

**AWT - ARBEITSGEMEINSCHAFT  
WÄRMEBEHANDLUNG UND  
WERKSTOFFTECHNIK E.V.  
- FACHAUSSCHUSS 4 (HRSG.)**



# Thermochemische Behandlung von Eisen- werkstoffen im Gas

**Verfahren und Anlagen**

2., durchgesehene Auflage

**expert** ›

AWT-Fachausschuss 4 (Hrsg.)  
Winfried Gräfen, Franz Hoffmann,  
Dieter Liedtke, Karl-Helmut  
Weissohn,  
Karl-Michael Winter

# **Thermochemische Behandlung von Eisenwerkstoffen im Gas**

Verfahren und Anlagen

2., durchgesehene Auflage

**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.

2., durchgesehene Auflage 2021

1. Auflage 2014

© 2021 · 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)

CPI books GmbH, Leck

ISBN 978-3-8169-3522-3 (Print)

ISBN 978-3-8169-8522-8 (ePDF)

eISBN 978-3-8169-0046-7

## **Vorwort zur 2. Auflage**

---

In diesem Handbuch werden für die thermochemischen Verfahren Aufkohlen, Carbonitrieren, Nitrieren und Nitrocarburieren die theoretischen Grundlagen und die industrielle Durchführung eingehend behandelt.

Es entstand in langjähriger Gemeinschaftsarbeit des AWT-Fachausschusses 4 „Einsatzhärten“ aus den Beiträgen verschiedener Mitglieder des Ausschusses. Die Beiträge wurden von einem Redaktionsstab zusammengefasst, intensiv überarbeitet, ergänzt und Texte und Bilder einheitlich gestaltet.

Bei den Grundlagen und der praktischen Durchführung werden die Verfahren bei Normaldruck, sowie bei Niederdruck mit und ohne Plasmaunterstützung, behandelt. Weiterhin werden charakteristische physikalische Eigenschaften der zum Herstellen der verschiedenen Ofenatmosphären erforderlichen Gase aufgeführt.

Die industriell gebräuchlichsten Arten von Öfen und die zugehörige Mess- und Regeltechnik werden beschrieben und den Verfahren zugeordnet. Betrachtungen zur Energiebilanz, dem Umweltschutz und der Entsorgung der verbrauchten Hilfsstoffe, sowie dem sicheren Betreiben der Wärmebehandlungsanlagen, runden den Inhalt des Buchs ab.

Der Themenband richtet sich an den mit dem Planen und Durchführen von Wärmebehandlungen befassten

Personenkreis, an Konstruktions-, Entwicklungs- und Fertigungsingenieure aber auch an Studierende und an der Wärmebehandlungspraxis Interessierte.

Bei der Überarbeitung der ersten Auflage aus dem Jahr 2014 wurden die inzwischen erkannten Druckfehler beseitigt, Inhalt und Darstellung des Buchs blieben gleich.

### **Der Redaktionsstab:**

Winfried Gräfen  
Franz Hoffmann  
Dieter Liedtke  
Karl-Michael Winter

Der an der ersten Auflage im Redaktionsstab mitwirkende Experte für die Regeltechnik von Wärmebehandlungsanlagen, Karl-Helmut Weissohn, ist inzwischen verstorben. Seinem Andenken ist diese zweite Auflage gewidmet.

Im August 2020

AWT-Fachausschuss „Einsatzhärten“

# Vorwort zur 1. Auflage

---

Im vorliegenden Handbuch werden für die Verfahren Einsatzhärten (Aufkohlen, Carbonitrieren), Nitrieren und Nitrocarburieren sowohl die theoretischen Grundlagen als auch die industrielle Durchführung eingehend behandelt.

Das Werk ist aus einer Vielzahl einzelner Beiträge von Mitgliedern des AWT-Fachausschusses 5 „Anlagentechnik“ entstanden, der nach Abschluss der Arbeiten in den Fachausschuss 4 „Einsatzhärten“ integriert wurde. Die ersten Texte reichen bis in das Jahr 1988 zurück. Seit dieser Zeit haben sich sowohl die Verfahrenstechnik, die Anlagentechnik wie auch die Mess- und Regeltechnik deutlich weiterentwickelt. Durch Forschungsvorhaben auf dem Gebiet der Wärmebehandlungstechnik und die Erfahrungen aus der industriellen Praxis konnten das Wissen erweitert, vertieft und neue Erkenntnisse gewonnen werden. Dies floss in die Texte ein, die kontinuierlich diskutiert, bearbeitet und an den sich weiterentwickelnden Stand der Technik angepasst wurden. Die so entstandenen Vorlagen wurden schließlich durch einen Redaktionsstab unter angemessener Berücksichtigung des gegenwärtigen Kenntnisstands intensiv überarbeitet und, wo erforderlich, ergänzt. Dabei wurden die unterschiedlichen Texte und Bilder der verschiedenen Autoren zur besseren Lesbarkeit einheitlicher gestaltet.

In der Abhandlung werden die Grundlagen und die Durchführung der Verfahren der thermochemischen Behandlung im Gas bei Normaldruck und bei Niederdruck

sowie ohne als auch mit Plasmaunterstützung dargestellt. Anschließend daran sind charakteristische physikalische Eigenschaften der zum Herstellen der verschiedenen Ofenatmosphären erforderlichen Gase angegeben.

Ein weiterer Teil befasst sich mit der Mess- und Regeltechnik. Die industriell gebräuchlichsten Arten von Öfen werden kurz beschrieben und charakterisiert. Betrachtungen zur Energiebilanz, dem Umweltschutz und der Entsorgung der verbrauchten Hilfsstoffe sowie dem sicheren Betreiben der Wärmebehandlungsanlagen runden den Inhalt des Handbuchs ab.

Der Themenband richtet sich an den mit dem Planen und Durchführen von Wärmebehandlungen befassten Personenkreis, an Konstruktions-, Entwicklungs- und Fertigungsingenieure aber auch an Studierende und an der Wärmebehandlungspraxis Interessierte.

Viele Mitautoren sind inzwischen aus dem aktiven Berufsleben und aus dem Fachausschuss ausgeschieden, neue sind hinzugekommen und haben ebenfalls aktiv mitgearbeitet. Ihnen allen sei an dieser Stelle für ihr Mitwirken gedankt:

Herwig Altena	Ralf Jennes	Karl Ritzka †
Hans Georg Bittner	Alexander Jurmann †	Dieter Roempler
Gottfried Böhm	Jürgen Klix	Hans-Jürgen Rönnecke
Michael Bonhagen	Heinrich Klümper-Westkamp	Richard Seemann

Herbert  
Boßmann

Ralf Kotz

Hans-Peter  
Schmidt

Stephan Dorn

Christoph Laumen

Werner Schwan

Hans-Erwin  
Esser

Wolfgang Lerche

Karl Schweyher †

Jürgen Genz

Dieter Liedtke

Wolfgang Specht

Winfried Gräfen Michael Lohrmann

Hartmut Steck-  
Winter

Dieter Grassl

Helmut Mallener

Matthias  
Steinbacher

Peter Haase

Albrecht Melber

Frank Treptow

Paul Heilmann

Dzo Mikulovic

Werner Trojahn

Erwin  
Heumüller †

Franz Neumann

Werner Vogel

Franz Hoffmann Manfred Oswald

Karl-Helmut  
Weissohn

Rüdiger  
Hoffmann

Guido Plicht

Karl-Michael  
Winter

Uwe Huchel

Karl Ritter

Urs Wyss †

Olaf Irretier

**Der Redaktionsstab:**



Winfried Gräfen  
Franz Hoffmann  
Dieter Liedtke  
Karl-Helmut Weissohn  
Karl-Michael Winter

