

Simulationsforum Schweißen und Wärmebehandlung 2013

Möglichkeiten der FE-basierten Simulation des Aufkohlens von Stahlbauteilen und der zweckmäßigen Definition des ZTU-Verhaltens aufgekohlter Werkstoffzustände

Dr.-Ing. Andreas Diemar¹

Dr.-Ing Uwe Gerth²

Prof. Dr.-Ing. Jörg Hildebrand¹

¹ Bauhaus Universität Weimar, Juniorprofessur Simulation und Experiment

² Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar,
Abteilung Werkstoffe und Bauteile



15.-17. Oktober 2013, Weimar

Gliederung

1 Einführung

2 Simulation des Aufkohlens von Stahlbauteilen

3 Definition des ZTU-Verhaltens aufgekohlter Werkstoffzustände

4 Beispiele

5 Schlussfolgerungen

Gliederung

1 Einführung

2 Simulation des Aufkohlens von Stahlbauteilen

3 Definition des ZTU-Verhaltens aufgekohlter Werkstoffzustände

4 Beispiele

5 Schlussfolgerungen

Aufkohlen von Stahlbauteilen

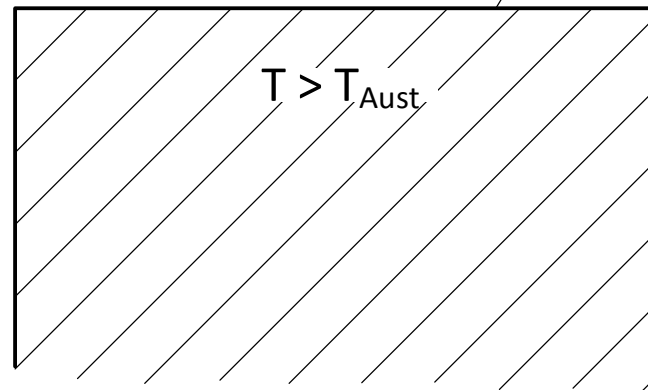
- Teilprozess des Einsatzhärtens
- Einlagerung von Kohlenstoff bei hohen Temperaturen, $T > T_{\text{Aust}}$

Aufkohlen von Stahlbauteilen

- Teilprozess des Einsatzhärtens
- Einlagerung von Kohlenstoff bei hohen Temperaturen, $T > T_{\text{Aust}}$

Aufkohlungsmittel

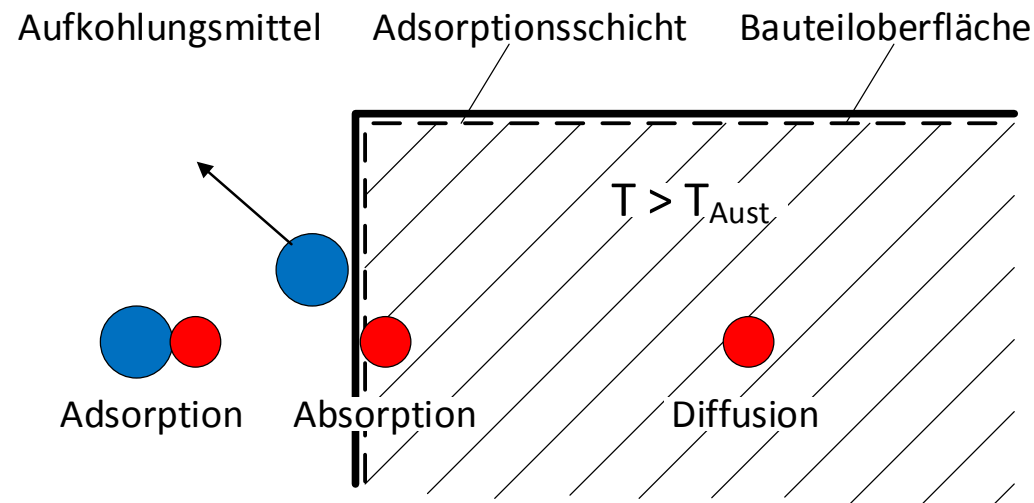
Bauteiloberfläche



Quelle: Liedtke: „Stahl-Merkblatt 452 Einsatzhärten“

Aufkohlen von Stahlbauteilen

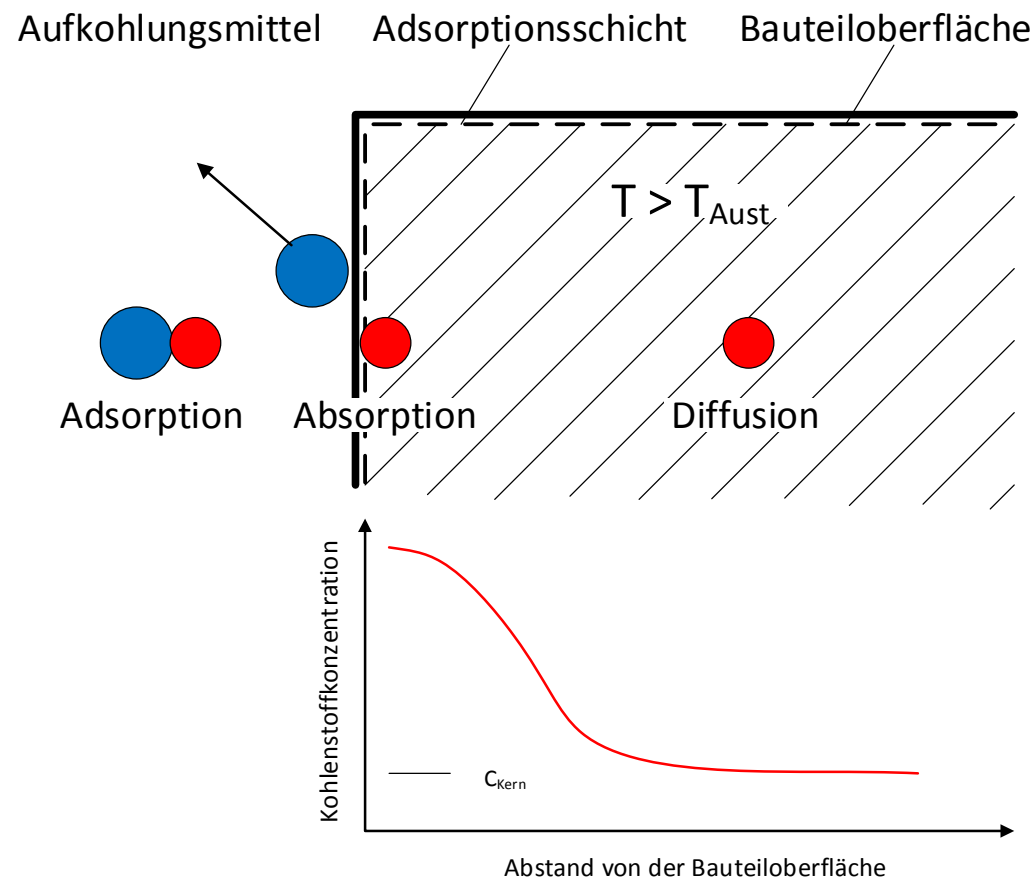
- Teilprozess des Einsatzhärtens
- Einlagerung von Kohlenstoff bei hohen Temperaturen, $T > T_{\text{Aust}}$



Quelle: Liedtke: „Stahl-Merkblatt 452 Einsatzhärten“

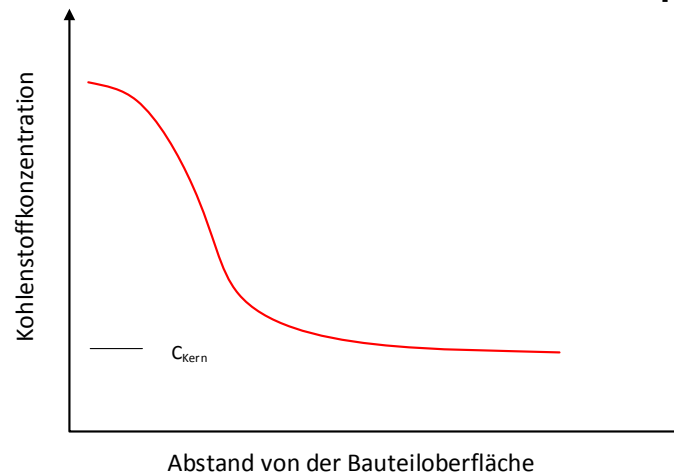
Aufkohlen von Stahlbauteilen

- Teilprozess des Einsatzhärtens
- Einlagerung von Kohlenstoff bei hohen Temperaturen, $T > T_{\text{Aust}}$



