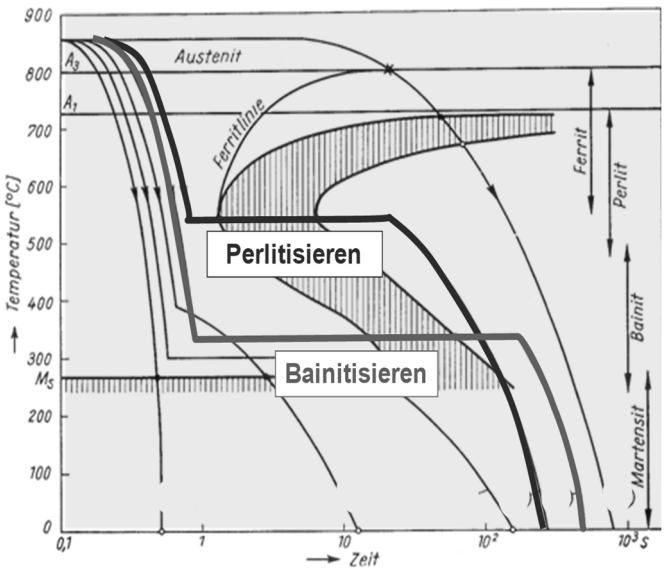
**► Perlitisieren (DIN EN 10052)**

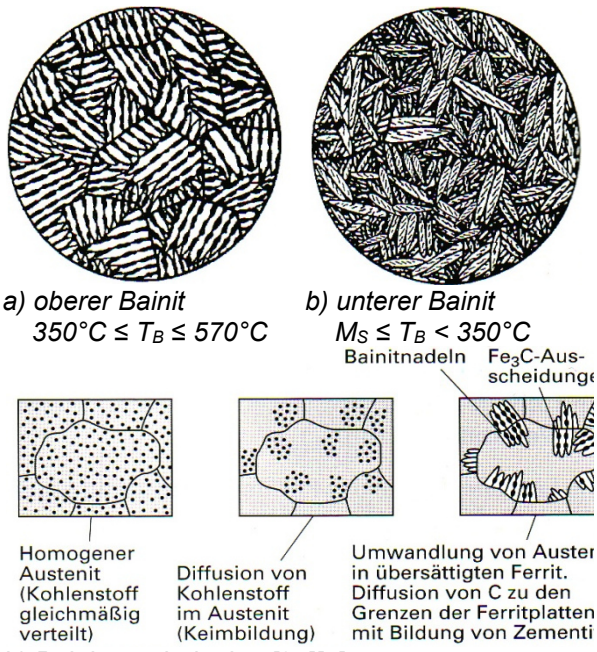
Glühen, bestehend aus Austenitisieren und anschließendem Abkühlen auf eine Temperatur in der Perlitstufe und Halten, so dass sich der Austenit vollständig in Ferrit/Perlit oder Zementit/Perlit umwandelt.

→ Patentieren: WBH von Draht oder Band für günstige Eigenschaften zum nachfolgenden Ziehen oder Ziehwalzen

**► Bainitisieren (DIN EN 10052)**

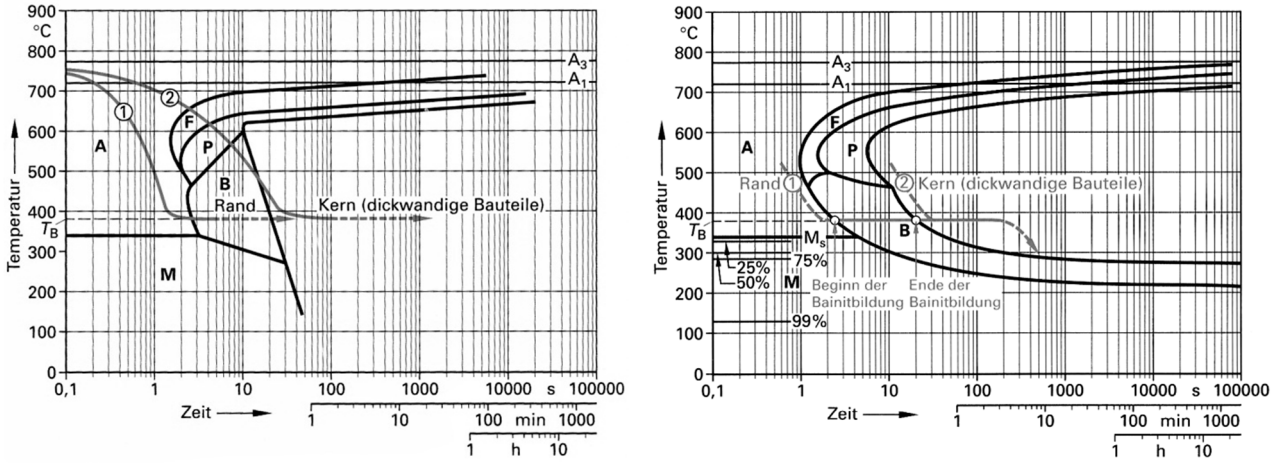
WBH, bestehend aus Austenitisieren und anschließendem gestuften Abschrecken auf eine Temperatur oberhalb Ms ($M_S < T_B < 500°C$) mit solcher Geschwindigkeit, dass jegliche Bildung von Ferrit oder Perlit vermieden wird, Halten auf dieser Temperatur, um den Austenit teilweise oder vollständig in Bainit umzuwandeln.




*a) Temperaturführung anhand eines ZTU-Schaubildes b) Bainitmorphologien [34][5]*

*Abb. 4-17 Bainitisieren*




*a) kontinuierliches ZTU ➔ Festlegung der Abkühlbedingungen*

*b) isothermes ZTA ➔ Festlegung der Bainitisiertemperatur, Haltezeit*

*Abb. 4-18 Festlegung optimaler Bedingungen zum Bainitisieren [21]*

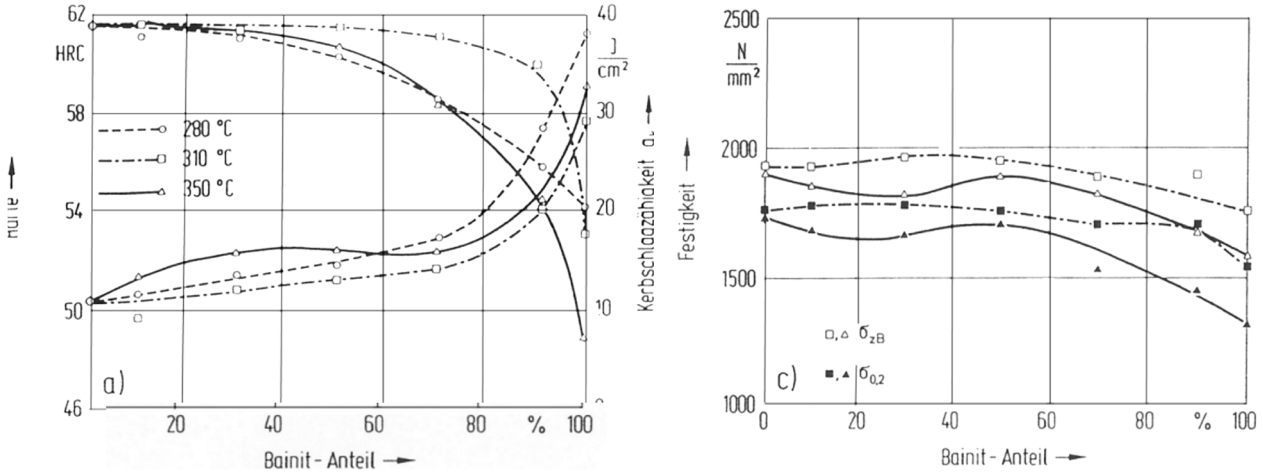



*Abb. 4-19 Einfluss des Bainitanteils (= $f(T_B)$) auf die mechanischen Eigenschaften (56NiCrMoV7-4)*

### 4.2.3 Tiefkühlen

**► Tiefkühlen (DIN EN 10052)**

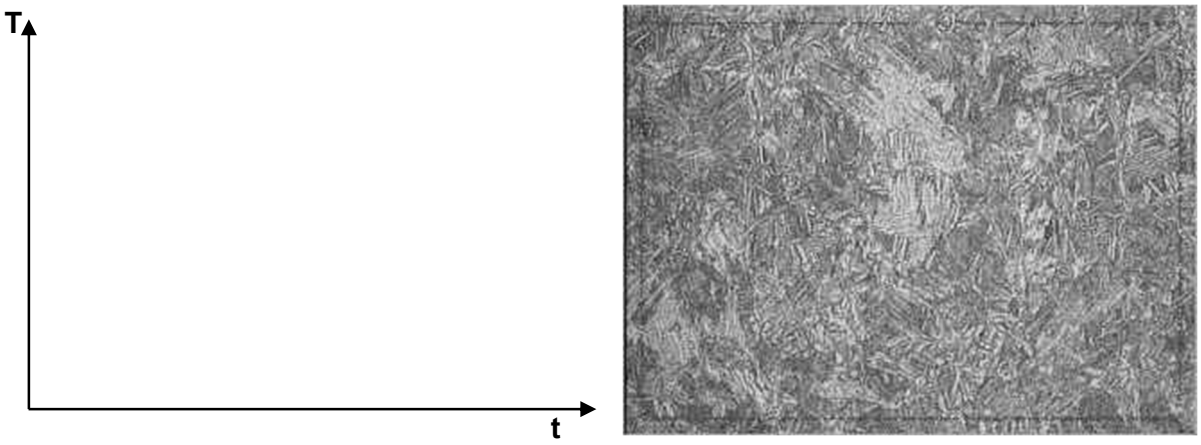
Behandlung, die nach dem Härten durchgeführt wird, um Restaustenit weitgehend in Martensit umzuwandeln. Sie besteht aus einem Abkühlen und Halten auf einer Temperatur unterhalb der Raumtemperatur.

→ wenn $M_f$ < RT z.B. 100Cr6 für Maßproben

### 4.2.4 Anlassen

**► Anlassen (DIN EN 10052)**

Wärmebehandlung, die im Allgemeinen nach einem Härten oder einer anderen Wärmebehandlung durchgeführt wird, um gewünschte Werte für bestimmte Eigenschaften zu erreichen.
Sie besteht aus ein- oder mehrmaligem Erwärmen auf vorgegebene Temperatur (< $A_{C1}$), Halten auf dieser Temperatur und anschließendem zweckentsprechenden Abkühlen.
Das Anlassen führt i.a. zu einer Verringerung der Härte, in bestimmten Fällen jedoch zu einer Härtesteigerung.



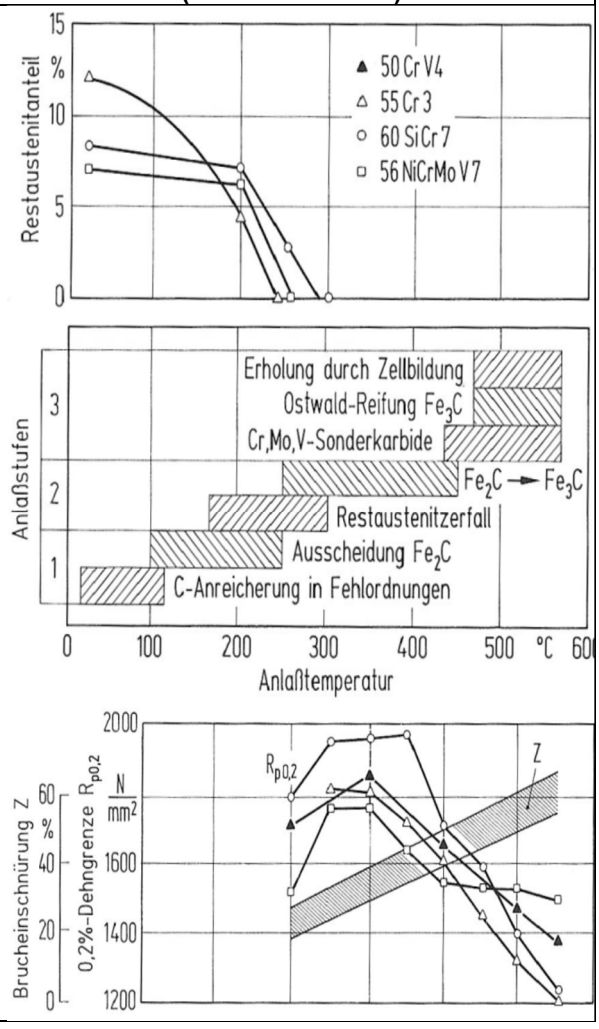

*a) T-t-Verlauf* *b) Gefüge*

*Abb. 4-20 Anlassen*

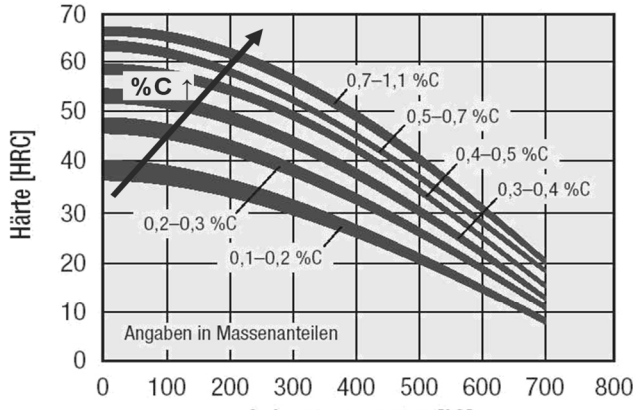
### 4.2.4.1 Anlassvorgang

*Tab. 4-1 Anlassstufen, Temperaturbereiche und Gefüge-/Eigenschaftsänderungen*

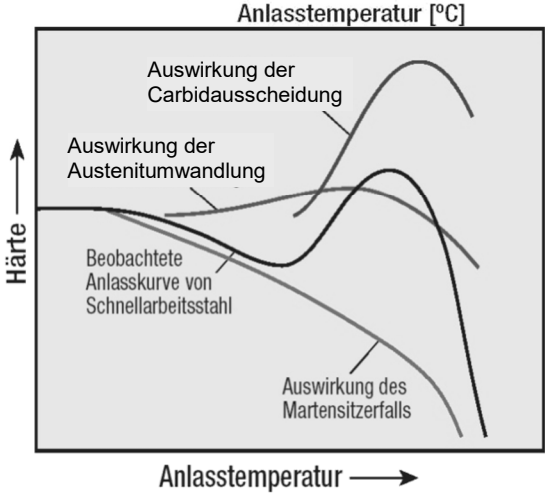
| Tempe-ratur | Gefüge / Werkstoffe | Anlassmechanismen und deren Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften (z.B. Federstähle) |
|---|---|---|
| **1. Anlassen bei niedrigen Temperaturen** | | |
| **Ziel:** | Verminderung der Sprödigkeit, Abbau innerer Spannungen<br>z.B.: Werkzeugstähle, legiert und unlegiert, einsatzgehärtete Bauteile | |
| **≤ 230°C** | Stabilisierung von Restaustenit | |
| **~ 250°C** | Ausscheidung von ε-Carbiden → Gitterverzerrung ↓, Härte ↓ (1. Anlassstufe) | |
| **2. Anlassen bei mittleren und hohen Temperaturen** | | |
| **Ziel:** | Einstellung eines bestimmten Festigkeits-Zähigkeitsniveaus<br>z.B. Federstähle | |
| **~ 260°C** | Umwandlung der ε-Carbide in Zementit, wenn $T_A$, $t_A$ ↑ Koagulation der Zementitausscheidungen | |
| **~ 230-280°C** | Beeinflussung Restaustenit → bei Abkühlung auf RT teilweiser Zerfall<br>→ un- und niedrig legierte Werkzeugstähle | |
| **> 450°C** | Entstehung von Sondercarbiden, Änderung chemische Zusammensetzung vorhandener Karbide → höher legierte Stähle mit Carbidbildnern (Cr, W, Mo, V) | |
| **3. Anlassen bei hohen Temperaturen** | | |
| **Ziel:** | Verbesserung der Verschleißbeständigkeit und Warmfestigkeit (Ausscheidungshärtung), Einstellung eines bestimmten Festigkeits- Zähigkeitsniveaus<br>z.B. Vergütungsstähle, hochlegierte Kalt- und Warmarbeitsstähle (CrMoV-Sorten), Schnellarbeitsstähle, Wälzlagerstähle (warmharte Sorten) | |
| **> 500°C** | Beginn des Restaustenit-Zerfalls | |



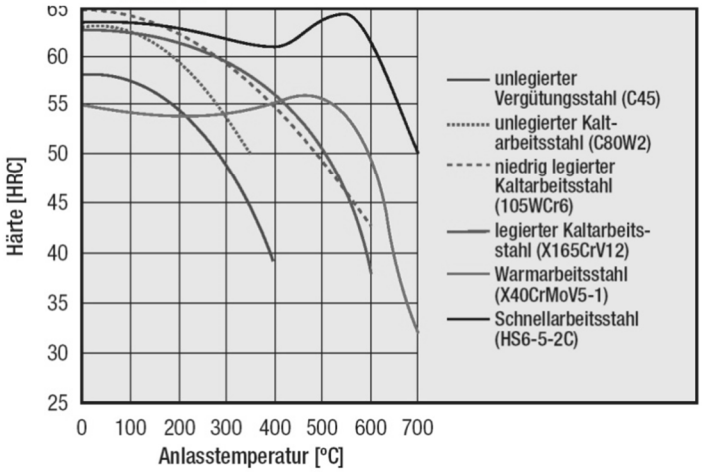
### 4.2.4.2 Anlassverhalten der Stähle




*a) Anlassverhalten von un- und niedrig legierten Stählen*




*b) Sekundärhärtemaximum*




*c) Anlassverhaltens von un- und hochlegierten Stählen*

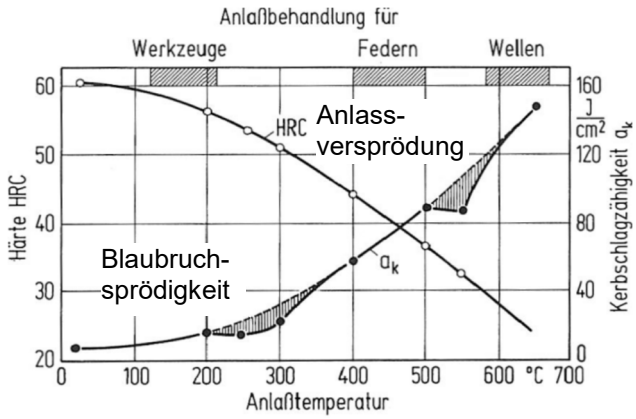
*Abb. 4-21 Härte = f(Anlasstemperatur, %C, %LE)*

### 4.2.4.3 Anlassversprödung und Eigenspannungen

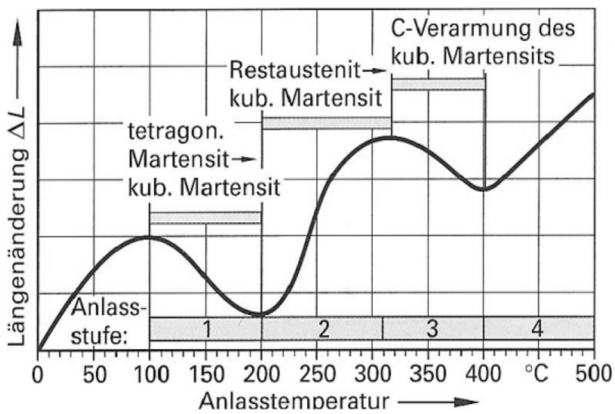
**► Anlasssprödigkeit (DIN EN 10052)**

Sprödigkeit, die beim Anlassen von bestimmten gehärteten und angelassenen Stählen in bestimmten Temperaturbereichen, während des Haltens oder des langsamen Abkühlens durch diesen Temperaturbereich auftreten kann. Es wird unterschieden zwischen:

- Anlasssprödigkeit, irreversibel: Versprödung, die durch Halten oder ähnlichen T-t-Folgen im Bereich von ca. 300°C bei bestimmten Stählen auftreten kann
- Anlasssprödigkeit, reversibel: Versprödung, die bei bestimmten Vergütungsstählen bei ca. 450 bis 550°C auftreten kann




*a) Härte und Kerbschlagzähigkeit = f($T_A$)*

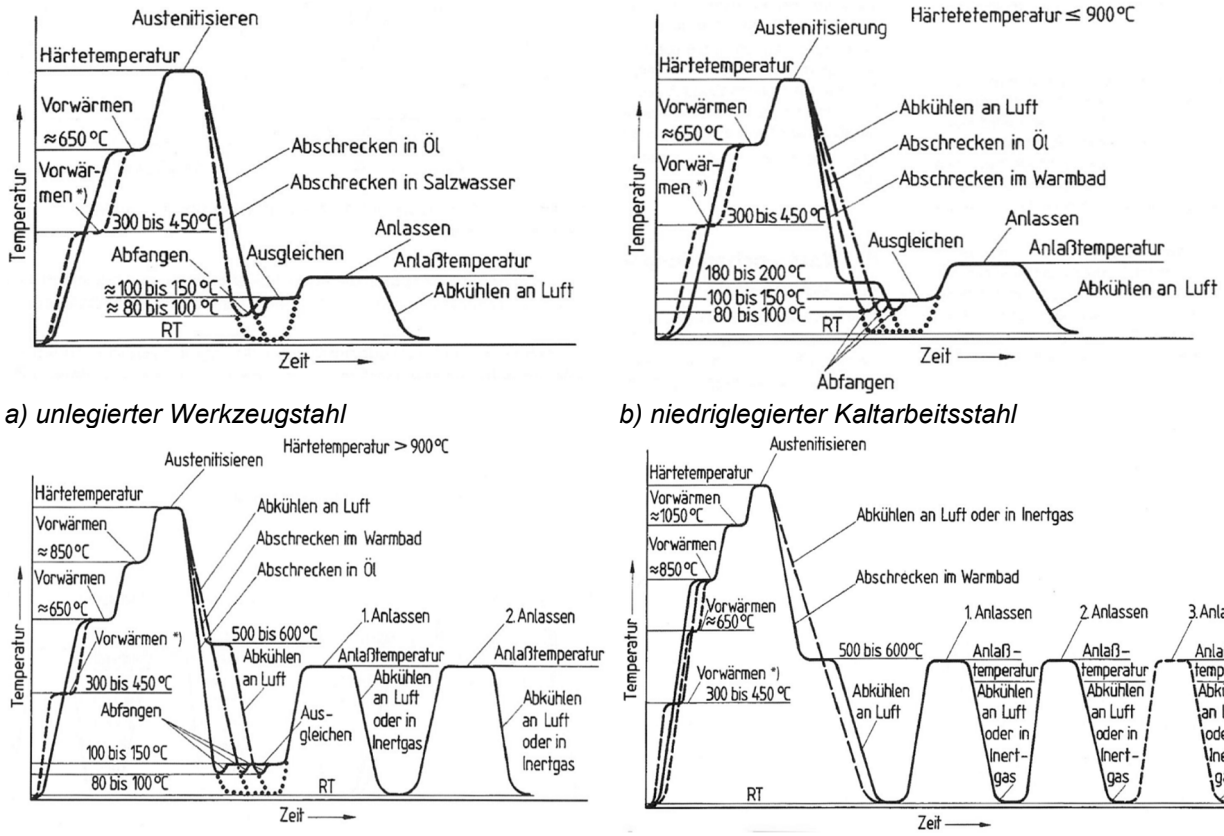



*b) Volumenänderung beim Anlassen*

*Abb. 4-22 Versprödung und Volumenänderung*

## 4.2.5 Härten und Anlassen

### 4.2.5.1 Temperatur-Zeit-Verläufe beim Härten und Anlassen

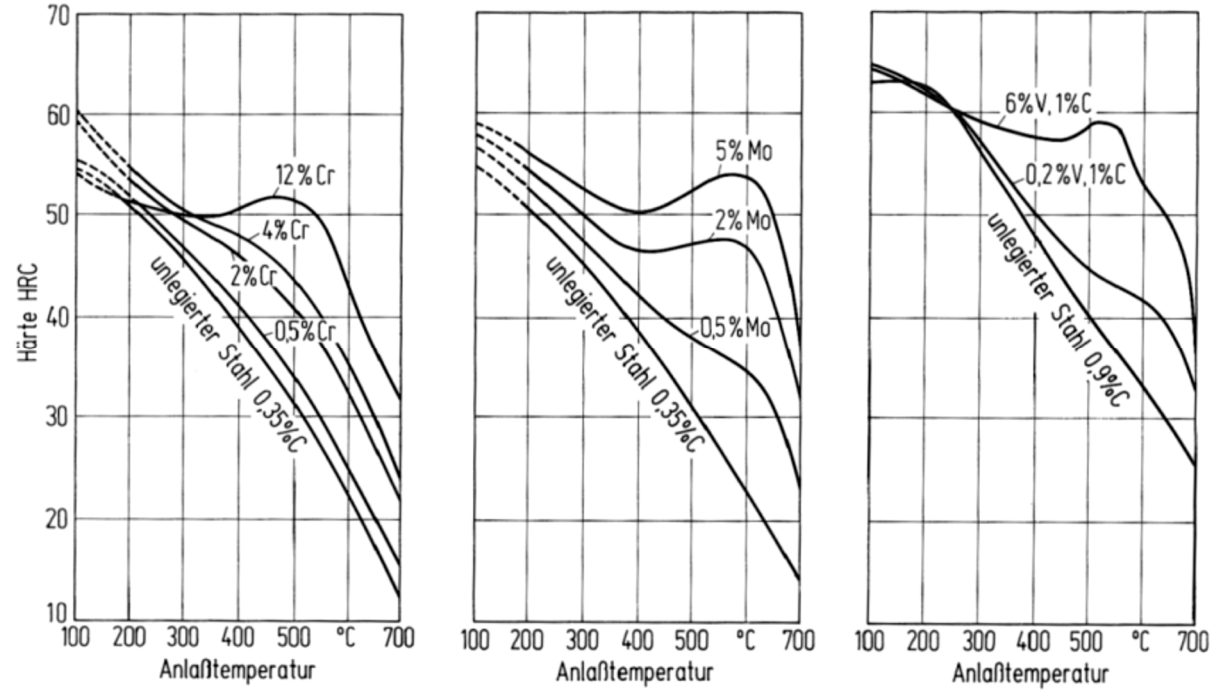



*a) unlegierter Werkzeugstahl* *b) niedriglegierter Kaltarbeitsstahl*

*c) hochlegierter Kalt- oder Warmarbeitsstahl* *d) Schnellarbeitsstahl*

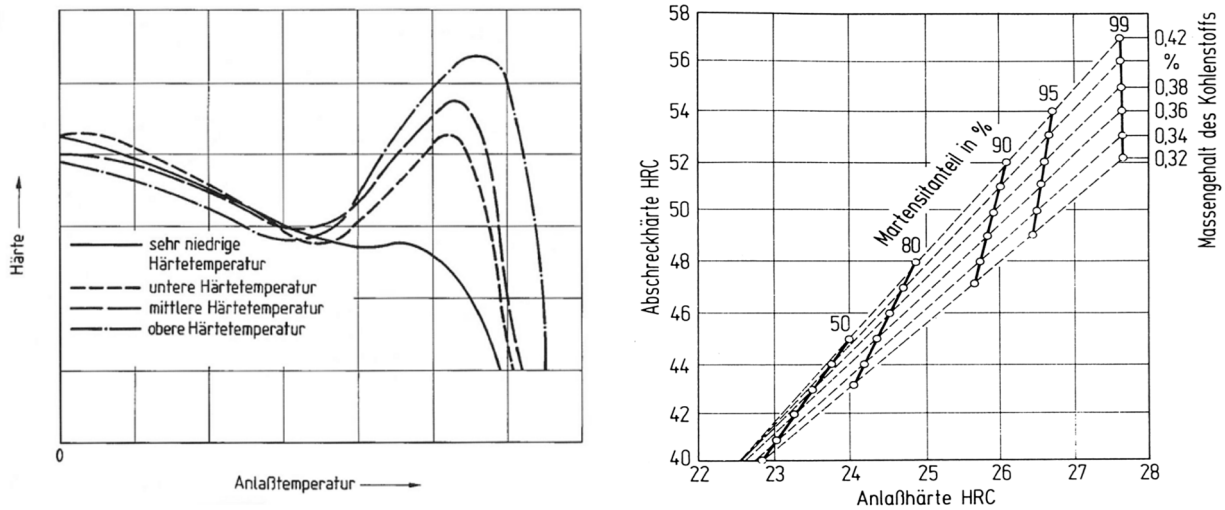
*Abb. 4-23 Temperatur-Zeit-Verläufe beim Härten und Anlassen verschiedener Stähle*