Im Dezember 2013      AWT-Fachausschuss 4 „Einsatzhärten“

# Inhalt

---

## Vorwort

- 1 Grundlagen der Verfahrenstechnik**
  - 1.1 Einsatzhärten**
    - 1.1.1 Aufkohlen
      - 1.1.1.1 Verfahren
        - 1.1.1.1.1 Die Aufkohlungsreaktionen, ihre Gleichgewichtsbeziehungen und die für das Prozessregeln spezifischen Indikatoren
        - 1.1.1.1.2 Die Kohlenstoffaktivität / C-Aktivität  $a_C$
        - 1.1.1.1.3 Der Kohlenstoffpegel / C-Pegel  $C_p$
        - 1.1.1.1.4 Der Legierungsfaktor  $k_L$
        - 1.1.1.1.5 Der Kohlenstoff-Übergangskoeffizient – die Kohlenstoff-Übergangszahl  $\beta$
        - 1.1.1.1.6 Die Kohlenstoffverfügbarkeit
        - 1.1.1.1.7 Die Kohlenstoffdiffusion
        - 1.1.1.1.8 Randoxidation
      - 1.1.1.2 Niederdruckaufkohlen
        - 1.1.1.2.1 Die Reaktionen beim Niederdruckaufkohlen
        - 1.1.1.2.2 Prozesskontrolle
        - 1.1.1.2.3 Prozesstypische Erscheinungen
    - 1.1.1.3 Das Reaktionsmedium Plasma für Diffusionsbehandlungen
      - 1.1.1.4 Plasmaaufkohlen
        - 1.1.1.4.1 Verfahrenstechnik
        - 1.1.1.4.2 Einfluss von Plasmastrom- bzw. Plasmaleistungsdichte auf die Aufkohlungsergebnisse

- 1.1.1.5 Gegenüberstellung der unterschiedlichen Aufkohlungsverfahren
- 1.1.2 Carbonitrieren
  - 1.1.2.1 C arbonitrieren bei Normaldruck
    - 1.1.2.1.1 Die Wechselwirkung zwischen Kohlenstoff- und Stickstoffaktivität
    - 1.1.2.1.2 Anwendung des Carbonitrierens
    - 1.1.2.1.3 Anlagen- und Chargeneinfluss beim Carbonitrieren
  - 1.1.2.2 Niederdruckcarbonitrieren
- 1.1.3 Sonderverfahren
  - 1.1.3.1 Aufkohlen austenitischer Stähle bei Niedrigtemperatur
  - 1.1.3.2 Aufkohlen bei hoher Temperatur - Hochtemperaturaufkohlen
  - 1.1.3.3 Aufkohlen in sauerstofffreien Atmosphären
  - 1.1.3.4 Aufkohlen mit hohen Randkohlenstoffgehalten - Excess Carburizing
- 1.1.4 Härten, Anlassen, Tiefkühlen
  - 1.1.4.1 Verfahren zum Härten
    - 1.1.4.1.1 Direkthärten (Typ A)
    - 1.1.4.1.2 Einfachhärten (Typ B)
    - 1.1.4.1.3 Härten nach isothermischem Umwandeln (Typ C)
    - 1.1.4.1.4 Doppelhärten (Typ D)
  - 1.1.4.2 Warmbadhärten
  - 1.1.4.3 Tiefkühlen
  - 1.1.4.4 Der einsatzgehärtete Zustand
  - 1.1.4.5 Anlassen

## **1.2 Nitrieren und Nitrocarburieren**

- 1.2.1 Begriffsbestimmung
- 1.2.2 Nitrieren
- 1.2.3 Nitrocarburieren
  - 1.2.3.1 Die Reaktionen
  - 1.2.3.2 Kenngrößen

- 1.2.3.3 Einfluss der Kenngrößen auf das Ergebnis des Nitrierens und Nitrocarburierens
- 1.2.3.4 Wechselwirkung von Stickstoff und Kohlenstoff in der Nitrierschicht
- 1.2.4 Plasmanitrieren
  - 1.2.4.1 Das Reaktionsmedium Plasma
  - 1.2.4.2 Prozessablauf
- 1.2.5 Sonderverfahren/Kombinationsverfahren
  - 1.2.5.1 Nitrieren/Nitrocarburieren bei niedriger Temperatur
  - 1.2.5.2 Nitrieren/Nitrocarburieren oberhalb 590 °C bzw. oberhalb  $A_{C1(Fe-N-C)}$
  - 1.2.5.3 Hochtemperaturnitrieren
  - 1.2.5.4 Niederdrucknitrieren
  - 1.2.5.5 Drucknitrieren
  - 1.2.5.6 Nitrieren/Nitrocarburieren und Beschichten
  - 1.2.5.7 Nitrocarburieren und anschließendes Härten im Vakuumofen
  - 1.2.5.8 Nitrocarburieren und anschließendes Randschichthärten
- 1.2.6 Vor- und Nachbehandlung
  - 1.2.6.1 Reinigen
    - 1.2.6.1.1 Waschen
    - 1.2.6.1.2 Strahlen
    - 1.2.6.1.3 Beizen
  - 1.2.6.2 Vorbehandlung
    - 1.2.6.2.1 Entgraten
    - 1.2.6.2.2 Voroxidieren
    - 1.2.6.2.3 Spannungsarmglühen
    - 1.2.6.2.4 Normalglühen
    - 1.2.6.2.5 Vergüten
    - 1.2.6.2.6 Vorbereiten für eine örtlich begrenzte Diffusionsbehandlung
  - 1.2.6.3 Nachbehandlung
    - 1.2.6.3.1 Reinigen

- 1.2.6.3.2 Auslagern
- 1.2.6.3.3 Nachoxidieren
- 1.2.6.3.4 Diffusionsbehandeln
- 1.2.6.3.5 Spanendes Bearbeiten
- 1.2.6.3.6 Richten oder Kalibrieren
- 1.2.6.4.7 Korrosionsschützen

## **2 Verfahrensdurchführung**

### **2.1 Herstellung der Behandlungsatmosphären**

- 2.1.1 Gase, allgemeine Bemerkungen
- 2.1.2 Propan
- 2.1.3 Methan/Erdgas
- 2.1.4 Ammoniak
- 2.1.5 Ammoniak-Spaltgas
- 2.1.6 Kohlenstoffdioxid
- 2.1.7 Kohlenstoffmonoxid
- 2.1.8 Stickstoff
- 2.1.9 Acetylen
- 2.1.10 Wasserstoff
- 2.1.11 Argon
- 2.1.12 Helium
- 2.1.13 Endogas
- 2.1.14 Exogas
- 2.1.15 Methanol

### **2.2 Atmosphären zum Wärmebehandeln**

- 2.2.1 Atmosphären zum Aufkohlen und Carbonitrieren
- 2.2.2 Atmosphären zum Nitrieren und Nitrocarburieren
- 2.2.3 Atmosphärenwechsel

### **2.3 Messen, Steuern und Regeln**

- 2.3.1 Prozess-Zielgrößen
  - 2.3.1.1 Aufkohlen, Carbonitrieren, Einsatzhärten
  - 2.3.1.2 Nitrieren und Nitrocarburieren