Aufkohlen von Stahlbauteilen

- Teilprozess des Einsatzhärtens
- Einlagerung von Kohlenstoff bei hohen Temperaturen, $T > T_{\text{Aust}}$



- Veränderung der chemischen Zusammensetzung
 - Höherfeste Gefügebestandteile und Druckeigenspannungen im Bauteilrandbereich
 - damit Steigerung der Verschleiß- und Festigkeitseigenschaften

Gliederung

1 Einführung

2 Simulation des Aufkohlens von Stahlbauteilen

3 Definition des ZTU-Verhaltens aufgekohlter Werkstoffzustände

4 Beispiele

5 Schlussfolgerungen

Diffusionsanalyse, theoretische Grundlagen

- Fick'sche Gesetze
 - Stationärer Zustand an der Bauteiloberfläche, 1. Fick'sches Gesetz
 - Zeitlich veränderlicher Zustand im Bauteilvolumen, 2. Fick'sches Gesetz

- Partielle Differentialgleichung des Kohlenstoffkonzentrationsfeldes

$$\frac{\partial c_C(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_C \frac{\partial c_C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_C \frac{\partial c_C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_C \frac{\partial c_C}{\partial z} \right)$$

c_C - Kohlenstoffkonzentration

\mathbf{r} - Ortsvektor

t - Zeit

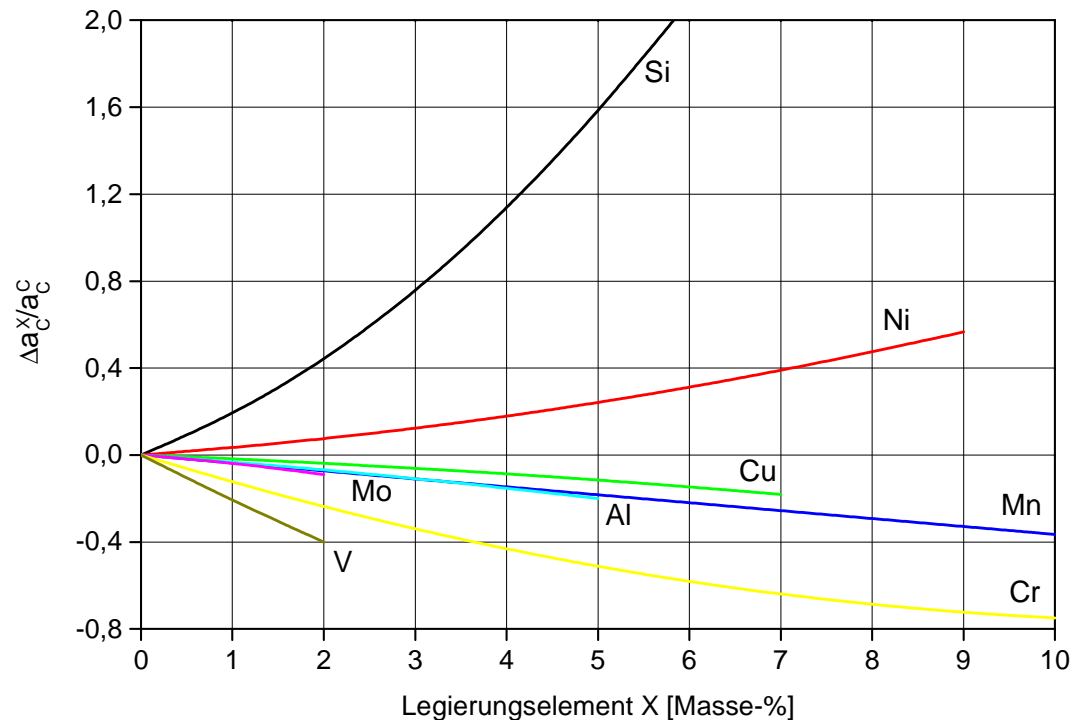
T - Temperatur

D_C - Diffusionskoeffizient

$D_C = f(c_C, T)$

- Grenzbedingungen
 - Anfangsbedingung, Modellierung Kohlenstoffgrundgehalt
 - 1., 2. und 3. Art Randbedingungen, Modellierung verschiedener Aufkohlungsverfahren wie Gas- und Niederdruckaufkohlen

Wirkung von Legierungselementen



Quelle: Neumann, F. und B. Person:
Beitrag zur Metallurgie der Gasaufkohlung

- Ni, Si legierte Stähle geringere Kohlenstoffrandkonzentration
- Mo, Cr, Mn legierte Stähle höhere Kohlenstoffrandkonzentration
- Definition eines empirischen Legierungsfaktors k_L

Abbildung praxisüblicher Aufkohlungsverfahren - Gasaufkohlen

- Aufkohlungsatmosphäre aus endotherm hergestelltem Trägergas (CO , CO_2 , H_2 , N_2) und Zusatzgas (C_3H_8)
- Bestimmung des C-Pegels der Aufkohlungsatmosphäre, Regelung des Aufkohlungsvorganges möglich