### 4.2.5.2 Gefüge/Eigenschaften nach Härten und Anlassen




*a) Cr bei Stählen mit 0,35 %C* *b) Mo bei Stählen mit 0,35 %C* *c) V bei Stählen mit ca. 1 %C*

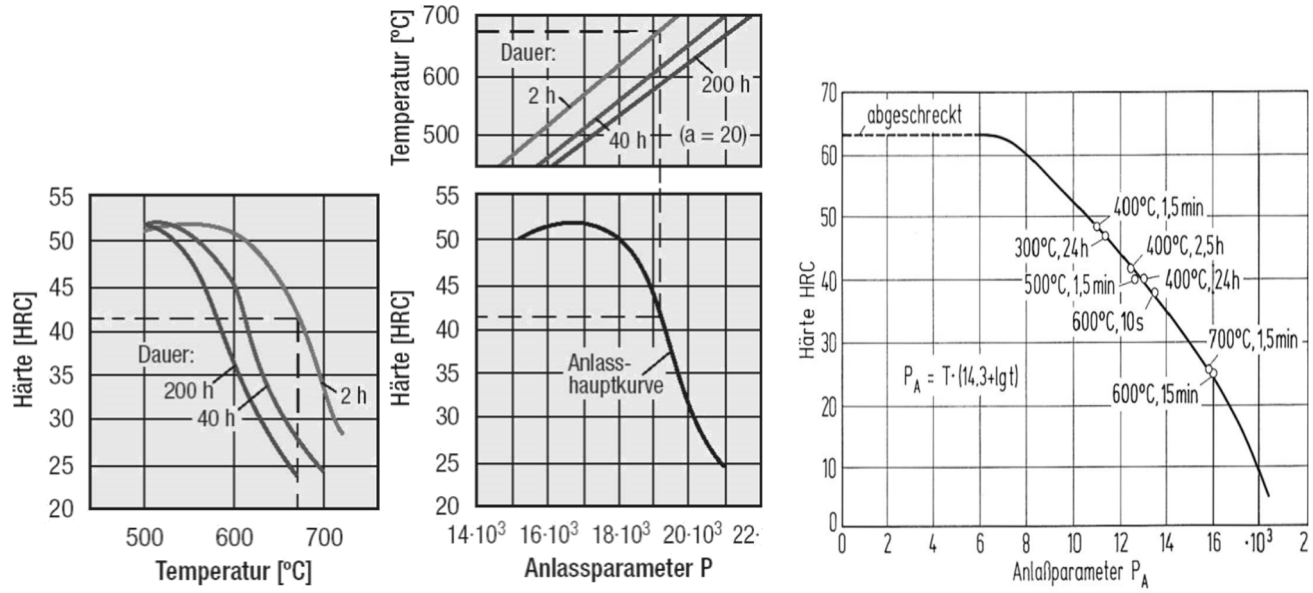
*Abb. 4-24 Einfluss verschiedener Sondercarbidbildnern auf das Anlassverhalten von Stählen*




*a) Einfluss der Härtetemperatur auf den Verlauf der Anlasskurve bei Schnellarbeitsstahl*

*b) Einfluss des C-Gehaltes und dem Martensitgehalt nach dem Härten auf die Anlasshärte*

*Abb. 4-25 Einfluss der Parameter beim Härten auf das Anlassergebnis*




*a) Warmarbeitsstahls*

*b) unlegierter Stahl mit 0,56 %C*

*Abb. 4-26 Konstruktion einer Anlasshauptkurve =f(T, t)*

## 4.2.6 Vergüten

**► Vergüten (DIN EN 10052)**

Härten + Anlassen bei höheren Temperaturen (500°C < T < $A_{c1}$), um die gewünschte Kombination der mechanischen Eigenschaften, insbesondere hohe Zähigkeit und Duktilität, zu erreichen.

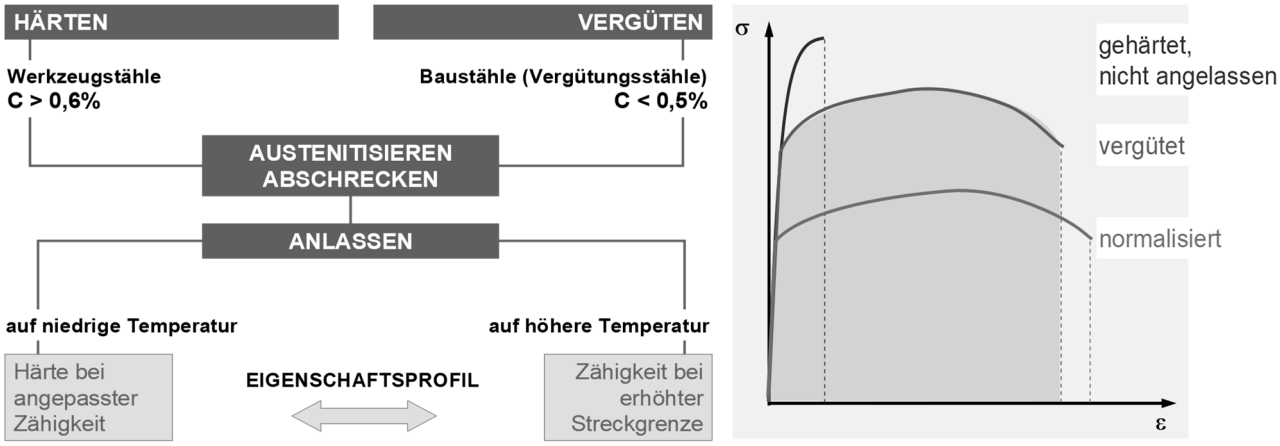
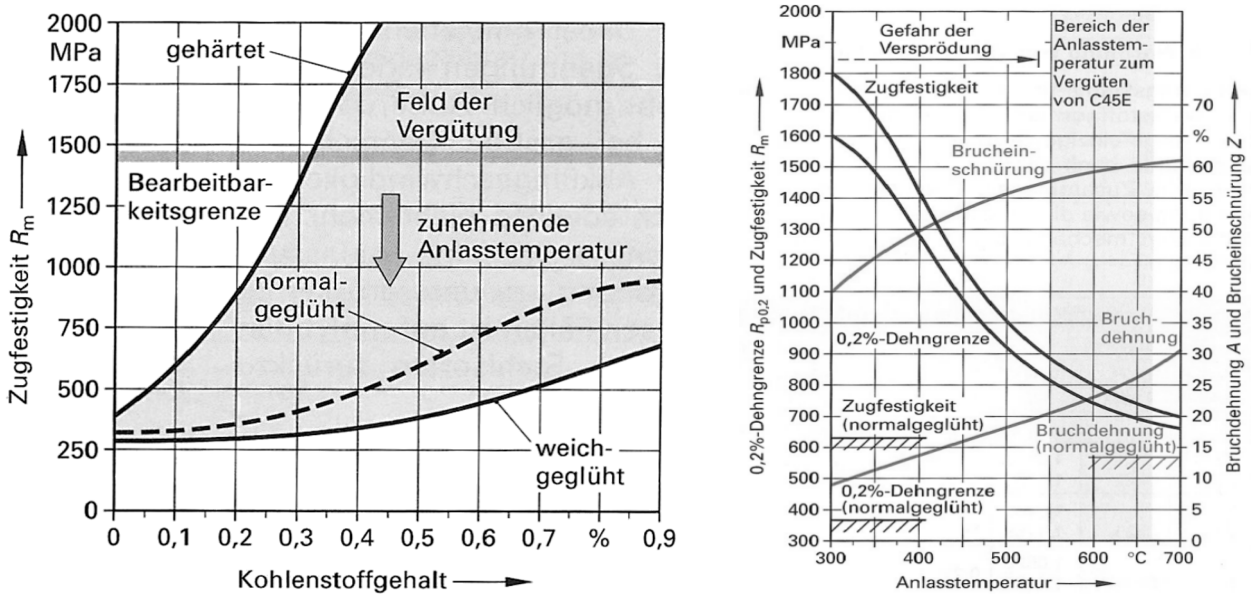



*Abb. 4-27 Unterschied zwischen Härten + Anlassen und dem Vergüten [4]*




*a) Festigkeit = f(%C)* *b) Vergütungsschaubild C45 [21]*

*Abb. 4-28 Variation der Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften in weiten Grenzen beim Vergüten*

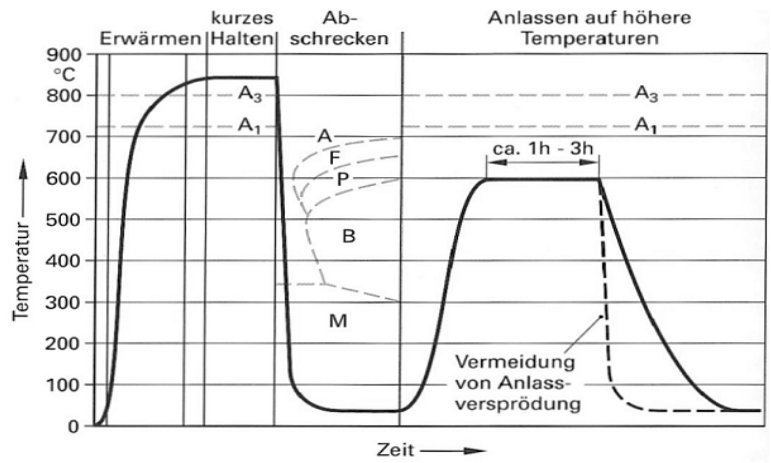
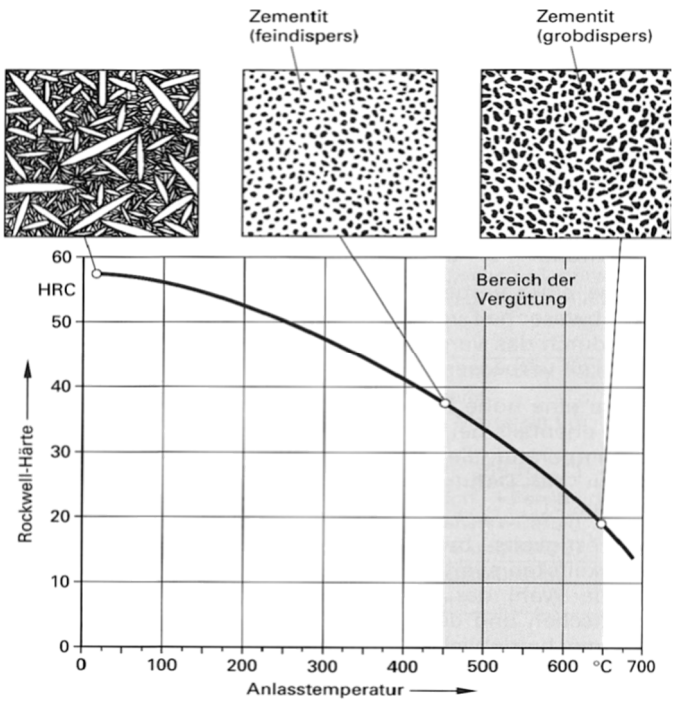
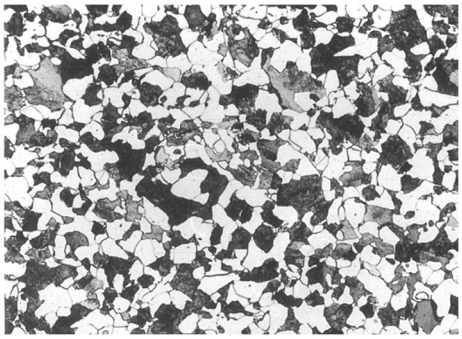


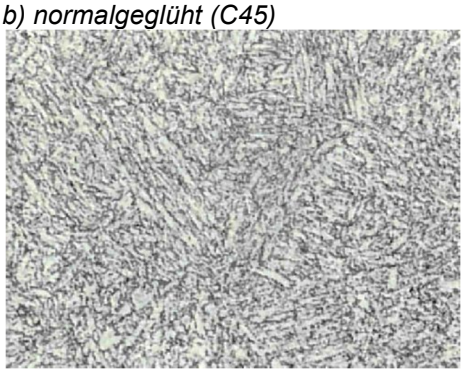

*Abb. 4-29 Zeit-Temperatur-Verlauf beim Vergüten*




a) Metallkundliche Vorgänge beim Vergüten

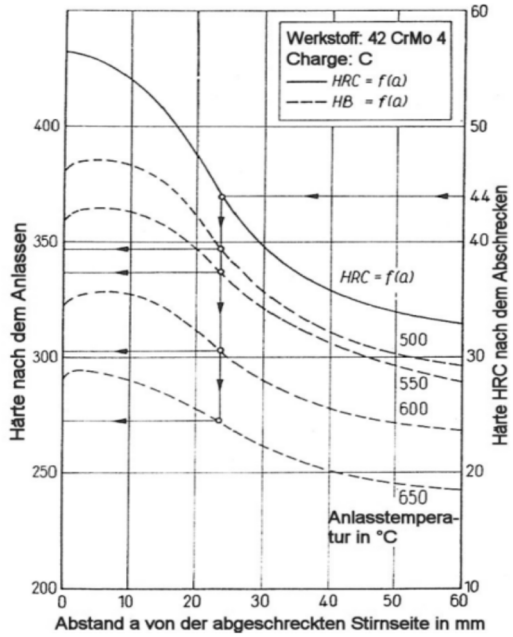


b) normalgeglüht (C45)

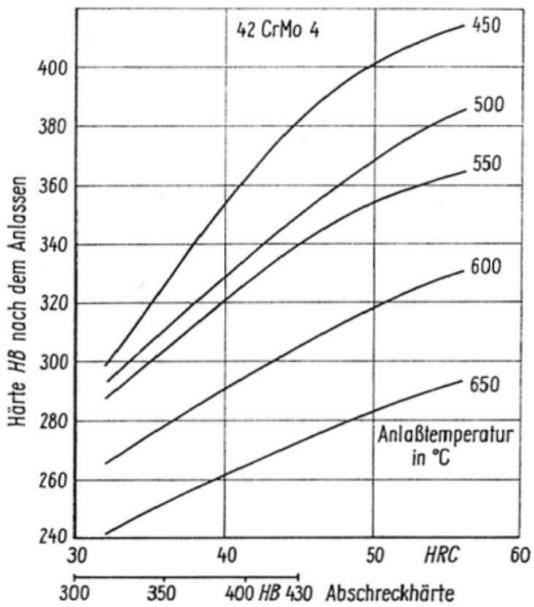


c) vergütet (900°C/Wasser + 600°C 1h) (C45)

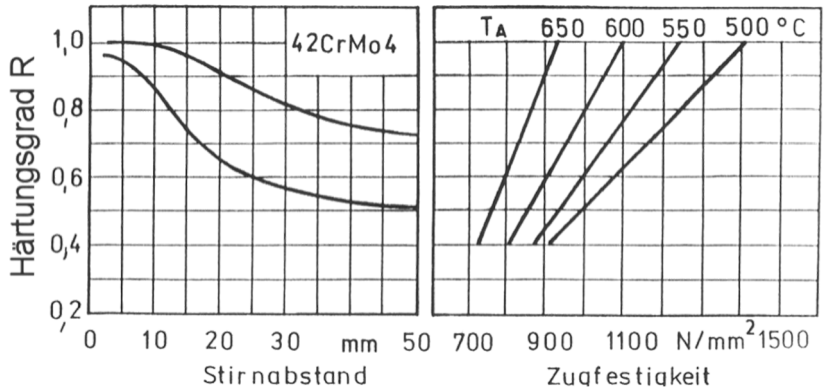
*Abb. 4-30 Gefügeveränderungen beim Vergüten*




a) Konstruktion

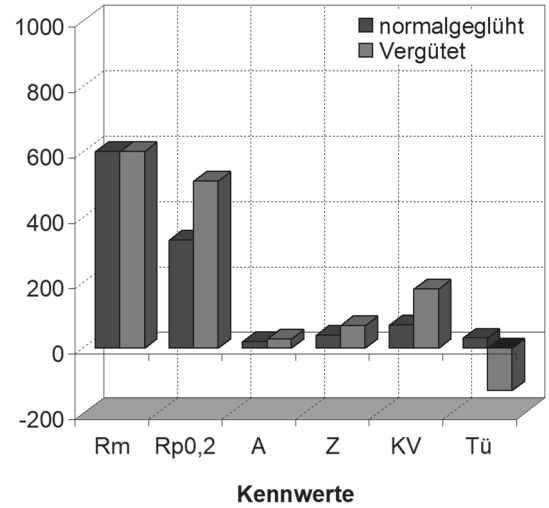


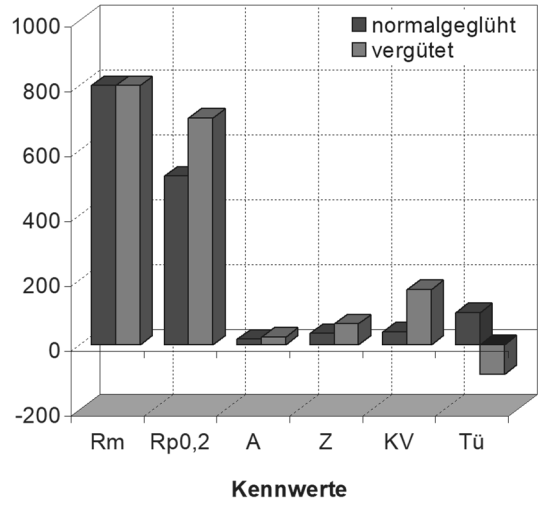

b) Vergütungsschaubild Härte = $f(T_A)$




c) Vergütungsschaubild
$R_m = f(T_A)$

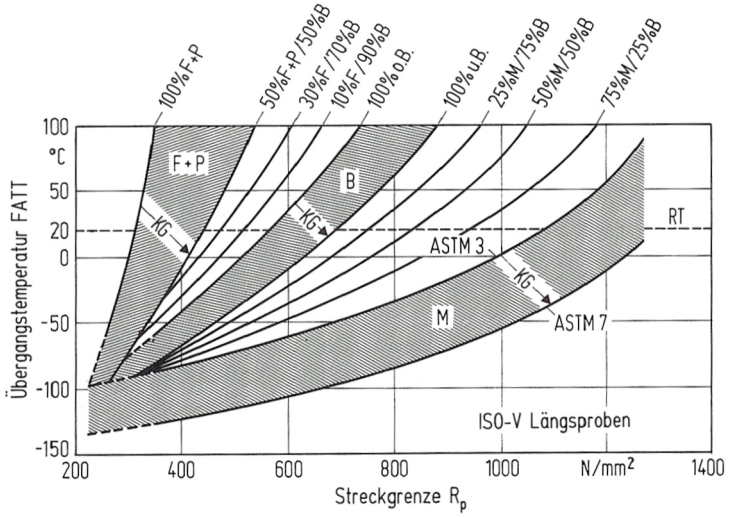
*Abb. 4-31 Ermittlung von abmessungsunabhängigen Vergütungsschaubildern*

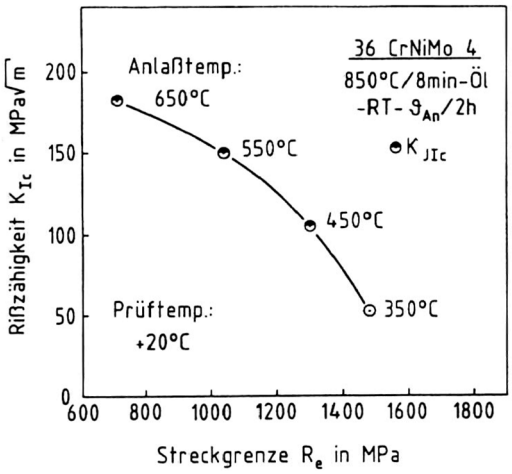


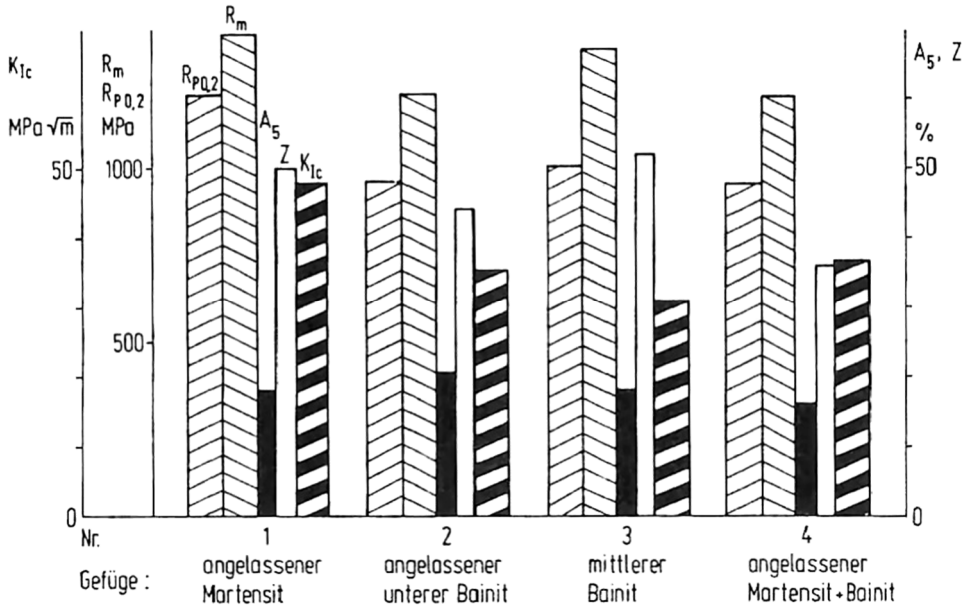

*a) Normalgeglüht: Ferrit/Perlit KG:ASTM 7* *b) Vergütet: angelassener Martensit KG: ASTM 7*

*Abb. 4-32 Mechanische Kennwerte von normalgeglühten und vergüteten C-Stählen (0,3-0,4%C)*




*a) Kaltzähigkeit (M …angelassener Martensit)* *b) Einfluss der Anlasstemperatur auf den Zusammenhang zwischen $K_{IC}$ und $R_e$*




*c) Einfluss des Gefüges auf die bruchmechanischen Kennwerte (Bsp. 50CrV4; $T_{Prüf}$ = -100°C)*

*Abb. 4-33 Einflussfaktoren auf die Eigenschaften nach dem Vergüten*

### 4.2.7 Aushärten

**► Aushärten (DIN EN 10052)**

Wärmebehandlung bestehend aus Lösungsbehandeln und Auslagern

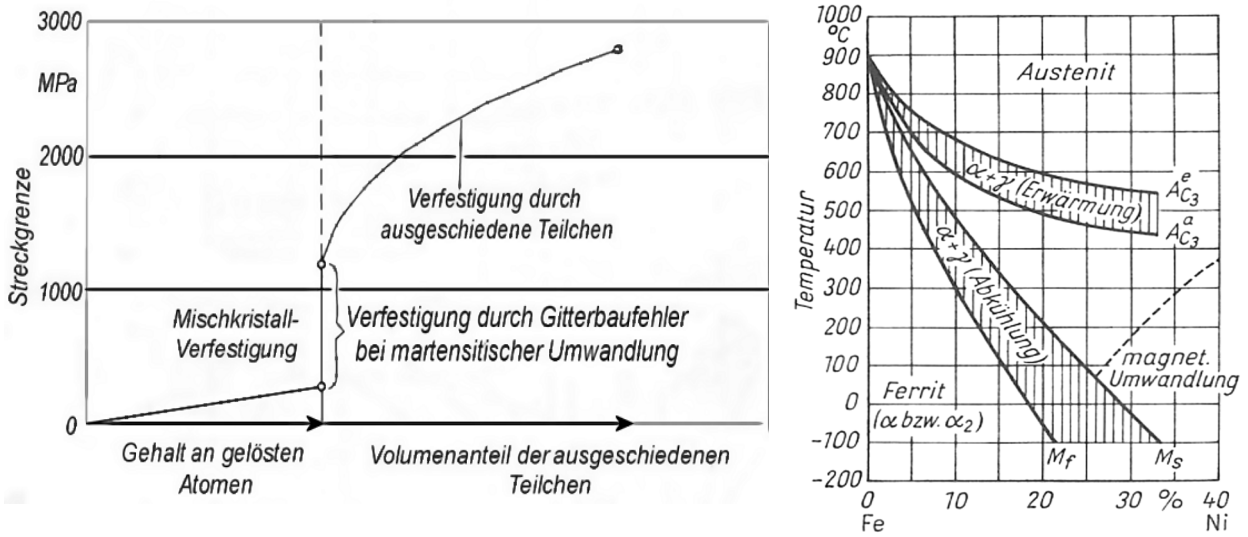
**► Aushärtung (DIN EN 10052)**

Härtesteigerung eines Eisenwerkstoffes durch Ausscheidung einer oder mehrerer Phasen aus einer übersättigten festen Lösung.

**► Martensitaushärten (DIN EN 10052)**

Aushärten von (bestimmten legierten) Stählen, bei dem das Lösungsbehandeln zu einem weichen sehr kohlenstoffarmen Martensit führt und durch anschließendes Auslagern die gewünschten mechanischen Eigenschaften erreicht werden.