- 2.3.2 Prozessparameter
  - 2.3.2.1 Temperatur
    - 2.3.2.1.1 Temperaturmessung
    - 2.3.2.1.2 Temperaturregelung
  - 2.3.2.2 Atmosphärenkenngößen
    - 2.3.2.2.1 Messen und Bestimmen der Kenngößen
      - 2.3.2.2.1.1 C-Pegel
      - 2.3.2.2.1.2 Carbonitrierpegel  $C_{p\text{Carb}}$  und  $N_{p\text{Carb}}$
      - 2.3.2.2.1.3 Kohlenstoffübergangszahl  $\beta$
      - 2.3.2.2.1.4 Dissoziationsgrad beim Nitrieren/Nitrocarburieren
      - 2.3.2.2.1.5 Nitrierkennzahl
      - 2.3.2.2.1.6 Oxidationskennzahl
      - 2.3.2.2.1.7 Kohlungskennzahl
    - 2.3.2.2.2 Regelung der Kenngößen
      - 2.3.2.2.2.1 C-Pegel
      - 2.3.2.2.2.2 C-Pegel in Ungleichgewichtsatmosphären
      - 2.3.2.2.2.3 Der Kohlenstoffübergangskoeffizient  $\beta$  in Gleichgewichtsatmosphären
      - 2.3.2.2.2.4 Nitrierwirkung beim Carbonitrieren
      - 2.3.2.2.2.5 Dissoziationsgrad und Nitrierkennzahl
      - 2.3.2.2.2.6 Oxidationskennzahl
      - 2.3.2.2.2.7 Kohlungskennzahl
  - 2.3.2.2.3 Atmosphärenzusammensetzung
    - 2.3.2.2.3.1 Messen der Atmosphärenzusammensetzung
      - 2.3.2.2.3.1.1 Infrarot-Analysatoren
      - 2.3.2.2.3.1.2 Sauerstoffsonden
      - 2.3.2.2.3.1.3 Schüttelflasche
      - 2.3.2.2.3.1.4 Wärmeleitfähigkeits-Messgeräte
      - 2.3.2.2.3.1.5 Taupunktmessgeräte
      - 2.3.2.2.3.1.6 Wasserstoff-Partialdruck-Messgerät
    - 2.3.2.2.3.2 Regelung der Atmosphärenzusammensetzung
  - 2.3.2.3 Gasmengen
    - 2.3.2.3.1 Messen der Gasdurchflussmengen
    - 2.3.2.3.2 Regelung der Gasdurchflussmengen

- 2.3.2.5 Druck
- 2.3.2.5.1 Druckmessung
- 2.3.2.5.2 Druckregelung
- 2.4 Prozessführung**
- 2.4.1 Beschicken und Erwärmen
- 2.4.1.1 Einbringen in den kalten Ofen
- 2.4.1.2 Einbringen in den warmen Ofen
- 2.4.1.3 Voroxidieren vor dem Nitrieren und Nitrocarburieren
- 2.4.2 Halten
- 2.4.2.1 Nitrieren und Nitrocarburieren
- 2.4.2.2 Aufkohlen und Carbonitrieren
- 2.4.3 Abkühlen
- 2.4.3.1 Nitrieren und Nitrocarburieren
- 2.4.3.2 Aufkohlen und Carbonitrieren

### **3 Anlagentechnik**

#### **3.1 Einrichtungen zur Gasversorgung**

- 3.1.1 Endogaserzeuger
- 3.1.2 Direktbegasungsverfahren
- 3.1.2.1 Direktbegasung mit Kohlenwasserstoff-Luft-Gemischen
- 3.1.2.2 Trägergas aus Methanol und Stickstoff
- 3.1.3 Ammoniak-Spaltgas-Erzeuger

#### **3.2 Begasung der Öfen**

- 3.2.1 Anlagen bei Normaldruck
- 3.2.2 Anlagen bei Niederdruck

#### **3.3 Prozessablauf und Prozessüberwachung**

- 3.3.1 Anlagen bei Normaldruck
- 3.3.2 Anlagen bei Niederdruck
- 3.3.3 Sicherheitseinrichtungen

#### **3.4 Schacht- und Haubenöfen**

- 3.4.1 Beschreibung der Anlagen

#### **3.5 Mehrzweck-Kammeröfen**

#### **3.6 Durchstoß-Öfen/Ringherdöfen**

- 3.7 Drehherdöfen**
- 3.8 Banddurchlauföfen**
- 3.9 Rollenherdöfen**
- 3.10 Anlagen zum Niederdruckaufkohlen**
- 3.11 Anlagen für thermochemische  
Behandlungen mit Plasmaunterstützung**
  - 3.11.1 Anlagen zum Plasmanitrieren/-nitrocarburieren
    - 3.11.1.1 Beschreibung der Anlagen
    - 3.11.1.2 Aufbau der Anlagen
    - 3.11.1.3 Anlagenbetrieb
- 3.12 Allgemeine Hinweise zur Ofenauswahl**
- 3.13 Abschrekanlagen**
- 3.14 Hinweise zum Chargenpacken**
- 3.15 Chargentransport**
  
- 4 Energiebilanz**
  - 4.1 Der Energiebedarf für thermochemische  
Prozesse**
  - 4.2 Beispiele aus der Praxis**
    - 4.2.1 Beispiel 1: Doppelkammerofen
    - 4.2.2 Beispiel 2: Durchstoßofen
    - 4.2.3 Beispiel 3: Vakuum-Mehrzweck-Kammerofen  
zum Niederdruckaufkohlen
  
- 5 Umweltschutz und Entsorgung**
  - 5.1 Umweltschutz und Genehmigungsrecht**
  - 5.2 Gefahrstoffe**
    - 5.2.1 Lagern von Gefahrstoffen
    - 5.2.2 Einsatz von Gefahrstoffen
  - 5.3 Anlagen und Ausrüstungen**
  - 5.4 Abfallentsorgung**
  - 5.5 Nutzen aus Umweltschutz und  
Entsorgung**



- 6 Hinweise zum sicheren Betrieb der Anlagen**
- 6.1 Beispiele für die Notwendigkeit von Sicherheitsmaßnahmen**
- 6.2 Allgemeines**
- 6.3 Sicherheit für Leib und Leben**
- 6.4 Sicherheit für die Anlage**
- 6.5 Sicherung des Behandlungsgutes**
- 6.6 Prüfung und Instandhaltung**

**Literatur**

**Stichwortverzeichnis**

**Zum Buch**

# 1 Grundlagen der Verfahrenstechnik

---

## 1.1 Einsatzhärten

Das Einsatzhärten besteht aus Aufkohlen oder Carbonitrieren und anschließendem Härten (DIN EN 10 052). Durch diese Wärmebehandlung erhalten Werkstücke einen Werkstoffzustand mit unterschiedlicher Gefügeausbildung über den Querschnitt: einer hohen Härte und Festigkeit am Rand und im Inneren, je nach Werkstoffzusammensetzung und Werkstückquerschnitt, ebenfalls eine gegenüber dem Ausgangszustand höhere Härte und Festigkeit. Außerdem liegt ein entsprechendes Eigenspannungsprofil über den Werkstückquerschnitt vor.

### 1.1.1 Aufkohlen

Beim Aufkohlen wird die Werkstückrandschicht im austenitischen Zustand mit Kohlenstoff angereichert [/Wys83/](#), [/Wys90/](#), [/AWT97/](#), [/Neu94-1/](#), [/Neu94-2/](#), [/Nue94-3/](#), [/Lie94/](#).

Zum Aufkohlen stehen feste Mittel wie Pulver oder Granulat, Gase oder Salzschnmelzen zur Verfügung. Das Gasaufkohlen kann bei Normaldruck durchgeführt werden oder in einem Niederdruckbereich ohne oder mit Plasmaunterstützung.