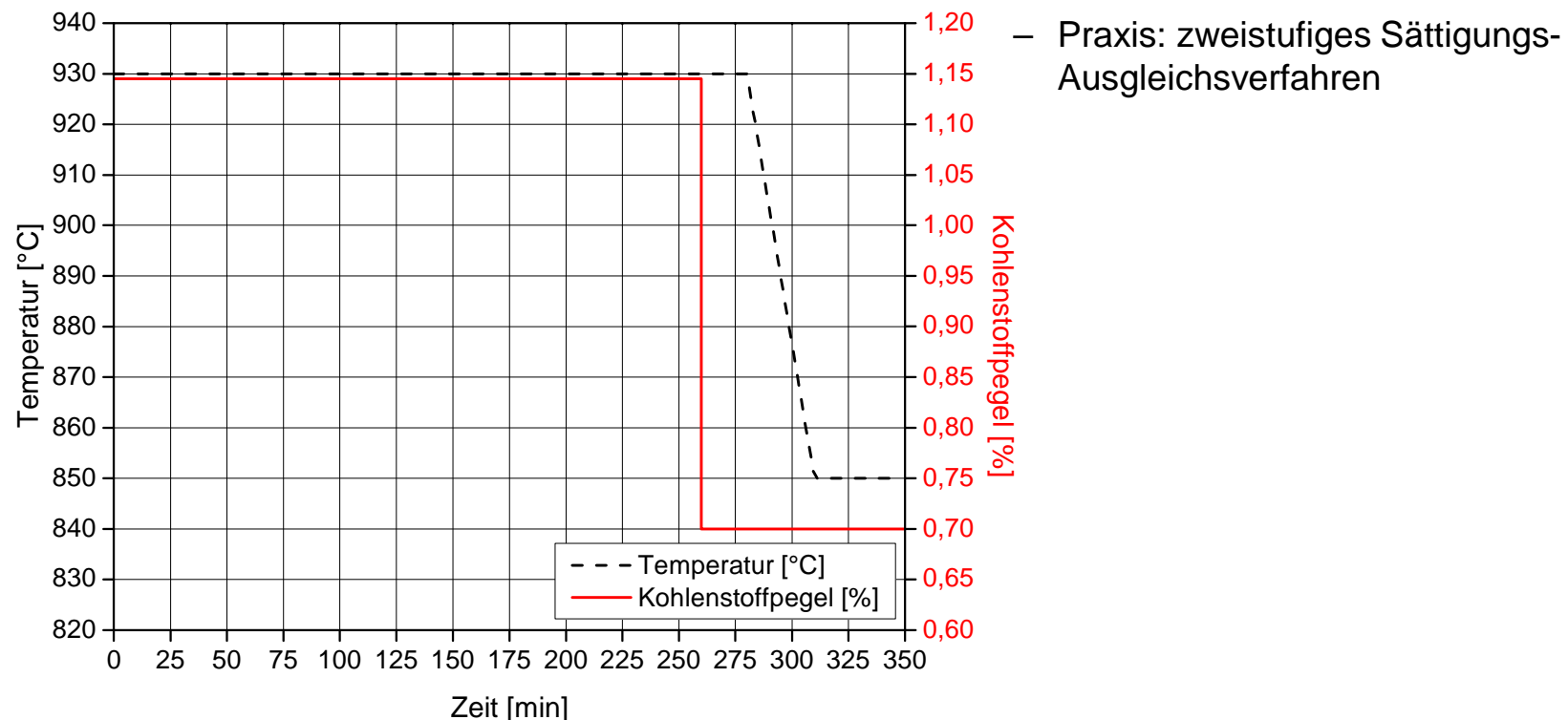
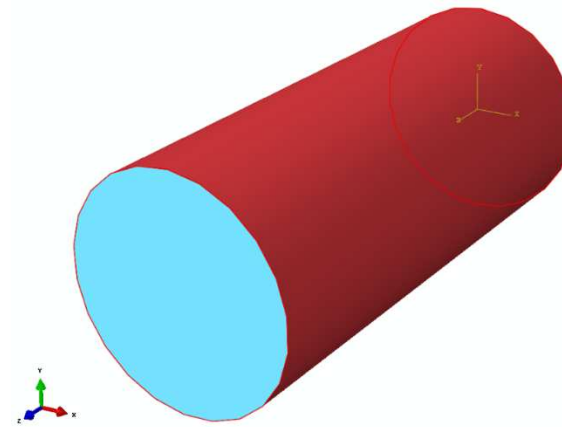
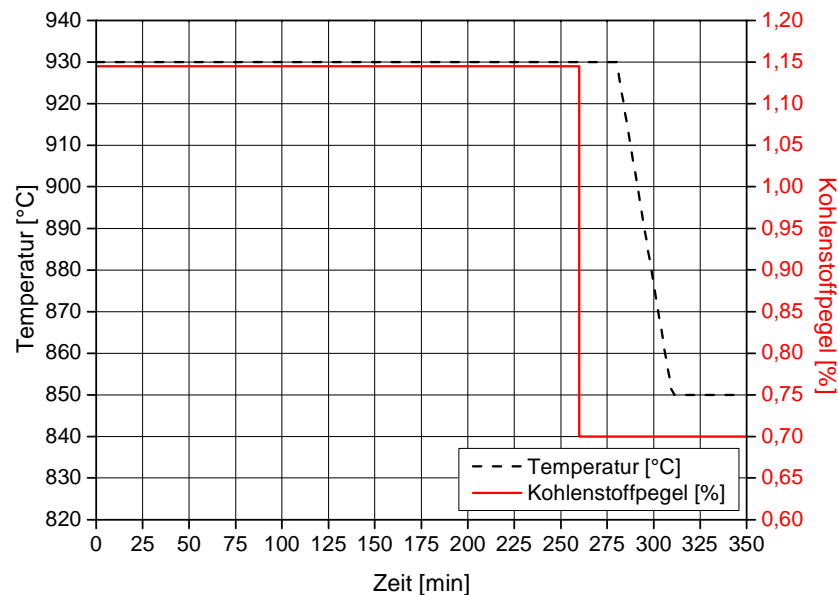


Abbildung praxisüblicher Aufkohlungsverfahren - Gasaufkohlen



– Definition der Randbedingungen (RB)

Möglichkeit 1: RB 1. Art

$$c_C(\mathbf{r}, t)|_{\mathbf{r}^{(A)}} = C_P(t) \cdot k_L$$

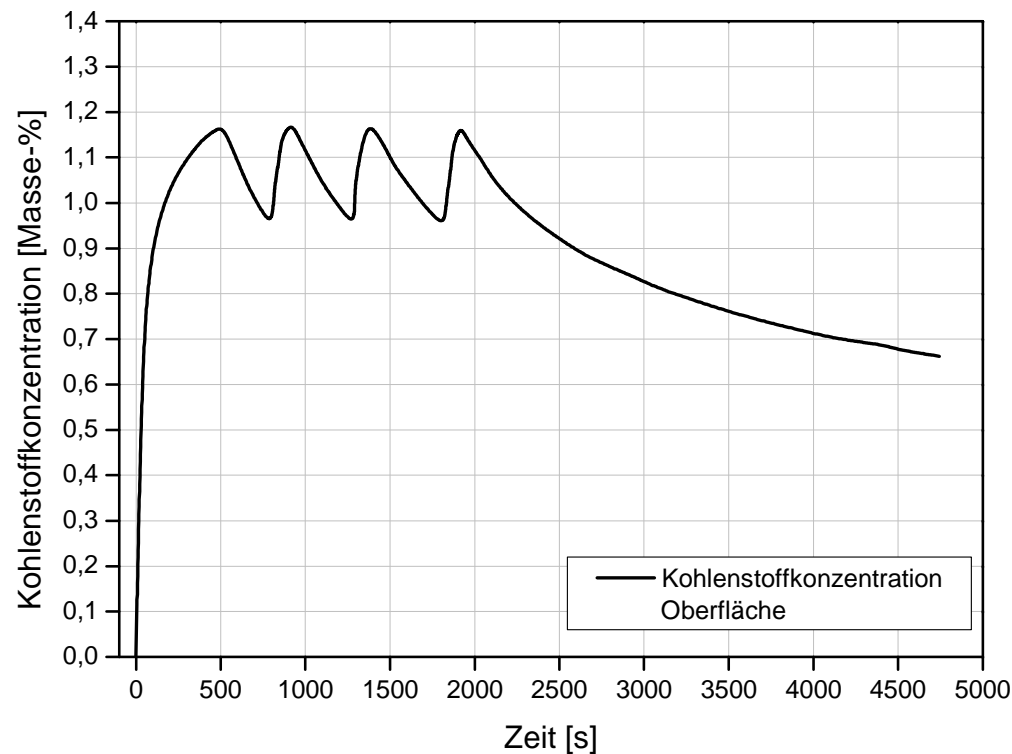
Möglichkeit 2: RB 3. Art

$$j_C^{(A)} = -\beta [c_C^{(G)} - c_C(\mathbf{r}^{(A)}, t)]$$

$$c_C^{(G)} = C_P(t) \cdot k_L$$

Abbildung praxisüblicher Aufkohlungsverfahren - Niederdruckaufkohlen

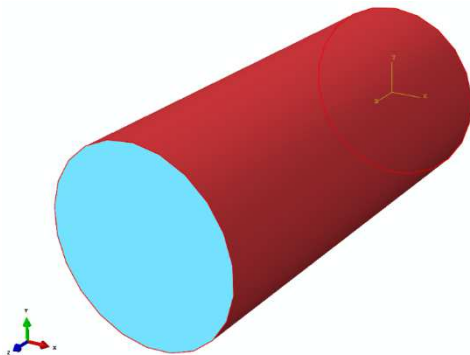
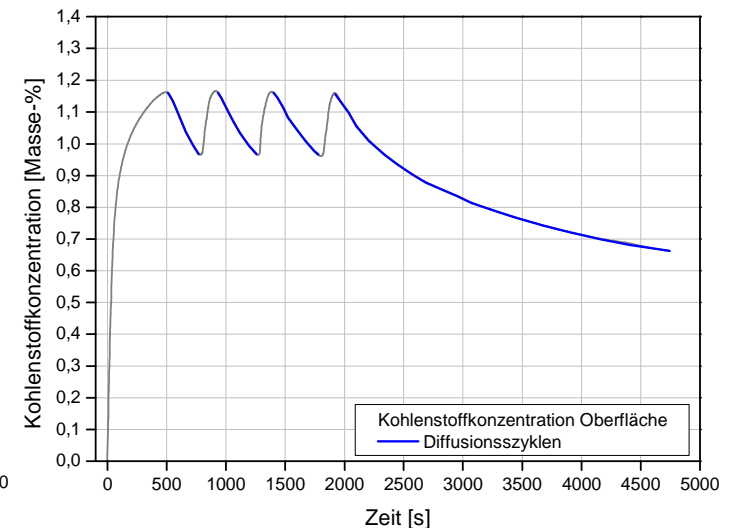
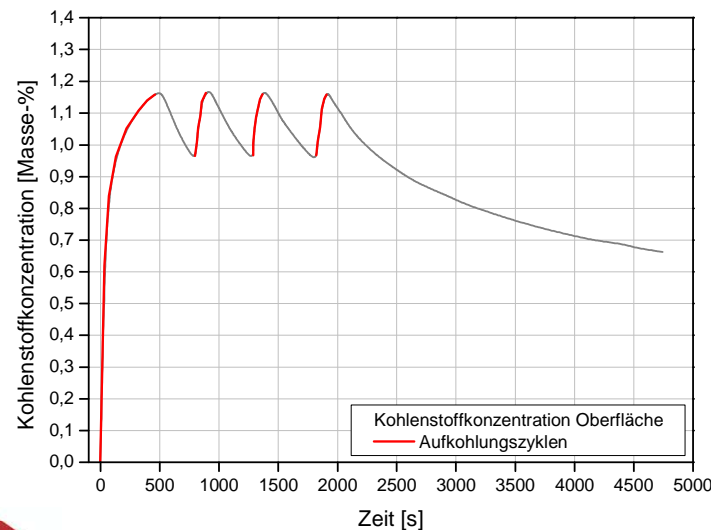
- Ausschließliche Verwendung von Kohlenwasserstoffen als Aufkohlungsgas (C_2H_2)
- Regelung über C-Pegel nicht möglich