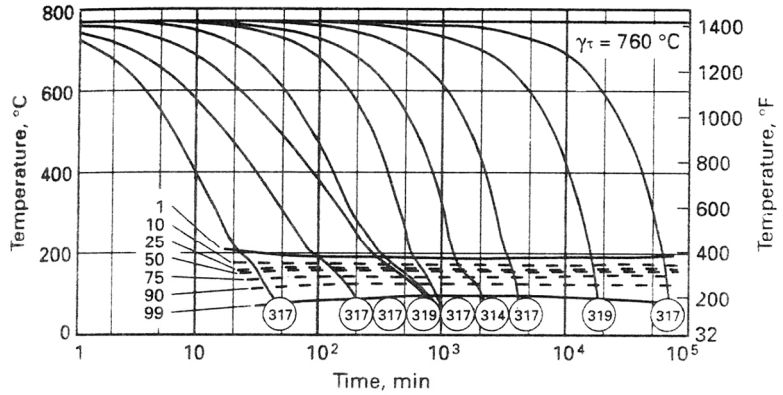
Aushärten = Ausscheidungshärten



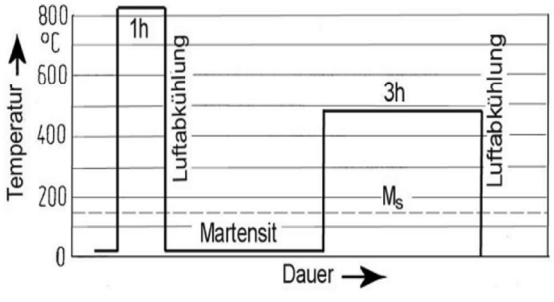

*a) Einfluss der Verfestigungsmechanismen auf Rp eines martensitaushärtenden Stahles.*

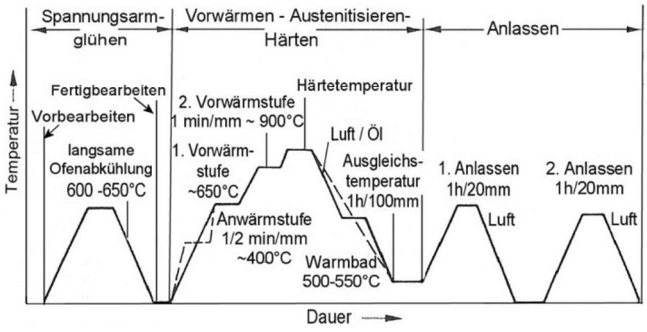
*b) System Fe-Ni*

*Abb. 4-34 Mechanismen und Voraussetzungen für das Aushärten*




*a) ZTU-Schaubild*




*b) NiCoMo-Stahl* *c) Warmarbeitsstahl*

*Abb. 4-35 Bedingungen zum Erwärmen und Abkühlen*

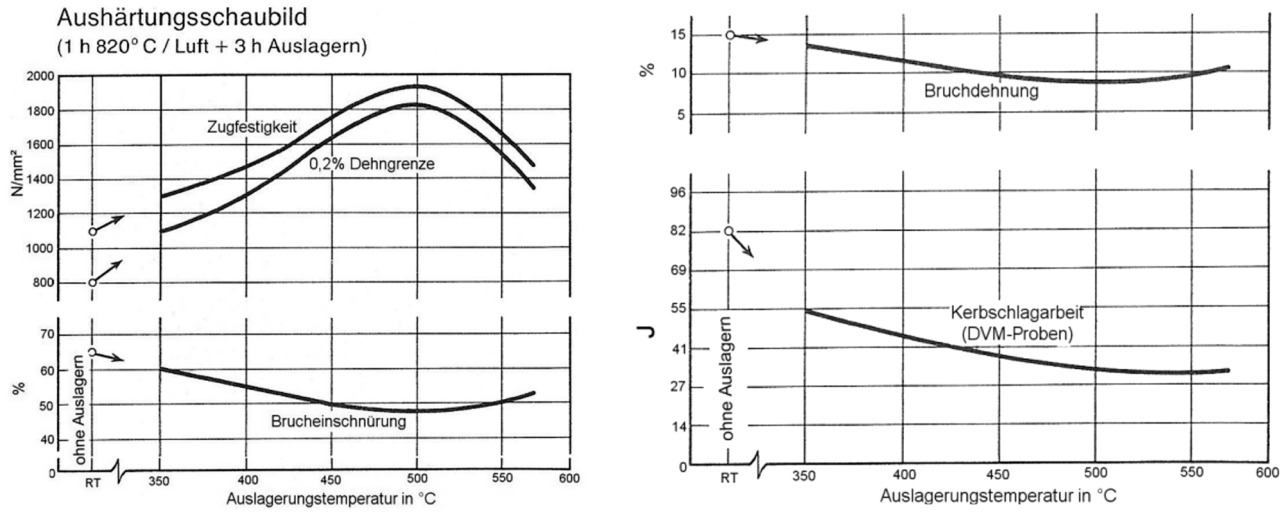
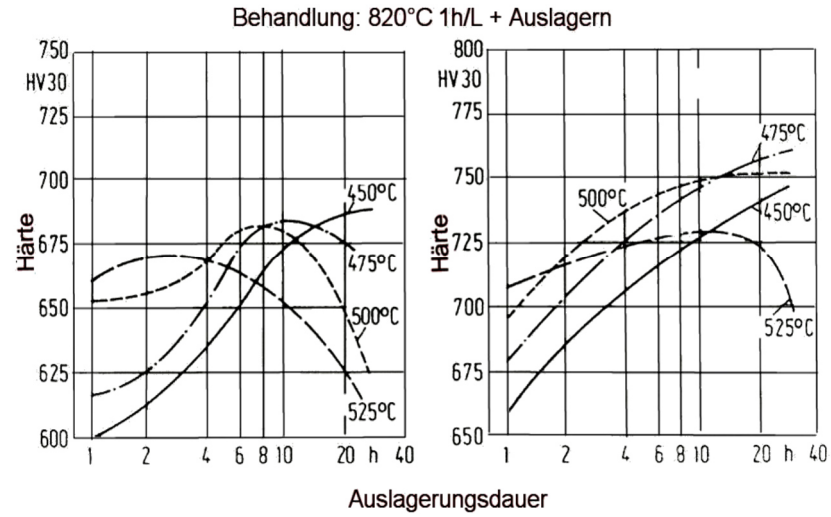



*Abb. 4-36 Aushärtungsschaubild: Eigenschaften = f(Auslagerungsbedingungen)*




*a) X2NiCoMoTi18-12-4 b) X2NiCoMo18-12-4*

*Abb. 4-37 Einfluss der Auslagerungsdauer bei unterschiedlichen Temperaturen auf die Härte*

## 4.3 Randschichttechnik

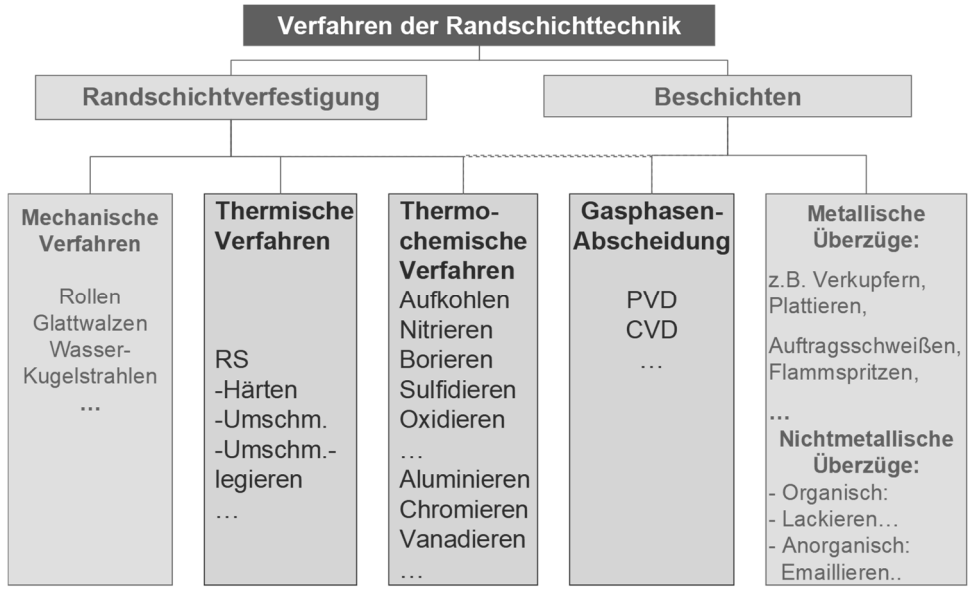
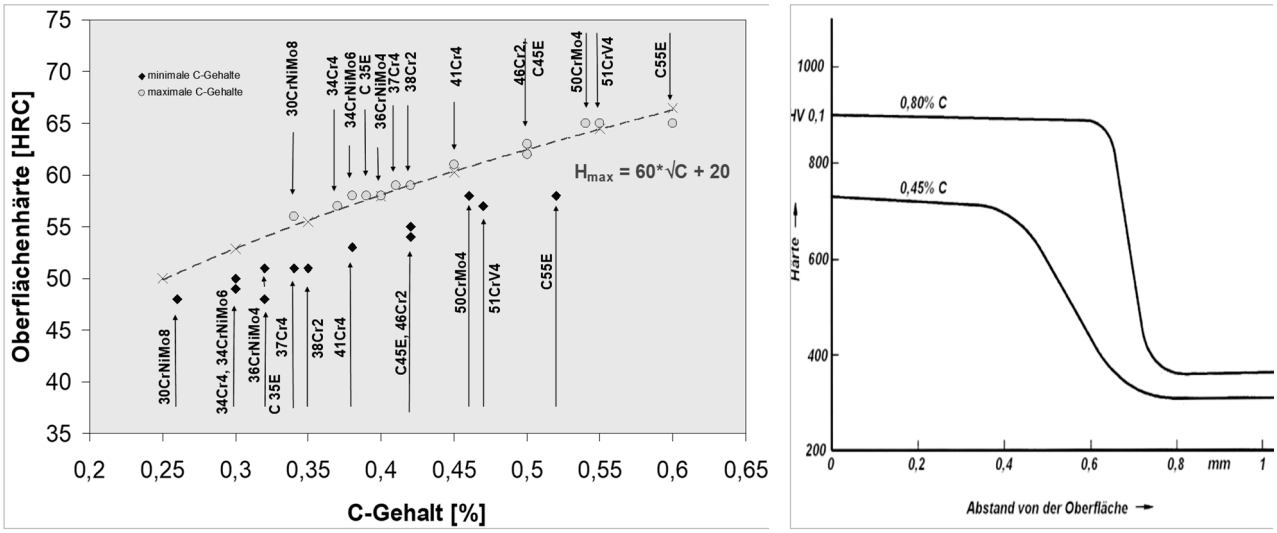



*Abb. 4-38 Schema der Verfahren der Randschichttechnik*

### 4.3.1 Randschichthärten

**► Randschichthärten (DIN EN 10052)**

Härten mit einem auf die Randschicht beschränktem Austenitisieren. Es ist zweckmäßig, den Begriff durch die Art des Wärmens zu kennzeichnen,
z.B. Flamm-, Induktions-, Elektronenstrahl- und Laserstrahlhärten.



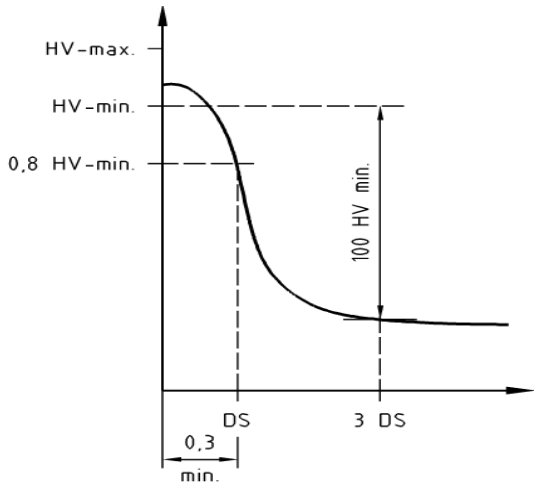

*a) Oberflächenhärte* *b) Härte-Tiefen-Verlauf*

*Abb. 4-39 erzielte Härtesteigerungen nach dem Randschichthärten = f(%C)*

*Tab. 4-2 Parametervergleich der Randschichthärteverfahren*

| Parameter | Flamme | Induktion | Laserstrahl | Elektronenstrahl |
|---|---|---|---|---|
| Leistungsdichte [W/cm²]<br>▪ maximal:<br>▪ normal: | <br>$6*10^3$<br>$10^3…6*10^3$ | <br>$1,5*10^4$<br>$10^3…10^4$ | <br>$10^9…10^{11}$<br>$10^3…10^4$ ($10^5$) | <br>$10^8…10^{11}$<br>$10^3…10^4$ ($10^5$) |
| Erwärmgeschw. [K/s]<br>▪ maximal<br>▪ normal | <br>$10^2$<br>$10^2$ | <br>$10^4$<br>$10…10^4$ | <br>$10^{10}$<br>$10^3…10^4$ ($10^5$) | <br>$10^9$ ($10^{10}$)<br>$10^3…10^4$ ($10^5$) |
| Haltedauer [s] | 5…600 | 0,5…30 | 0,01…10 | 0,01…10 |
| Abschrecken | Fremdabschreckung | | Selbstabschreckung | |
| Einwirktiefe [1)][mm] | - | 0,1…1 | $10^{-6}…10^{-4}$ | 0,01…0,05 |
| DS [mm] | 1,5…15 | 0,3…8 (20) [2)] | 0,01…2 | 0,01…2 |
| Wirkungsgrad [%] | 50…70 | 50…70 | 3…10 | 15...60 |
| Werkstückgröße | nahezu beliebig | = f(Anlagengröße) | nahezu beliebig | = f (Rezipientengröße) |

[1)] ohne Wärmeleitung [2)] je nach Frequenzbereich




| $H_O$ [HRC] | $H_O$ [HV] | $H_G$ [HV] |
|---|---|---|
| 43…45 | 425…455 | 350 |
| 46, 47 | 460…480 | 475 |
| 48…50 | 485…515 | 400 |
| 51, 52 | 520…545 | 425 |
| 53 | 550…575 | 450 |
| 54, 55 | 580…605 | 475 |
| 56, 57 | 610…635 | 500 |
| 58 | 640…665 | 525 |
| 59, 60 | 670…705 | 550 |
| 61 | 710…730 | 575 |
| 62 | 735…765 | 600 |
| 63 | 770…795 | 625 |
| 64, 65 | 800…835 | 650 |
| 66 | 840…865 | 675 |

*Abb. 4-40 Bestimmung der Einhärtungstiefe nach DIN 10328 ($H_O$…Oberflächenhärte; $H_G$…Grenzhärte)*

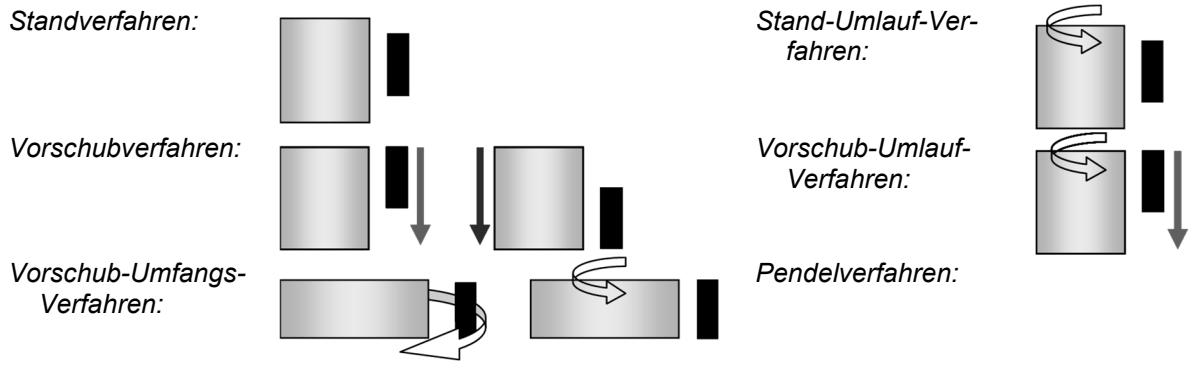
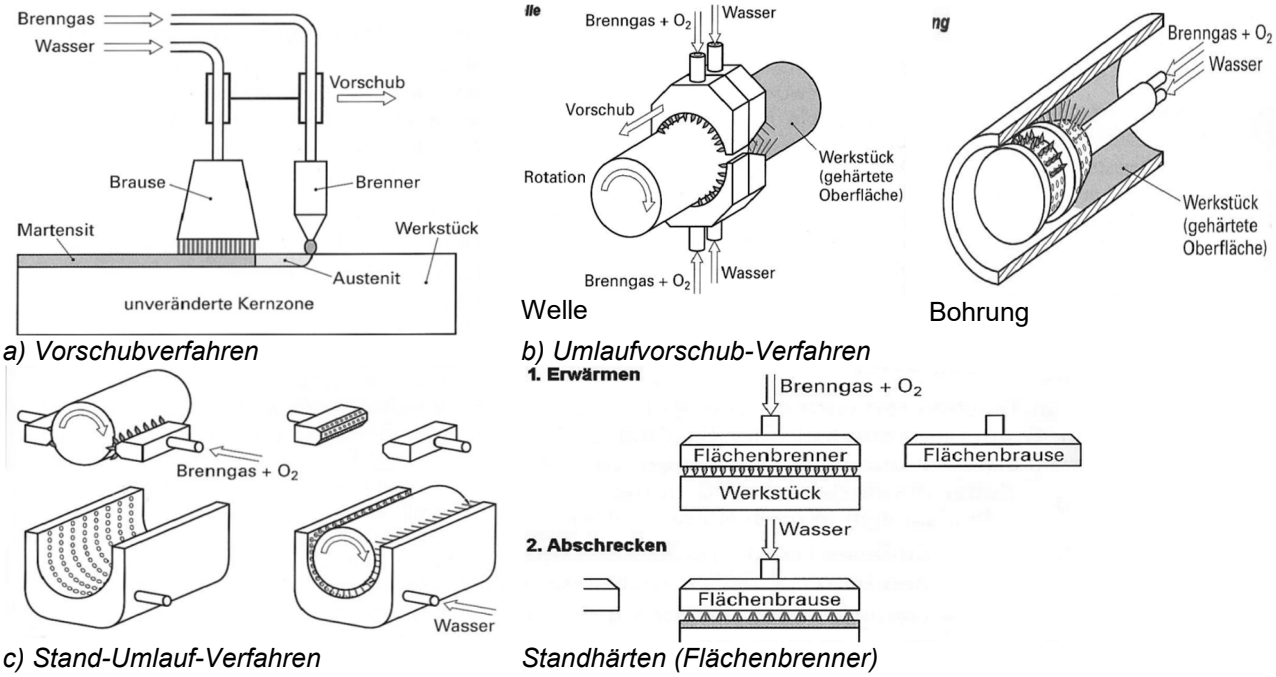



*Abb. 4-41 Verfahrensvarianten für das Randschichthärten*

### 4.3.1.1 Flammhärten




*a) Vorschubverfahren* *b) Umlaufvorschub-Verfahren*

*c) Stand-Umlauf-Verfahren* *Standhärten (Flächenbrenner)*

*Abb. 4-42 Verfahrensvarianten Flammhärten*

### 4.3.1.2 Induktionshärten

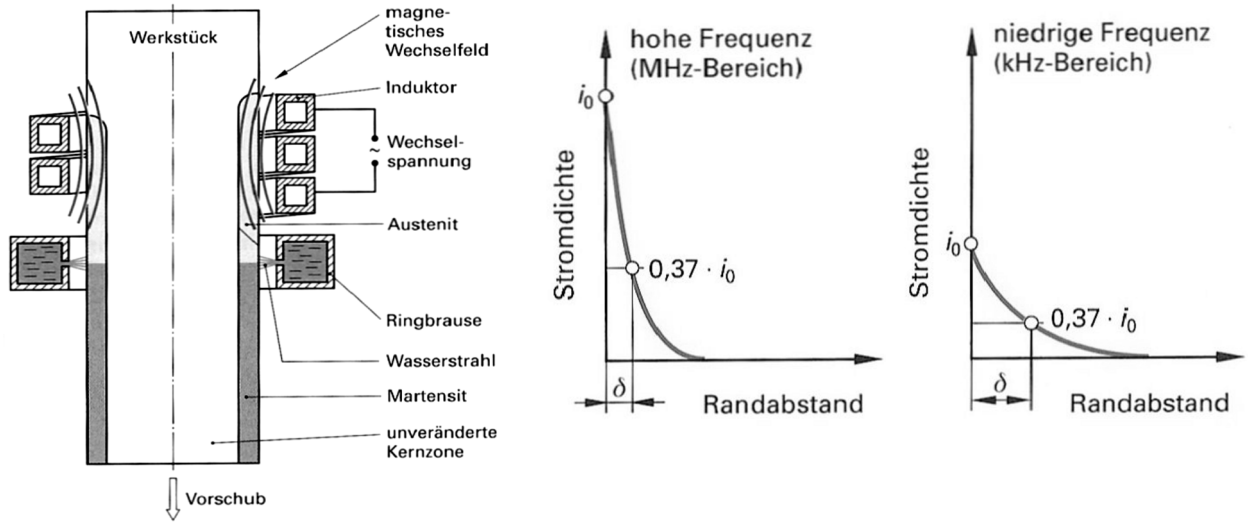



*Abb. 4-43 Prinzip des Induktionshärtens*

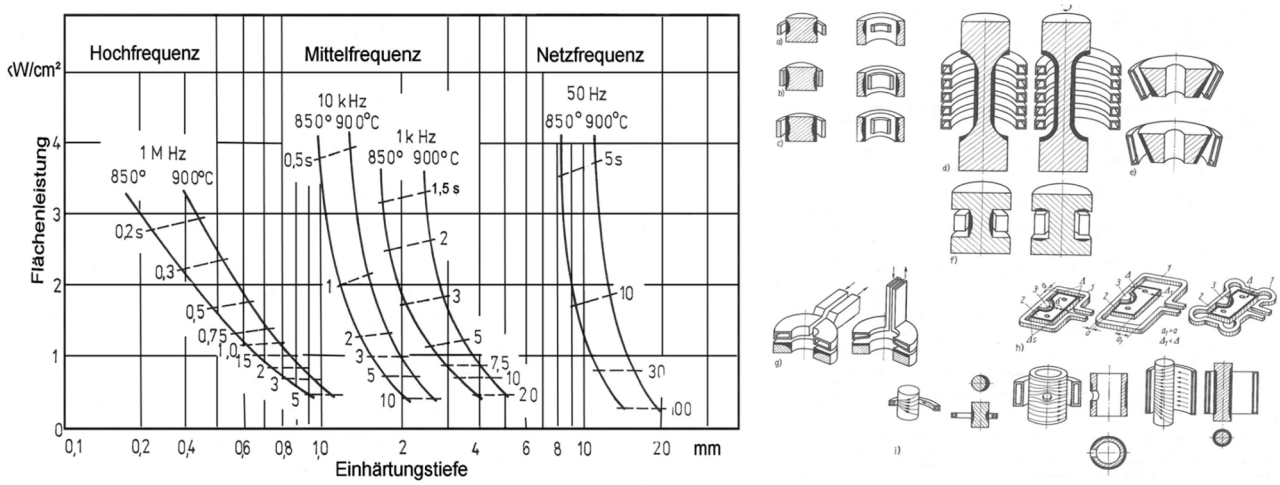
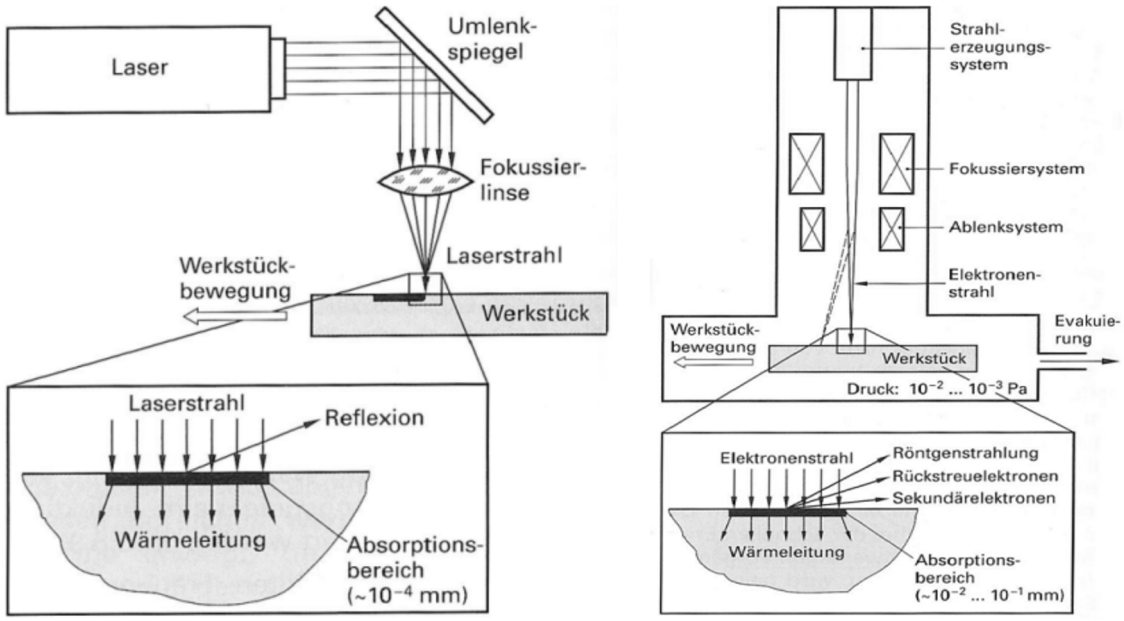



*Abb. 4-44 Einfluss von Frequenz, Leistung und Aufheizdauer auf die Einhärtungstiefe beim Induktionshärten*

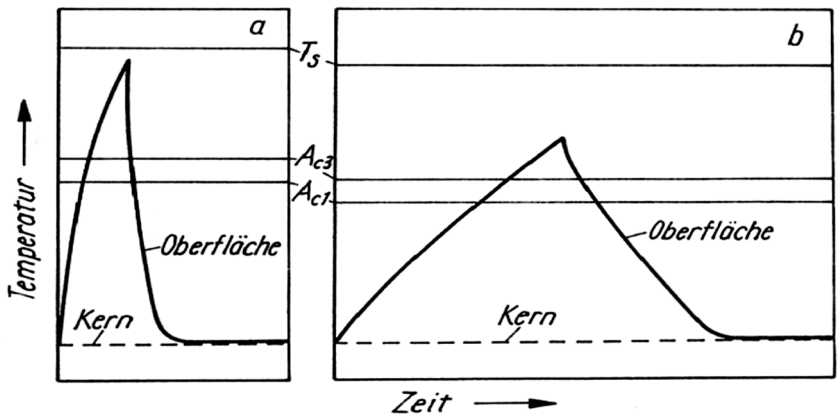
### 4.3.1.3 Strahlhärten




*a) Laserstrahl* *b) Elektronenstrahl*

*Abb. 4-45 Prinzip der Strahlerzeugung und -führung und des Energieeintrags im Werkstoff*

### 4.3.1.4 Verfahrensvergleich




*a) Laser, Elektronenstrahl* *b) Flamme, Induktion*

*Abb. 4-46 typischer Temperatur-Zeit-Verlauf beim Randschichthärten*

*Tab. 4-3 typische Prozessparameter beim Randschichthärten*

| WBH-Schritte | *Laser, Elektronenstrahl* | *Flamme* | *Induktion* |
|---|---|---|---|
| Erwärmen | $T_A = T_s$ - 250 K | $T_A = A_{c3}$ + 100 K | $T_A = A_{c3}$ + 30…150 K |
| Halten | $t_H$ = 0,01…10 s | $t_H$ = 5…600 s | $t_H$ = 0,5…30 s |
| Abschrecken | Wärmeleitung ins Bauteil | Wasserbrause, Bad | |
| Anlassen | nicht erforderlich | 150…200 °C/1h | |

### 4.3.2 Thermochemische Verfahren

**► thermochemische Behandlung (DIN EN 10052)**

Wärmebehandlung in einem geeigneten Mittel, um eine Änderung der chemischen Zusammensetzung des Grundwerkstoffes durch Stoffaustausch mit dem Mittel zu erreichen.
► Diffusion: Anreichern von Metallen und/oder Nichtmetallen durch Diffusion in der Randschicht
► Effusion: Entfernen von Metallen und/oder Nichtmetallen durch Diffusion in der Randschicht

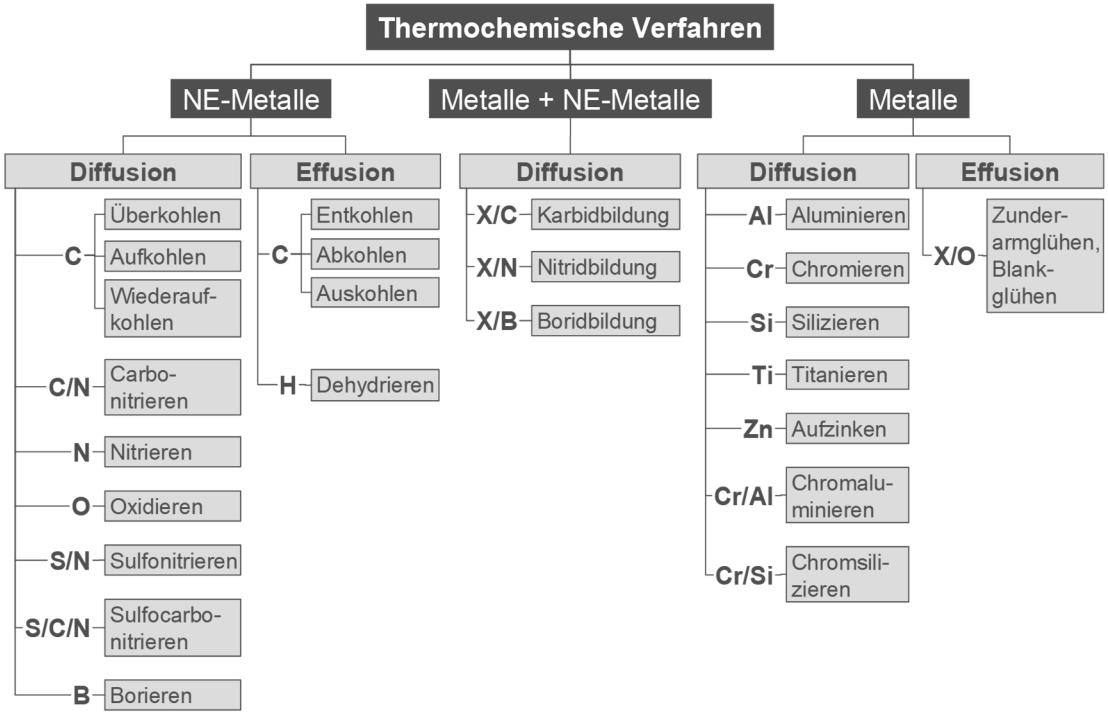



*Abb. 4-47 Schema Thermochemische Verfahren*

#### 4.3.2.1 Nichteisenmetall-Diffusionsverfahren

##### 4.3.2.1.1 Aufkohlen (Einsatzhärten)

**► Aufkohlen (DIN EN 10052)**

Thermochemisches Behandeln eines Werkstückes im austenitischen Zustand ($T > A_{c3}$) zum Anreichern der Randschicht eines Werkstückes mit Kohlenstoff, der dann im Austenit in fester Lösung vorliegt. Das aufgekohlte Werkstück wird anschließend gehärtet (unmittelbar oder nach Wiedererwärmen).
→ Angabe der Mittels, in dem aufgekohlt wird: z.B. Gas, Pulver u.a.

