



JOHANN GROSCH  
ARNIM KÜPER  
FRANK TRAUTMANN



# Einsatzhärten

Grundlagen – Verfahren –  
Anwendung – Eigenschaften  
einsatzgehärteter Gefüge  
und Bauteile

5., überarbeitete Auflage

expert ›

Einsatzhärten



Johann Grosch / Arnim Küper /  
Frank Trautmann

# Einsatzhärten

Grundlagen – Verfahren – Anwendung –  
Eigenschaften einsatzgehärteter Gefüge und  
Bauteile

5., überarbeitete Auflage



Kontakt & Studium

Band 656

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Wilfried J. Bartz

Dipl.-Ing. Hans-Joachim Mesenholl

**expert** ›

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

© 2019 · expert verlag GmbH  
Dischingerweg 5 · D-72070 Tübingen

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

Alle Informationen in diesem Buch wurden mit großer Sorgfalt erstellt. Fehler können dennoch nicht völlig ausgeschlossen werden. Weder Verlag noch Autoren oder Herausgeber übernehmen deshalb eine Gewährleistung für die Korrektheit des Inhaltes und haften nicht für fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Internet: [www.expertverlag.de](http://www.expertverlag.de)  
eMail: [info@verlag.expert](mailto:info@verlag.expert)

Printed in Germany

ISBN 978-3-8169-3468-4 (Print)  
ISBN 978-3-8169-8468-9 (ePDF)

## Vorwort

---

Durch Einsatzhärten wird ein hartes martensitisches Randgefüge mit einem weicheren Kerngefüge verbunden. Das harte Randgefüge ergibt einen hohen Widerstand gegen abrasiven und adhäsiven Verschleißangriff und, zusammen mit den bei der martensitischen Umwandlung des Randgefüges dort entstandenen Druckeigenspannungen, hohe Schwing- und Wälzfestigkeiten. Das weiche Kerngefüge mildert das spröde Verhalten des Randgefüges und sichert eine hinreichende Bauteilzähigkeit. Insgesamt werden in *einem* Bauteil Eigenschaften erreicht, die mit keinem anderen Behandlungsverfahren zugänglich sind. Einsatzhärten ist damit ein Wärmebehandlungsverfahren, das höchstbeanspruchten Bauteilen ihre Gebrauchseigenschaften verleiht.

Für das Aufkohlen, dem ersten Schritt des Einsatzhärtens, können Spendermedien für den Kohlenstoff in verschiedenen Aggregatzuständen – Gas und Plasma, Salz, Pulver – verwendet werden, entsprechend vielfältig sind die verfügbaren Verfahrensvarianten, eine durch Randkohlenstoffgehalt und Aufkohlungstiefe beschriebene Kohlenstoffverlaufskurve einzustellen. Die Härteverlaufskurve und die Eigenspannungsverteilung bestimmen die Eigenschaften, wesentliche Einflußgrößen sind Randhärte und Einsatzhärtungstiefe, die von der Kohlenstoffverlaufskurve und der Härthbarkeit des Werkstoffs abhängig sind. Verfahrensvarianten und Einflußgrößen ermöglichen für verschiedenste Anwendungen technisch und wirtschaftlich beste Lösungen, wenn das Einsatzhärten hinreichend gut beherrscht wird. Das vorliegende Buch soll dazu beitragen.

Das Buch ist aus einem Seminar an der Technischen Akademie Esslingen entstanden. Der für einen Lehrgang zweckmäßige schrittweise Aufbau vom Aufkohlen und der Verfahrenstechnik über die nach dem Härten vorliegenden Gefüge und Eigenspannungen bis zu den Eigenschaften einsatzgehärteter Bauteile wurde ebenso beibehalten wie der anhand des in der Anwendung bestätigten und erforderlichen Kenntnisstands ausgewählte und abgegrenzte Inhalt.

