



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
eMail: 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 weiche-
ren 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 Druckeigen-
spannungen, 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 Wärmebehand-
lungsverfahren, 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 Verfahrens-
varianten, eine durch Randkohlenstoffgehalt und Aufkohlungstiefe beschriebene
Kohlenstoffverlaufskurve einzustellen. Die Härteverlaufskurve und die Eigen-
spannungsverteilung bestimmen die Eigenschaften, wesentliche Einflußgrößen sind
Randhärte und Einsatzhärtungstiefe, die von der Kohlenstoffverlaufskurve und der
Härtbarkeit des Werkstoffs abhängig sind. Verfahrensvarianten und Einflußgrößen
ermöglichen für verschiedenste Anwendungen technisch und wirtschaftlich beste Lö-
sungen, wenn das Einsatzhärten hinreichend gut beherrscht wird. Das vorliegende
Buch soll dazu beitragen.

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

Johann Grosch

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

1	Einführung	1
2	Grundlagen des Aufkohlens	5
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
3	Verfahrens- und Anlagentechnik des Einsatzhärtens	22
	<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

4	Aufkohlen in Salzschnelzen	61
	<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
5	Einsatzgehärtete Gefüge und Werkstoffauswahl	81
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
6	Eigenspannungen und Verzug	107
6.1	Gemeinsame Grundlagen	107
6.2	Eigenspannungen	114
6.3	Maß- und Formänderungen	120
6.4	Schrifttum	127
7	Schwing- und Wälzfestigkeit	129
7.1	Ermüdungsverhalten	129
7.2	Schwingfestigkeit einsatzgehärteter Gefüge	134
7.3	Wälz(ermüdungs)festigkeit einsatzgehärteter Gefüge	142
7.4	Schrifttum	148
8	Zähigkeit und Duktilität einsatzgehärteter Bauteile und Gefüge	150
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
	Stichwortverzeichnis	164
	Die Autoren	167

Einsatzhärten gehört zu den Verfahren der Randschichtwärmebehandlung, mit denen in Bauteilen aus metallischen Werkstoffen ein gradierter Gefügeaufbau 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 Gefügeaufbau 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) % aufgekühlt 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), Salzbadtaufkohlen (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 aufgekühlt. 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 Pulveraufohlen, heute nur noch selten durchgeföhrt, stammt der Begriff Einsatzhärten: Die Teile werden zusammen mit dem Kohlungspulver in einen Kasten gepackt und dieser in den Ofen *eingesetzt*.