Das Aufkohlen erfolgt in mehreren Teilschritten:

1. Reaktionen im Aufkohlungsmittel
2. Diffusion im Aufkohlungsmittel
3. Phasengrenzflächenreaktionen zwischen Aufkohlungsmittel und Stahl
4. Diffusion im Stahl
5. Reaktionen im Stahl

Voraussetzung für einen sicheren Erfolg des Aufkohlens ist die Kenntnis der thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten der Reaktionen im Aufkohlungsmittel und in der Werkstückrandschicht sowie der Einsatz geeigneter Mess- und Regelverfahren. Ausführliche Beschreibungen hierzu sind in „Die Prozeßregelung beim Aufkohlen und Einsatzhärten“ zu finden [/AWT97/](#). Nachfolgend werden die wesentlichen Gesichtspunkte daraus wiedergegeben.

### 1.1.1.1 Verfahren

Der Transport der Kohlenstoffspender - in der Regel sind dies Kohlenwasserstoffe wie Methan, Propan u. a. oder deren Sauerstoffderivate - erfolgt über das so bezeichnete Trägergas. Dieses bildet die Grundgaszusammensetzung der Ofenatmosphäre und ermöglicht, je nach Art der Herstellung der Atmosphäre, eine Einteilung in die verschiedenen industriell gebräuchlichen Gasaufkohlungs-Verfahren. Die heute industriell üblichen sind in [Tabelle 1-1](#) aufgelistet, vgl. auch [/Ede94/](#), [/Ede01/](#).

Tabelle 1-1: Derzeit übliche Gas-Aufkohlungsverfahren

<b>Mit Endogas-Generator</b>	<b>Ohne Gas-Generator</b>
<p><b>Trägergas-Verfahren:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Unvollständiges Verbrennen von Propan, Erdgas oder Methan mit Luft und Zugabe von Propan, Methan oder Erdgas → Trägergasverfahren</li> </ul>	<p><b>Trägergas-Verfahren:</b></p> <p>Spalten von Methan → Spaltgas, Mischen mit Stickstoff (60 : 40) und Zugabe von Propan, Erdgas oder Methan</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erdgas, Methan, Propan oder Butan und Kohlendioxid und Zugabe von Propan, Erdgas oder Methan</li> </ul>	<p><b>Eintropf-Verfahren:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Eintropfen von flüssigem Methanol und Stickstoff und Zugabe von Propan, Erdgas oder Methan</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eintropfen von flüssigem Methanol und Aceton, Alkohole oder Ethylacetat</li> </ul>
	<p><b>Direktbegasung:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Methan, Erdgas, Propan oder Butan und Kohlendioxid und Zugabe von z. B. Propan</li> <li>- Propan, Erdgas oder Methan und Luft</li> <li>- Isopropanol oder andere Alkohole und Luft</li> <li>- Methanol und Stickstoff und Zugabe von Propan</li> </ul>

Maßgebende Kenngrößen für das Aufkohlen sind neben der Temperatur die Kohlenstoffaktivität  $a_C$ , der Kohlenstoffpegel  $C_p$ , die Kohlenstoffübergangszahl  $\beta$  und die Kohlenstoffverfügbarkeit.

### **1.1.1.1.1 Die Aufkohlungsreaktionen, ihre Gleichgewichtsbeziehungen und die für das Prozessregeln spezifischen Indikatoren**

Grundlage für das Regeln des Gasaufkohlens bei Normaldruck sind die in [Tabelle 1-2](#) aufgeführten vier Reaktionen und die dazu gehörenden Indikatoren und Regelgrößen.

Die Indikatoren errechnen sich aus der Beziehung der Partialdrucke der Gaskomponenten gemäß der Gleichungen in [Tabelle 1-2](#), die mit dem Kohlenstoffgehalt [C] an der Stahloberfläche ein Gleichgewicht anstreben. Der Partialdruck entspricht bei einem Normaldruck von 1 bar dem Volumenanteil in Prozent dividiert durch 100 (20 Vol-% CO z. B., entsprechen 0,2 bar).

Die sich daraus ergebenden Messgrößen gelten für die Reaktionen (1-1) und (1-3) bei konstantem CO-Gehalt in der Aufkohlungsatmosphäre und für die Reaktion (1-2) bei konstantem Produkt  $(\%CO) \cdot (\%H_2)$ . Methan kommt infolge seiner relativ trägen Reaktionsgeschwindigkeit als Regelgröße nicht in Frage. Bei Verfahren mit variablem CO-Gehalt muss dieser kontinuierlich mit gemessen und im Prozessrechner berücksichtigt werden.

Tabelle 1-2: Reaktionen, Indikatoren und Regelgrößen beim Gasaufkohlen

	Reaktion	Indikator	Regelgröße
(1-1)	$2 \text{ CO} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + [\text{C}]$	$\frac{p_{\text{CO}}^2}{p_{\text{CO}_2}}$	Vol-% $\text{CO}_2$
(1-2)	$\text{CO} + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O} + [\text{C}]$	$\frac{p_{\text{CO}} \cdot p_{\text{H}_2}}{p_{\text{H}_2\text{O}}}$	Vol-% $\text{H}_2\text{O}$ bzw. Taupunkttemperatur
(1-3)	$\text{CO} \rightleftharpoons \frac{1}{2} \text{O}_2 + [\text{C}]$	$\frac{p_{\text{CO}}}{p_{\text{O}_2}^{0,5}}$	$p_{\text{O}_2}$ bzw. Sondenspannung
(1-4)	$\text{CH}_4 \rightleftharpoons 2 \text{H}_2 + [\text{C}]$	$\frac{p_{\text{CH}_4}}{p_{\text{H}_2}^2}$	--