Johann Grosch



# Inhaltsverzeichnis

---

## Vorwort

<b>1</b>	<b>Einführung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen des Aufkohlens .....</b>	<b>5</b>
2.1	Aufkohlen in Gasatmosphären .....	5
2.1.1	Gasgleichgewichte .....	5
2.1.2	Diffusion des Kohlenstoffs im Stahl .....	10
2.1.3	Zur Kinetik der Aufkohlung .....	12
2.2	Carbonitrieren .....	15
2.3	Aufkohlen in Salzbädern .....	18
2.4	Schrifttum .....	19
<b>3</b>	<b>Verfahrens- und Anlagentechnik des Einsatzhärtens .....</b>	<b>22</b>
	<i>Arnim Küper</i>	
3.1	Verfahrensablauf .....	22
3.1.1	Werkstückvorbereitung .....	23
3.1.2	Aufkohlen .....	24
3.1.3	Härten .....	26
3.1.4	Tiefkühlen .....	29
3.1.5	Anlassen .....	29
3.1.6	Carbonitrieren .....	30
3.2	Einsatzhärtens mit Gasaufkohlung bei Normaldruck .....	30
3.2.1	Die Prozessführung und -überwachung des Gasaufkohlens bei Normaldruck .....	30
3.2.1.1	Direkte Messmethoden .....	31
3.2.1.2	Indirekte kontinuierliche Messmethoden – C-Pegelregelung .....	32
3.2.1.3	Kohlenstoffdiffusion und Aufkohlungstiefe .....	38
3.2.2	Die Anlagentechnik des Einsatzhärtens mit Gasaufkohlung .....	39
3.2.2.1	Erzeugung der Aufkohlungsatmosphären .....	39
3.2.2.2	Die Ofentechnologie des Gasaufkohlens .....	42
3.2.2.3	Abschrecken .....	48
3.2.2.4	Anlassen .....	50
3.3	Gasaufkohlen in Atmosphären bei Unterdruck .....	50
3.3.1	Grundlagen des Gasaufkohlens bei Unterdruck .....	51
3.3.2	Die Prozessführung und -überwachung des Gasaufkohlens bei Unterdruck .....	53
3.3.3	Anlagentechnik des Gasaufkohlens bei Unterdruck .....	54
3.3.4	Plasmaunterstütztes Aufkohlen .....	56
3.4	Schrifttum .....	60

<b>4</b>	<b>Aufkohlen in Salzschnelzen .....</b>	<b>61</b>
	<i>Frank Trautmann</i>	
4.1	Grundlagen .....	61
4.2	Verwendete Salze .....	63
4.3	Verfahrensablauf .....	66
4.4	Anlagentechnik .....	69
4.5	Anwendungsbeispiele .....	73
4.6	Entsorgung / Umweltschutz .....	74
4.7	Aufkohlen austenitischer, korrosionsbeständiger Stähle nach dem Durofer® SH Verfahren .....	75
4.8	Verfahrensvor- und -nachteile .....	78
4.9	Zusammenfassung .....	78
4.10	Schrifttum .....	79
<b>5</b>	<b>Einsatzgehärtete Gefüge und Werkstoffauswahl .....</b>	<b>81</b>
5.1	Martensit und Restaustenit .....	81
5.2	Unvermeidbare und unerwünschte Gefügeanteile und Gefügestände .....	96
5.2.1	Randoxidation .....	96
5.2.2	Carbide .....	100
5.2.3	Einschlüsse und Seigerungen .....	102
5.3	Werkstoffe .....	104
5.4	Schrifttum .....	105
<b>6</b>	<b>Eigenspannungen und Verzug .....</b>	<b>107</b>
6.1	Gemeinsame Grundlagen .....	107
6.2	Eigenspannungen .....	114
6.3	Maß- und Formänderungen .....	120
6.4	Schrifttum .....	127
<b>7</b>	<b>Schwing- und Wälzfestigkeit .....</b>	<b>129</b>
7.1	Ermüdungsverhalten .....	129
7.2	Schwingfestigkeit einsatzgehärteter Gefüge .....	134
7.3	Wälz(ermüdungs)festigkeit einsatzgehärteter Gefüge .....	142
7.4	Schrifttum .....	148
<b>8</b>	<b>Zähigkeit und Duktilität einsatzgehärteter Bauteile und Gefüge .....</b>	<b>150</b>
8.1	Einleitung .....	150
8.2	Zähigkeit des einsatzgehärteten (Verbund-)Gefüges .....	151
8.3	Duktilität des einsatzgehärteten Randgefüges .....	155
8.4	Schlussfolgerungen .....	162
8.5	Schrifttum .....	163
	<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>164</b>
	<b>Die Autoren .....</b>	<b>167</b>