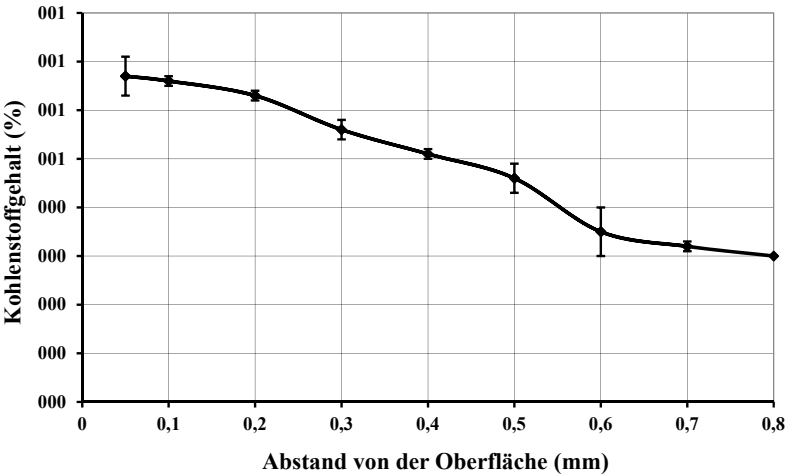


Bild 1a: Kohlenstoffverlaufskurve

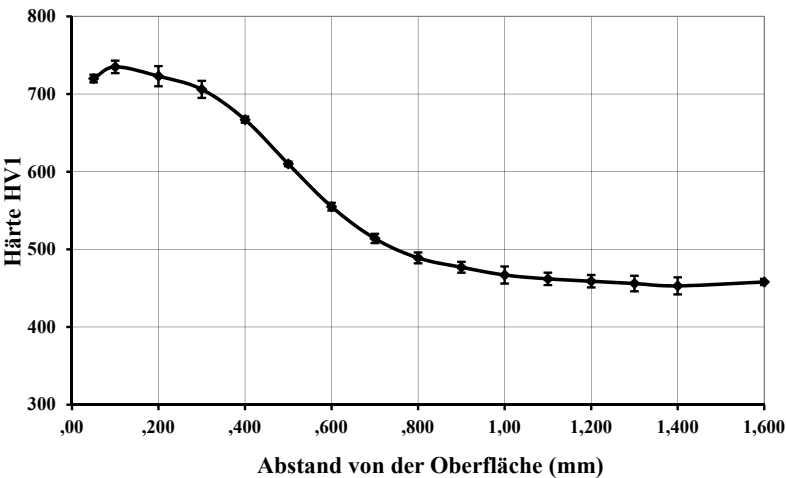


Bild 1b: Härteverlaufskurve

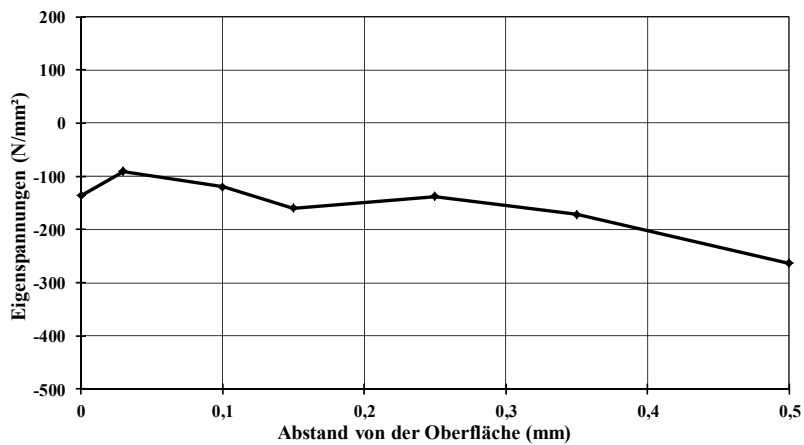


Bild 1c: Eigenspannungsverteilung

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

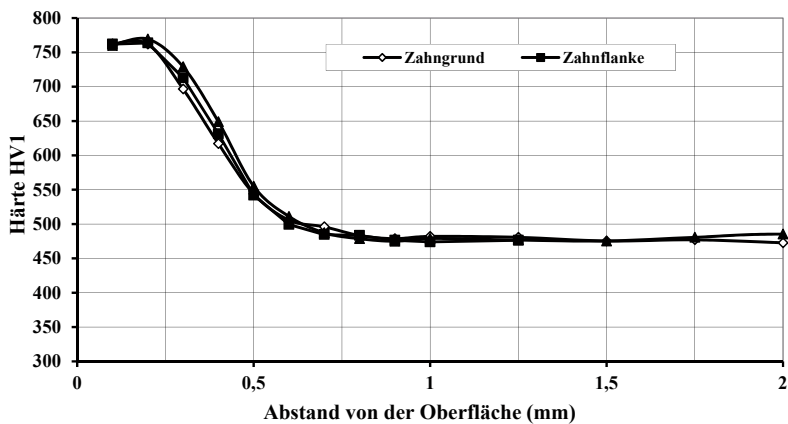


Bild 2: Härteverlaufskurven an einem Zahn. Stahl 20MnCr5, bei 900°C gasaufgekohlt, 830°C/Öl(60°C)

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

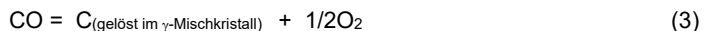
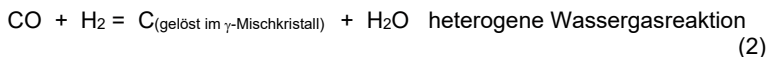
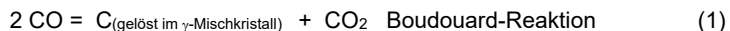
Übergang von Kohlenstoff in der Grenzschicht aus der Gasphase in den Stahl

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 werden¹.

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 H₂ mit geringen Anteilen an Kohlendioxid CO₂, Wasserdampf H₂O, Sauerstoff O₂ und Methan CH₄, wobei in der Regel feste Verhältnisse von CO und H₂ mit Stickstoff N₂ verdünnt als Trägergase extern aufbereitet oder im Ofenraum entstehend verwendet werden. Ein solches Trägergas besitzt über die Reaktionen



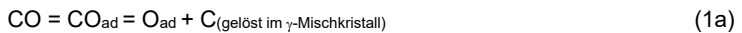
¹ Kapitel 2: Verfahrens- und Anlagentechnik des Einsatzhärtens

und dem homogenen Wassergasgleichgewicht

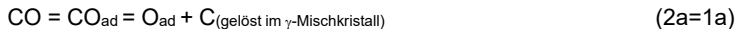


, mit dem das Reaktionsprodukt Kohlendioxid wieder abgebaut wird, eine aufkohlende oder entkohlende Wirkung, d.h., nach hinreichend langer Haltedauer bei Behandlungstemperatur wird ein Gleichgewicht zwischen Aufkohlung und Entkohlung erreicht, dessen Kohlenstoffgehalt als Kohlenstoffpegel (C-Pegel C_P) [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).

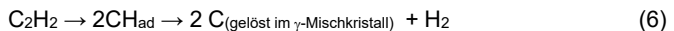
Die Boudouard-Reaktion (1) verläuft in zwei Teilschritten [8,11,13]



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



Kohlenmonoxid CO wird an der Bauteiloberfläche adsorbiert, zerfällt in adsorbierten Sauerstoff O_{ad} und atomaren Kohlenstoff, der in das Randgefüge diffundiert. Der adsorbierte Sauerstoff reagiert mit CO zu CO_2 (1b) oder mit 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 C_2H_2 gearbeitet, das bei Aufkohlungs-temperatur 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.