**► Carbonitrieren (DIN EN 10052)**

Thermochemisches Behandeln eines Werkstückes oberhalb $A_{c1}$ (meist $A_{c3}$) zum Anreichern der Randschicht eines Werkstückes mit Kohlenstoff und Stickstoff. Beide Elemente befinden sich danach im Austenit in fester Lösung. Im Allgemeinen folgt dieser Behandlung unmittelbar ein Abschrecken, um Härtung zu erzielen.
→ Angabe der Mittels, in dem carbonitriert wird: z.B. Gas, Salzbad u.a.

**► Einsatzhärten (DIN EN 10052)**

Aufkohlen oder Carbonitrieren mit anschließender, zur Härtung führender Behandlung.

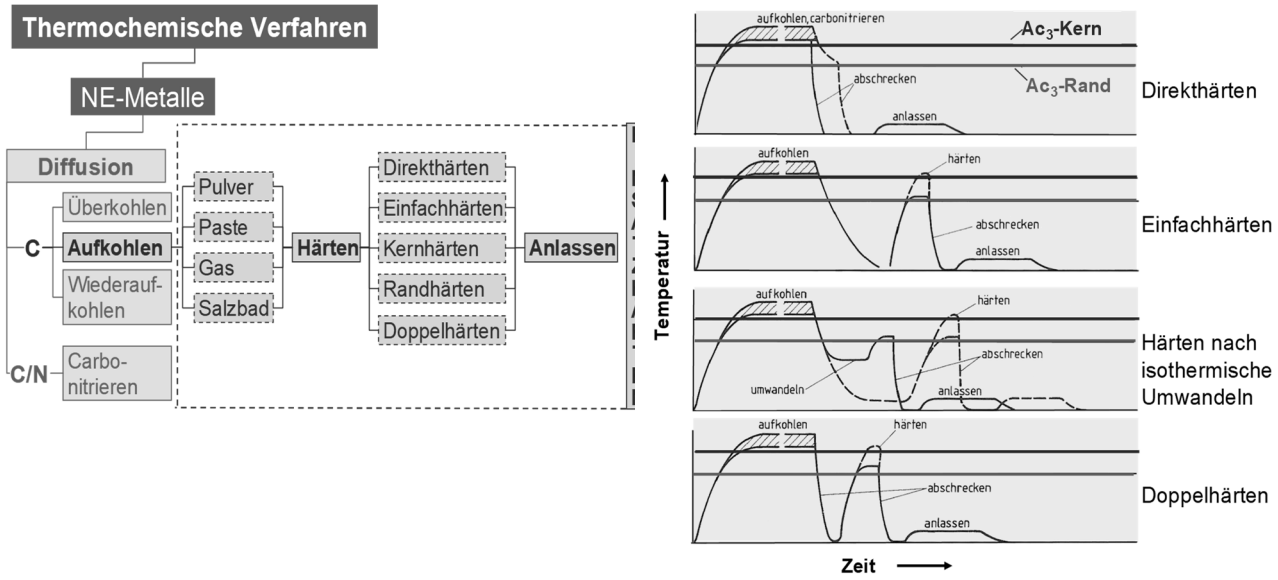
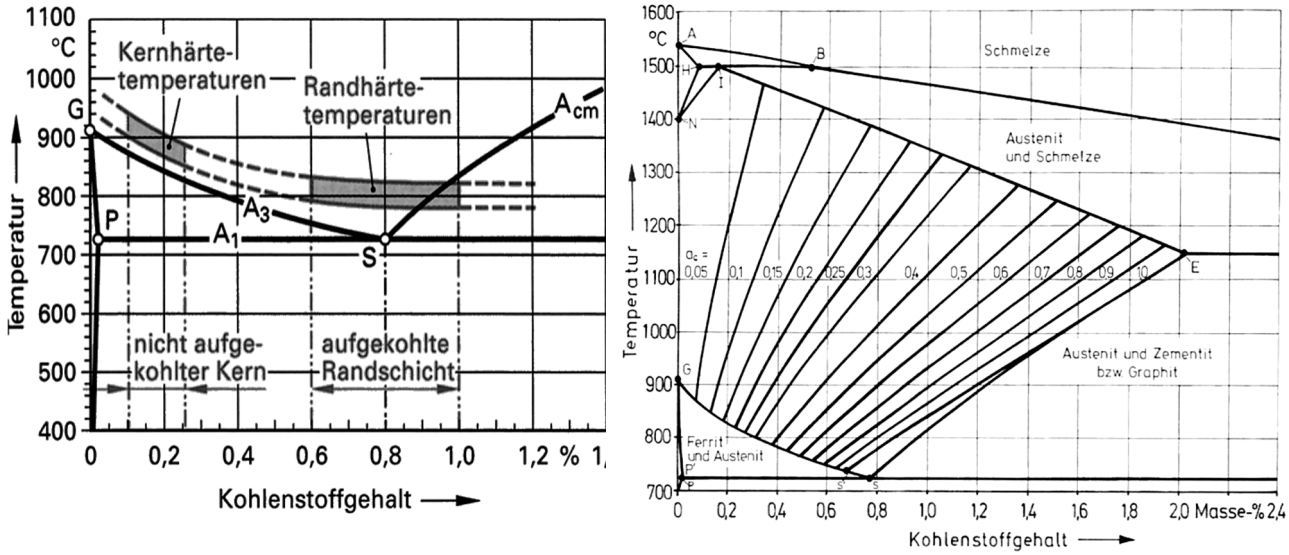
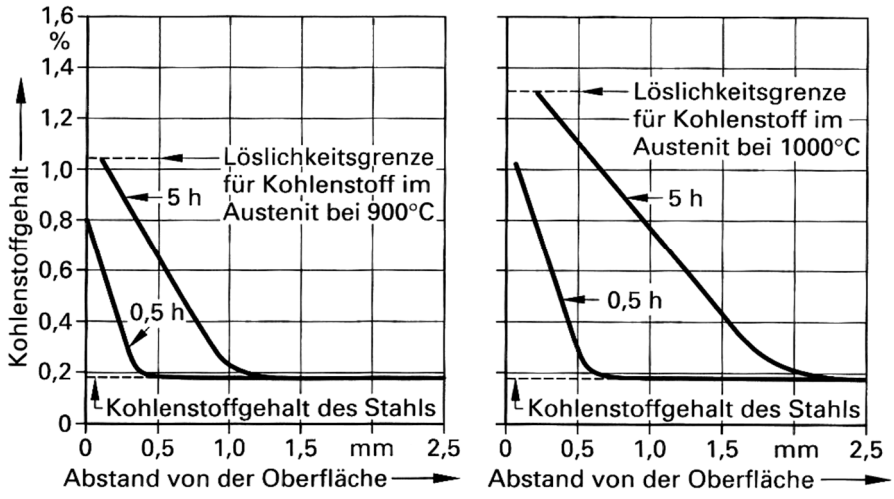



*Abb. 4-48 Verfahrensvarianten des Einsatzhärtens und deren typische T-t-Verläufe*




*a) Bestimmung der Prozesstemperatur* *b) Kohlenstoffaktivität*

*Abb. 4-49 Einordnung im Fe-C-Diagramm*

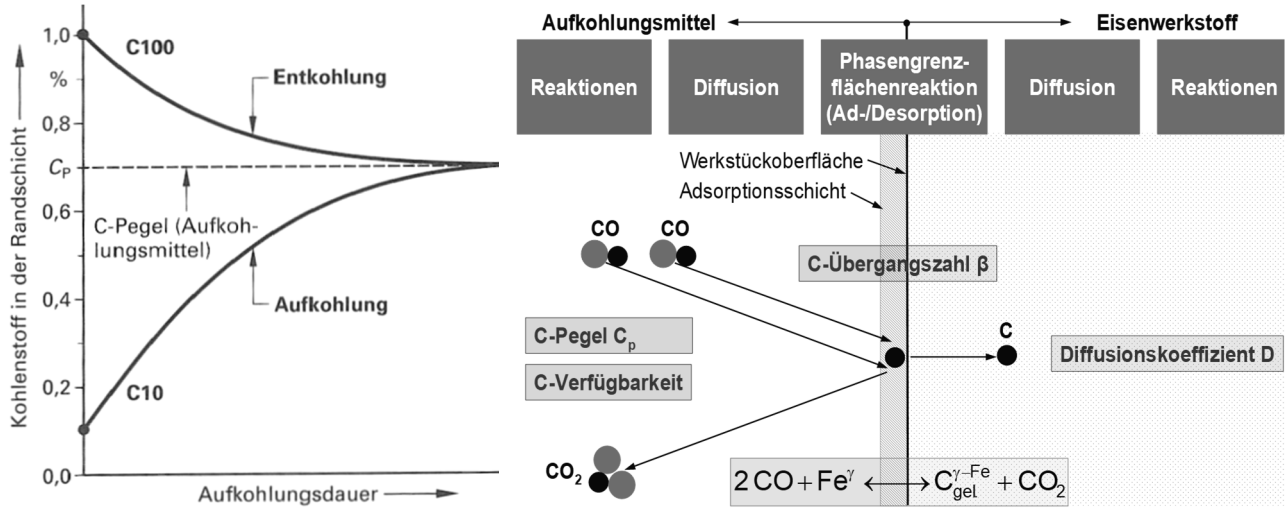



*a) T = 900°C* *b) T = 1000°C*

*Abb. 4-50 Einfluss der Aufkohlungstemperatur (18CrNi8)*

## ► Kohlenstoffpegel (DIN EN 10052)

Randkohlenstoffgehalt (Gew.-%) einer Probe aus Reineisen, der bei vorgegebenen Bedingungen mit dem Aufkohlungsmedium im Gleichgewicht steht.
→ Maß für die Aufkohlungswirkung eines Kohlungsmittels
→ dient zur Regelung des Aufkohlungsvorganges

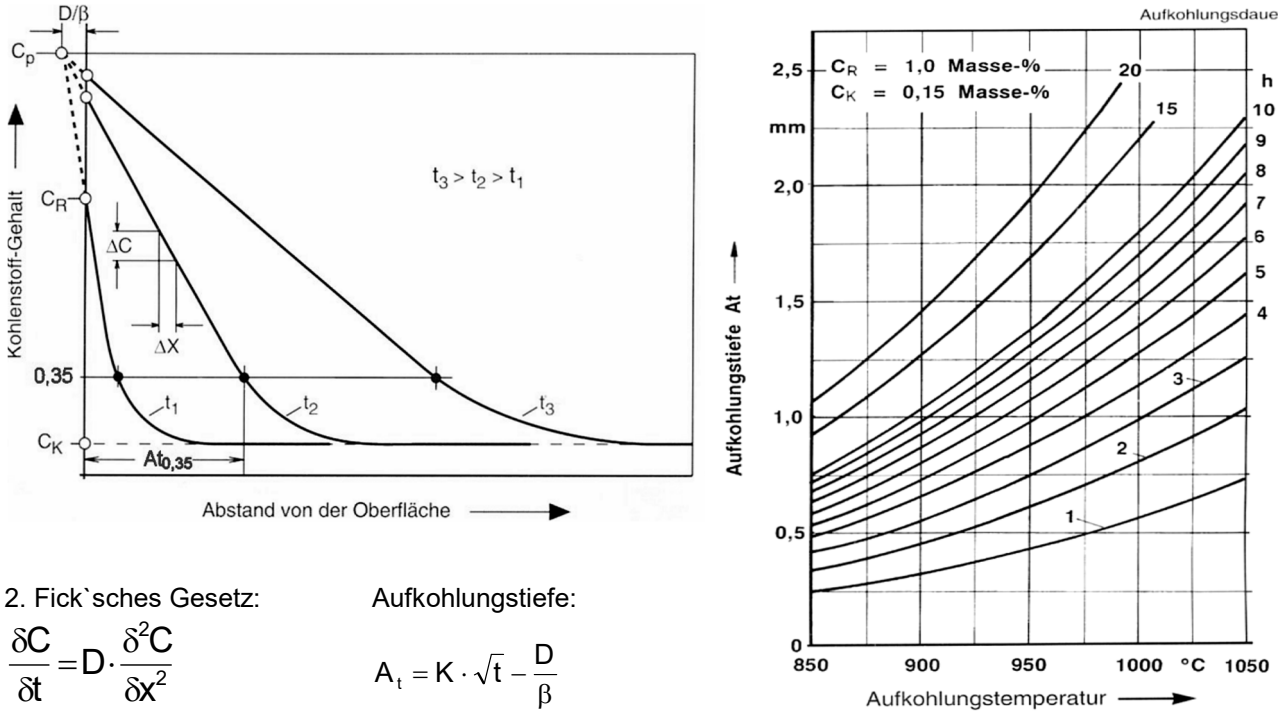



*a) Kohlenstoffpegel* *b) Aufkohlungsvorgang*

*Abb. 4-51 Vorgänge und Einflussfaktoren beim Aufkohlen*

## ► Aufkohlungstiefe ($At_{0,35}$) (DIN EN 10052)

derjenige Randabstand, bei dem ein vereinbarter C-Gehalt (0,35%) erreicht wird.
→ bei vollmartensitischer Härtung → 52,5 HRC→ (550 HV)




2. Fick`sches Gesetz:

$$\frac{\delta C}{\delta t} = D \cdot \frac{\delta^2 C}{\delta x^2}$$

Aufkohlungstiefe:

$$A_t = K \cdot \sqrt{t} - \frac{D}{\beta}$$

*a) Kohlenstoffkonzentrationsprofil* *b) Aufkohlungstiefe*

*Abb. 4-52 Einfluss von Aufkohlungsdauer und –temperatur auf die Aufkohlungstiefe*

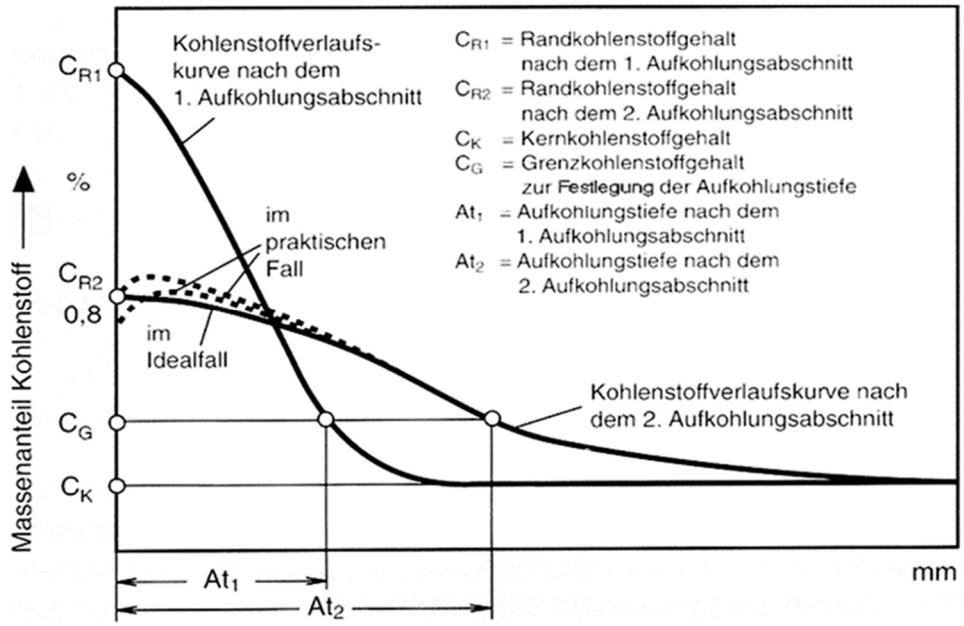
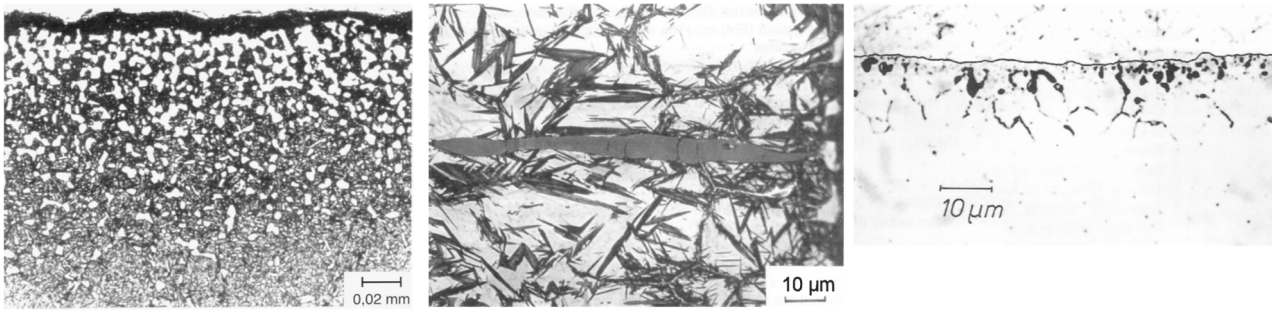



*Abb. 4-53 Regelung des C-Pegels - Zweistufenaufkohlung*




*a) Martensit + Carbide (16MnCr5)* *b) überkohlte Randschicht (C15) Restaustenit + Martensit* *c) Randoxidation*

*Abb. 4-54 fehlerhafte Gefügeausbildung nach dem Einsatzhärten*

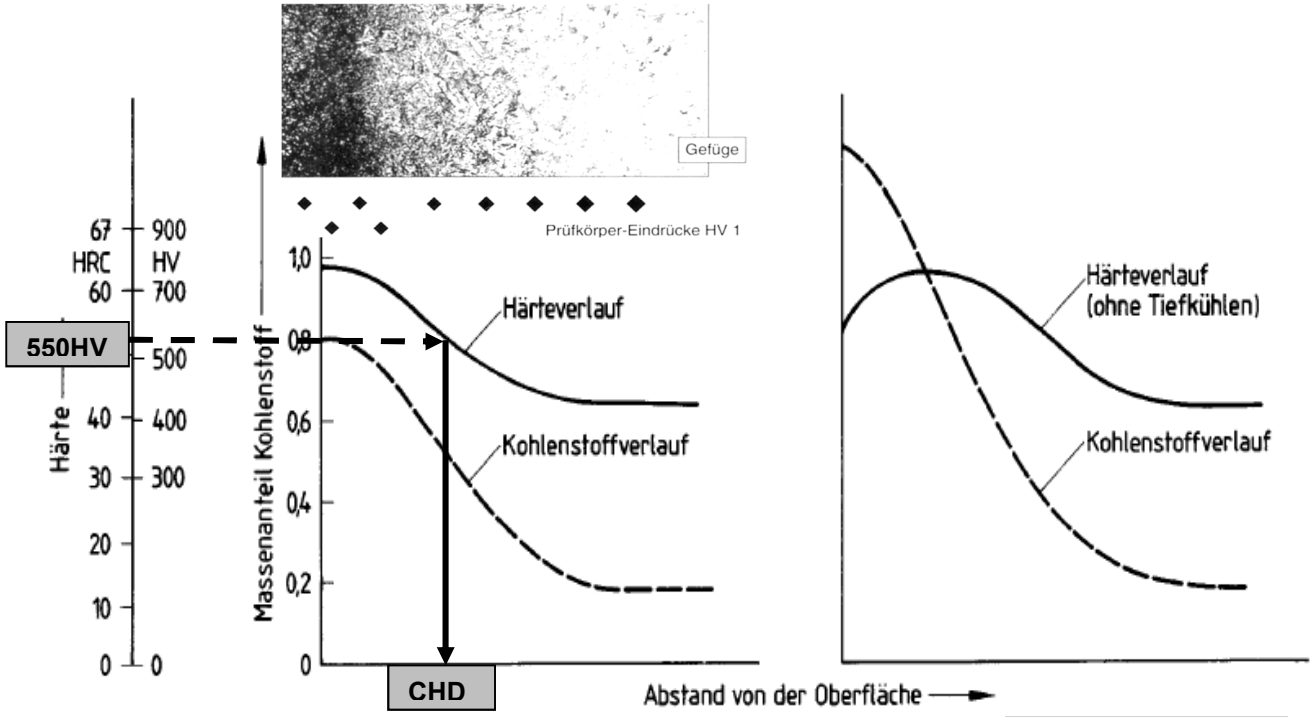



*Abb. 4-55 Bestimmung der Einsatzhärtungstiefe CHD nach DIN EN ISO 2639 = Eht (alt DIN 50 190-1)*

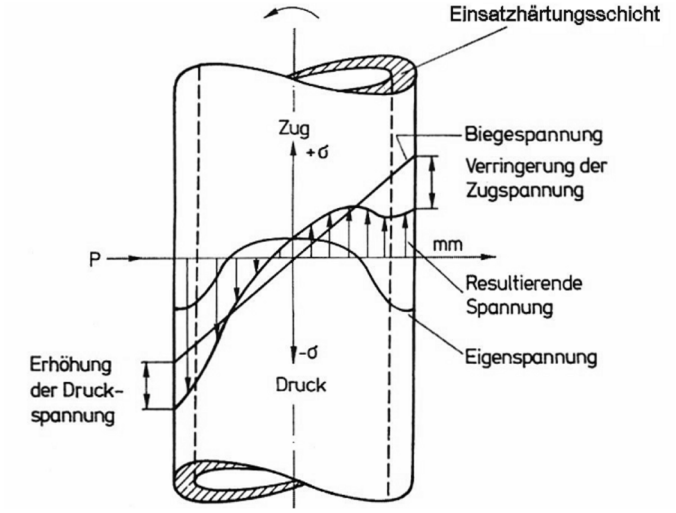



*Abb. 4-56 Wirkung des Einsatzhärtens auf Eigenspannung und Beanspruchungsspannung*

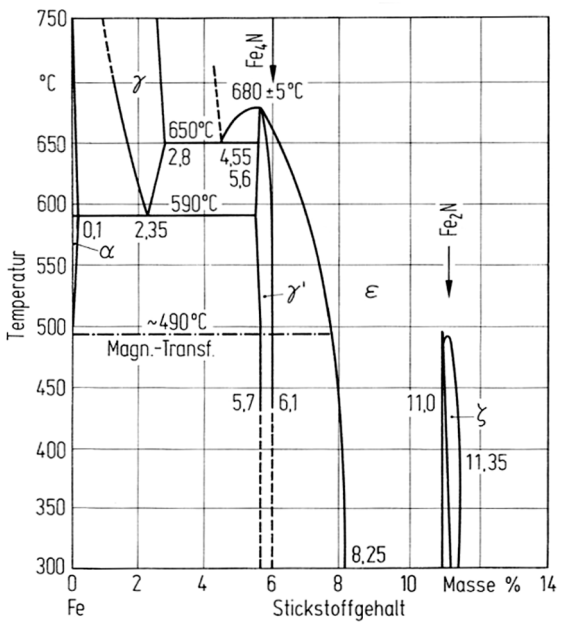
### 4.3.2.1.2 Nitrieren

**► Nitrieren (DIN EN 10052)**

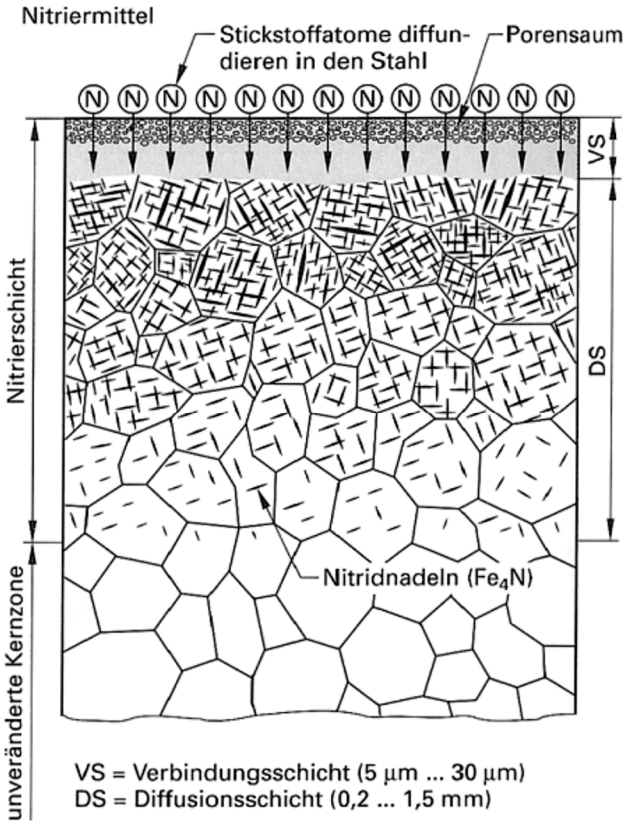
Thermochemisches Behandeln zum Anreichern der Randschicht eines Werkstückes mit Stickstoff. Erfolgt diese Behandlung in einem Mittel, dem ein nennenswerter Anteil Sauerstoff zugefügt wurde, wird von Oxinitrieren gesprochen.
→ Angabe der Mittels, in dem nitriert wird: z.B. Gas, Plasma u.a.