# 1 Einführung

---

Einsatzhärten gehört zu den Verfahren der Randschichtwärmebehandlung, mit denen in Bauteilen aus metallischen Werkstoffen ein gradierter Gefügebau mit hartem Randgefüge und weicherem Kerngefüge eingestellt wird. Beim Randschichthärten bleibt die chemische Zusammensetzung des Gefüges unverändert, bei den thermochemischen Verfahren Borieren, Einsatzhärten und Nitrieren/ Nitrocarburieren werden entsprechende Legierungselemente in das Randgefüge eingebracht. Der gradierte Gefügebau verbessert Bauteileigenschaften wie Schwing- und Wälzfestigkeit und Verschleißwiderstand. Im weicheren Gefügezustand vor dem Einsatzhärten kann wirtschaftlicher spanend und spanlos gefertigt werden.

Durch Einsatzhärten, nach DIN EN 10052 als Aufkohlen mit anschließender, zur Härtung führenden Behandlung beschrieben, erhalten vergleichsweise weiche Bauteile eine bezogen auf die Bauteilabmessungen meistens dünne harte Randschicht, indem das Randgefüge von Stählen mit (Kern-) Kohlenstoffgehalten üblicherweise zwischen 0.15 – 0.25% auf Kohlenstoffgehalte im Bereich von 0.7 – 0.9(1.0) % aufgekohlt und martensitisch umgewandelt wird. Dabei entsteht ein gradiertes Gefüge und, bedingt durch die Volumenänderungen bei der martensitischen Umwandlung, eine Eigenspannungsverteilung mit Druckeigenspannungen im Randgefüge. Die Bauteileigenschaften Schwing- und Wälzfestigkeit und Zähigkeit erreichen durch die überlagerte Wirkung beider Einflussgrößen die höchsten in *einem* Bauteil möglichen Werte.

Einsatzhärten umfasst damit die Verfahrensschritte *Aufkohlen* mit dem Ergebnis Kohlenstoffverlaufskurve (Bild 1a) und *Härten* mit dem Ergebnis Härteverlaufskurve (Bild 1b) und Eigenspannungsverteilung (Bild 1c). Kohlenstoff diffundiert am gesamten Bauteil grundsätzlich gleichmäßig, damit werden an allen Stellen gleiche Gefüge und Härteverlaufskurven möglich (Bild 2). Die Aufkohlung wird durch Glühen des Stahls bei Temperaturen im homogenen Austenitgebiet in bei diesen Temperaturen kohlenstoffabgebenden Medien erreicht, die Aufkohlungsdauer wird vorrangig von der gewünschten Aufkohlungstiefe bestimmt.

Nach den kohlenstoffabgebenden Medien (den Kohlungsmitteln) sind die verwendeten Verfahren Pulveraufkohlen (feste Kohlungsmittel), Salzbadlaufkohlen (flüssige Kohlungsmittel) und Gas- und Plasmaaufkohlen (gasförmige Kohlungsmittel) eingeteilt. Das Pulveraufkohlen ist das älteste Verfahren, das bereits im frühen Mittelalter als Pastenaufkohlung bei der Feilenherstellung verwendet wurde. Nach eher exotischen anmutenden (und erfolgreichen) Versuchen zur Aufkohlung mit Diamanten zum Ende des 18. Jahrhunderts wurden etwa hundert Jahre später gezielte Untersuchungen (z.B. von Mannesmann 1879) zum Aufkohlen mit Pulvermischungen aus Holzkohle und Bariumcarbonat durchgeführt. Mit Gasen wurde zu Beginn des 19. Jahrhunderts experimentiert (1824 mit Ölgas; 1834 mit Leuchtgas) und später mit Leuchtgas industriell aufgekohlt. Die thermodynamischen und diffusionstheoretischen Grundlagen der Gasaufkohlung wurden ab der Mitte des 20. Jahrhunderts erarbeitet und, nachdem geeignete Messgeräte und Rechner verfügbar wurden, zur heutigen rechnergesteuerten Verfahrensführung umgesetzt. Flüssige Kohlungsmittel wie Blutlaugensalz wurden

zuerst in den USA verwendet, die Salzbadaufohlung wurde ab etwa 1930 vor allem in Deutschland entwickelt. Die Unterdruckverfahren werden seit etwa 15 Jahren erfolgreich verwendet.