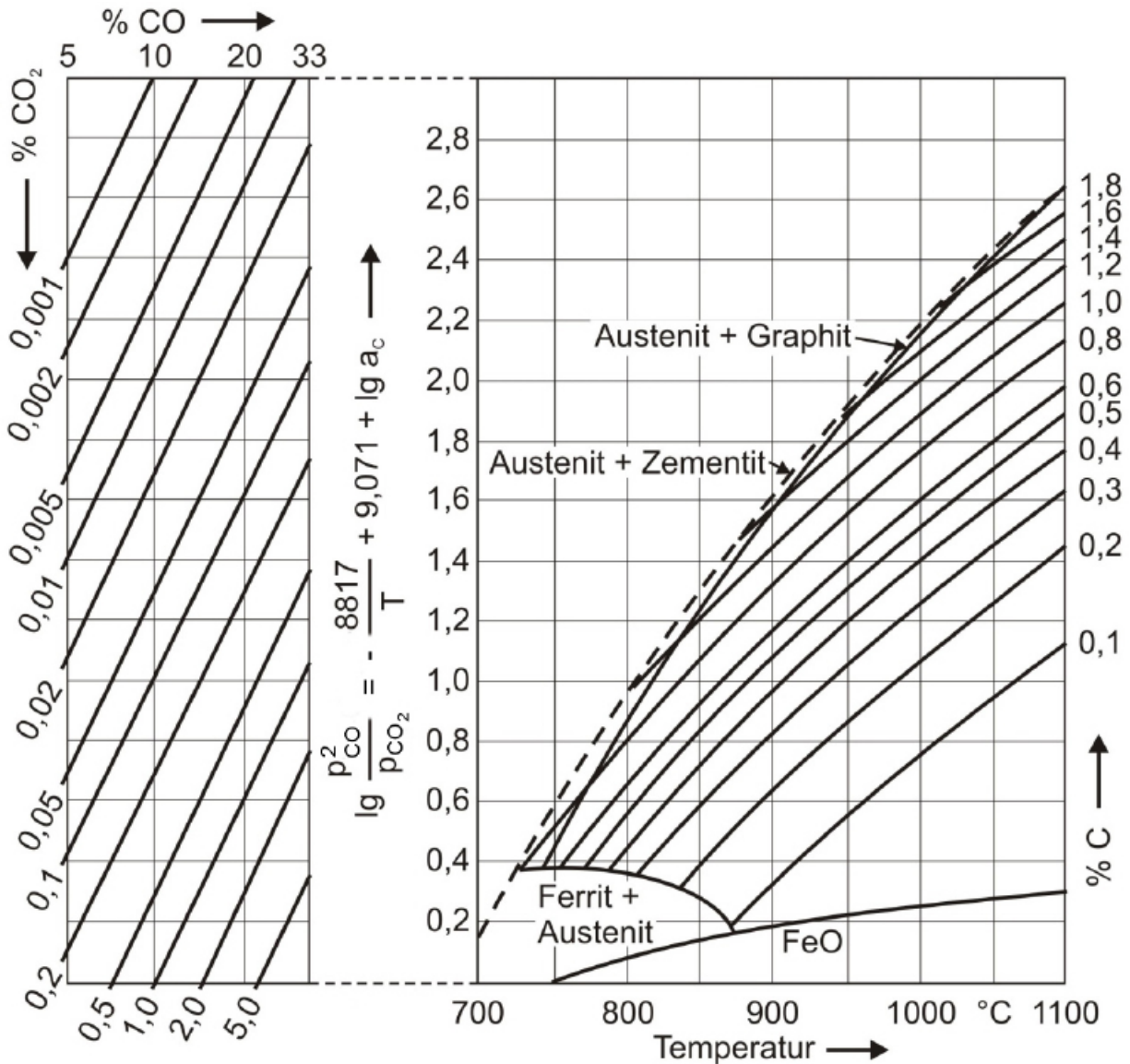


Bild 1-1: Beziehung zwischen C-Pegel (%C), Ofentemperatur und CO<sub>2</sub>-Gehalt bei verschiedenen CO-Gehalten der Atmosphäre  
 /AWT97/, /Neu94-2/

Die Bilder 1-1, 1-2 und 1-3 enthalten Nomogramme, aus denen zu vorgegebenen C-Pegeln, CO-Gehalten und Ofentemperaturen die entsprechenden Messgrößen entnommen werden können.

Im rechten Teil der Bilder 1-1 und 1-2 ist für die verschiedenen C-Pegel der erforderliche Indikatorwert als Funktion der Ofentemperatur dargestellt. Im jeweils linken Teilbild ist die Verbindung der Regelgrößen CO<sub>2</sub> (Bild 1-1) bzw. Taupunkt (Bild 1-2)

zur Gaszusammensetzung: CO-Gehalt, Produkt  $(\%CO) \cdot (\%H_2)$ , dargestellt, so dass ausgehend von Ofentemperatur und C-Pegel die betreffenden Regelgrößen abgelesen werden können.

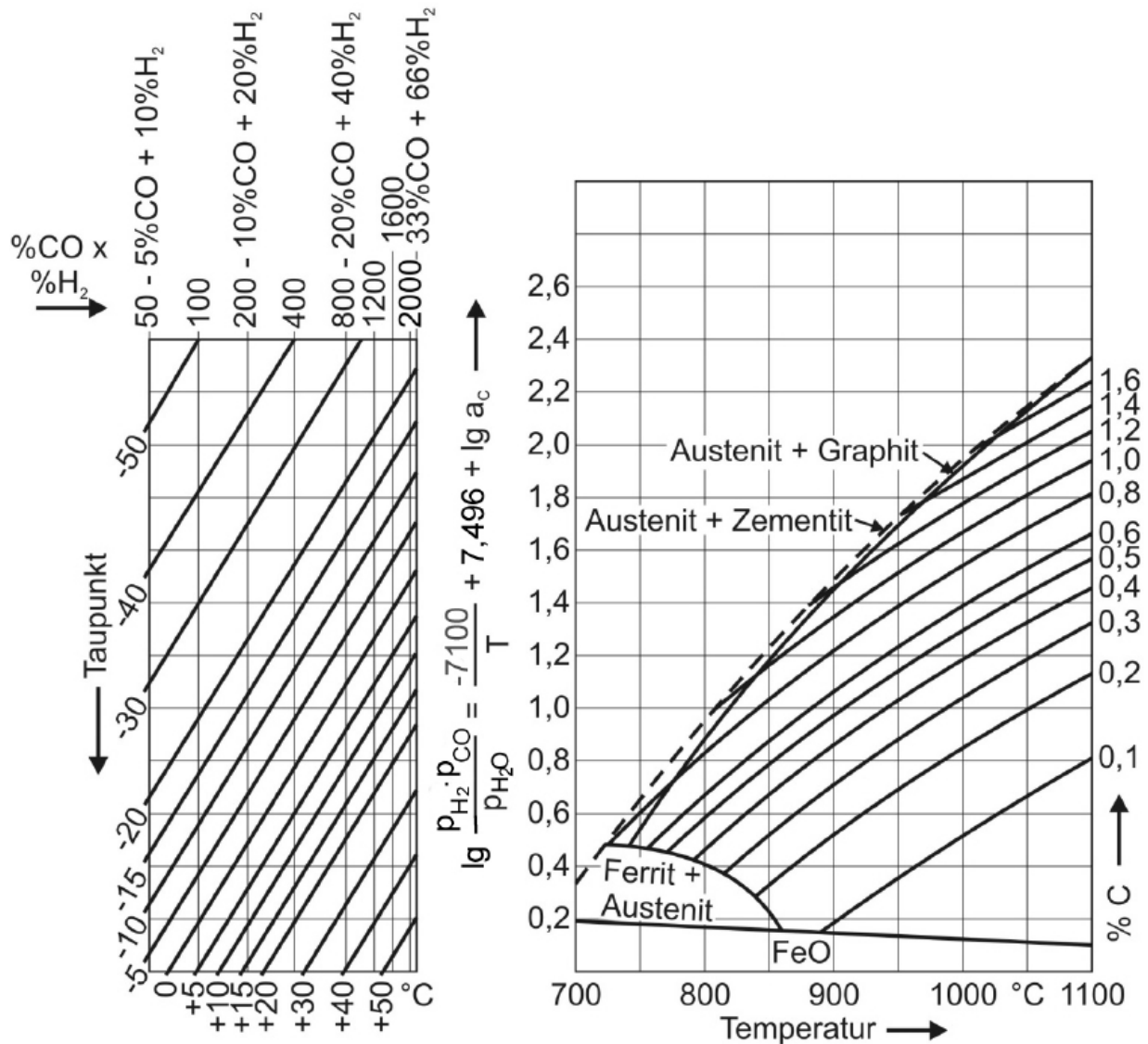


Bild 1-2: Beziehung zwischen C-Pegel (%C), Ofentemperatur und Taupunkt bei verschiedenen CO- und H<sub>2</sub>-Gehalten der Atmosphäre  
/AWT97/, /Neu94-2/

In Bild 1-3 ist in gleicher Weise die Funktion des Indikators der Reaktion (3) berücksichtigt. In der Praxis wird der Sauerstoffpartialdruck mit Sauerstoffsonden als eine elektrische Spannung (EMK) gemessen. Diese ist über das angesetzte linke

Teilbild unter Einbeziehung des CO-Gehalts der Atmosphäre zum temperaturbezogenen C-Pegel in Verbindung zu bringen. Der Zusammenhang zwischen dem Sauerstoffpartialdruck und der Sondenspannung ist in /AWT97/ und /Neu94-2/ beschrieben.