- Bereits nach wenigen Minuten Kohlenstoffrandgehalt in Höhe Sättigungskonzentration
- Praxis: Verwendung von Aufkohlungs- und Diffusionszyklen

Abbildung praxisüblicher Aufkohlungsverfahren - Niederdruckaufkohlen

- Definition der Randbedingungen



Aufkohlungszyklen RB 1. Art

Diffusionszyklen RB 2. Art

$$c_C(\mathbf{r}, t)|_{\mathbf{r}^{(A)}} = c_{C, \text{Sätt.}}$$

$$j_C^{(A)}(\mathbf{r}^{(A)}, t) = 0$$

Numerische Lösung der konstitutiven Gleichungen

- Analytische Lösungen nur für einfache Geometrien und Randbedingungen verfügbar
- Komplexe Geometrien: Lösung der partiellen DGL durch FEM
 - nicht alle FE-Programme verfügen über Diffusionsanalyseprozedur
 - Lösung der DGL => Betrachtung als transientes Temperaturfeld

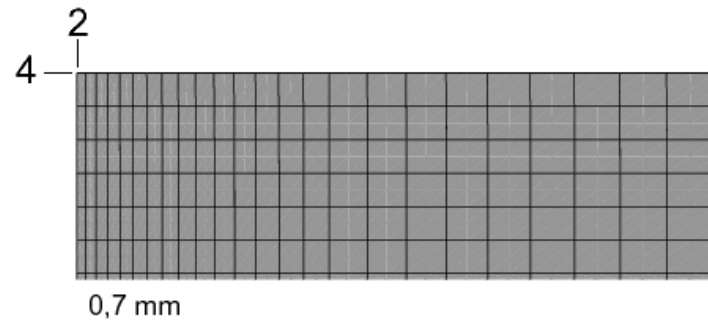
$$c_C \Rightarrow T, \quad D_C \Rightarrow \alpha$$

- Temperaturleitfähigkeit

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$$

Numerische Lösung der konstitutiven Gleichungen

- FE-Vernetzung entsprechend elastizitätstheoretischer Bauteilanalyse
- ausreichend Elemente über die Aufkohlungstiefe verteilen



- Einhaltung minimaler Zeitschritte bei quadratischen Elementen bei Integration durch Rückwärts-Euler-Verfahren

– ABAQUS Diffusionsanalyse $\Delta t > \frac{1}{6D_c} \Delta l^2$

– ABAQUS thermische Analyse $\Delta t > \frac{\rho \cdot c_p}{6\lambda} \Delta l^2$

Gliederung

1 Einführung

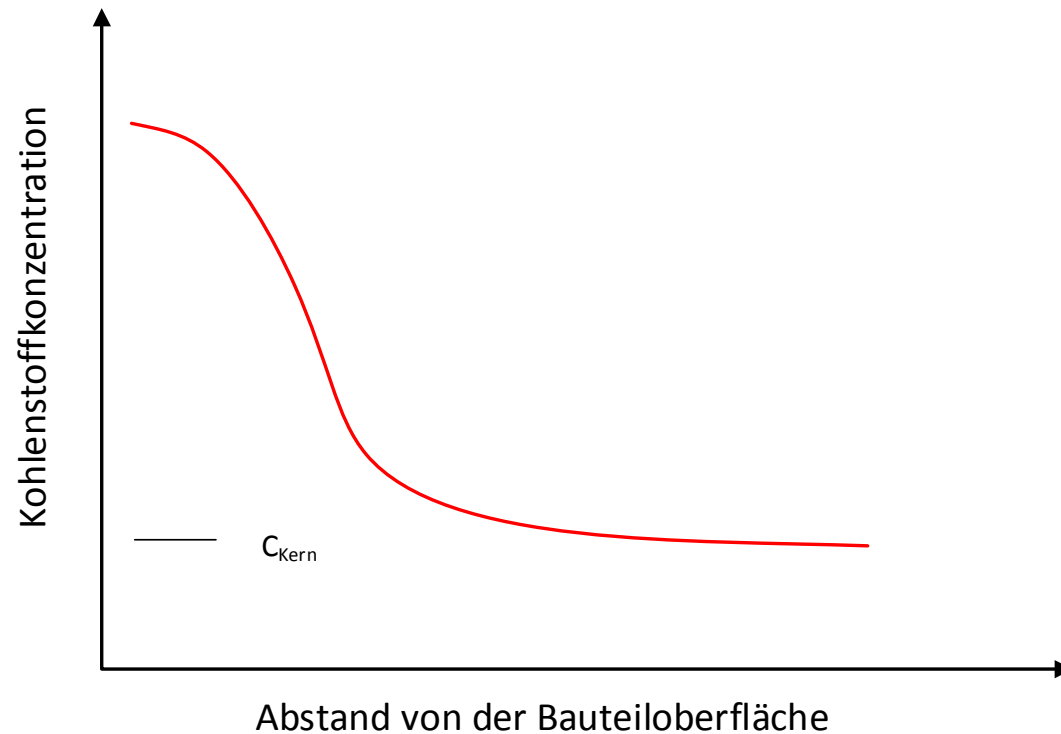
2 Simulation des Aufkohlens von Stahlbauteilen

3 Definition des ZTU-Verhaltens aufgekohlter Werkstoffzustände

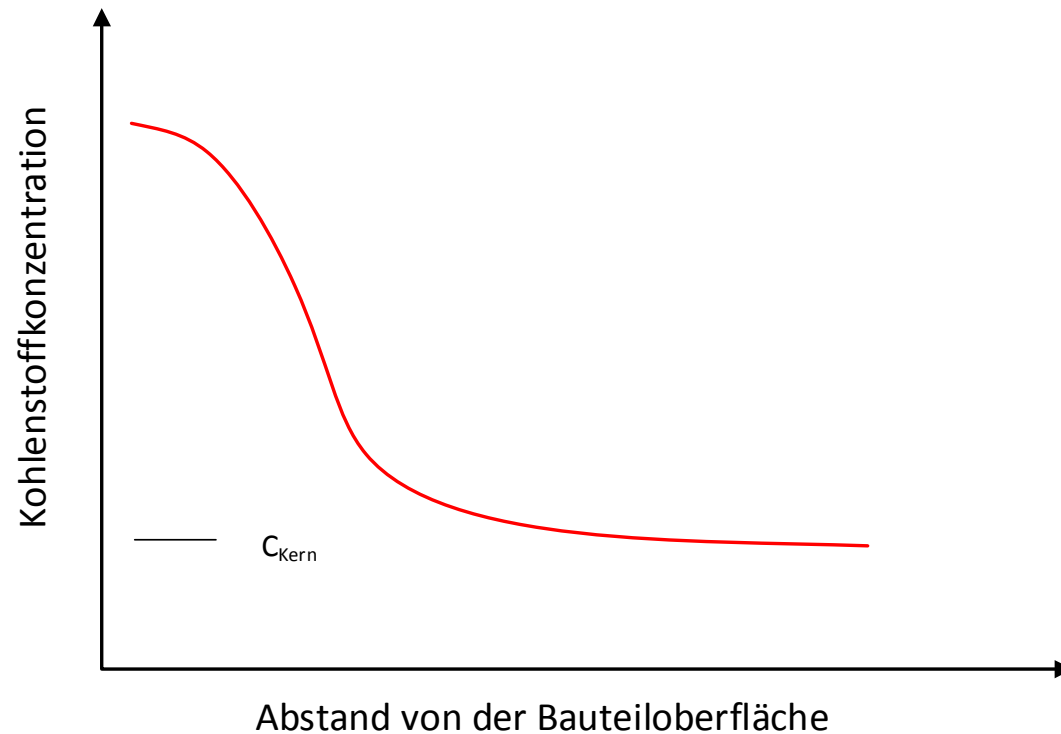
4 Beispiele

5 Schlussfolgerungen

Folgerungen aus dem Kohlenstoffverlauf



Folgerungen aus dem Kohlenstoffverlauf



- Unterschiedliche thermophysikalische Werkstoffkennwerte
- Unterschiedliche thermomechanische Werkstoffkennwerte
- **Unterschiedliches ZTU-Verhalten**