Vom Pulveraufkohlen, heute nur noch selten durchgeführt, stammt der Begriff Einsatzhärten: Die Teile werden zusammen mit dem Kohlungspulver in einen Kasten gepackt und dieser in den Ofen *eingesetzt*.

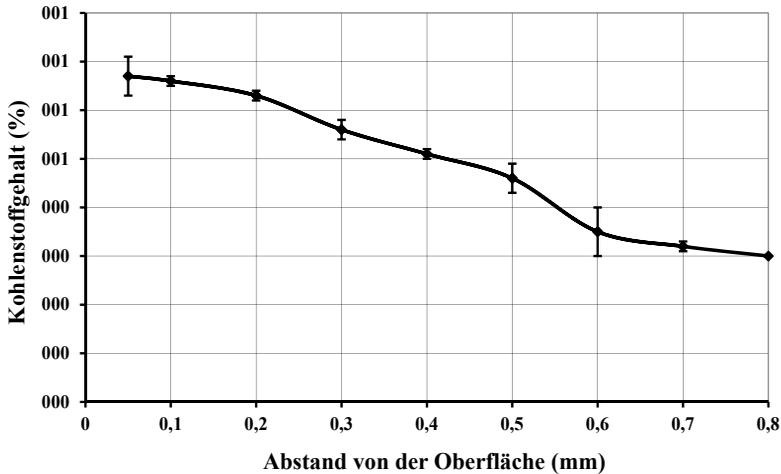


Bild 1a: Kohlenstoffverlaufskurve

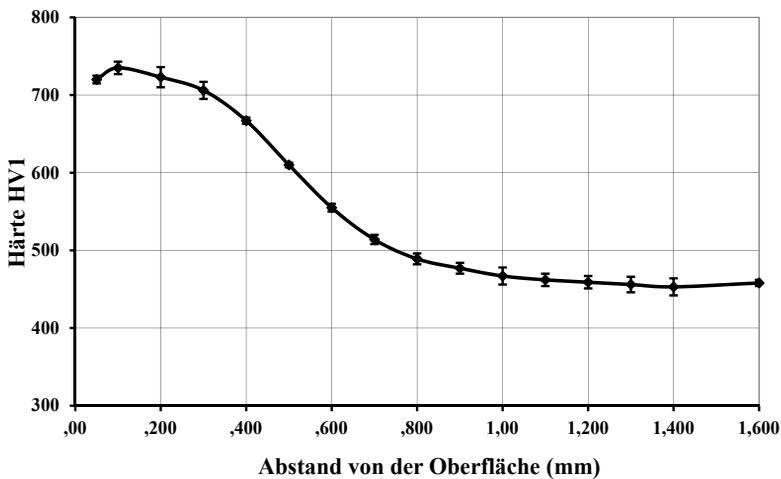


Bild 1b: Härteverlaufskurve

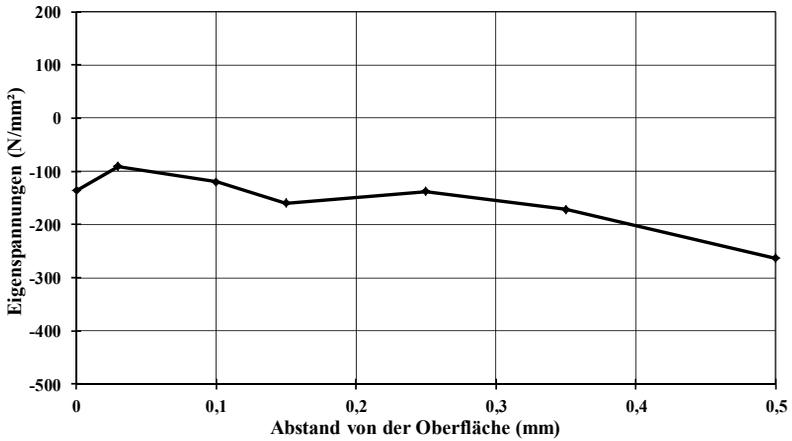


Bild 1c: Eigenspannungsverteilung

Bild 1: Ergebnisse des Einsatzhärtens. Stahl 14NiCr14; bei 925°C gasaufgeholt/Öl; 2 Stunden bei 180°C angelassen. Wärmebehandlungsvorgabe: 0,7% Randkohlenstoffgehalt, 1mm Einsatzhärtungstiefe.