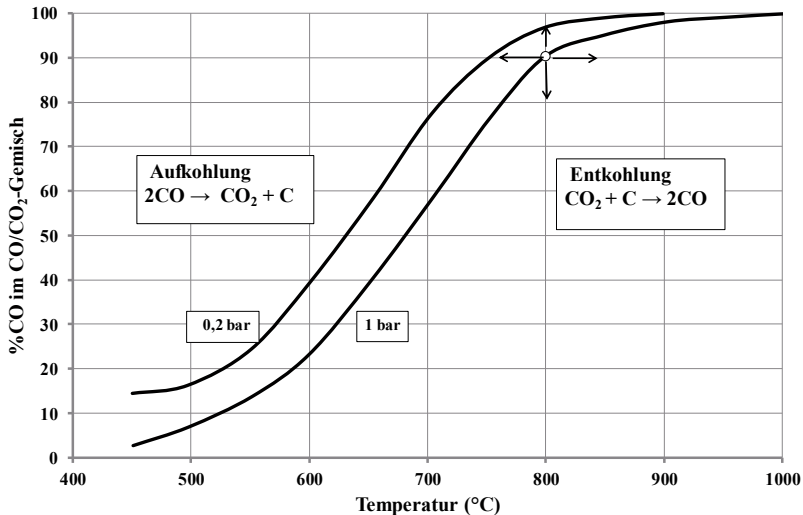


Bild 1: Boudouard-Gleichgewicht [nach 4,19]

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].

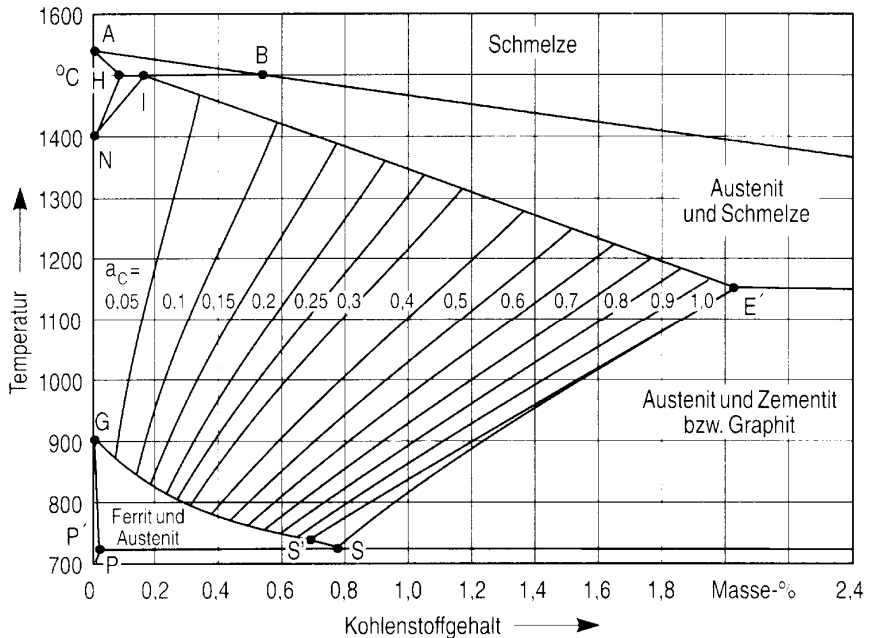


Bild 2: Isoaktivitäten des Kohlenstoffs im γ -Mischkristall [21]

Der Einfluss der Legierungselemente auf die Kohlenstoffaktivität wird durch das Verhältnis des C-Pegels C_P der Kohlunqsatmosphäre (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 Kohlungsatmosphäre 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 Kohlungsatmosphäre 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 Aufkohlungsgleichgewichte der Boudouard-Reaktion im Austenitgebiet sind in Bild 3 [5] dargestellt.

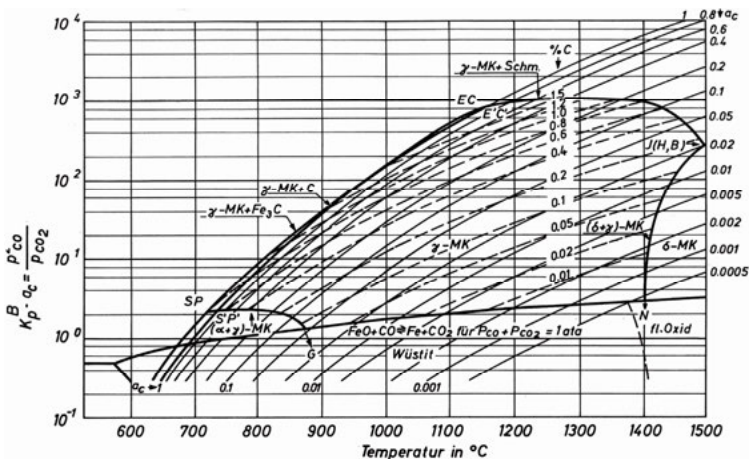


Bild 3: Aufkohlungsgleichgewichte für die Reaktion $2CO \rightarrow CO_2 + C$ [5]