**► Nitrocarburieren (DIN EN 10052)**

Thermochemisches Behandeln zum Anreichern der Randschicht eines Werkstückes mit Stickstoff und Kohlenstoff unter Bildung einer Verbindungsschicht.
→ Angabe der Mittels, in dem nitrocarburiert wird bzw. Verfahren:
z.B. Gas, Plasma u.a.

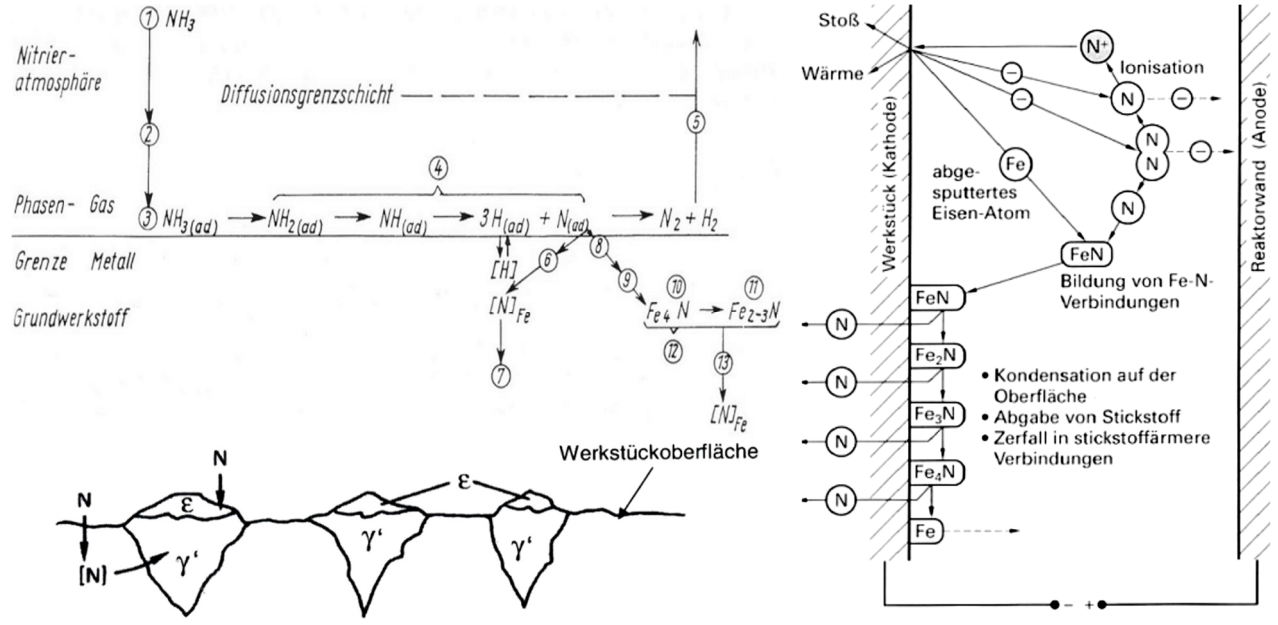



*a) System Fe-N*
α= N-α-Fe MK
γ= N-γ-Fe MK
γ'= γ'-Nitrid ($Fe_4N$): 5,7…6,1%N; kfz
ε= ε- Nitrid ($Fe_{2...3}N$): 7,8…11,3%N; hex.
ζ= ζ- Nitrid ($Fe_2N$): 11,1…11,35%N; orthorh.
α"-Nitrid: $Fe_{16}N_2$ ; 3%N; trz




*b) unlegierter Stahl*

*Abb. 4-57 Phasendiagramm und Aufbau einer Nitrierschicht*




*a) im Gas* *b) im Plasma*

*Abb. 4-58 Schematische Darstellung der einzelnen Teilvorgänge bei der Nitrierschichtbildung*

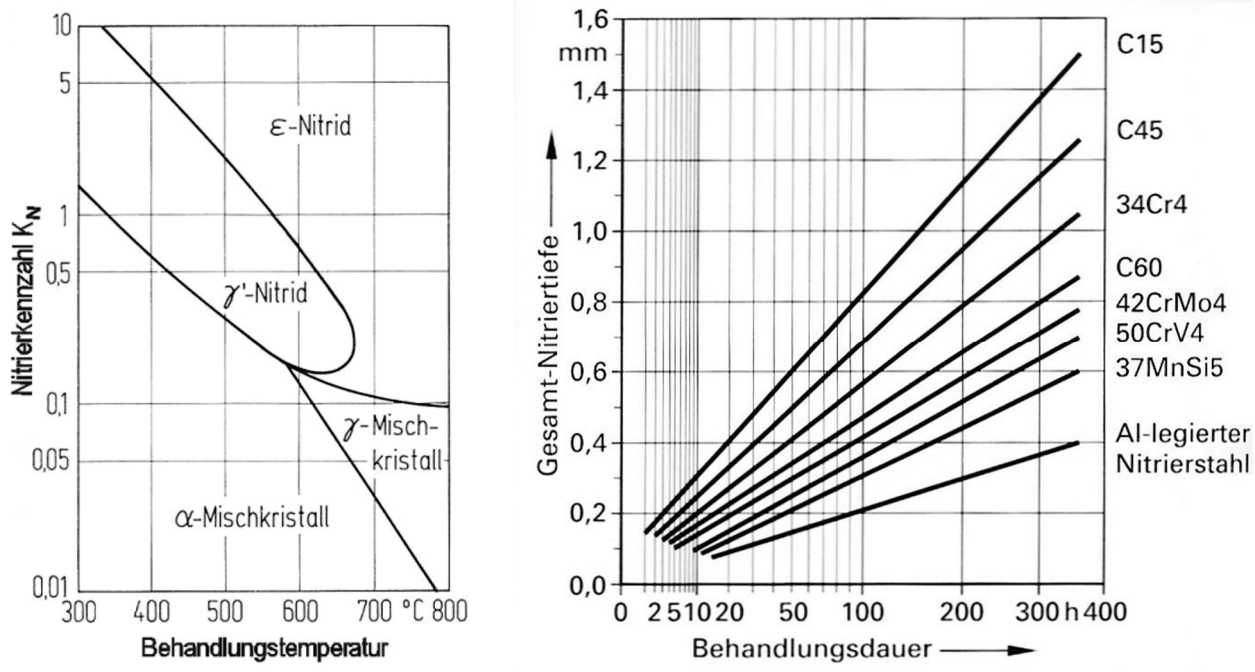
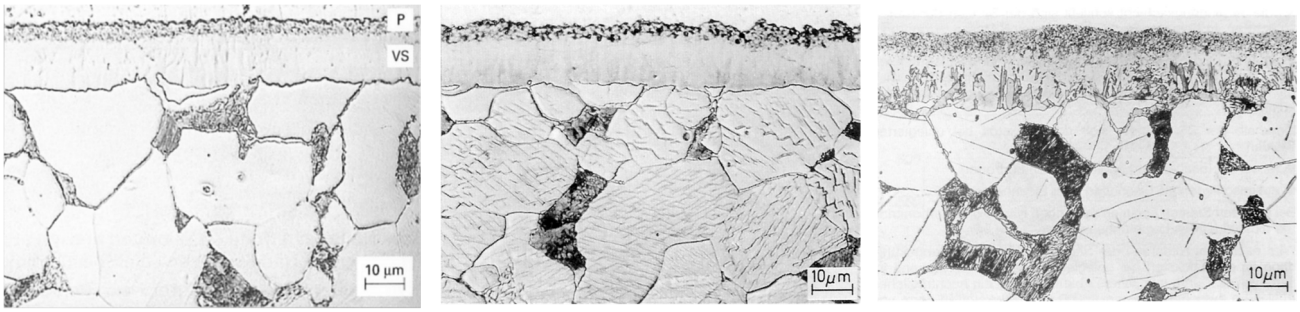
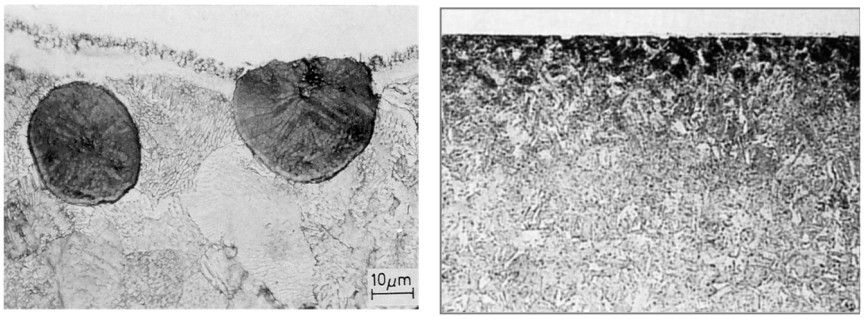



*Abb. 4-59 Lehrerdiagramm (Zusammenhang von Nitrierkennzahl und Phasenbildung beim Nitrieren von Eisen)*




salzbadnitrooxicarburiert salzbadnitrooxicarburiert + ausgel. gasnitrooxicarburiert (ε+γ' VS)

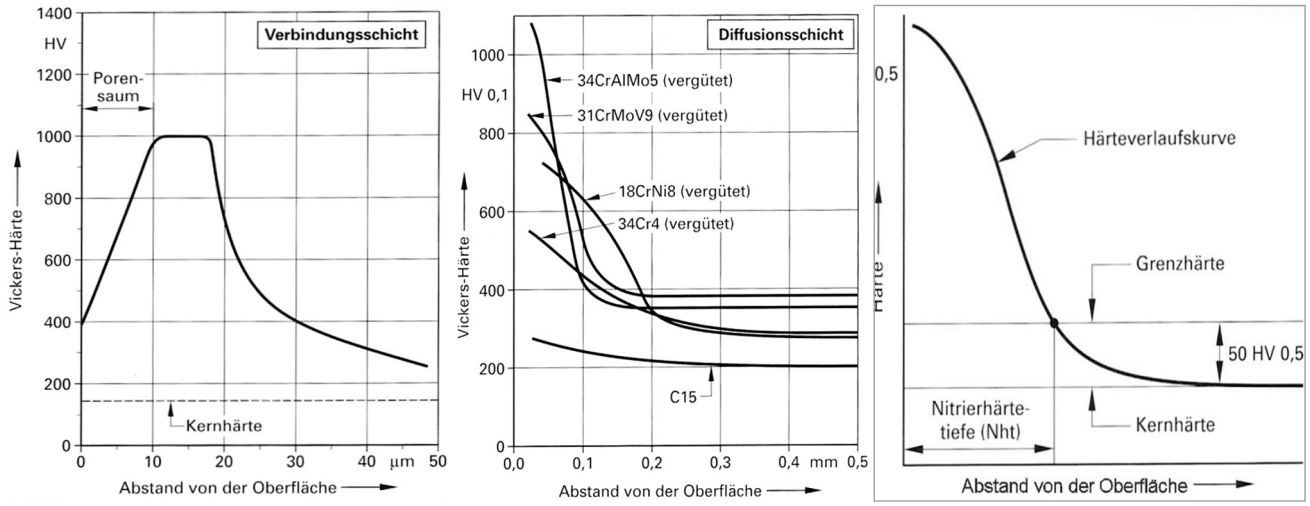
*a) C15*




salzbadnitrooxicarburiert — kontrolliert gasoxinitriert

*b) GJS 500* — *c) 31CrMoV9*

*Abb. 4-60 Nitrierschichten im metallographischen Querschliff [36]*

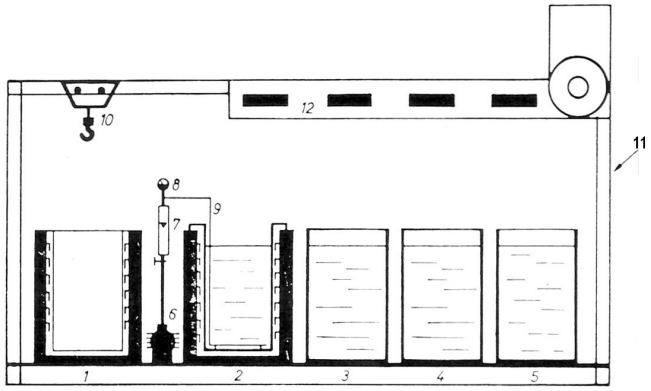



*a) Härteverlauf in der VS (C15)* *b) Härteverlauf in der DS legierter und unlegierter Stähle* *c) Bestimmung der Nht nach DIN 50190-3*

| | | VS | RH | ΔH | Nht | Rht | ΔX/Nht | ε |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Nitrierbedingungen** | **T ↑** | ↑ | = ↓ | = ↓ | ↑ | ↑ | = ↓ | ↓ |
| | **t ↑** | ↑ | = ↓ | = ↓ | ↑ | ↑ | = ↓ | ↓ |
| | **$K_N$ ↑** | ↑ | = | = | = | = | = | = |
| **Werkstoff** | | | | | | | | |
| Zusammensetzung.: | **Cr ↑** | = ↓ | ↑ | ↑ | ↓ ↓ | ↑ | ↓ | ↑ |
| | **Al ↑** | ↑ | ↑ ↑ | ↑ ↑ | = ↓ | ↓ | ↑ | ↑ ↑ |
| | **C ↑** | = ↑ | ↓ | ↓ | = ↓ | ↓ | ↑ | ↓ |
| Gefüge: | **N** | = | = ↑ | ↑ | = | ↑ | ↓ | = ↑ |
| | **V($T_A$↑)** | = | ↓ | ↓ | = | ↓ | ↑ | ↓ |

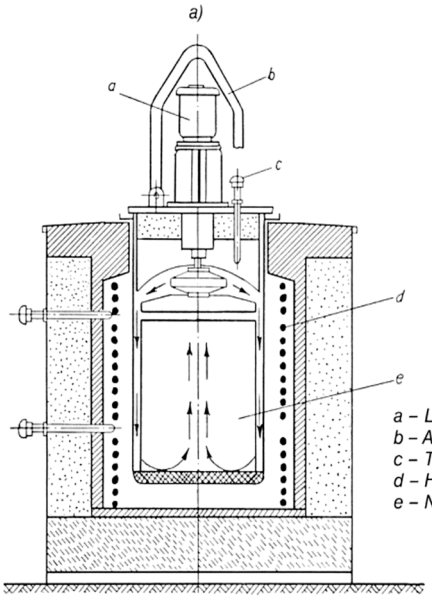
*d) Wirkung der Nitrierbedingungen und des Grundwerkstoffes auf das Nitrierergebnis*
*N: normalgeglüht, V: vergütet, $T_A$: Anlasstemperatur*
*VS: Verbindungsschicht; RH: Randhärte*

*Abb. 4-61 Einflussfaktoren auf die Nht und deren Bestimmung*




1. Vorwärmofen (mögl. mit Luftumwälzung)
2. Nitrierofen
3. Abkühlbad
3. Kaltwassertank
5. Warmwassertank
6. Kompressor
7. Luftmengenmesser
8. Manometer
9. Belüftungsrohr
10. Hebezug
11. Allseitig geschlossene Absaughaube
12. Absaugung

*a) Salzbad-Nitrocarburieranlage*




a – Lüftermotor
b – Aufhängung für Retorte
c – Thermoelement
d – Heizung
e – Nitriertopf (Retorte)

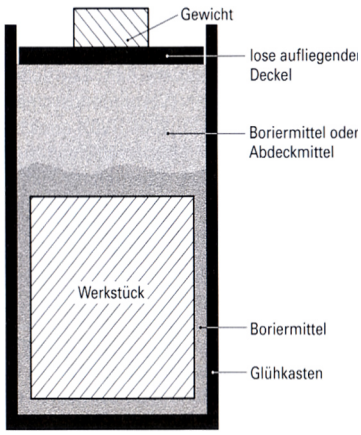
*b) Schachtofen - Vertikalretorte*

*Abb. 4-62 Anlagen zum Nitrieren (Bsp.)*

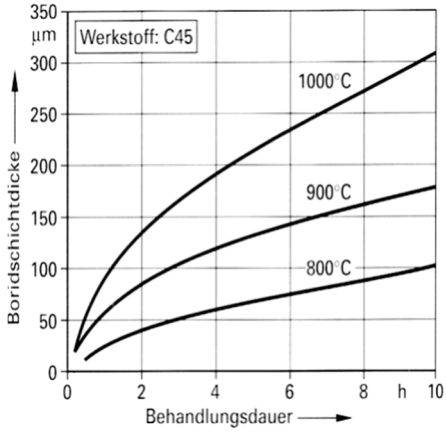
### 4.3.2.1.3 Borieren

**► Borieren (DIN EN 10052)**

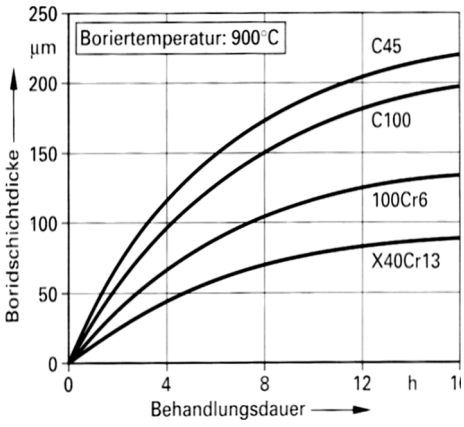
Thermochemisches Behandeln zum Anreichern der Randschicht eines Werkstückes mit Bor, mit dem Ziel, eine Boridschicht zu bilden.
→ Angabe der Mittels, in dem boriert wird: z.B. Pulver, Paste u.a.




*a) Schema Pulverborieren*

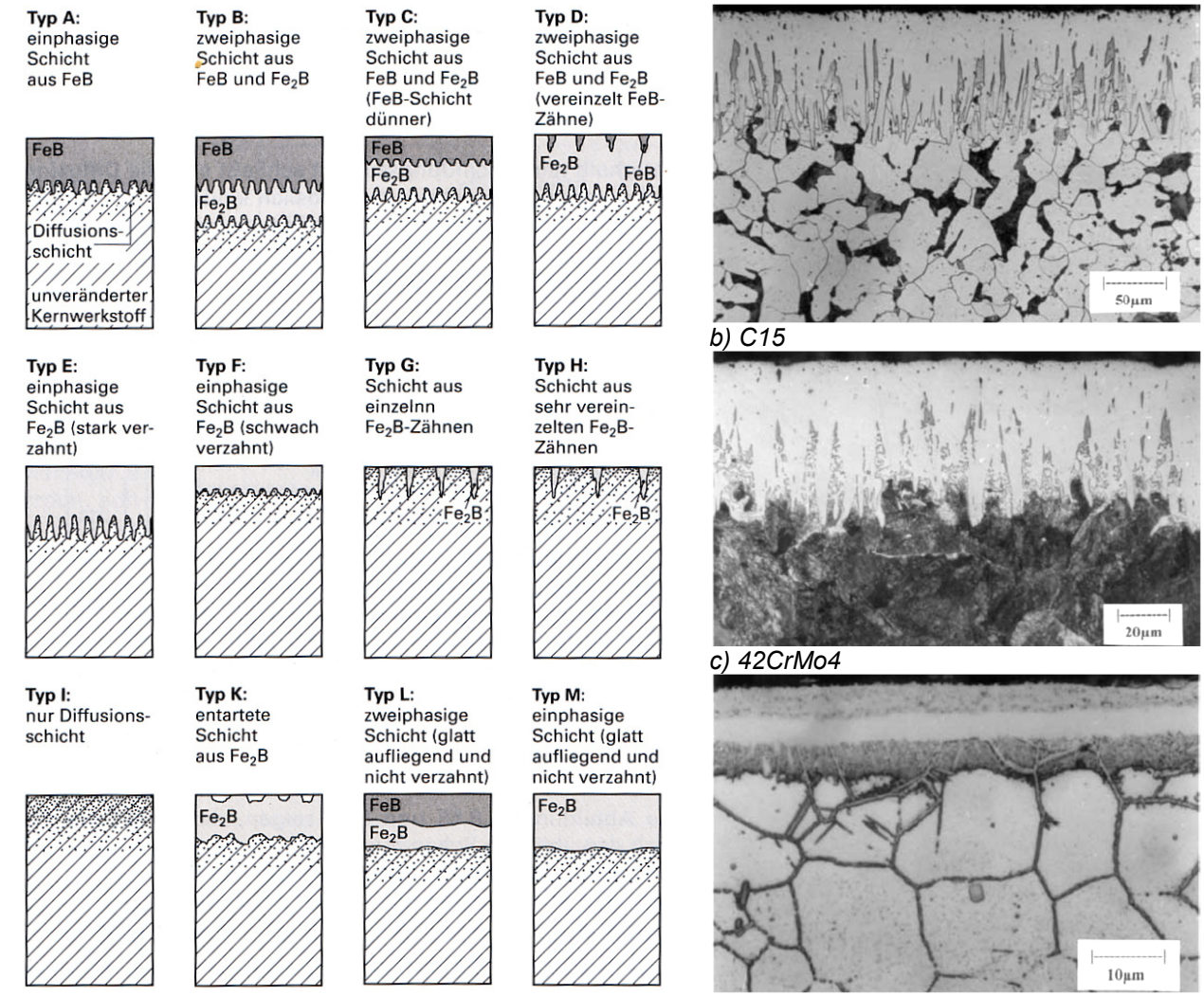



*b) Boriertemperatur, -dauer*




*c) Stahlzusammensetzung*

*Abb. 4-63 Einflussfaktoren auf die erreichbare Boridschichtdicke*



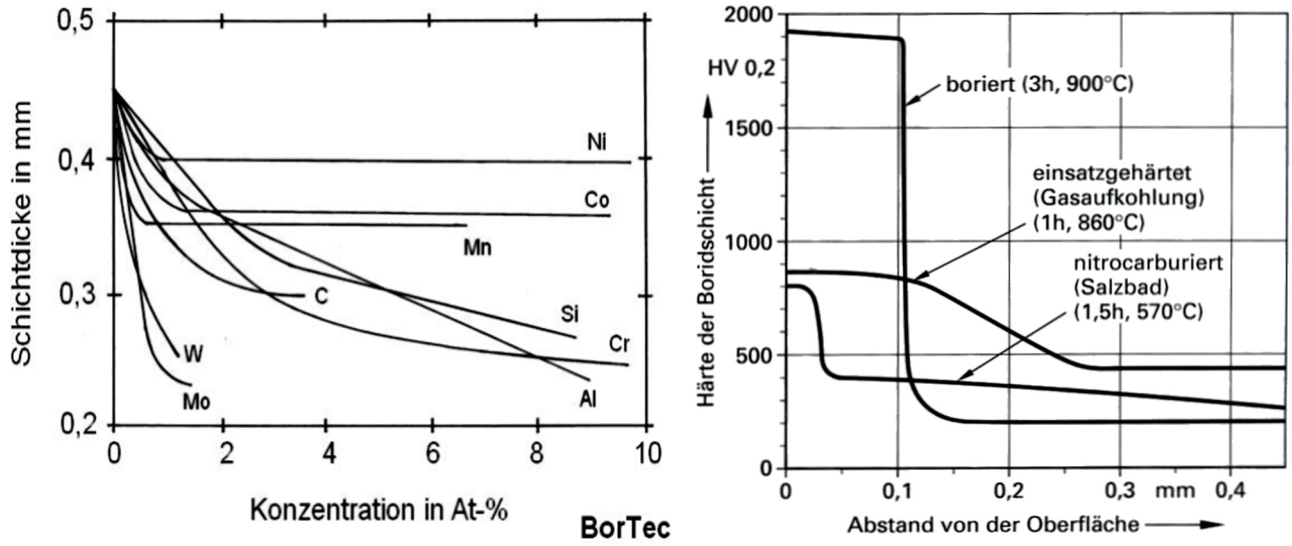

a) Boridschichttypen

b) C15

c) 42CrMo4

d) X10CrNiTi18-9

*Abb. 4-64 Boridschichttypen [35] und Schichtgefüge = f(Legierungselemente)*




a) Legierungselemente im Stahl

b) Härte-Tiefen-Verlauf [36]

*Abb. 4-65 Einflussfaktoren und Behandlungsergebnis des Borierens*

### 4.3.2.2 Metall-Diffusionsverfahren

*Tab. 4-4 Metall-Diffusionsverfahren*

| Verfahren | Zweck | Zusatzstoff | Prinzip | Bemerkungen |
|---|---|---|---|---|
| **Aluminieren** | → HT-Korrosionsbest.↑ (~800°C) | Pulvergemisch aus Al, Al-Oxid, Al-Chlorid | → 1000°C/10…20h<br>→ 1,5 mm Schicht aus intermetall. Fe-Al-Phasen ($Fe_2Al_5$)<br>→ spröde | → Feueraluminieren (Tauchdauer ↑)<br>→ elektrolyt. Aluminieren (Salzschmelze)<br>→ geeignet für Stähle mit %C↓ und Gusseisen |
| **Chromieren** | → bei Stählen %C↓: Korrosionsbest. ↑<br>→ bei Stählen %C↑: Korrosionsbest. ↑; Härte ↑, Verschleißbest. ↑ | Pulvergemisch aus Cr, Ferro-Cr, Amoniumchlorid (Aktivator), Al-Oxid<br>Gas | → 1000…1150°C/6…12h<br>→ bei Stählen %C↓:<br>0,2 mm weiche (250HV) Diffusionsschicht (>30%Cr)<br>→ bei Stählen %C↑:<br>dünne, harte (1600… 2000HV) Cr-Carbidschicht (Hartchromieren) | → bei Stählen %C↑: anschließend Härten als Stützschicht für spröde, dünne Cr-Carbidschicht |
| **Silicieren** | → Korrosionsbest. gegen Säuren ↑ | Pulver, Schmelzen oder Gase mit Ferrosilicium (Gassilicieren) | → 950…1000°C/1…2h<br>→ 1…1,5 mm Schicht aus Si-Fe-Mischkristallen (15% Si) | → keine Härtesteigerung (190…250HV)<br>→ geeignet für Stähle und Gusseisen (GJS) |
| **Titanieren** | → bei Stählen %C↓: HT-Korrosionsbest. gegen Säuren ↑<br>→ bei Stählen %C↑: Korrosionsbest. ↑; Härte ↑, Verschleißbest. ↑, Schmelztemperatur ↑, Haftfähigkeit ↑, Polierbarkeit ↑ | Ti-Halogenverbindungen | → 1000°C<br>→ bei Stählen %C↓:<br>dünne $Fe_2Ti$-Randschicht und Übergangsschicht aus Fe-Ti-Mischkristallen<br>→ bei Stählen %C↑:<br>Ti-Carbidschicht | |
| **Verzinken** | → atmosphärische Korrosionsbest. ↑ | Pulver aus Zn, Quarzsand und aktivierende Zusätze | → 370…400°C<br>→ Randschicht aus intermetallischen Fe-Zn-Phasen | → Verzinken mit Pulvern = Sherardisieren<br>→ auch gebräuchlich: Schmelztauchverzinken, Zinkdampf |

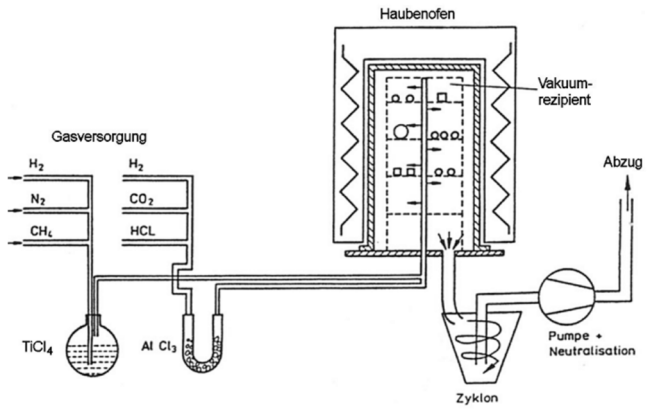
### 4.3.2.3 Beschichten

**► Beschichten**

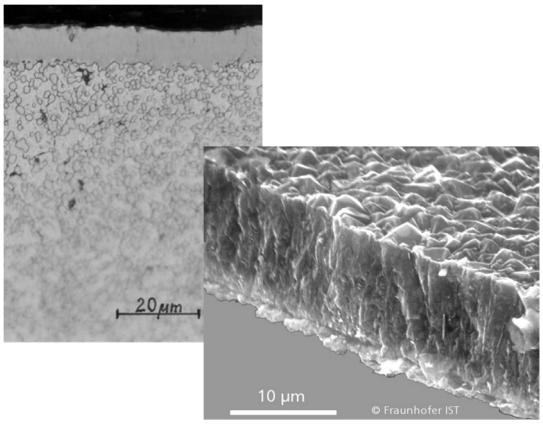
Behandlung zur Erzeugung einer Metall-Nichtmetall-Schicht auf der Oberfläche unter Nutzung unter-schiedlicher physikalisch-chemischer Wirkprinzipien (Temperatur, Druck, Plasma, Reduktion, thermische Zersetzung)

**► CVD-Verfahren - Chemical vapour deposition**

Herstellen dünner, hochreiner Hartstoffniederschläge durch chemische Reaktion, die in der Gasphase bei beliebigem Druck unter Zufuhr erheblicher Wärme- oder Strahlungsenergie ablaufen und dabei nutzbare Feststoffprodukte und flüchtige Nebenprodukte liefern.