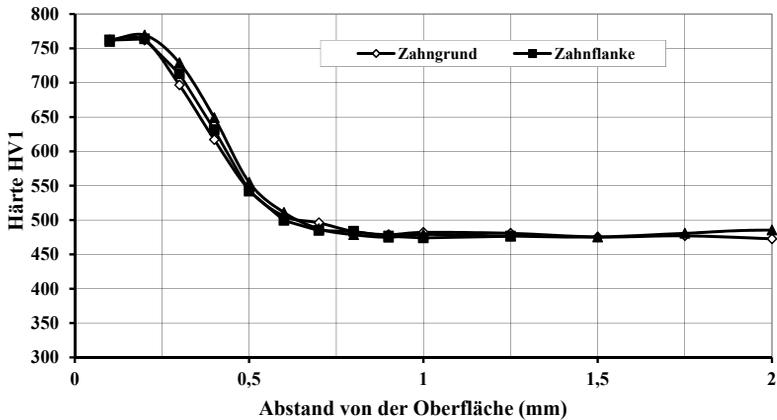


Bild 2: Härteverlaufskurven an einem Zahn. Stahl 20MnCr5, bei 900°C gasaufgeholt, 830°C/Öl(60°C)

## Schrifttum

- [1] H. Berns: Die Geschichte des Härtens. Herausgeber Härterei Gerster AG, Egerkingen 2002
- [2] F. Reiser: Das Härten des Stahles. Verlag Arthur Felix, Leipzig. (zwischen 1880 und 1913 in 6 Auflagen erschienen).
- [3] H. Brearley: The Case Hardening of Steel. Ilifer, London 1914.  
Deutsche Fassung: R. Schäfer: Die Einsatzhärtung von Eisen und Stahl. Springer Verlag, Berlin 1926

## 2 Grundlagen des Aufkohlens

---

### 2.1 Aufkohlen in Gasatmosphären

Die Gasaufkohlung kann durch die Teilschritte [1,2]

Vorgänge in der Gasphase

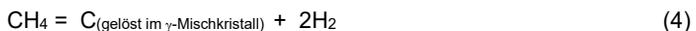
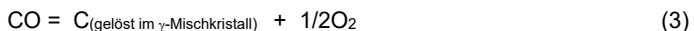
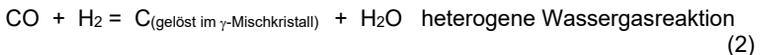
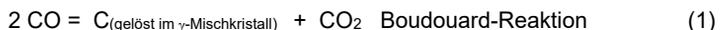
Übergang von Kohlenstoff in der Grenzschicht aus der Gasphase in den Stahl

Diffusion des Kohlenstoffs im Stahl

beschrieben werden. Die Vorgänge in der Gasphase und in der Grenzschicht können anschaulich zunächst als Gleichgewichtszustände behandelt werden [3-9], der gezielte Übergang zum Ungleichgewicht führt zur Aufkohlung. Diese Betrachtungsweise ist zulässig, weil in der technischen Durchführung des Aufkohlens meistens die Diffusion im Stahl geschwindigkeitsbestimmend und viel langsamer als die beiden anderen Teilschritte ist. Zu den Aufkohlungsverfahren, bei denen diese Voraussetzung nicht mehr zutrifft, gehören die Unterdruckverfahren, die im nächsten Kapitel besprochen werden<sup>1</sup>.