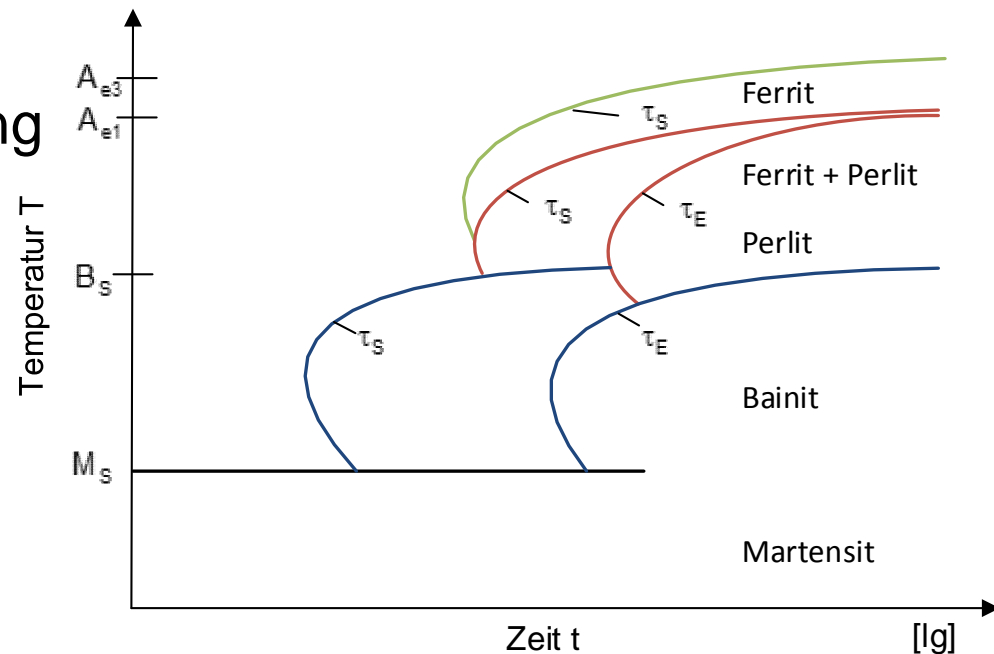
Mögliche Umwandlungen

- Umwandlungen mit vollständiger / eingeschränkter Diffusion
 - Austenit => Ferrit
 - Austenit => Perlit
 - Austenit => **Bainit**

- Diffusionslose Umwandlung

- Austenit => **Martensit**

- ZTU-Schaubilder



Analytische Bestimmung des ZTU-Verhaltens

- Diffusionsgesteuerte Umwandlungen
 - Halbempirisches Modell isothermes ZTU-Diagramm (Li e. a. 1998), niedrig legierte Stähle

$$\tau^{(k)}(V, T) = \frac{f(C, Mn, Si, Ni, Cr, Mo, G)}{\Delta T^n \cdot \exp(-Q / R \cdot T)} \cdot \int_0^V \frac{dV}{V^{0,4 \cdot (1-V)} \cdot (1-V)^{0,4 \cdot V}}$$

ΔT - Temperaturdifferenz, Starttemp.

T - Temperatur

G - Austenitkorngroße

$k = 2-4$: Ferrit, Perlit, Bainit

V - Volumenfraktion

Q - Aktivierungsenergie

R - Ideale Gaskonstante

- Beginn der Umwandlung $V_S=0,01$
 - Ende der Umwandlung $V_E=0,99$
- Diffusionslose Umwandlung in Martensit

$$M_S = f(C, Mn, Si, Ni, Cr, Mo, \dots)$$

Gliederung

1 Einführung

2 Simulation des Aufkohlens von Stahlbauteilen

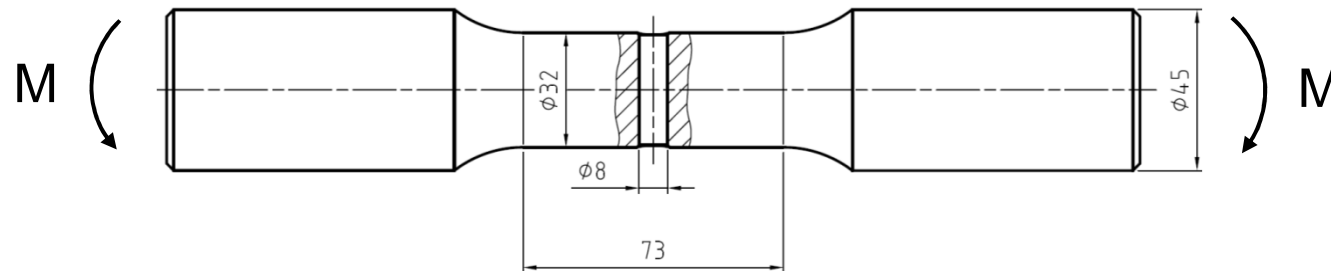
3 Definition des ZTU-Verhaltens aufgekohlter Werkstoffzustände

4 Beispiele

5 Schlussfolgerungen

Gasaufkohlung einer Biegeprobe mit Querbohrung

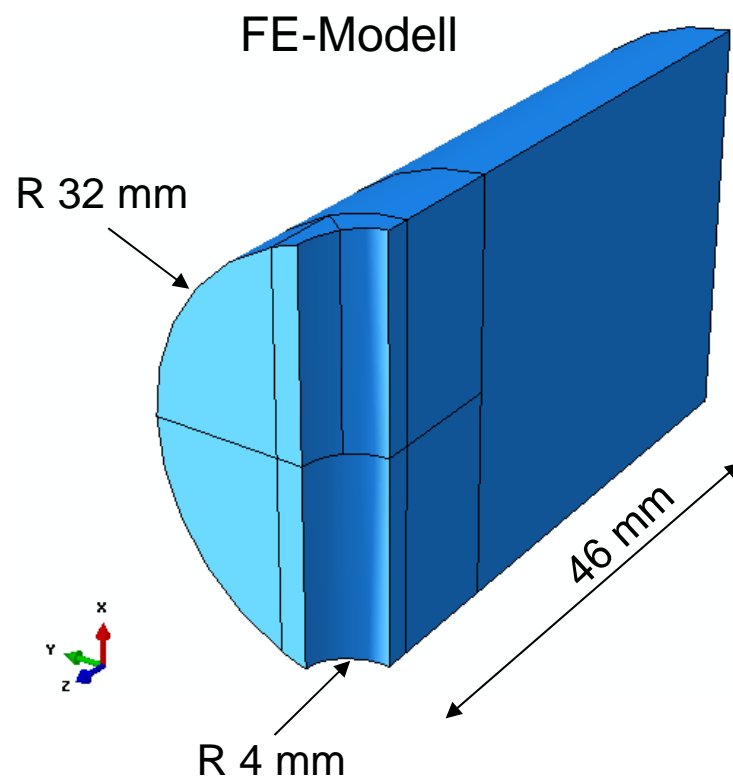
- Geometrie (Bruder 1999)