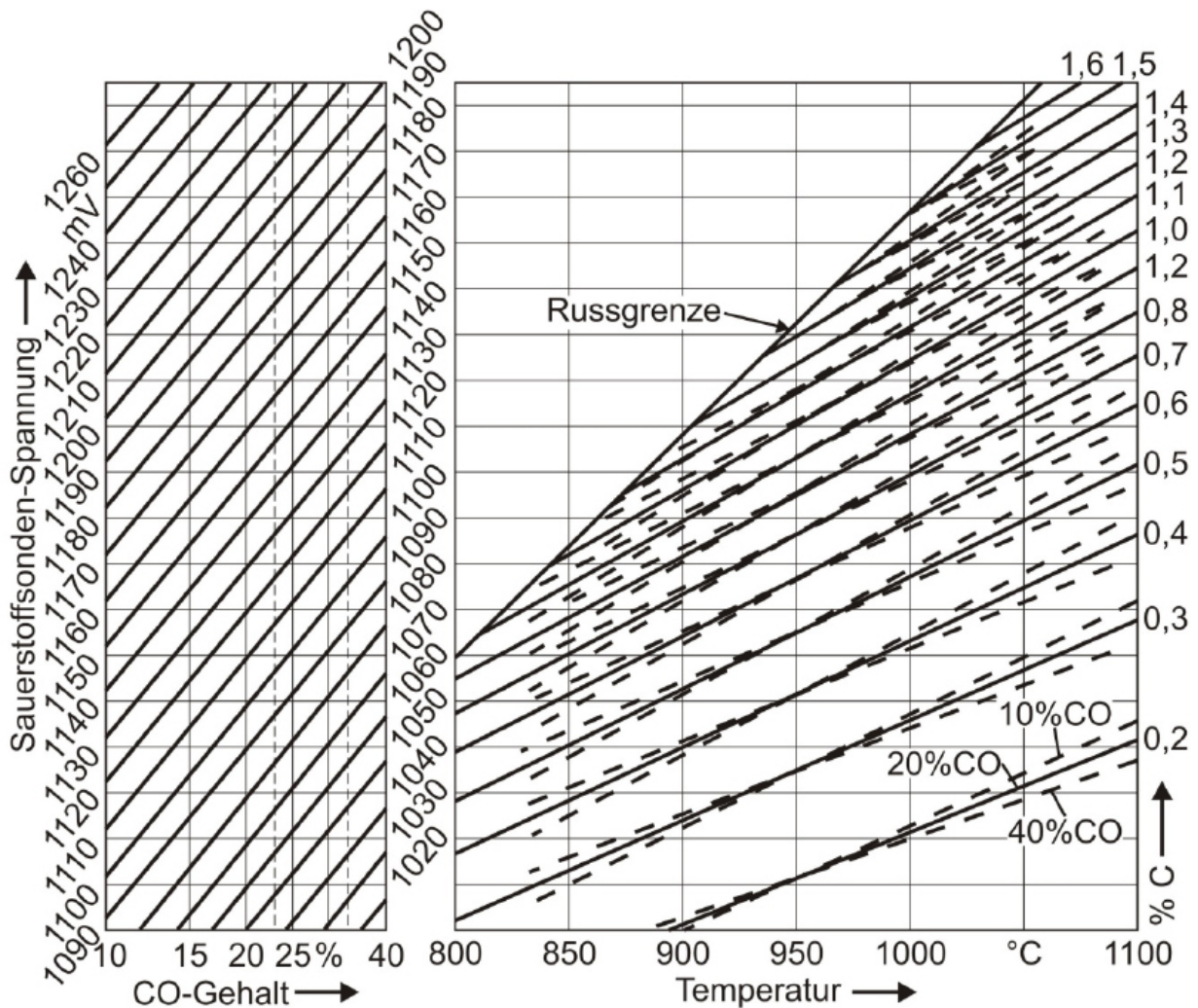


Bild 1-3: Beziehung zwischen C-Pegel (%C), Ofentemperatur und O<sub>2</sub>-Sondenspannung (mV) bei verschiedenen CO-Gehalten der Atmosphäre /AWT97/, /Neu94-2/

### 1.1.1.1.2 Die Kohlenstoffaktivität/C-Aktivität $a_c$

Die Wirksamkeit von Elementen in Gasreaktionen oder Legierungen kann durch einen Aktivitätskoeffizienten beschrieben werden. Dieser ist temperatur- und druckabhängig und dimensionslos. Triebkraft für



die Kohlenstoffaufnahme im Eisen ist die Potentialdifferenz, die sich aus den unterschiedlichen Aktivitäten des Kohlenstoffs in der Gasphase und im Austenit ( $\gamma$ -Mischkristall) ergibt und die einen Ausgleich der Aktivitätsunterschiede anstrebt. Was also die Reaktionen einer Werkstoffoberfläche mit einer Aufkohlungsatmosphäre angeht, tritt keine Reaktion auf, wenn der Kohlenstoff in der Atmosphäre und der im Werkstoff die gleiche Aktivität aufweisen. Ist die Kohlenstoffaktivität in der Atmosphäre höher als im Werkstoff, findet ein Aufkohlen statt, ist sie kleiner, wird der Werkstoff entkohlt.

Die Aktivität  $a_C$  kann aus der Konzentration des im Austenit gelösten Kohlenstoffs in Masse-% und der Temperatur in Kelvin wie folgt mit den Daten in /Koh63/ berechnet werden:

$$\log a_C = \frac{2296,28}{T} + 0,15 \cdot \%C + \log\left(\frac{\%C}{0,785 \cdot \%C + 21,5}\right) - 0,864 \quad (1-5)$$

Dieser Zusammenhang ist in Bild 1-4 für das Löslichkeitsgebiet des Kohlenstoffs im Austenit mit Linien gleicher Kohlenstoffaktivität dargestellt /Neu94-1/. Die Linie S'-E' entspricht der Aktivität  $a_C = 1,0$ . Wird sie überschritten, werden Carbide gebildet.