#### 2.1.1 Gasgleichgewichte

Als gasförmige Kohlungsmittel werden vornehmlich Kohlenwasserstoffe wie Methan, Propan, Äthylen, Acetylen [5-12] sowie Alkohole und Alkoholderivate (vor allem Methanol [13]) sowie organische Kohlenstoffverbindungen [14] verwendet. Diese Kohlungsmittel zerfallen bei Aufkohlungstemperatur in die Bestandteile Kohlenmonoxid CO und Wasserstoff H<sub>2</sub> mit geringen Anteilen an Kohlendioxid CO<sub>2</sub>, Wasserdampf H<sub>2</sub>O, Sauerstoff O<sub>2</sub> und Methan CH<sub>4</sub>, wobei in der Regel feste Verhältnisse von CO und H<sub>2</sub> mit Stickstoff N<sub>2</sub> verdünnt als Trägergase extern aufbereitet oder im Ofenraum entstehend verwendet werden. Ein solches Trägergas besitzt über die Reaktionen



---

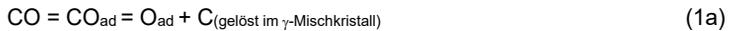
<sup>1</sup> Kapitel 2: Verfahrens- und Anlagentechnik des Einsatzhärtens

und dem homogenen Wassergasgleichgewicht



, mit dem das Reaktionsprodukt Kohlendioxid wieder abgebaut wird, eine aufkohlende oder entkohlende Wirkung, d.h., nach hinreichend langer Haltedauer bei Behandlungstemperatur wird ein Gleichgewicht zwischen Aufkohlung und Entkohlung erreicht, dessen Kohlenstoffgehalt als Kohlenstoffpegel (C-Pegel  $C_P$ ) [15] beschrieben wird und mit der Folienprobe ermittelt werden kann [16]. (Vereinbarungsgemäß ist der Kohlenstoffpegel derjenige Kohlenstoffgehalt in Masseprozent, den eine Probe aus Reineisen innerhalb des homogenen Austenitgebiets bei einer gegebenen Temperatur im Gleichgewicht mit dem umgebenden Medium annimmt).

Die Boudouard-Reaktion (1) verläuft in zwei Teilschritten [8,11,13]



Die heterogene Wassergasreaktion (2) verläuft ebenfalls in zwei Schritten [8,11,13]



Kohlenmonoxid CO wird an der Bauteiloberfläche adsorbiert, zerfällt in adsorbierten Sauerstoff  $\text{O}_{\text{ad}}$  und atomaren Kohlenstoff, der in das Randgefüge diffundiert. Der adsorbierte Sauerstoff reagiert mit CO zu  $\text{CO}_2$  (1b) oder mit  $\text{H}_2$  zu Wasserdampf (2b), die Bauteiloberfläche bleibt dadurch reaktionsfähig. Die Reaktion (2b) ist temperaturabhängig drei- bis viermal schneller als die Reaktion (1b). Die heterogene Wassergasreaktion bestimmt damit die Geschwindigkeit der Aufkohlung. Die Reaktionen (1b) und (2b) sind im homogenen Wassergasgleichgewicht (5) zusammengefasst. Die Reaktion mit Methan (4) ist etwa 2 Größenordnungen langsamer als die Reaktionen 1 und 2 und trägt daher unter Gleichgewichtsbedingungen nur wenig zur Aufkohlung bei. Methan zerfällt im Plasma wesentlich schneller, so dass beim Plasmaaufkohlen mit Methan gearbeitet wird [17]. Beim Unterdruckaufkohlen [9,11] wird insbesondere beim Aufkohlen schlanker Bohrungen vorteilhaft mit Acetylen  $\text{C}_2\text{H}_2$  gearbeitet, das bei Aufkohlungstemperatur nach [18]



reagiert. Beim Plasmaaufkohlen und beim Unterdruckaufkohlen wird kein Gleichgewichtszustand erreicht.