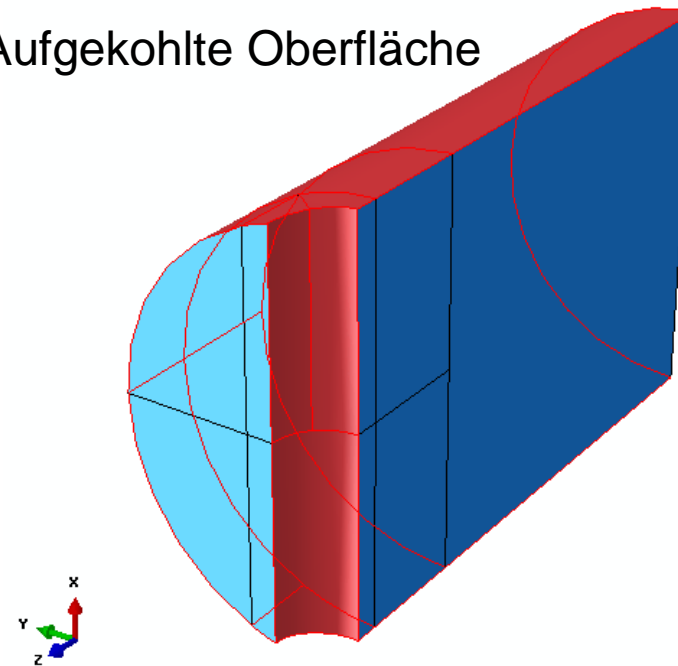
- Werkstoff 20MnCr5
- Wärmebehandlung - Ziel: Eht 0,7 mm
 - Gasaufkohlung, 2-stufig (0,7 %C / 1,15 %C) 350 min bei 930 C°
 - Direkthärtung in Öl (110 C), Anlassen bei 170 C

Gasaufkohlung einer Biegeprobe mit Querbohrung

- FE-Modellierung (Diemar 2007)



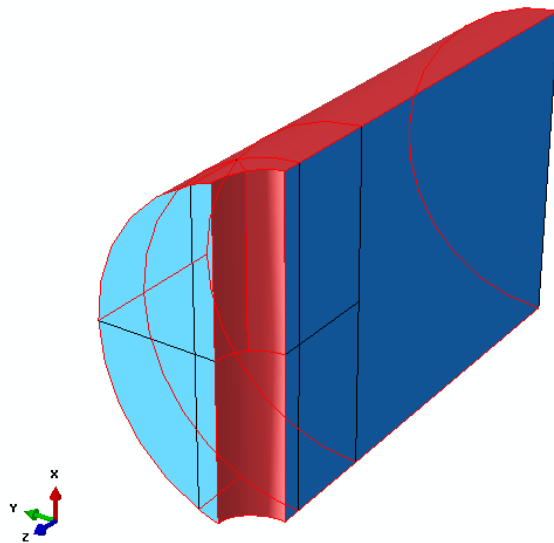
Aufgekohlte Oberfläche



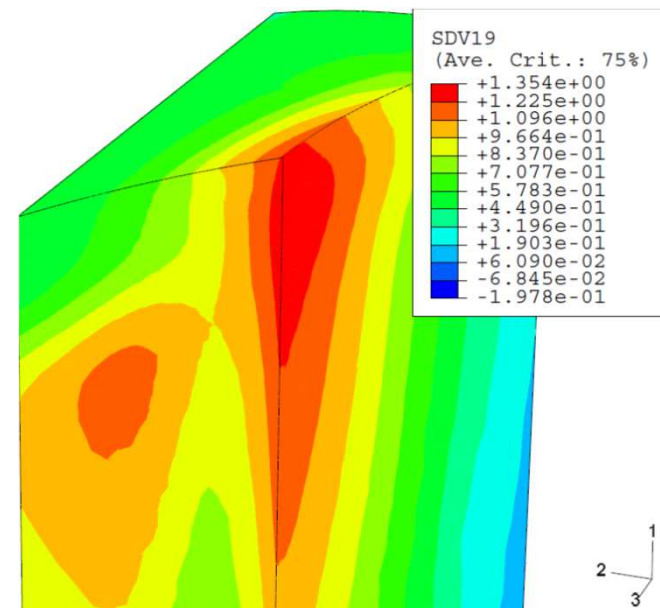
Gasaufkohlung einer Biegeprobe mit Querbohrung

- FE-Vernetzung (Diemar 2007)

Aufgekohlte Oberfläche



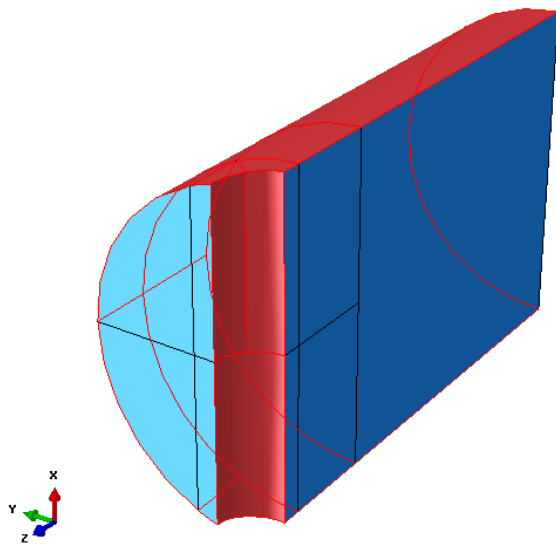
Auslastungsgrad, Dauerfestigkeit



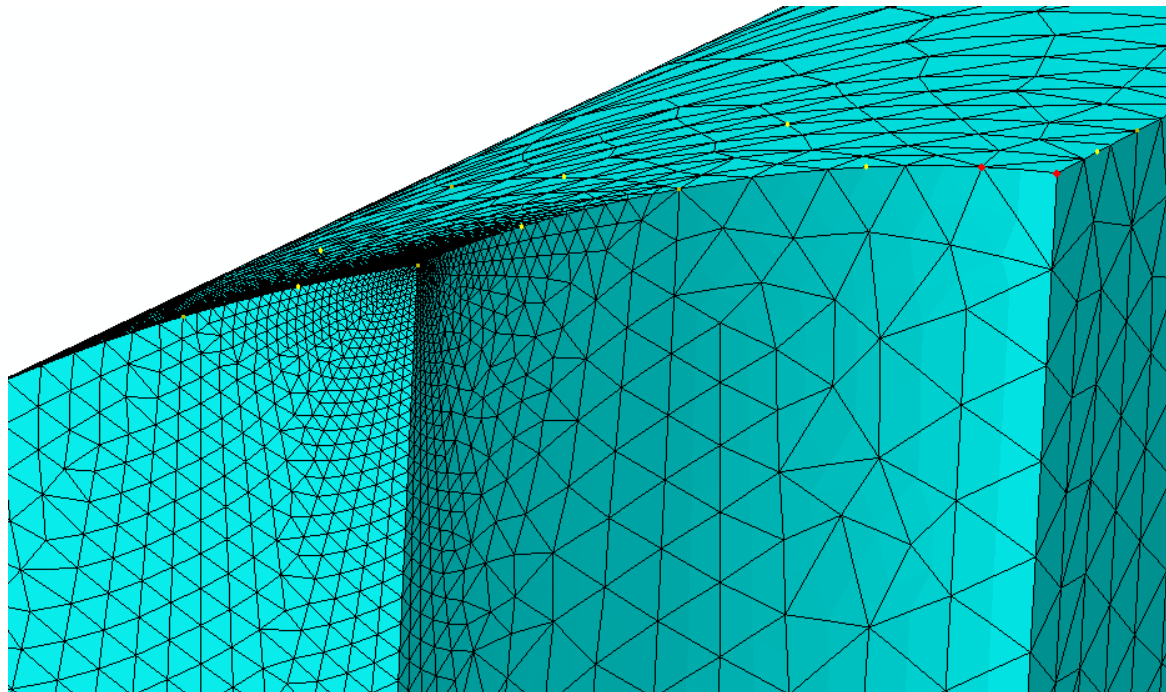
Gasaufkohlung einer Biegeprobe mit Querbohrung

- FE-Vernetzung (Diemar 2007)