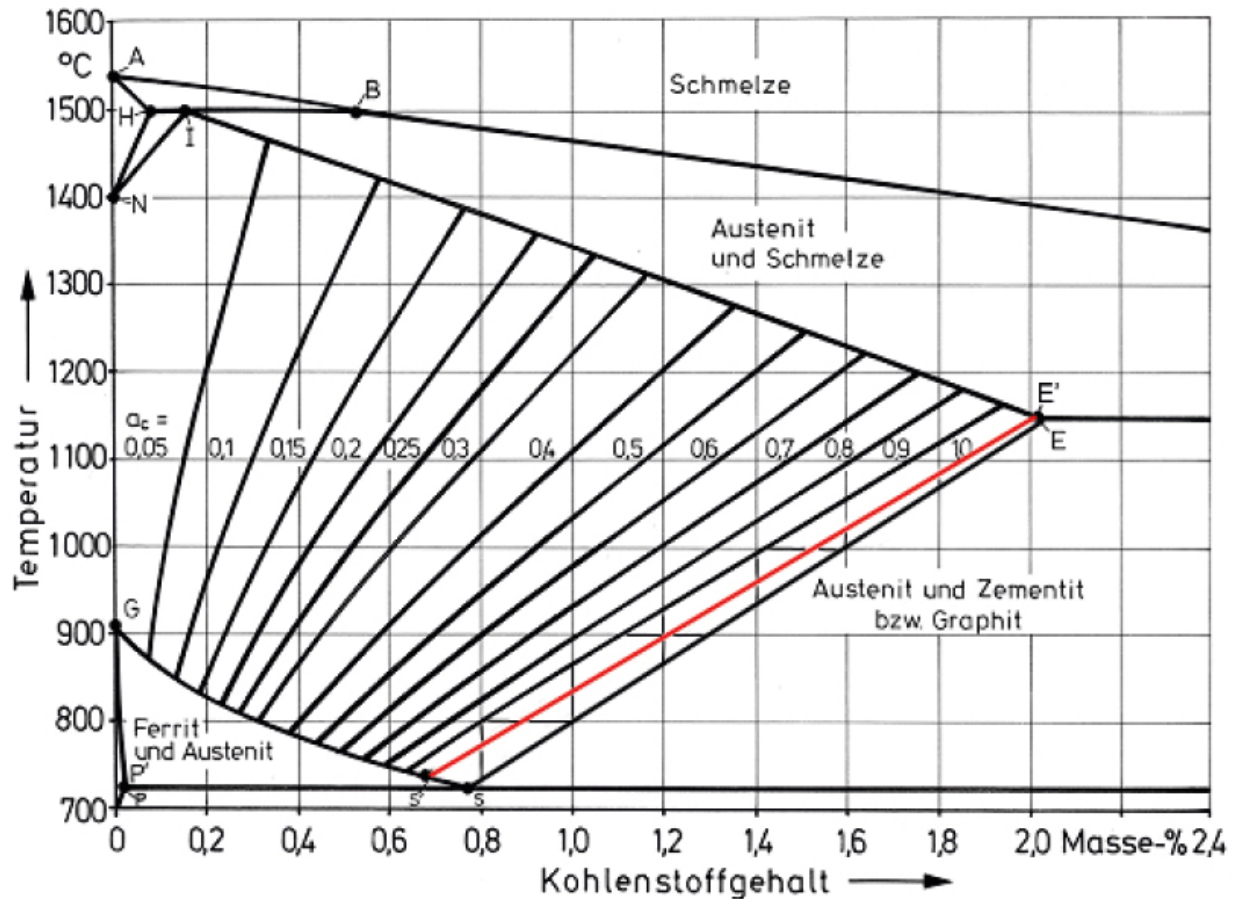


Bild 1-4: Eisen-Kohlenstoff-Zustands-Diagramm mit den Iso-Aktivitätslinien für Kohlenstoff /Hor85/

### 1.1.1.1.3 Der Kohlenstoffpegel/C-Pegel $C_p$

Als Maß für die Aufkohlungswirkung einer Atmosphäre wird der Kohlenstoffpegel  $C_p$  verwendet. Er kennzeichnet das Aufkohlungspotential der Atmosphäre gegenüber Reineisen und ist definiert durch den sich einstellenden Massenanteil Kohlenstoff in %.

Nach DIN EN 10 052 ist der C-Pegel der Kohlenstoffgehalt, angegeben in Massenanteilen Kohlenstoff in %, den eine Probe aus Reineisen innerhalb des Löslichkeitsgebiets des Austenits bei einer bestimmten Temperatur im Gleichgewicht mit einem umgebenden Mittel annimmt.

### 1.1.1.1.4 Der Legierungsfaktor $k_L$

Bei legierten Eisenwerkstoffen wird durch die Legierungselemente die Kohlenstoffaktivität gegenüber Reineisen verändert. So wird z. B. durch die Elemente Silizium, Nickel, Bor, Stickstoff und Cobalt die Aktivität erhöht und durch Chrom, Mangan, Molybdän, Wolfram, Titan und Vanadium erniedrigt. Eine Erhöhung der C-Aktivität durch die Legierungselemente führt bei gegebenem C-Pegel bei unveränderter C-Aktivität des Aufkohlungsmittels nach Erreichen des Gleichgewichtszustands zu einer geringeren Kohlenstoffkonzentration  $C_L$  im legierten Eisenwerkstoff gegenüber reinem Eisen, siehe Bild 1-5. Wird dagegen die C-Aktivität durch Legierungselemente erniedrigt, so ergibt sich bei gleicher C-Aktivität des Aufkohlungsmittels eine höhere Gleichgewichts-Kohlenstoffkonzentration  $C_L$  als bei Reineisen. Soll dieselbe Gleichgewichts-Kohlenstoffkonzentration wie bei unlegiertem Eisen erreicht werden, muss daher der C-Pegel entsprechend angepasst werden. Die Korrektur ist mit Hilfe des reziproken Aktivitätskoeffizienten, bezogen auf  $a_C = \text{konstant}$ , vorzunehmen.

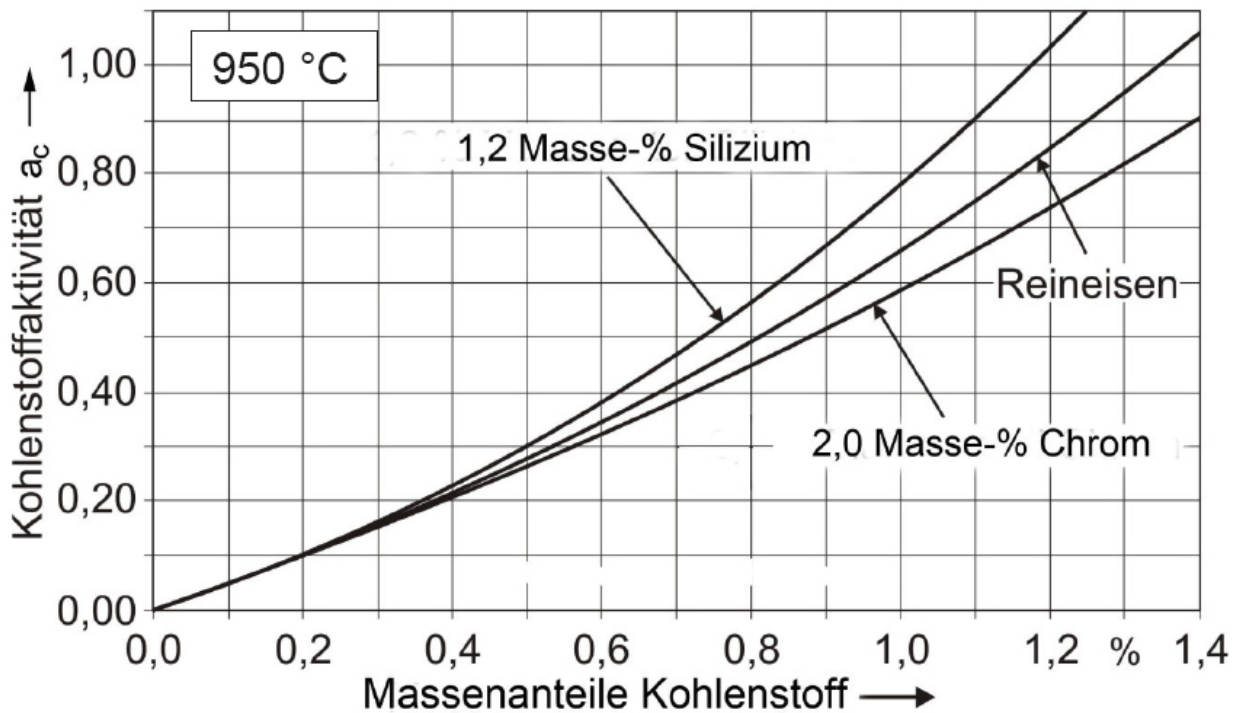


Bild 1-5: Darstellung der Kohlenstoffaktivität  $a_C$  als Funktion der Kohlenstoffkonzentration einer reinen Fe-C-Legierung, einer Fe-C-