Das Gleichgewicht zwischen Aufkohlung und Entkohlung ist in Bild 1 [nach 4,19] für die Boudouard-Reaktion gegen reinen Kohlenstoff abhängig von Druck und Temperatur dargestellt. Das Gleichgewicht kann mit der Massenwirkungskonstanten

$$\log K_B = \log \frac{p_{CO}^2}{p_{CO_2} p_C} = \log \frac{p_{CO}^2}{p_{CO_2}} \quad (7)$$

definiert werden, welche die Gaskonzentrationen als jeweilige Partialdrücke und die Kohlenstoffkonzentration als Dampfdruck  $p_c^0$  des reinen Kohlenstoffs (gleich 1) enthält. Die im Bild 2 gezeigte Gleichgewichtslinie für  $p_{abs} = 0.2$  bar entspräche einem Anteil von 20% Kohlenmonoxid im Trägergas.

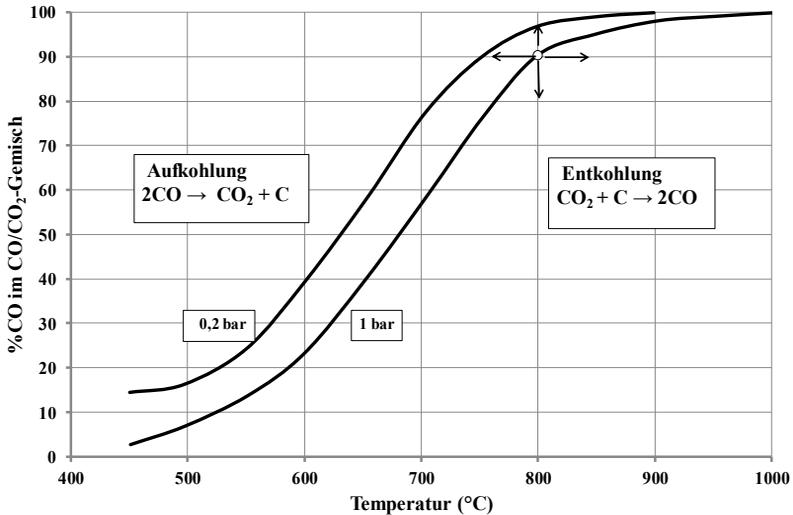


Bild 1: Boudouard-Gleichgewicht [nach 4,19]

Bei der Aufkohlung von Stahl muss der Einfluss des Kohlenstoffgehalts und der Legierungsanteile des Stahls auf die Kohlenstoffkonzentration durch die Kohlenstoffaktivität  $a_c$  [5] berücksichtigt werden, die als das Verhältnis des Dampfdrucks  $p_c$  des Kohlenstoffs im betrachteten Zustand zum Dampfdruck  $p_c^0$  des reinen Kohlenstoffs definiert ist

$$a_c = \frac{p_c}{p_c^0} \quad (8)$$

und für unlegierte Stähle mit [5,20]

$$\log a_C = \frac{10500}{4.575T} - \frac{3.95 - 0.69C}{4.575} + \frac{C}{0.785C + 21.5} \quad (9)$$

hinreichend genau vereinfacht zu

$$\log a_C = \frac{2300}{T} - 2.21 + 0.15C + \log C \quad (10)$$

berechnet und in Form von Isoaktivitätslinien (Bild 2 [21]) dargestellt werden kann [21,22].