Aufgekohlte Oberfläche



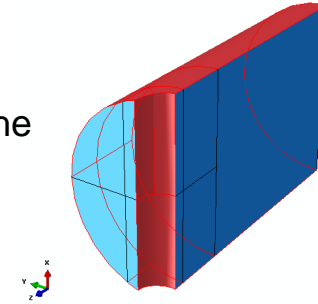
Ausschnitt FE-Netz



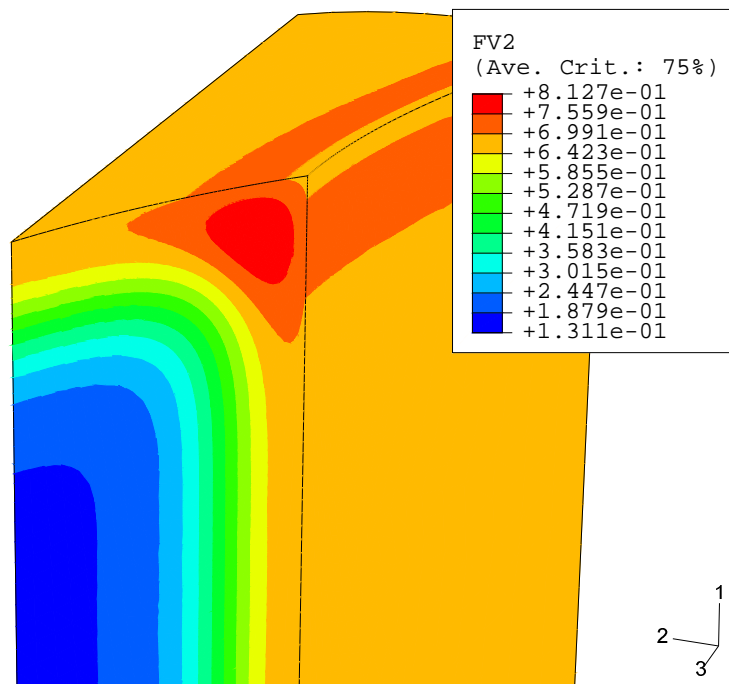
Gasaufkohlung einer Biegeprobe mit Querbohrung

- Ergebnisse (Diemar 2007)

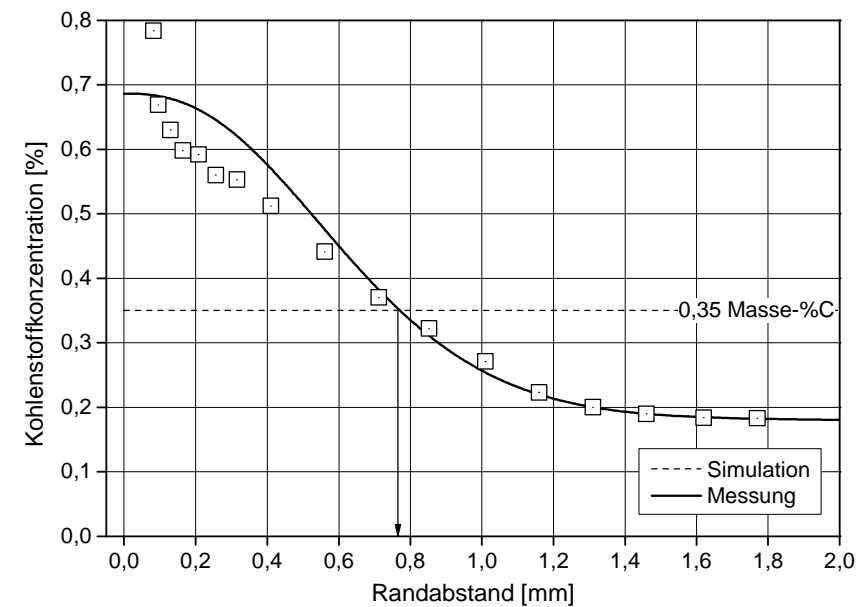
Aufgekohlte Oberfläche



Kohlenstoffkonzentration [Masse-%]



Gegenüberstellung mit Experiment



ZTU-Verhalten 20MnCr5

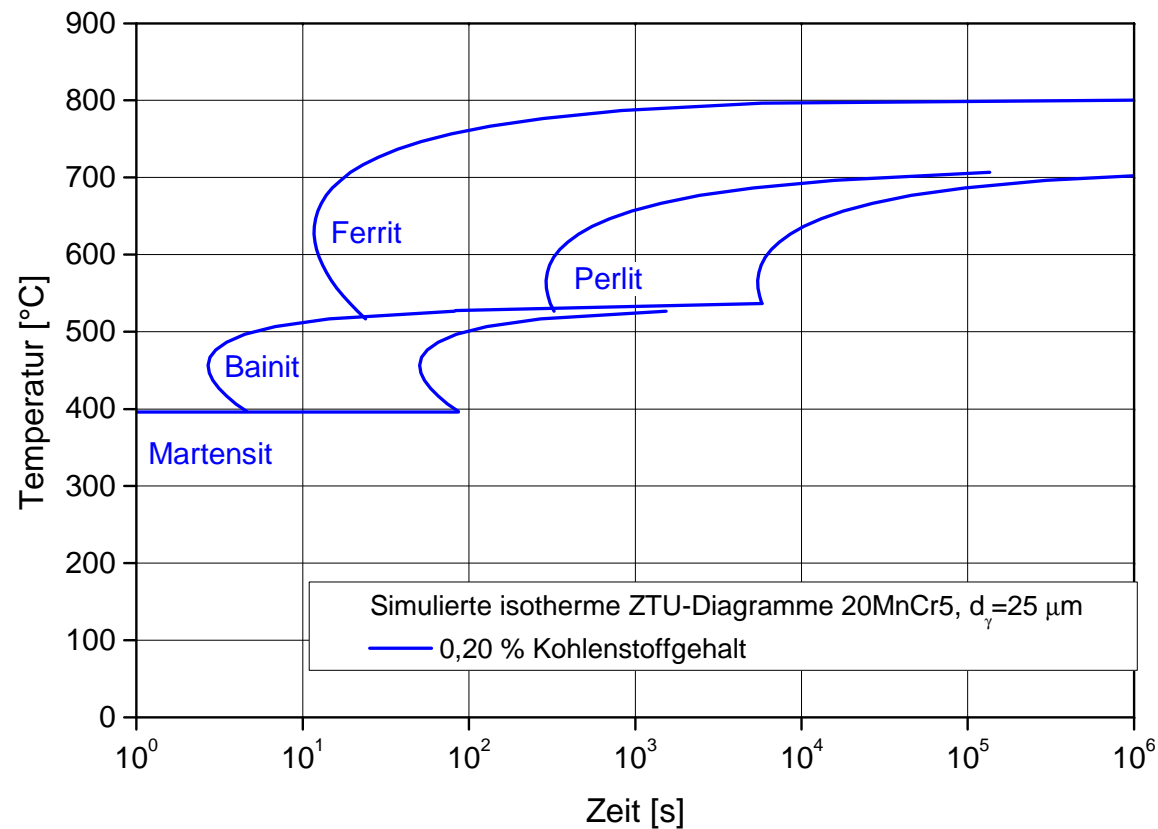
- Chemische Zusammensetzung

C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	P	Al
0,20	1,250	0,160	0,100	1,350	0,039	0,220	0,026	0,043

- Austenitkorngröße $d_\gamma = 25 \mu\text{m}$
- Untersuchung C=0,20 Masse-%, C=0,60 Masse%