Legierung mit 1,2 Masse-% Silizium und einer mit 2,0 Masse-%  
Chrom

Der reziproke Aktivitätskoeffizient wird als Legierungsfaktor  $k_L$  bezeichnet, wobei gilt:

$$k_L = \frac{C_L}{C_P} \quad (1-6)$$

Der Legierungsfaktor  $k_L$  errechnet sich aus den thermodynamischen Wirkungskoeffizienten und der Konzentration der jeweiligen Legierungselemente /Neu94-1/, /Lie94/:

$$\lg k_L = - 0,055 \cdot (\%Si) - 0,011 \cdot (\%Ni) + 0,012 \cdot (\%Mn) + 0,009 \cdot (\%Mo) + 0,043 \cdot (\%Cr) \quad (1-7)$$

In der [Tabelle 1-3](#) sind die danach berechneten Werte für die in DIN EN 10 084 enthaltenen Einsatzstähle zusammengestellt. Die Mittelwerte in Spalte 3 der Tabelle können verwendet werden, wenn die genaue Analyse der betreffenden Stahlsorte nicht bekannt ist.

Werden Werkstücke aus Stählen mit unterschiedlichen Legierungsfaktoren gemeinsam aufgekohlt, stellen sich unterschiedliche Rand-Kohlenstoffgehalte und Kohlenstoff-Konzentrationsprofile ein.

Tabelle 1-3: Legierungsfaktor für die in DIN EN 10084 enthaltenen Stähle

Stahl Bezeichnung	Legierungsfaktor $k_L$	
	Grenzwerte	Mittelwert
C10/C10E	0,95 bis 1,02	0,99
C15/C15E		
C16E		
17Cr3	0,99 bis 1,12	1,06
28Cr4	1,05 bis 1,16	1,10

16MnCr5/16MnCr5B	1,05 bis 1,16	1,11
20MnCr5	1,07 bis 1,19	1,13
18CrMo4	1,05 bis 1,17	1,11
20MoCr3	1,00 bis 1,12	1,06
20MoCr4	1,00 bis 1,11	1,05
22CrMoS3-5	1,04 bis 1,16	1,10
16NiCr4	0,99 bis 1,12	1,06
18NiCr5-4	1,04 bis 1,15	1,10
20NiCrMo2-2	0,98 bis 1,10	1,04
17NiCrMo6-4	1,00 bis 1,13	1,06
20NiCrMoS6-4	0,98 bis 1,10	1,04
17CrNi6-6	1,05 bis 1,18	1,12
15NiCr13	1,04 bis 1,15	1,10
17CrNiMo6-4	1,06 bis 1,19	1,13
18CrNiMo7-6	1,06 bis 1,14	1,10
14NiCrMo13-4	0,94 bis 1,01	0,98

### **1.1.1.1.5 Der Kohlenstoff-Übergangskoeffizient - die Kohlenstoff-Übergangszahl $\beta$**

Der Kohlenstoff-Übergangskoeffizient  $\beta$  fasst die kinetischen Zusammenhänge des Kohlenstoffübergangs aus dem Aufkohlungsmittel in die Werkstück-Randschicht zusammen. Er ist ein Maß dafür, wie rasch ein vorgegebener Randkohlenstoffgehalt erreicht werden kann.

Die Kohlenstoff-Übergangszahl  $\beta$  gibt an, wieviel Gramm Kohlenstoff durch eine Werkstückoberfläche von  $1 \text{ cm}^2$  pro Sekunde eindiffundieren, bezogen auf die jeweilige Differenz zwischen dem C-Pegel im Aufkohlungsmittel und dem Randkohlenstoffgehalt. Sie hat die Dimension  $\text{cm/s}$  und ist somit mitverantwortlich für die Geschwindigkeit, mit der sich der Randkohlenstoffgehalt  $C_R$  eines Werkstücks beim Aufkohlen dem Gleichgewichtskohlenstoffgehalt nähert. Nachweislich läuft die Reaktion (1-1) mit  $\text{CO}$  und  $\text{CO}_2$ , besonders aber die Reaktion (1-4) mit  $\text{CH}_4$  äußerst langsam ab. Die Anwesenheit von Wasserstoff erhöht die Übergangsgeschwindigkeit. Nach Bild 1-6 ist der Kohlenstoff-Übergangskoeffizient weitgehend eine Funktion des Produktes der Partialdrücke  $p_{\text{CO}}$  und  $p_{\text{H}_2}$  und steigt demzufolge bis zu einem Höchstwert bei 50 %  $\text{CO}$  und 50 %  $\text{H}_2$  an /Neu94-2/, /Neu70/. Aus der Darstellung ist zu entnehmen, dass  $\beta$  je nach Gaszusammensetzung Werte zwischen  $1 \cdot 10^{-5}$  und  $3 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$  annehmen kann.

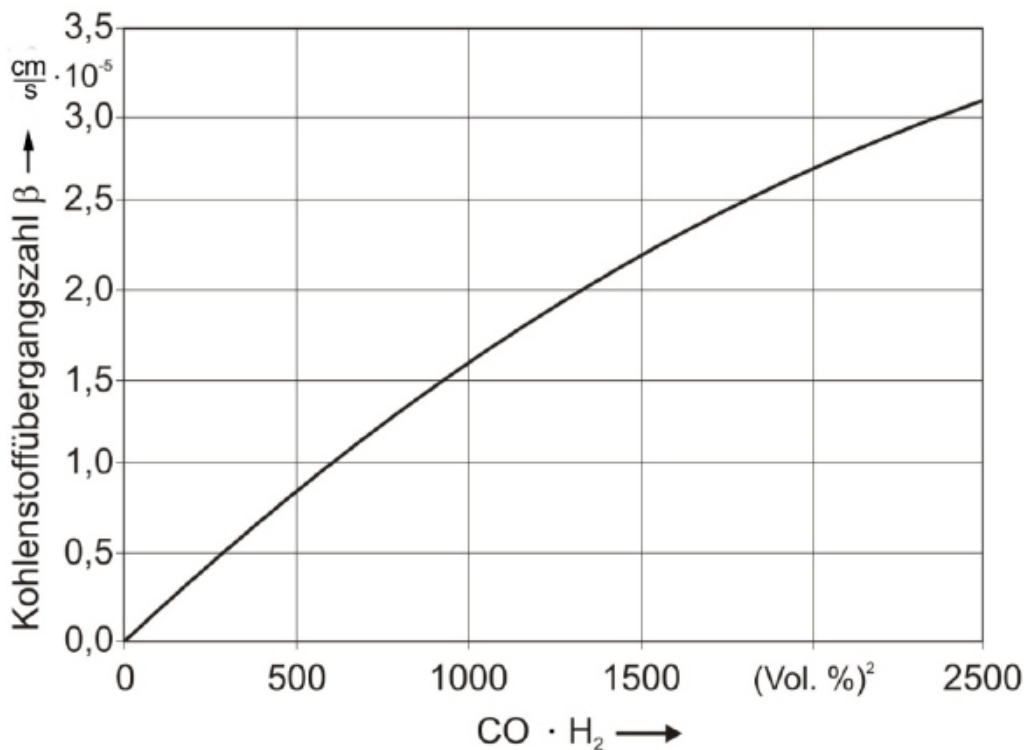


Bild 1-6: Kohlenstoff-Übergangszahl  $\beta$  für das System ( $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4$ ) - ( $\text{CO}/\text{CO}_2$ ) bei  $900 \text{ }^\circ\text{C}$