

FOSTA-Forschungsvorhaben

Optimiertes Einsatzhärten

Simulationsgestützte Optimierung des lokalen Werkstoffzustandes
im Bereich zyklisch hochbeanspruchter einsatzgehärteter
Konstruktionsdetails mit Kerbwirkung
IGF 17779 BR

Bauhaus-Universität Weimar
Juniorprofessur Simulation und Experiment



Materialforschungs- und -prüfanstalt an der
Bauhaus-Universität Weimar



Sitzung des AWT-Fachausschusses 21 - Gefüge und mechanische Eigenschaften -
26.02.2014 - Schaeffler Technologies AG & Co. KG Schweinfurt

Gliederung

- 1 Vorstellung des Forschungsvorhabens
 - 1.1 Allgemeine Projektdaten
 - 1.2 Problemstellung
 - 1.3 Zielsetzung und Lösungsweg
 - 1.4 Analytisches und experimentelles Untersuchungsprogramm
- 2 Projektstand
 - 2.1 Erweiterung SYSWELD-Funktionalität
 - 2.2 Numerische Untersuchungen

Gliederung

1 Vorstellung des Forschungsvorhabens

1.1 Allgemeine Projektdaten

1.2 Problemstellung

1.3 Zielsetzung und Lösungsweg

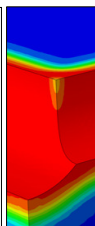
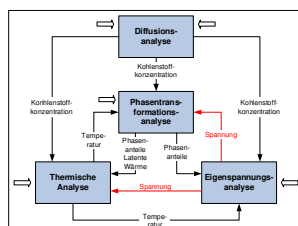
1.4 Analytisches und experimentelles Untersuchungsprogramm

2 Projektstand

2.1 Erweiterung SYSWELD-Funktionalität

2.2 Numerische Untersuchungen

Simulationsgestützte Optimierung des lokalen Werkstoffzustandes im Bereich zyklisch hochbeanspruchter einsatzgehärteter Konstruktionsdetails mit Kerbwirkung



Ausgangslage:

- Bauteilmüdigung durch funktionsbedingte Konstruktionsdetails mit Kerbwirkung bei zyklischer Bauteilbeanspruchung
- Form der Konstruktionsdetails beeinflusst signifikant das lokale Wärmebehandlungsergebnis
- Häufig lokale Eigenspannungen und Festigkeiten nicht optimal

FOSTA Forschungsvorhaben (P 993):

- Numerische Simulation mittels Finite Elemente Methode (FEM)
- Modifizierung technologischer Parameter des Einsatzhärtens
- Lokal optimale höherfeste Gefügestände und Druckeigen-spannungen bezogen auf die Form der Konstruktionsdetails
- Signifikante Steigerung der Dauerfestigkeit
- Verifikation der Simulationsergebnisse mittels Experiment

Beteiligte Industriepartner



Forschungsstellen



Gesamtvolumen: 487.150 € (bZ + vAW)
 Projektlaufzeit: 01.07.2013 – 30.06.2015
 FOSTA-Projektstatus: laufend

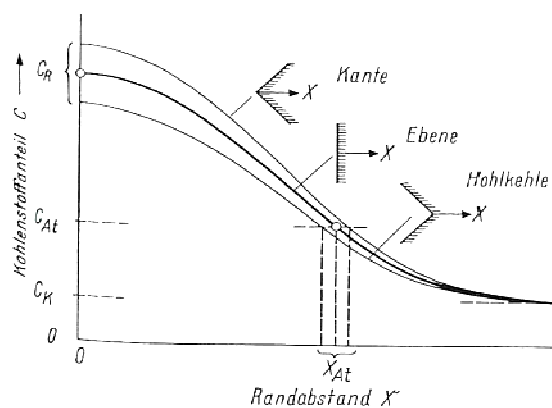
1.2 Problemstellung

- Konstruktionsdetails in Bauteilen
 - z.B. Welle mit Querbohrung, ausgerundete Wellenabsätze
 - Kerbwirkung, lokale Extremwerte der Spannung
 - zyklische Beanspruchung: Ausbildung von Anrissen und Ermüdung des Bauteils
- Konstruktionsdetail beeinflusst:
 - Kohlenstoffaufnahme
 - Kohlenstoffdiffusion im Bauteil
 - Wärmeübergang während des Abschreckens
 ⇒ Werkstofffestigkeiten und Eigenspannungen



1.2 Problemstellung

- Einfluss des Konstruktionsdetails auf das Aufkohlungsprofil



- Gasaufkohlung, zweistufiges Sättigungs-Ausgleichsverfahren
 J. WÜNNING, G. LEYENS, G. WOELK: Gesteuerte Aufkohlung in CO-freien Atmosphären.
 In: *HTM* 31 (1976), S. 132-135.