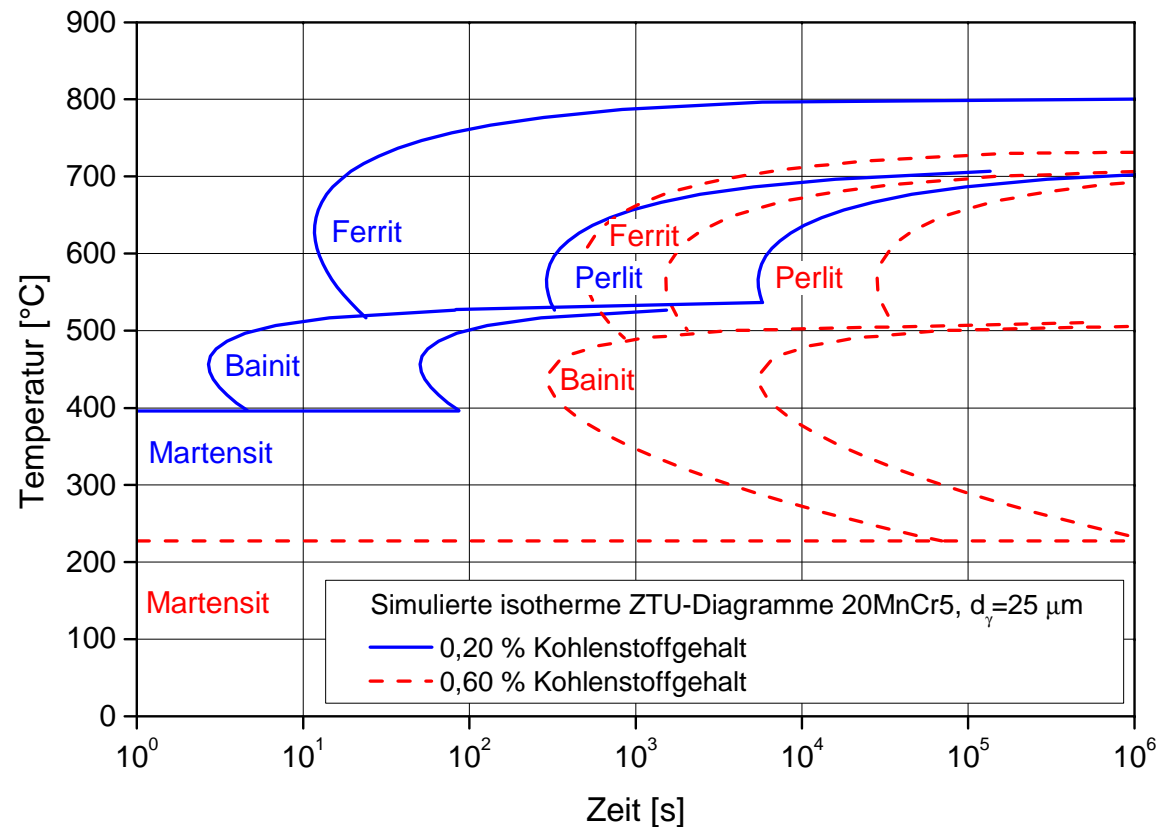
ZTU-Verhalten 20MnCr5

- Ergebnisse C=0,20 Masse-%



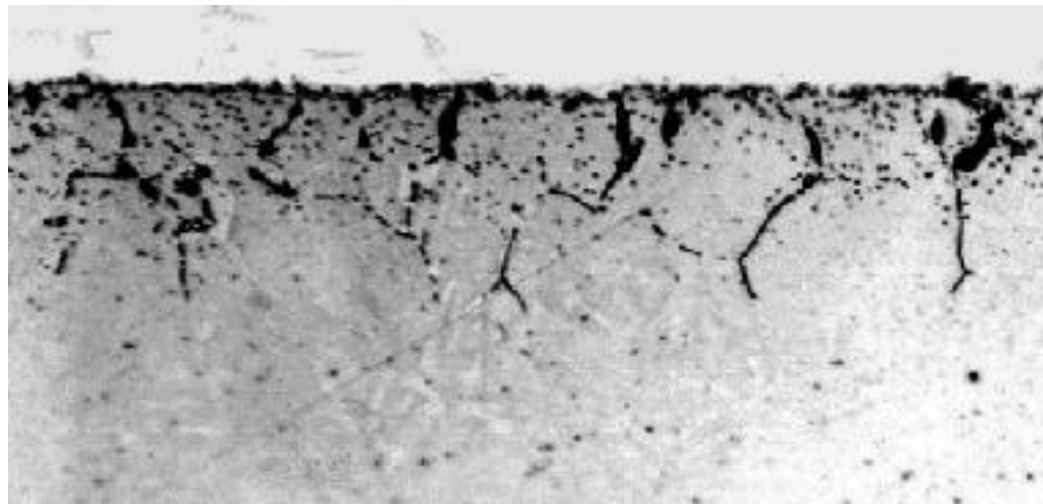
ZTU-Verhalten 20MnCr5

- Gegenüberstellung C=0,20 Masse-% und C=0,60 Masse-%



ZTU-Verhalten 20MnCr5

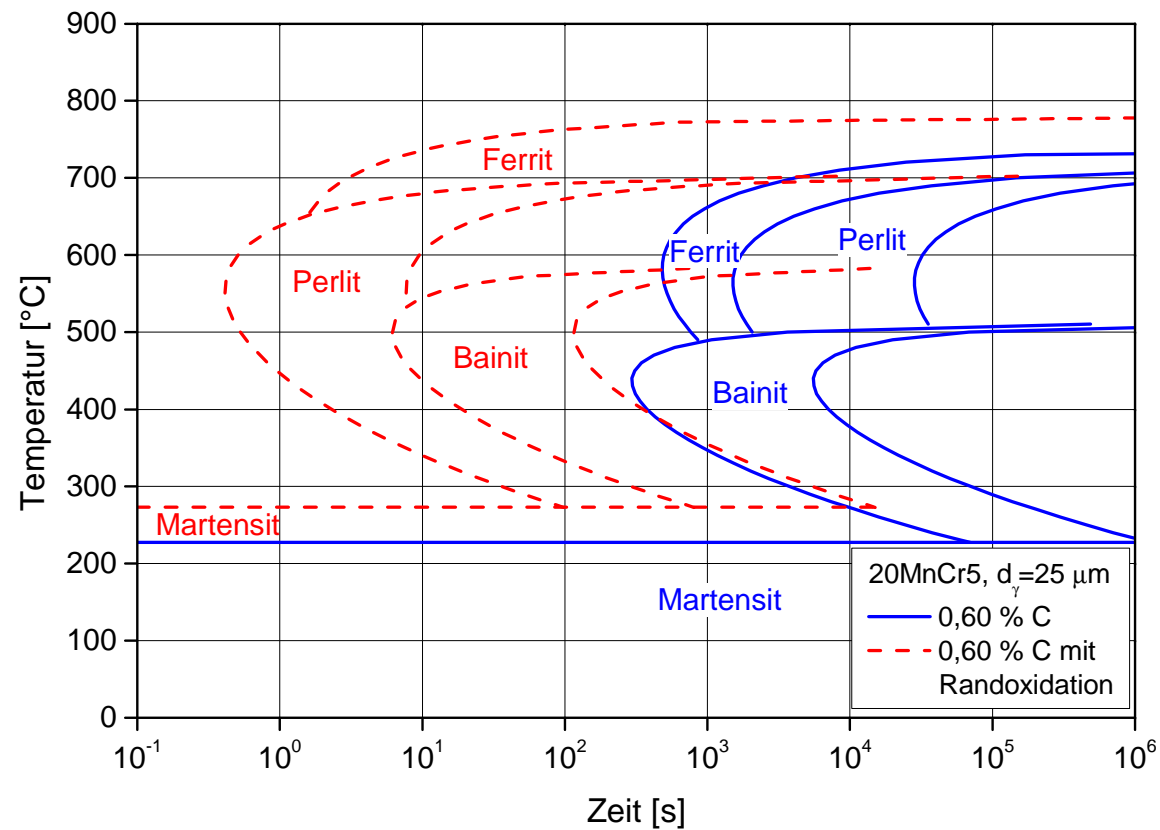
- Einfluss einer Randoxidation
 - Gasaufkohlen
 - Legierungselemente mit großer Affinität zu Sauerstoff, Bildung von Oxiden



Quelle: Liedtke: „Stahl-Merkblatt 452 Einsatzhärten“

ZTU-Verhalten 20MnCr5

- Einfluss einer Randoxidation



Gliederung

1 Einführung

2 Simulation des Aufkohlens von Stahlbauteilen

3 Definition des ZTU-Verhaltens aufgekohlter Werkstoffzustände

4 Beispiele

5 Schlussfolgerungen

Schlussfolgerungen

- Die mathematische Beschreibung des Aufkohlens von Stahlbauteilen erfolgt auf der Basis der Fick'schen Gesetze unter Berücksichtigung der Legierungszusammensetzung.
- Durch die geeignete Wahl der Randbedingungen können industrieübliche Aufkohlungsverfahren abgebildet werden.
- Die Diffusionsanalyse beliebiger Bauteilgeometrien erfolgt mit der FEM.
- Zur Analyse von Abschreckprozessen ist das ZTU-Verhalten des Stahlwerkstoffes in Abhängigkeit des Kohlenstoffgehaltes zu definieren.
- Das ZTU-Verhalten aufgekohlter Werkstoffzustände kann anhand des reaktionskinetischen Modells von Li definiert werden.