*a) TiC-Beschichtung: $TiCl_4^{(g)} + CH_4^{(g)} \rightarrow TiC^{(f)} + 4HCl^{(g)}$*
*Substrattemperatur: 800 -1100°C*

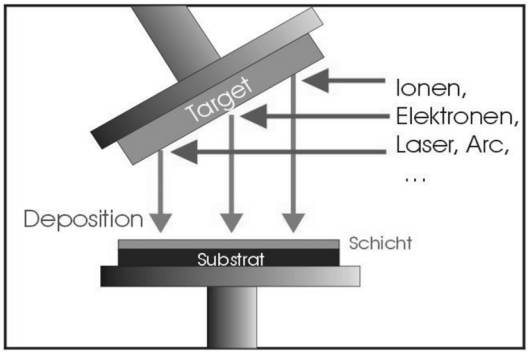



*b) TiN- Schicht auf PM-Stahl*
*(Schichtdicken: 1…200 µm)*

*Abb. 4-66 Bsp. für thermischen CVD-Prozess und Schichtausbildung*

## ► PVD-Verfahren - Physical vapour deposition

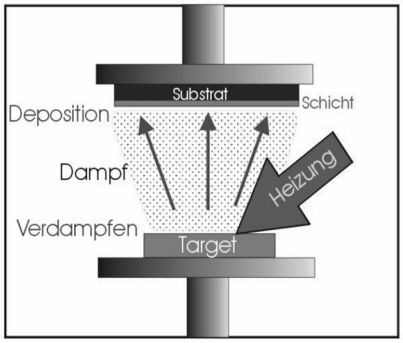
Vakuumbeschichtungsverfahren, bei denen die zur Abscheidung gelangenden Stoffe durch Verdampfen oder Zerstäuben gebildet und direkt auf dem Substrat abgeschieden werden.



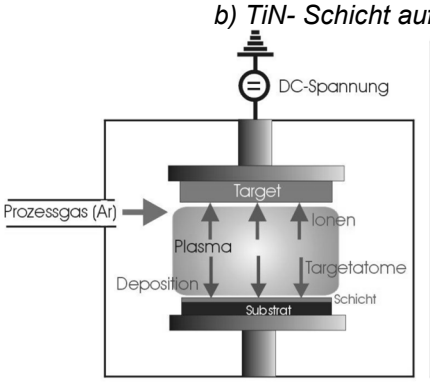

*a) allg. Verfahrensprinzip*



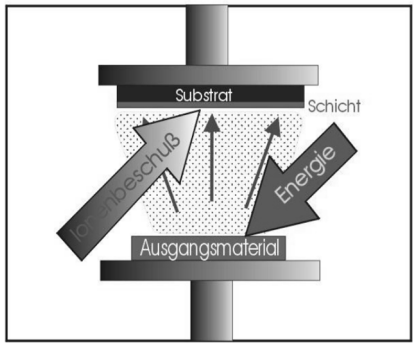
*b) TiN- Schicht auf X210Cr12*




*c) Aufdampfen*




*b) Sputtern*




*c) Ionenplattieren*

*Abb. 4-67 Prinzip des PVD-Verfahrens*

# 5 WÄRMEBEHANDLUNG VON AUSGEWÄHLTEN WERKSTOFFGRUPPEN

## 5.1 Wärmebehandlung von austenitischen Stähle

### 5.1.1 Austenitische Stähle

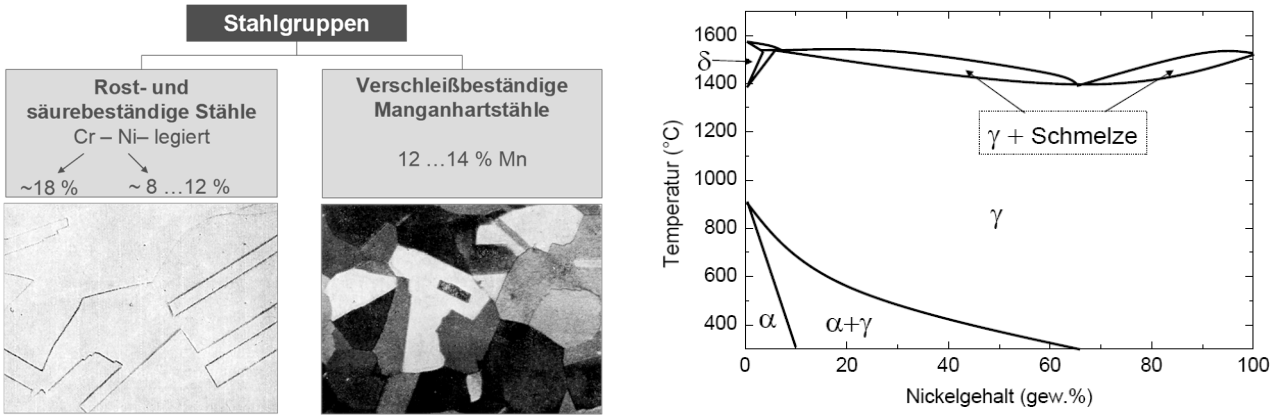
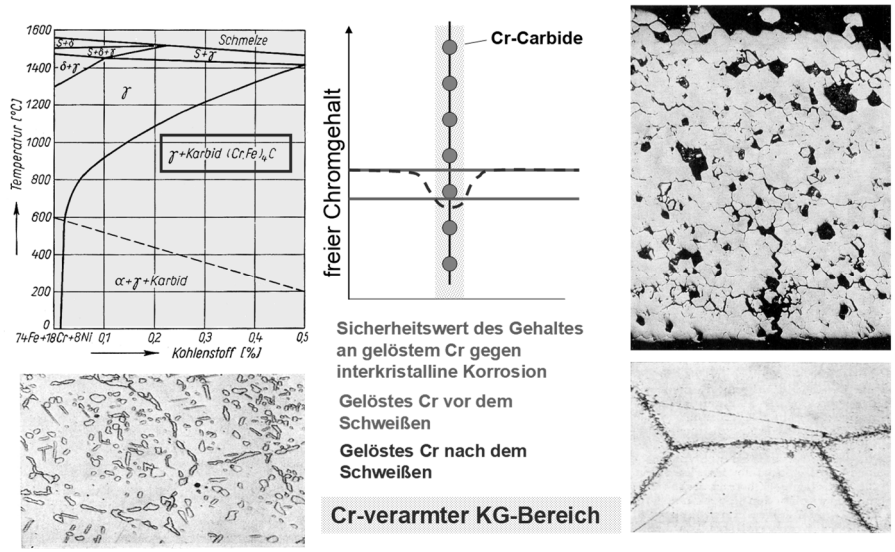



*Abb. 5-1 austenitische Stähle und deren charakteristische Erweiterung des γ-Gebietes*

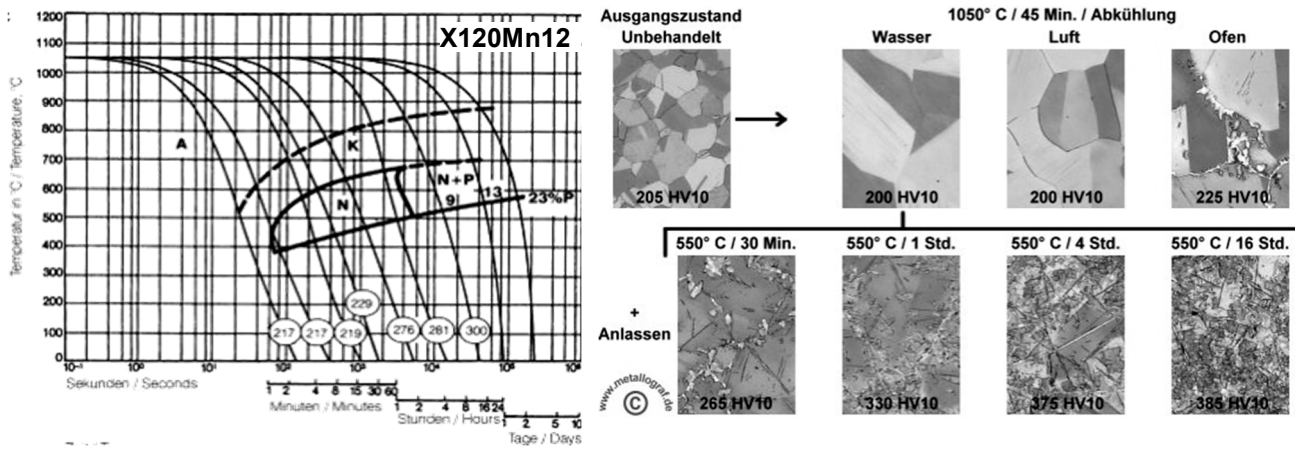
### 5.1.2 Wärmebehandlung von Cr-Ni-Stählen




*a) Ursache für die Notwendigkeit der WBH* *b) T-t-Verläufe*

*Abb. 5-2 WBH austenitischer Cr-Ni-Stähle*

### 5.1.3 Wärmebehandlung von Mn-Stählen




*a) kont. ZTU ($T_A$ = 1050°C; $t_H$ = 15min)* *b) Gefüge, Härte = f(Abkühlung, Auslagerung ($t_H$))*

*Abb. 5-3 Wärmebehandlung am Bsp. des X120Mn12*

## 5.2 Wärmebehandlung von Gusseisenwerkstoffen

### 5.2.1 Einteilung der Gusseisenwerkstoffen

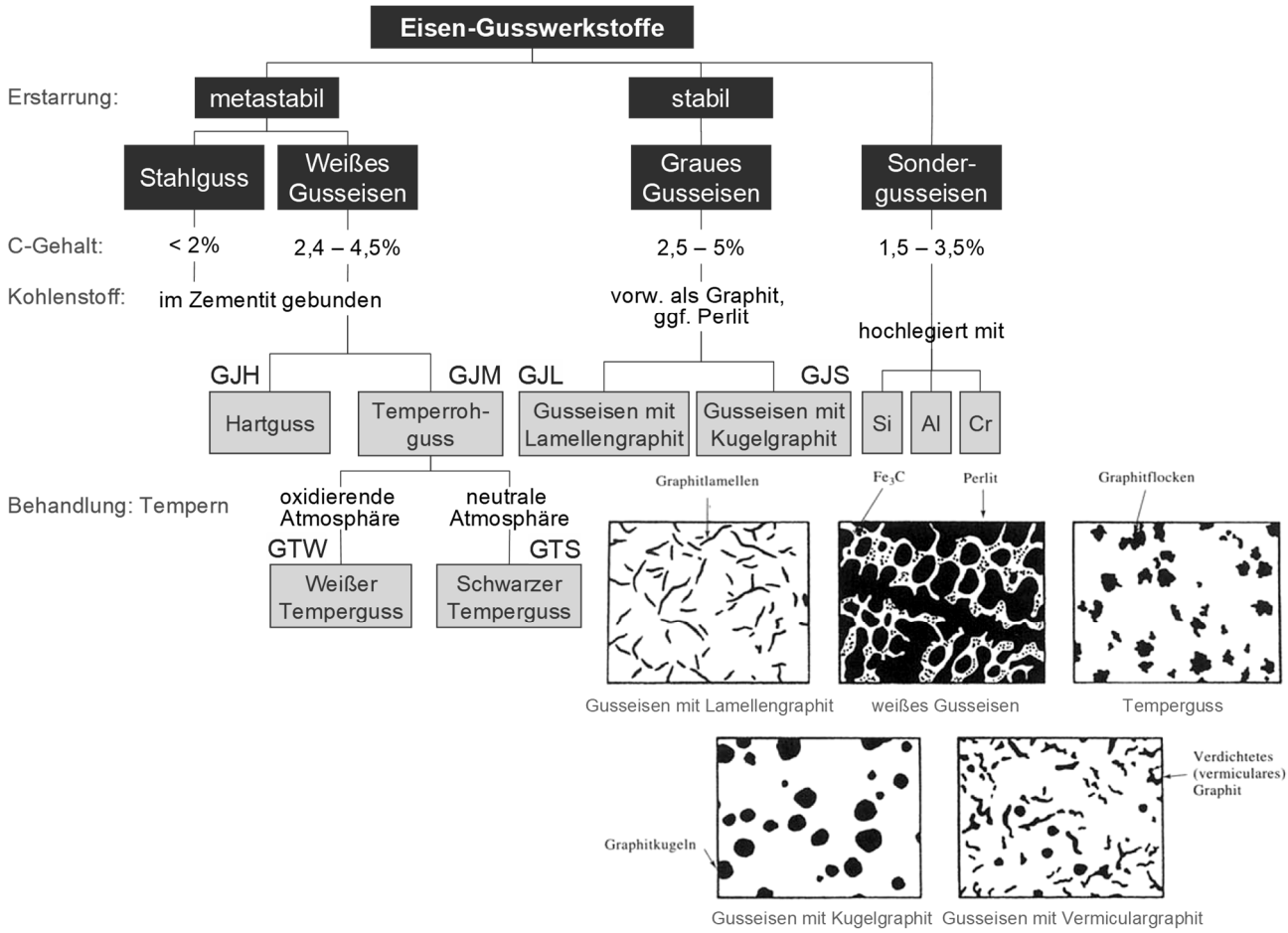



*Abb. 5-4 Einteilung, Kennzeichnung und Gefügeausbildung verschiedener Gusseisenwerkstoffe*

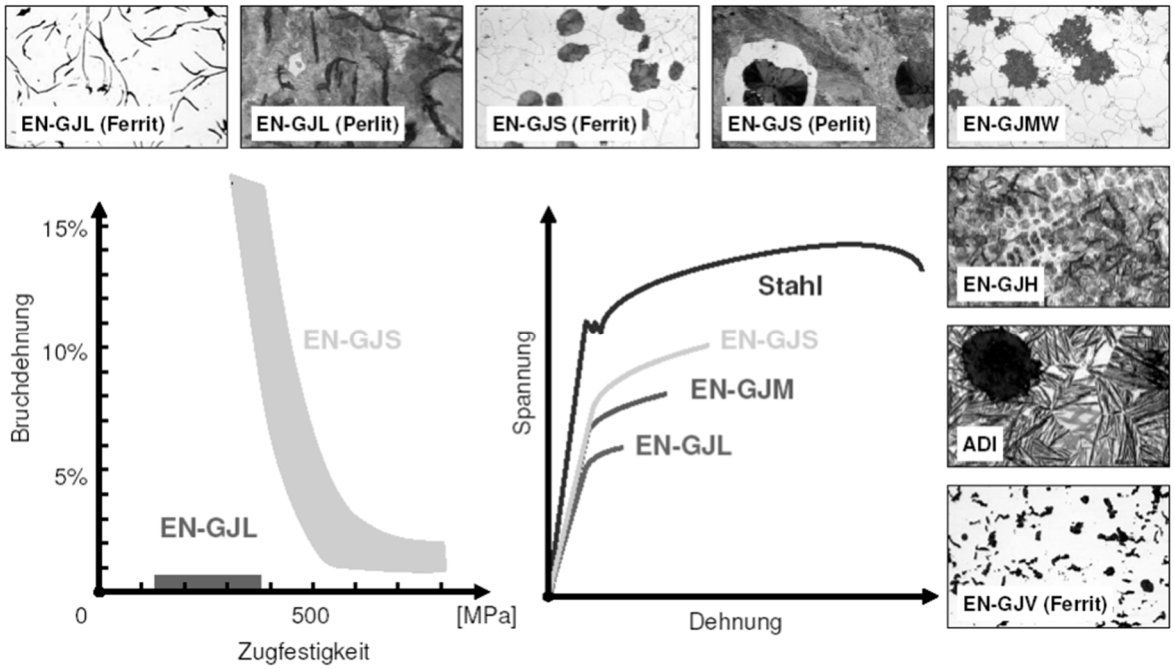
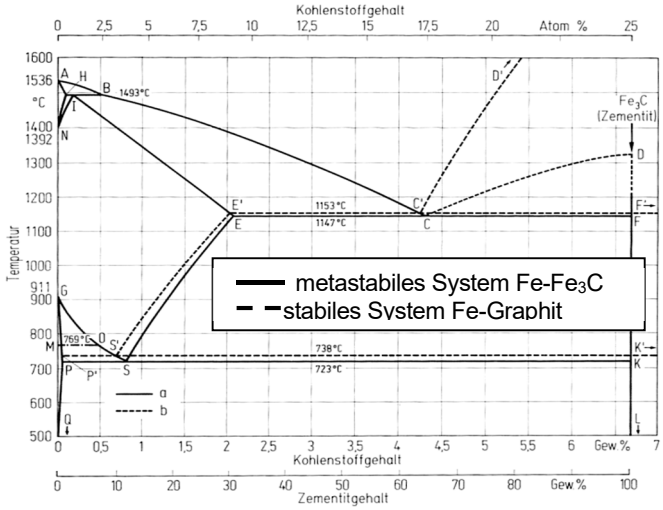
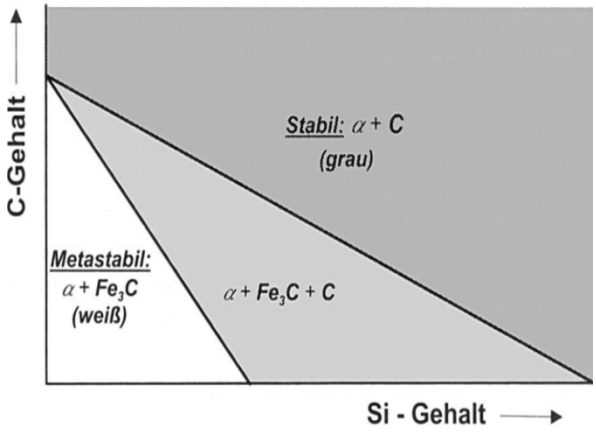


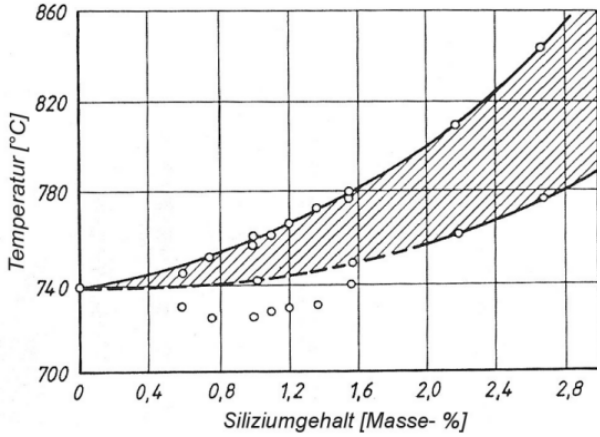

*Abb. 5-5 Vergleich der mechanischen Eigenschaften und Gefügeausbildungen*



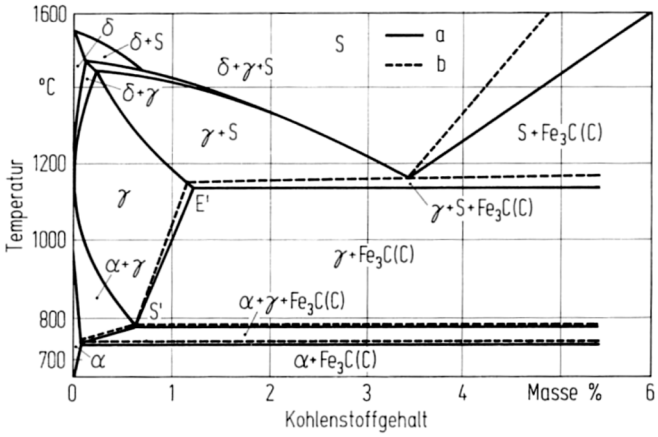

*a) Fe-C-Diagramm*




*b) Phasenbildung im Gusseisen nach E. Maurer*




*c) Einfluss des Si auf die eutektoide Temperatur mit Bildung eines Temperaturintervalls*




*d) Quasibinärer Schnitt im System Fe-Si-C bei 2,4 % Si a ...Fe(Si) –Zementit b ...Fe(Si) - Graphit*

*Abb. 5-6 Einfluss der Legierungselemente (Si, C) auf die Gefügebildung*

## 5.2.2 Möglichkeiten der Wärmebehandlung

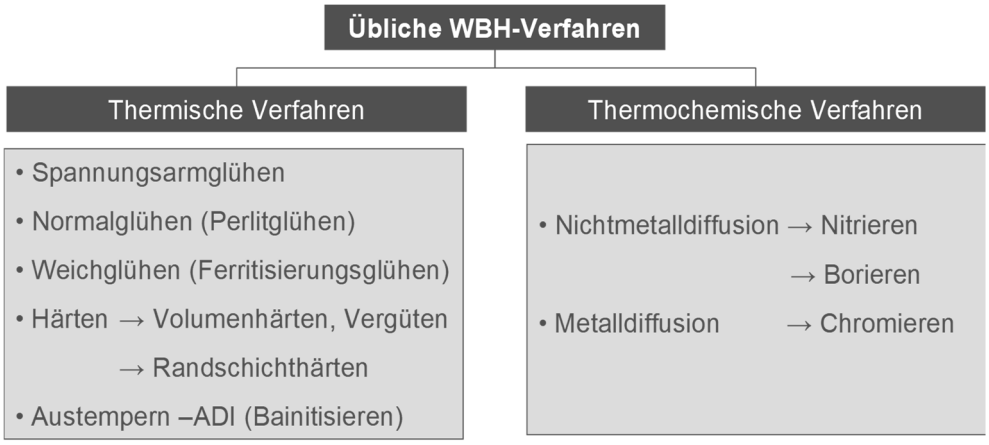



*Abb. 5-7 typische WBH-Verfahren für Gusseisenwerkstoffe*

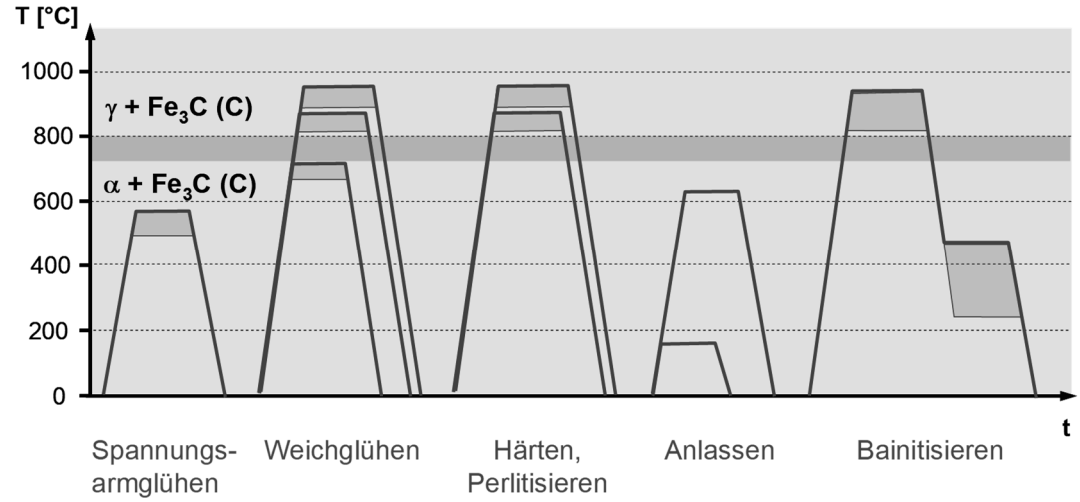
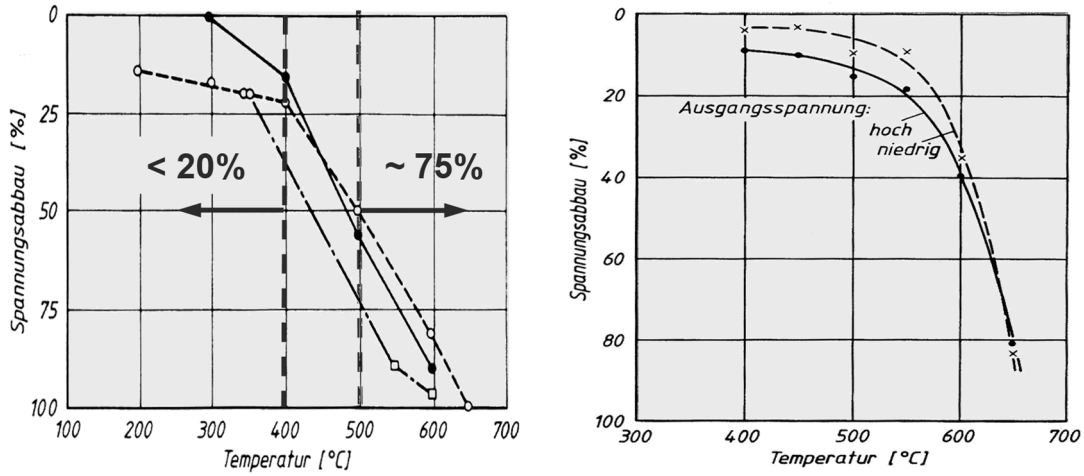