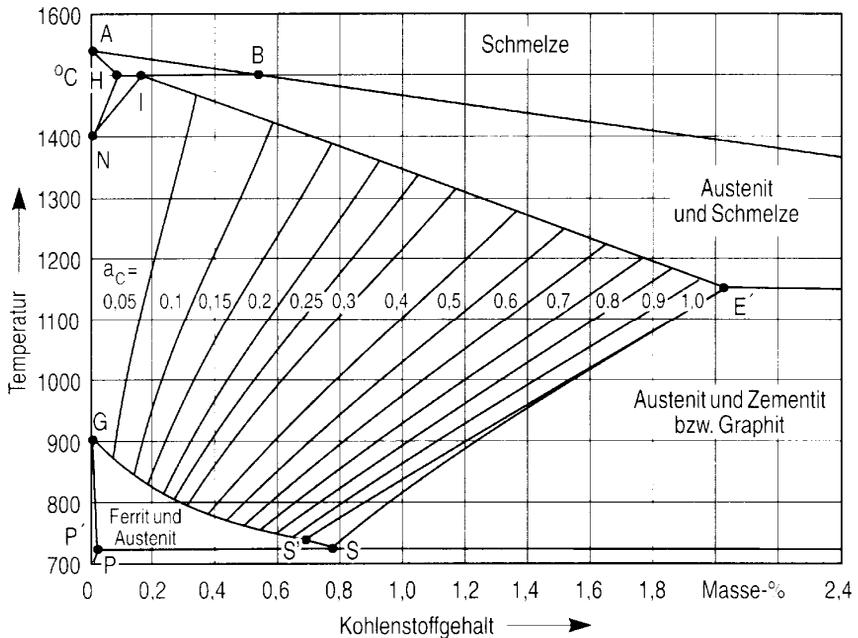


Bild 2: Isoaktivitäten des Kohlenstoffs im  $\gamma$ -Mischkristall [21]

Der Einfluss der Legierungselemente auf die Kohlenstoffaktivität wird durch das Verhältnis des C-Pegels  $C_P$  der Kohlunqatmosphäre (Gleichgewichtskohlenstoffgehalt des reinen Eisens) zum Gleichgewichtskohlenstoffgehalt  $C_L$  des legierten Stahls beschrieben [5,7,23,24]

$$\lg(C_P/C_L) = 0.075 \cdot \%Si + 0.02 \cdot \%Ni - 0.04 \cdot \%Cr - 0.01 \cdot \%Mn - 0.01 \cdot \%Mo \quad (11)$$

(Zahlenwerte nach [23], andere Werte in [5,24]) und mit dem Legierungsfaktor  $f = C_L/C_P$  bei der Berechnung des erforderlichen Kohlenstoffpegels einer KohlunSATmosphäre für einen bestimmten Stahl berücksichtigt. Nickellegierte Einsatzstähle haben Legierungsfaktoren kleiner 1, Chrom-, Chrom-Mangan- und Chrom-Molybdän-legierte Einsatzstähle Legierungsfaktoren größer 1, d.h., beim Aufkohlen dieser Stähle in einer KohlunSATmosphäre mit einem C-Pegel von 1 % ist der Randkohlenstoffgehalt bei nickellegierten Stählen kleiner 1%, der Randkohlenstoffgehalt der übrigen Stähle größer 1 %.

Die Massenwirkungskonstante der Boudouard-Reaktion bei der Aufkohlung von Stahl [5,6,20]

$$\log K_B = \log \frac{p_{CO}^2}{p_{CO_2} a_C} - \frac{8817}{T} + 9.071 \quad (12)$$

(Zahlenwerte nach [20], andere Zahlenwerte bei [5,6]) enthält damit die Kohlenstoffaktivität, die nach

$$\log a_C = \log \frac{p_{CO}^2}{p_{CO_2}} - \frac{8817}{T} - 9.071 \quad (13)$$

abgeleitet werden kann.

Die zugehörigen AufkohlunSGleichgewichte der Boudouard-Reaktion im Austenitgebiet sind in Bild 3 [5] dargestellt.

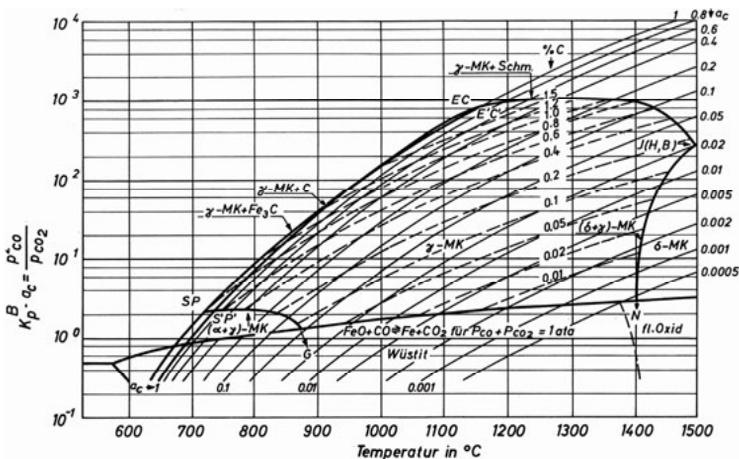


Bild 3: AufkohlunSGleichgewichte für die Reaktion  $2CO \rightarrow CO_2 + C$  [5]