*Abb. 5-8 typische T-t-Verläufe verschiedener WBH-Verfahren*

*Tab. 5-1 Übersicht der wichtigsten WBH-Verfahren für Bauteile aus GJS und GJL*

| WBH-Verfahren | Gusseisen | Ziel | T [°C] | Zeit | Abkühlen |
|---|---|---|---|---|---|
| Spannungsarm-glühen | un-, niedrig- und hochle-giert | Beseitigen von Spannungen | 500 - 550<br>560 - 600<br>600 - 650 | 1 h + 1 h je 25 mm Wanddi-cke | Ofenabkühlung 40 K/h bis 300°C (bis 100°C für komplizierte Teile) |
| Weichglühen bei T ↓ (Ferritisieren, Graphitisieren) | un- und nied-riglegiert | ferritisches Gefüge, Zerspanbarkeit ↑ | 700 - 760 | 45 min…1 h je 25 mm Wanddi-cke | Ofenabkühlung 55 K/h zwischen 540…300°C |
| Weichglühen bei mittl. T (Ferriti-sieren, Graphiti-sieren) | legiertes Gusseisen | ferritisches Gefüge, Zerspanbarkeit ↑ | 790 - 900 | >45 min je 25 mm Wanddi-cke | Ofenabkühlung von Glühtemperatur bis 300 °C |
| Weichglühen bei T ↑ (Ferritisieren, Graphitisieren) | meliertes, weißes Guss-eisen | ferritisches Gefüge, Zerspanbarkeit ↑ | 900 - 955 | 1…3 h + 1 h je 25 mm Wanddi-cke | Ofenabkühlung bis 300°C |
| Weichglühen bei T ↑ | meliertes oder weißes Guss-eisen | Beseitigung von Carbideinschlüssen bei maximaler Fes-tigkeit und Härte | 900 - 955 | 1…3 h + 1h je 25 mm Wanddi-cke | Luftabkühlung bis 540°C, dann Ofenab-kühlung bis 300°C |
| Perlitglühen (Perlitisieren) | alle Sorten | Perlitisches Gefüge | 850 - 955 | 1…3 h + 1h je 25 mm Wanddi-cke | Luftabkühlung bis 540°C,dann Ofenab-kühlung bis 300 °C |
| Härten | alle Sorten | Martensitisches Ge-füge höchster Härte | 800 - 950 | 1 h + 1 h je 25 mm Wanddi-cke | Luft- oder Flüssigkeits-abschreckung auf < 200°C |
| Vergüten (Härten + Anlassen) | alle Sorten | Abbau der Sprödig-keit des Martensits | 150 - 650 | 1 h je 25 mm Wanddicke | Luft- oder Ofenabküh-lung |
| Bainitisieren Austempern | un- und nied-riglegiert | bainitisches Gefüge Ausferrit | 850 - 950 | 1 h + 1 h je 25 mm Wanddi-cke | Warmbadabschre-ckung auf 230…400°C, 1,5…4 h Halten |

### 5.2.3 Spannungsarmglühen




*a) unlegiertes Gusseisen* *b) hochlegiertes Gusseisen*

*Abb. 5-9 Spannungsabbau = f(Temperatur) beim Spannungsarmglühen[37]*

### 5.2.4 Weichglühen (Ferritisieren, Graphitisieren)

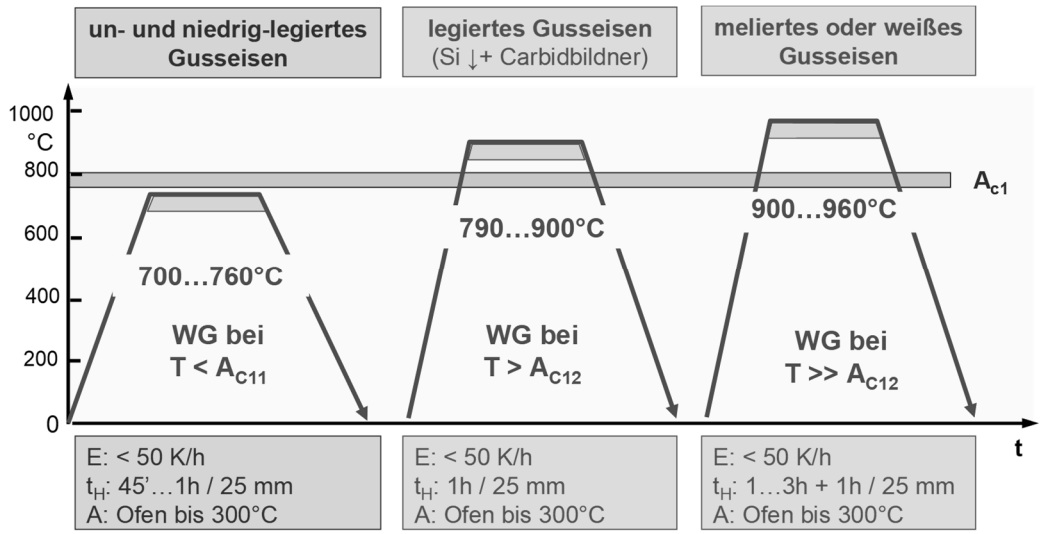
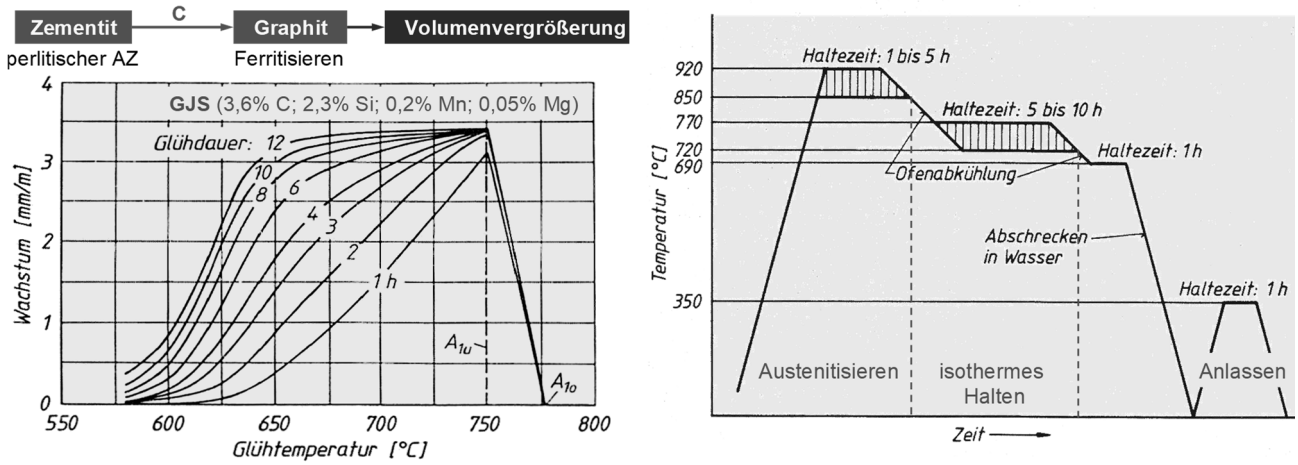



*Abb. 5-10 T-t-Regime zum Weichglühen verschiedener Gusseisenwerkstoffe*




*a) Maßänderung beim Weichglühen [38]* *b) zweistufiges Weichglühen (GJS) [37]*

*Abb. 5-11 Weichglühen von Gusseisenwerkstoffen*

## 5.2.5 Perlitglühen (Perlitisieren, Normalglühen)

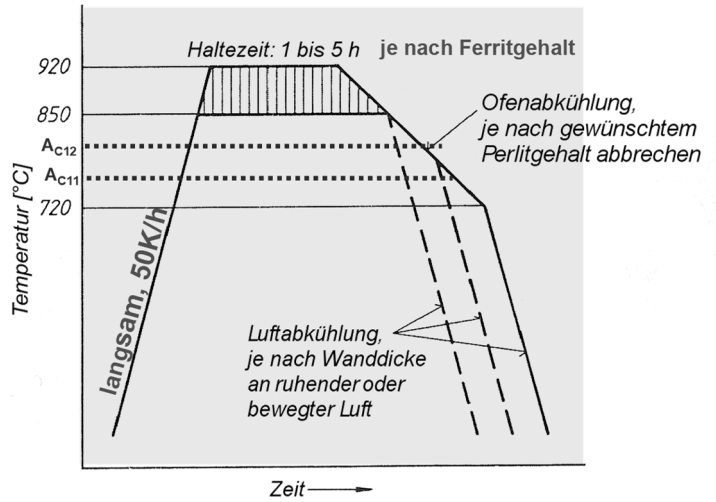
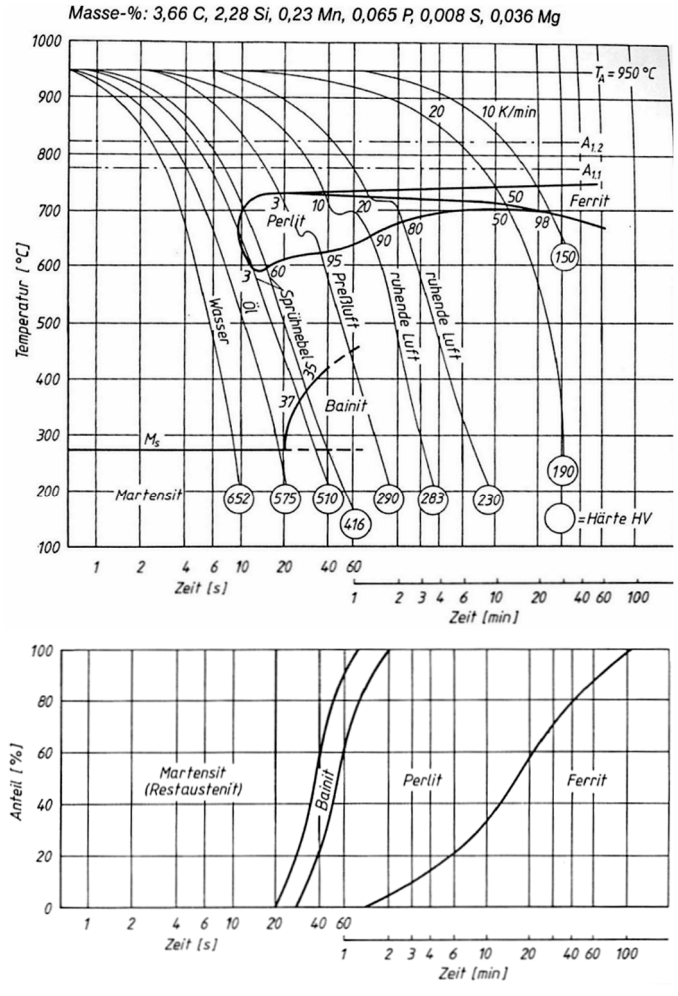
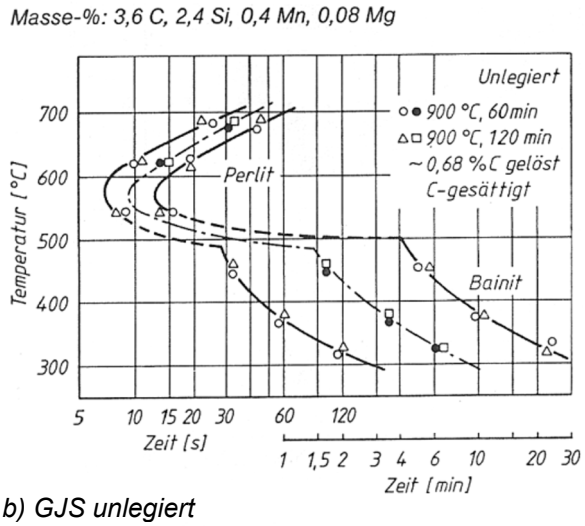



*Abb. 5-12 T-t-Verlauf beim Perlitglühen*

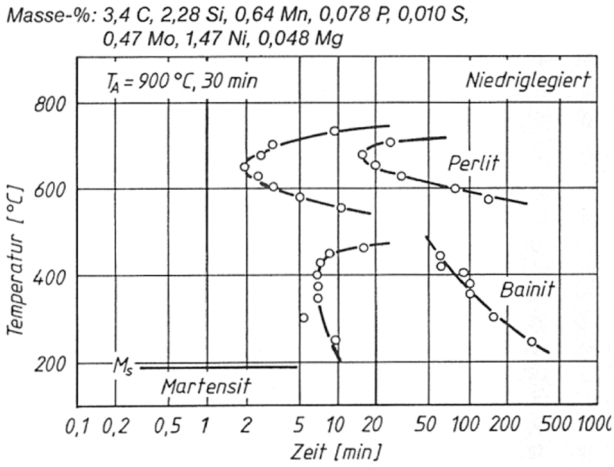
## 5.2.6 Härten und Vergüten




*a)*

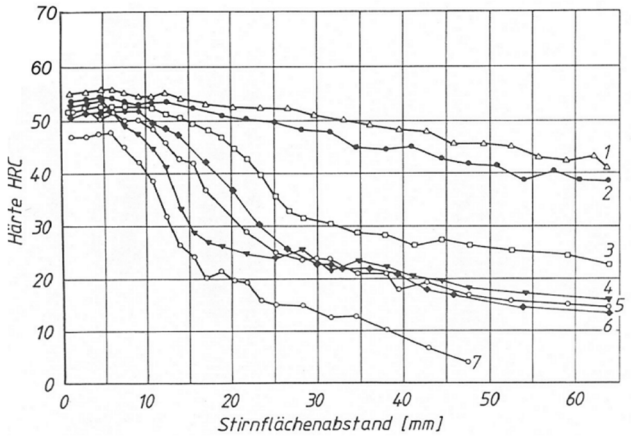



*b) GJS unlegiert*




*c) GJS niedriglegiert*

*Abb. 5-13 Beschreibung des Umwandlungsverhaltens durch isotherme und kontinuierliche ZTU-Diagramme*




| | Chemische Analyse [Gew.-%] | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | C | Si | Mn | Cu | Cr | Mo | Ni |
| 1 | 3,29 | 1,96 | 0,59 | 1,23 | 0,28 | 0,41 | - |
| 2 | 3,27 | 1,97 | 0,59 | 1,21 | - | 0,50 | - |
| 3 | 3,32 | 2,01 | 0,57 | 2,02 | 0,51 | - | - |
| 4 | 3,28 | 2,07 | 0,59 | 0,17 | 0,53 | - | - |
| 5 | 3,31 | 2,03 | 0,59 | 1,54 | - | - | - |
| 6 | 3,27 | 1,99 | 0,58 | 1,02 | - | - | 1,05 |
| 7 | 3,29 | 2,08 | 0,67 | 0,13 | - | - | - |

*Abb. 5-14 Härtbarkeit von GJL für verschieden Legierungsgehalte*

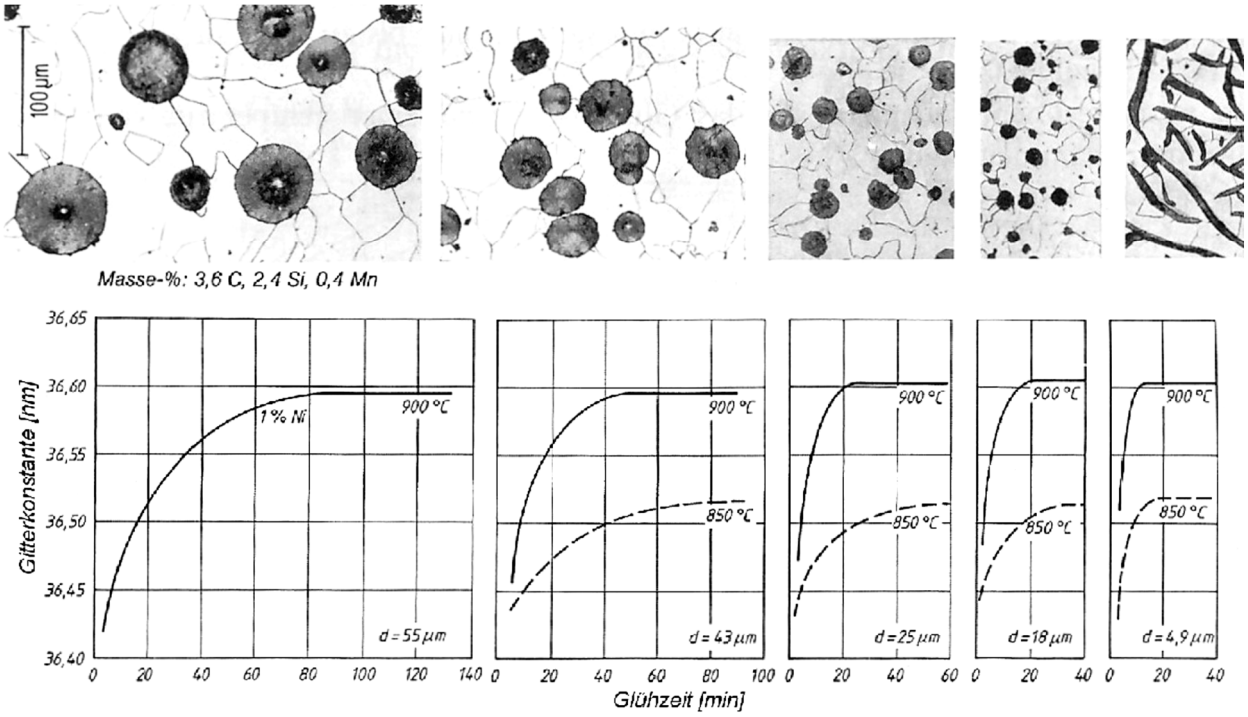
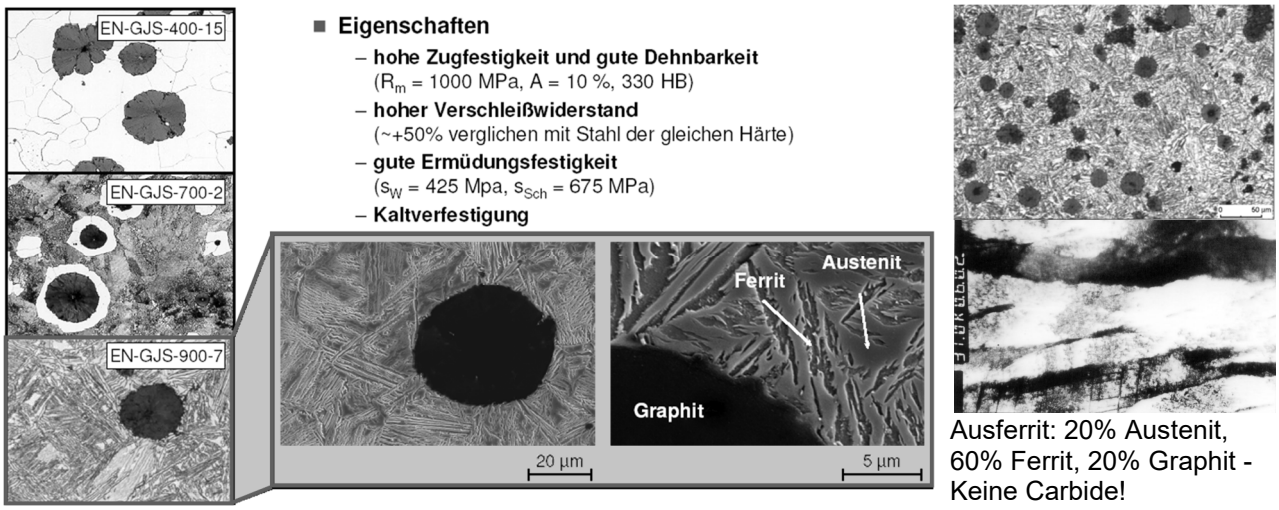



*Abb. 5-15 Einfluss der Graphitausbildung auf die Austenitisierungsdauer*

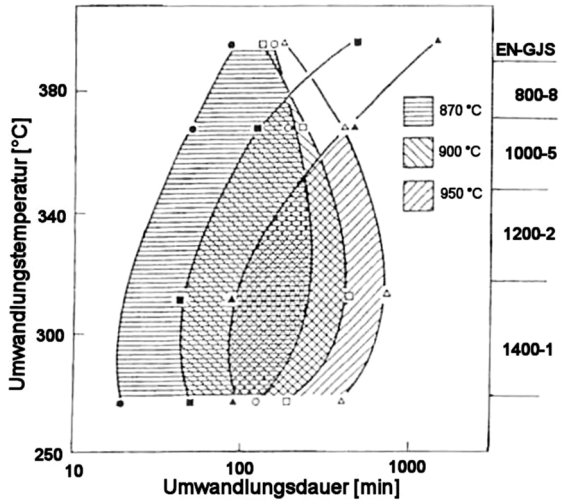
## 5.2.7 ADI-Gusswerkstoffe (Austempern)



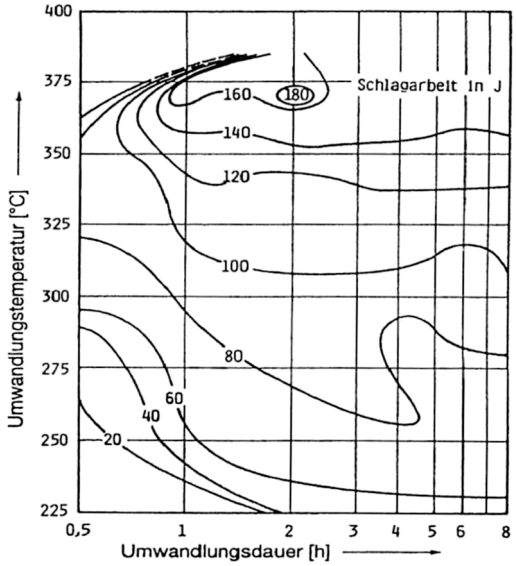



Ausferrit: 20% Austenit, 60% Ferrit, 20% Graphit - Keine Carbide!

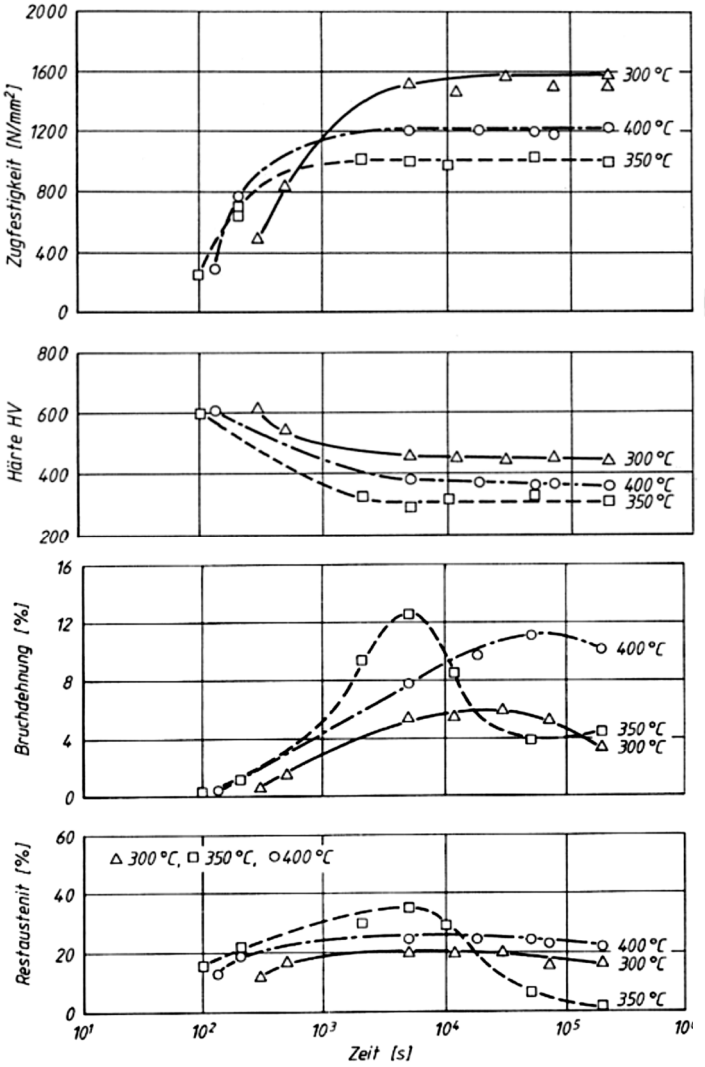
*Abb. 5-16 Eigenschaften und Gefüge des ADI-Werkstoffes*




a) Prozessfenster zur Herstellung von ADI



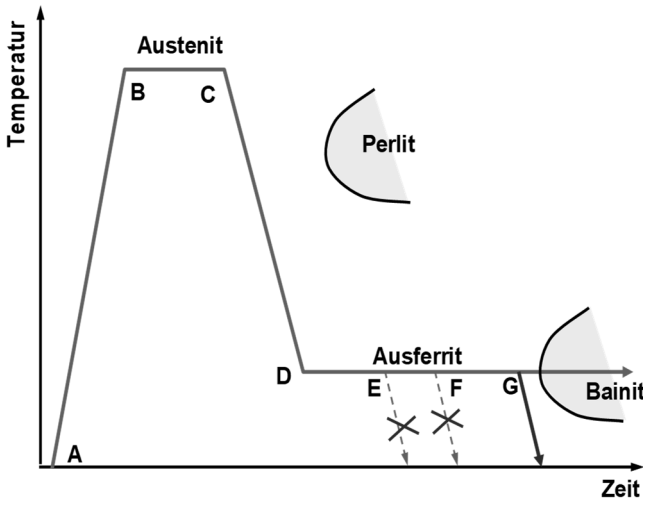

b) Zähigkeit von ADI



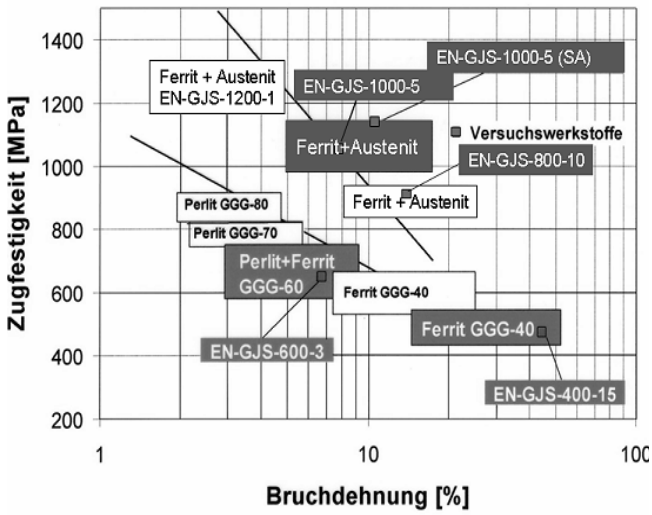

GJS mit 0,53% Ni und 0,17% Mo

c) mechanischen Eigenschaften des ADI

*Abb. 5-17 Einfluss von Umwandlungstemperatur, Haltedauer und Restaustenitgehalt auf die mechanischen Eigenschaften des ADI*




a) T-t-Verlauf [31]




b) Mechanische Kennwerte aus dem Zugversuch

*Abb. 5-18 WBH und Eigenschaften von ADI*

# 6 WÄRMEBEHANDLUNGSTECHNIK

## 6.1 Anforderungen und Klassifikation an Wärmebehandlungsanlagen

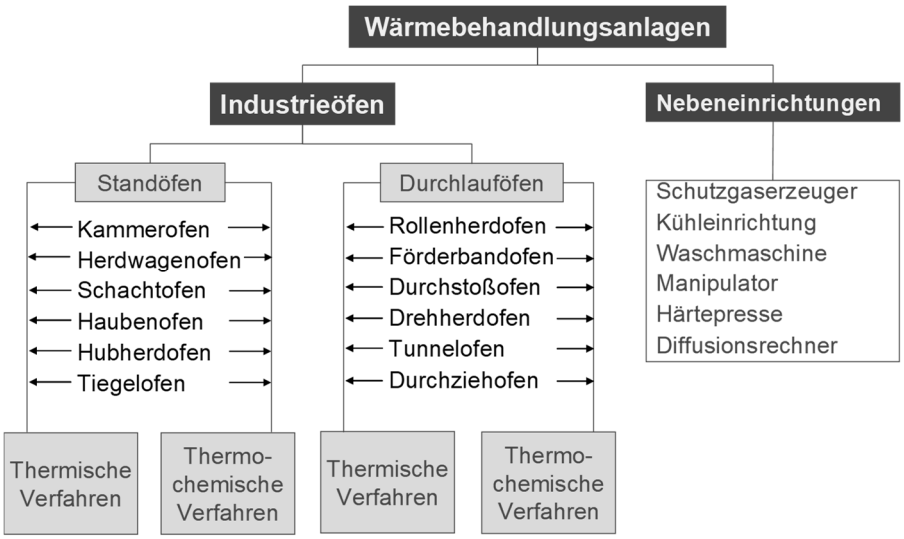
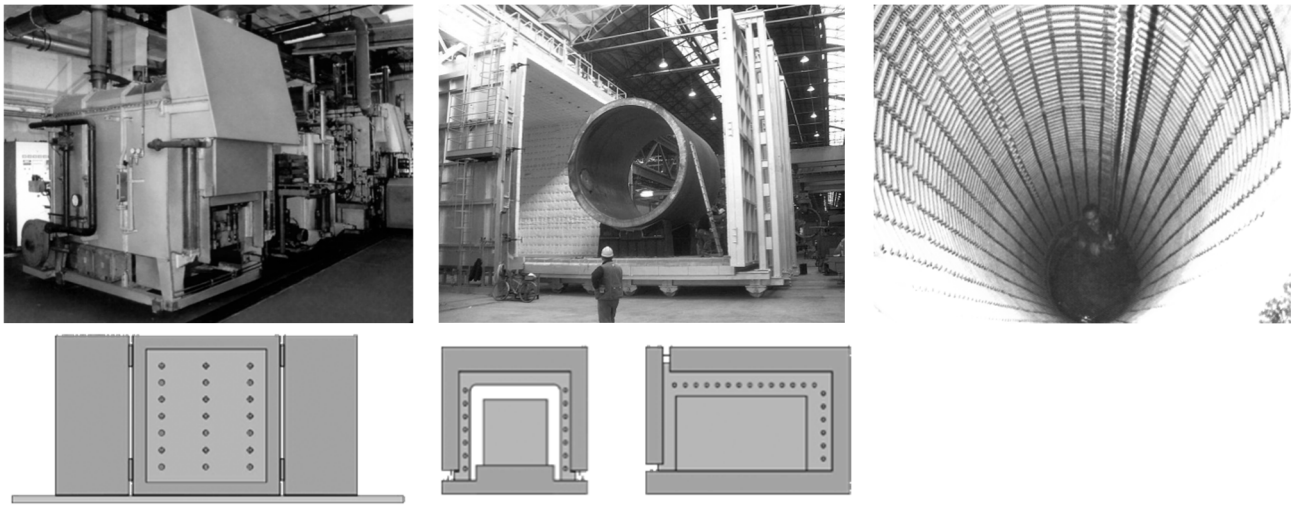
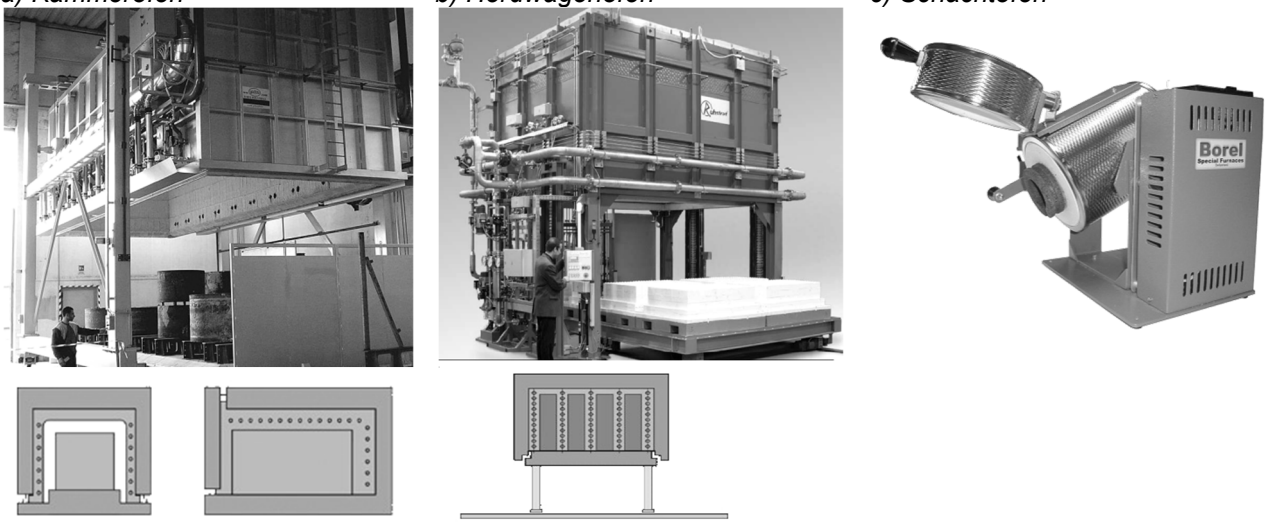



*Abb. 6-1 Wärmebehandlungsanlagen*

## 6.2 Standöfen



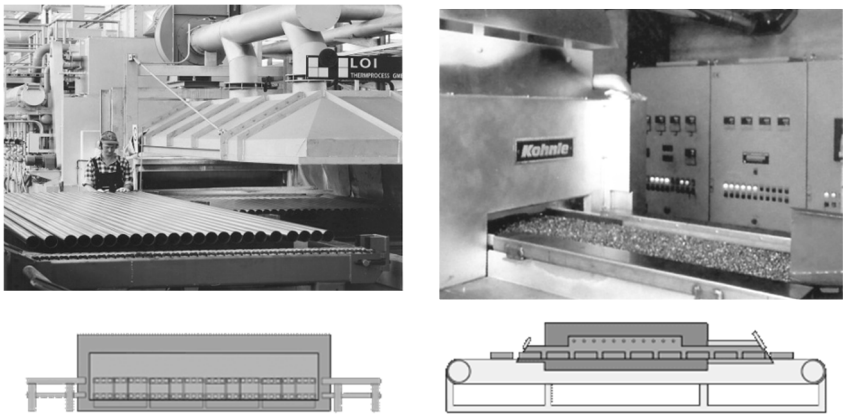
*a) Kammerofen* *b) Herdwagenofen* *c) Schachtofen*



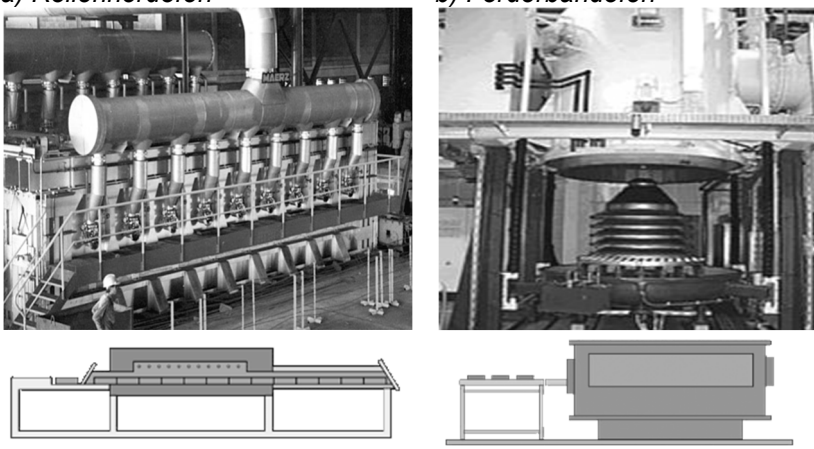

*d) Haubenofen* *e) Hubherdofen* *f) Tiegelofen*

*Abb. 6-2 Bsp. für Standöfen*

## 6.3 Durchlauföfen




*a) Rollenherdofen* *b) Förderbandofen*



*c) Stoßofen* *d) Drehherdofen*

*Abb. 6-3 Bsp. für Durchlauföfen*

## 6.4 Zusatzeinrichtungen

## 6.5 Integration von Wärmebehandlungsanlagen in Fertigungsprozessabläufe

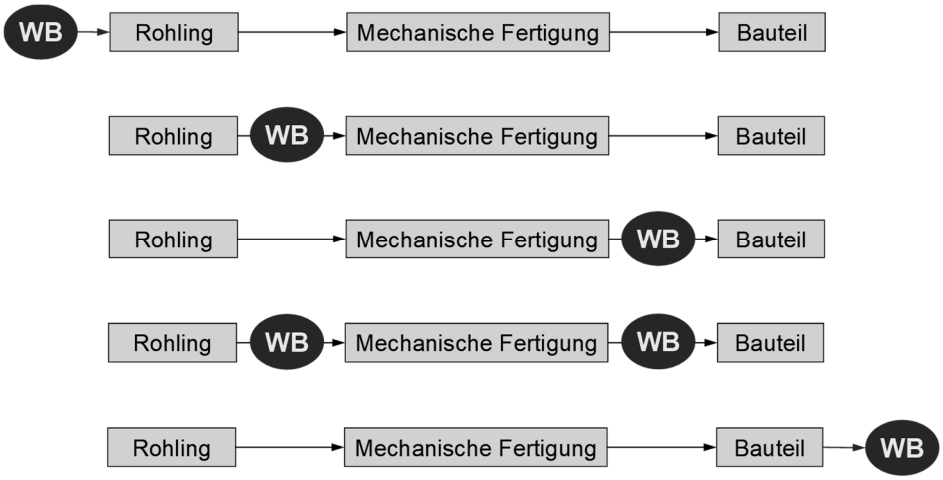
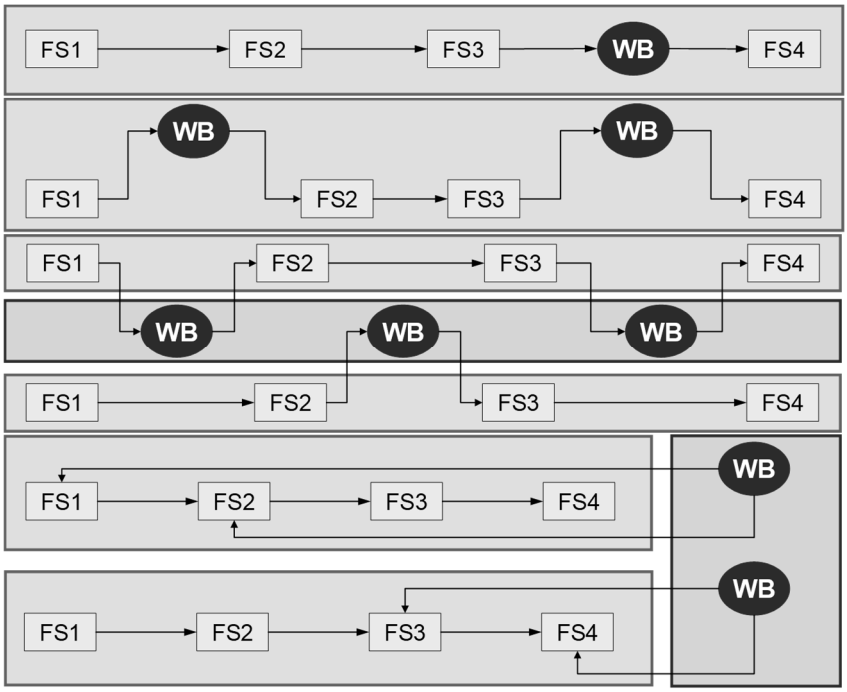



*Abb. 6-4 Möglichkeiten zur Eingliederung der WBH in Fertigungsprozess*




*a) direkte Eingliederung*

*b) Konzentration von WBH-Anlagen*

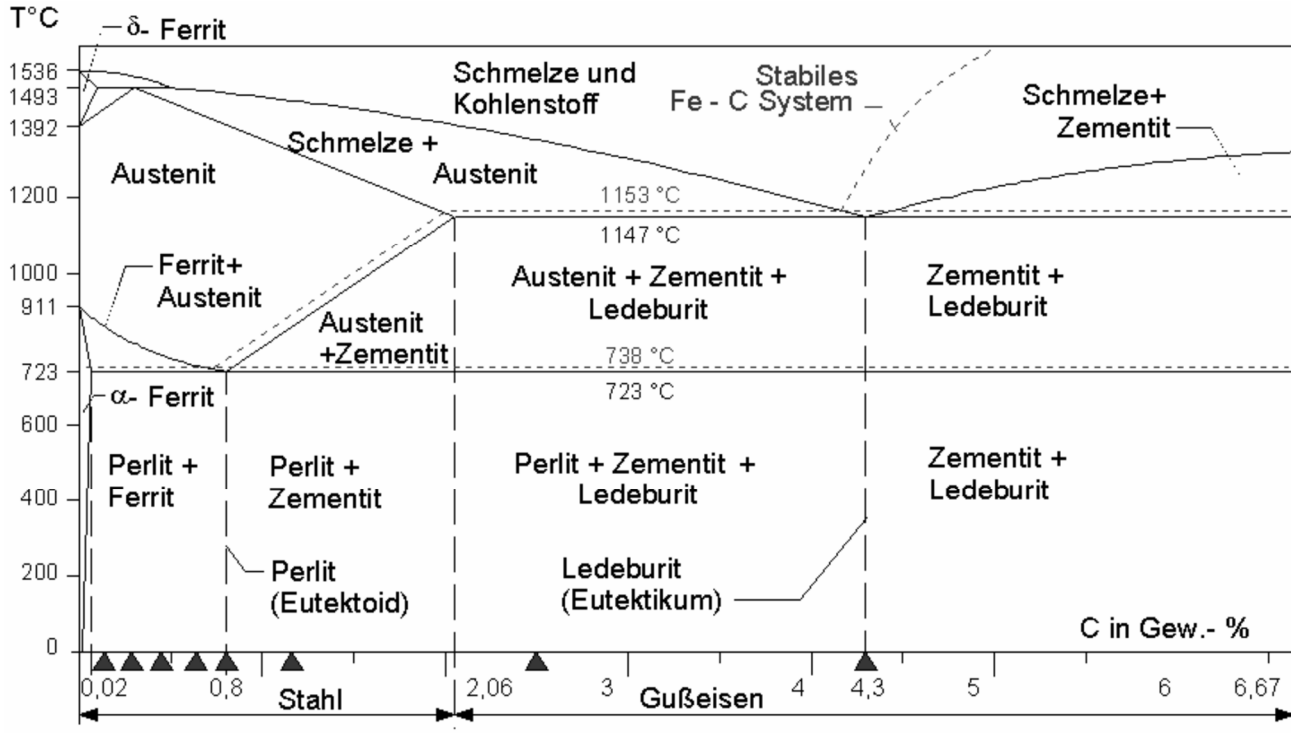
*c) zentrale Einbindung*

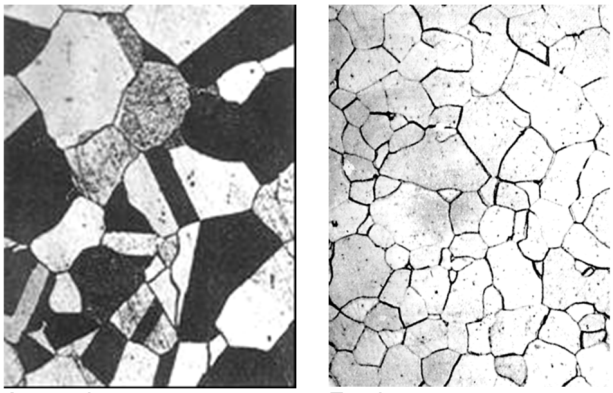
*d) Zentralisierung der WBH (überbetrieblich, -regional)*

*Abb. 6-5 Möglichkeiten zur Eingliederung der WBH in den Fertigungsprozess*

# 7 ANHANG

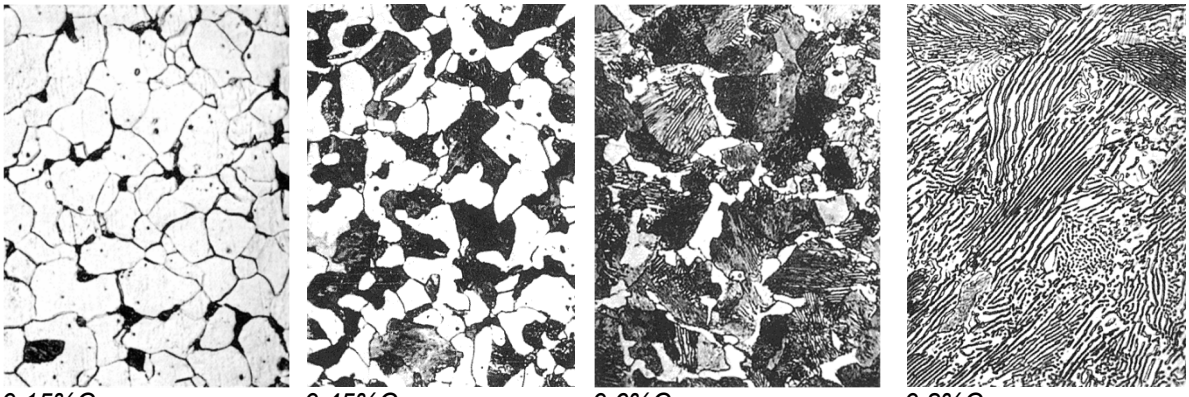
## 7.1 Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm (EKD)



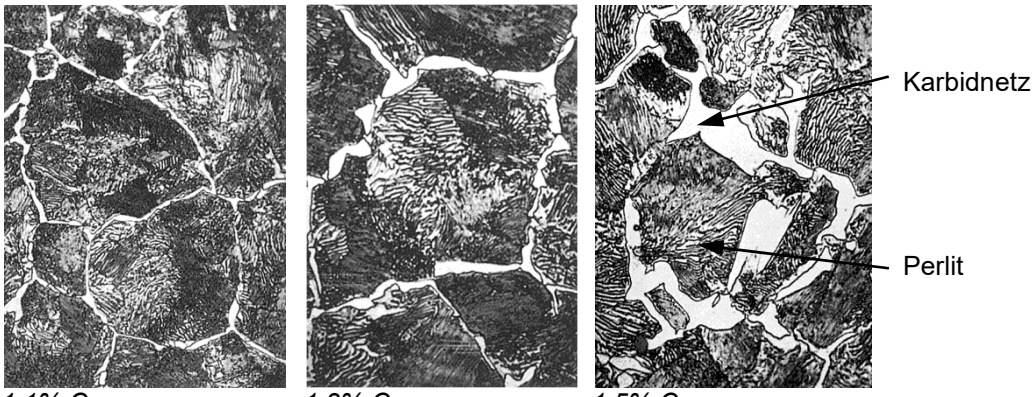
*Austenit* *Ferrit*

*Abb. 7-1 Gefügeausbildung im reinen Eisen*



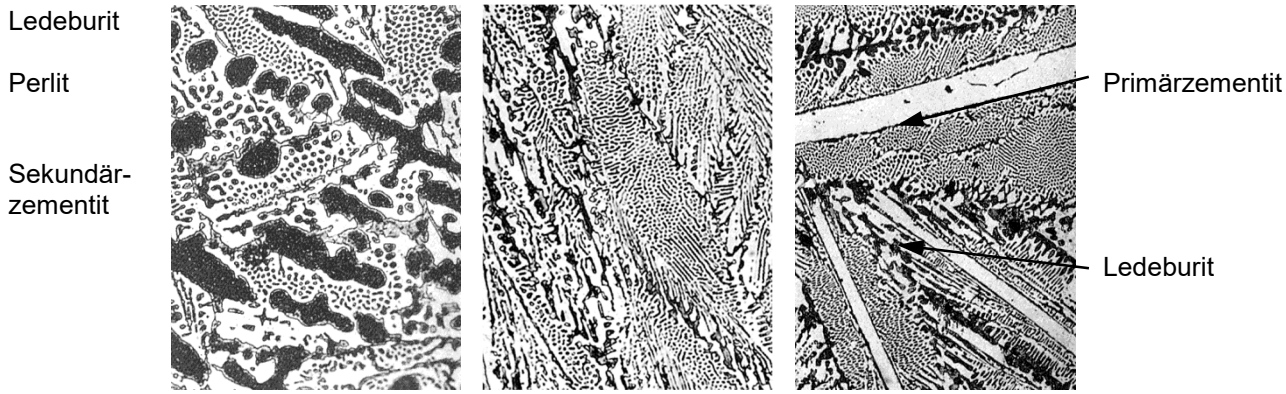
*0,15%C* *0,45%C* *0,6%C* *0,8%C*

*Abb. 7-2 Gefüge in Abhängigkeit vom C-Gehalt (C ≤ 0,8%, untereutektoid, eutektoid)*




*1,1% C* *1,3% C* *1,5% C*

*Abb. 7-3 Gefüge in Abhängigkeit vom C-Gehalt (0,8%C, übereutektoid)*




*3% C untereutektisch* *4,3 % C eutektisch* *5,0 % C übereutektisch*

*Abb. 7-4 Gefügeausbildung des Gusseisens mit C > 2,06%*

# 8 QUELLENVERZEICHNIS

[1] Eckstein, H.- J.: Wärmebehandlung von Stahl. Metallkundliche Grundlagen. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 1969

[2] Eckstein, H.- J.: Technologie der Wärmebehandlung von Stahl. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 2. Auflage, 1987

[3] Liedke, D.: Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen I, Grundlagen und Anwendungen. Renningen: Expert-Verlag, 2007, 7. Auflage, K&S Band 349

[4] Weißbach, W.: Werkstoffkunde. Wiesbaden: Friedrich Viehweg & Sohn Verlag; GWV Fachverlage GmbH, 2007, 15. Auflage

[5] Dilthey, U: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 2, 2006

[6] Spur, G.; Stöferle, T.: Handbuch der Fertigungstechnik. Bd. 4/2: Wärmebehandeln, Carl Hanser Verlag München, 1987

[7] Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle. Verlag Stahleisen mbH. Düsseldorf
Bd. 1 (1954/56/58) Teil 1 und 2, ZTU-Schaubilder
Bd. 2 (1972), ZTU-Schaubilder (Einsatzstähle)
Bd. 3 (1973), ZTA-Schaubilder
Bd. 4 (1976), ZTA-Schaubilder

[8] Grosch, J.: Grundlagen der Technischen Wärmebehandlung von Stahl. Werkstofftechnische Verlagsgesellschaft mbH. Karlsruhe, 1981

[9] Simon, H. u. M. Thoma: Angewandte Oberflächentechnik für metallische Werkstoffe. Carl Hanser Verlag München, 1985

[10] Frohberg, M. G.: Thermodynamik für Werkstoffingenieure und Metallurgen, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie GmbH Leipzig

[11] Houdremont, E.: Handbuch der Sonderstahlkunde. 3. verbesserte Auflage, Bd. 1 u. 2, Springer-Verlag, 1956

[12] Crafts, W. u. J. L. Lamont: Härtbarkeit und Auswahl von Stählen. Springer-Verlag 1954

[13] Benkowsky, G.: Induktionserwärmung. Verlag Technik Berlin, 1990

[14] Chatterje-Fischer, R.: Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen – Nitrieren und Nitrocarburieren. Expert-Verlag Sindelfingen, 1986

[15] Mittmeijer, E. J. u. J. Grosch: Nitrieren und Nitrocarburieren. AWT-Tagung Wärmebehandlung, Darmstadt 1991, Berichtsband

[16] Schmitt-Thomas, K. G.: Metallkunde für das Maschinenwesen. 2. Auflage, Springer-Verlag 1990
Bd. 1: Aufbau und Eigenschaften metallischer Werkstoffe
Bd. 2: Gleichgewichts- und Ungleichgewichtszustände

[17] Spur, G. u. Stöferle: Handbuch der Fertigungstechnik. Bd. 4/1: Abtragen, Beschichten. Carl Hanser Verlag 1987

[18] DIN-Taschenbuch 218: Werkstofftechnologie 1, Wärmebehandlungstechnik. Beuth Verlag GmbH, 4. Auflage 2001

[19] Gräfen, H. (Hrsg): Lexikon Werkstofftechnik. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1991

[20] Pursche, G. (Hrsg.): Oberflächenschutz vor Verschleiß. Verlag Technik Berlin, 1990

[21] Läpple, V.: Wärmebehandlung des Stahls. Grundlagen Verfahren und Werkstoffe. Verlag Europa – Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. 8. Auflage, 2003

[22] VdEh (Hrsg.): Werkstoffkunde Stahl. Springer-Verlag 1985
Bd. 1: Grundlagen
Bd. 2: Anwendung

[23] Schumann, H.: Metallografie. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 14. Auflage, 2005

[24] Merkel, M.; Thomas, K.-H.: Taschenbuch der Werkstoffe. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 5. Auflage, 2000

[25] Beyer, B.: Werkstoffkunde. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 1971

[26] Hougardy, H.P.: Umwandlung und Gefüge unlegierter Stähle. Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 2. Aufl., 1990

[27] Macherauch: Praktikum der Werkstoffkunde

[28] Zschech, E.: HTM 51(1996), 3

[29] Ashby, M.F.; Jones, D.R.H.: Engineering Materials 2, 1998

[30] ASM Handbook: Volume 4: Heat Treating. ASM International, Materials Park, Ohio, USA, 1991

[31] Kovacs, B. V.: Gefüge und Bezeichnungen von bainitischem Gusseisen mit Kugelgraphit. Konstruieren + gies-sen 21(1996)3, S. 4-9

[32] Mg-Taschenbuch

[33] Gerber, Wyss: v. Roll-Mitteilungen 7(1948) S. 13-49

[34] Läpple, V.; Drube, B.; Wittke, G.; Kammer, C.: Werkstofftechnik Maschinenbau – Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen. Verlag Europa –Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co., 1. Auflage, 2007

[35] Kunst, H.; Schaaber, O.: Borieren von Eisenwerkstoffen und Titan. In: Härterei-Technische-Mitteilungen 26(1971), 1, S. 18-20

[36] Liedtke, D.; Jönsson, R.: Wärmebehandlung. Kontakt Studium, Band 349, 1991

[37] Wolters, D.: konstruieren + gießen 21(1996), 2

[38] Wiegand, H. et.al.: Gießerei, Techn.-Wiss.-Beihefte 12(1960)

[39] Aluminium Taschenbuch. Aluminium-Verlag Düsseldorf, 15. Auflage 1998/99