1.3 Zielsetzung

- Simulationsgestützte Optimierung des lokalen Werkstoffzustandes im Bereich zyklisch hochbeanspruchter einsatzgehärteter Konstruktionsdetails
 - Besseres Verständnis der Wirkung von Bauteilkerben innerhalb der Teilprozesse des Einsatzhärtens
 - Weiterentwicklung von Konzepten zur Dauerfestigkeitsabschätzung
 - Erweiterung des Wissensstandes zur Dauerfestigkeitssteigerung durch Anwendung der Technologie des Einsatzhärtens
- ⇒ Effizienterer Einsatz des Werkstoffes Stahl und Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit

1.3 Lösungsweg

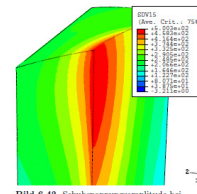
- Untersuchung von verschieden einsatzgehärteten Modellbauteilproben im Dauerfestigkeitsbereich
 - Modifizierung technologische Parameter Einsatzhärteprozess
 - Identifikation festigkeitsrelevanter Bauteilbereich durch FE-Analyse
 - Simulation des Einsatzhärtens in Kopplung mit Optimierungssolvern
- ⇒ Ziel: Lokale Maximierung der Werkstofffestigkeiten und (Druck-) Eigenspannungen
- Abschätzung der Dauerfestigkeit als Bezugsgröße zum Nachweis Maximierung Festigkeiten und Druckeigenspannungen

1.4 Analytisches Untersuchungsprogramm

- Erweiterung Funktionsumfang SYSWELD
 - Entwicklung eines Mehrfeldsolvers
 - Berücksichtigung des Einflusses des Spannungszustandes auf das Phasenumwandlungsverhalten in SYSWELD
 - Basis: theoretische Modelle aus Literatur
 - Verifikation: anhand Literaturdaten
 - Simulation von Niederdruckaufkohlungsprozessen
 - bisher nur Gasaufkohlungsprozesse in SYSWELD implementiert
 - Verifikation anhand vorhandener eigener Untersuchungen

1.4 Analytisches Untersuchungsprogramm

- Simulation modifizierte Einsatzhärtung
 - Identifikation des versagensmaßgebenden Bauteilbereiches
 - Elastische Analyse der äußeren Beanspruchung
 - Variation der technologischen Parameter
 - Ziel: Maximierung der Festigkeiten und Druckeigenstressspannungen des versagensmaßgebenden Bauteilbereiches
=> Minimierung des Auslastungsgrades
 - Grundlagen
 - Dang-Van-Vergleichsspannungskrit.
 - Wechselfestigkeit nach Murakami



1.4 Analytisches Untersuchungsprogramm

- Standardparameter Einsatzhärten (PbA 14.06.2013)
 - Aufkohlungstemperatur: 900 °C – 960 °C → Soll: 960 °C
 - Härtetemperatur: 840 °C – 870 °C → Soll: 960 °C
 - bei Ölabschreckung Öltemperatur: 50 – 150 °C → Soll: 60 °C
 - Anlasstemperatur: 150 °C – 180 °C → Soll: 160 °C (2 h)
 - Randkohlenstoff: 0,6 % - 0,8 % → Soll: 0,7 %
 - CHD: 0,56 mm – 0,80 mm
 - Grenzhärte: 550 HV; 610 HV (ZF)
 - Versuchsproben sollen direkt gehärtet werden

1.4 Analytisches Untersuchungsprogramm

- Simulation der modifizierten Einsatzhärtung

Übersicht technologische Parameter

Einsatzhärtungsverfahren	Parameter	Variation
Gasaufkohlung mit Ölabschreckung	Aufkohlungstemperatur	-
	Anzahl und Länge der Aufkohlungszyklen	X
	C-Gehalt der Aufkohlungszyklen	X
	Härtetemperatur	-
	Temperatur des Öl-Abschreckmediums	-
	Anlasstemperatur	-
Niederdruckaufkohlung mit Hochdruckgasabschreckung	Aufkohlungstemperatur	-
	Anzahl und Länge der Aufkohlungszyklen	X
	Anzahl und Länge der Diffusionszyklen	X
	Härtetemperatur	-
	Gas-Abschreckmedium	X
	Druck des Gas-Abschreckmediums	X
	Anlasstemperatur	-

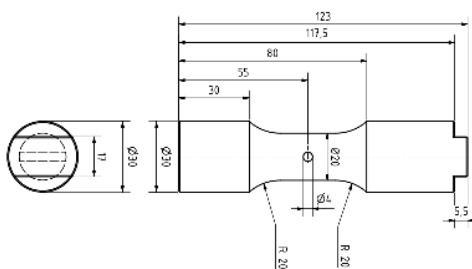
1.4 Experimentelles Untersuchungsprogramm

- Schwingversuche
 - Nachweis Eigenspannungsstabilität
 - Ermittlung Dauerfestigkeit und Übergangsbereich Zeitfestigkeit
 - Verifikation der Simulationsergebnisse
- Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung
 - Gefüge
 - Eigenspannungen
 - Härteverläufe
 - Qualitätssicherung Einsatzhärtung
 - Versagensursachen

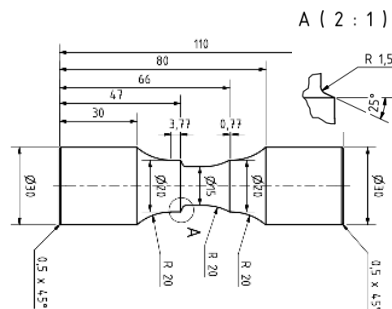


1.4 Experimentelles Untersuchungsprogramm

- Modellbauteilproben



Welle mit Querbohrung, Maße in [mm]
 Gasaufkohlung / Ölabschreckung
 18CrNiMo7-6, 20MnCr5



Welle mit Absatz, Maße in [mm]
 Niederdruckaufkohlung / Hochdruck-
 gasabschreckung
 18CrNiMo7-6, 20MnCr5

1.4 Experimentelles Untersuchungsprogramm

Übersicht Versuchsvarianten

Modellbauteil	Einsatzhärtung	Parameter	Werkstoff
Welle mit Querbohrung	Standard / modifiziert	Eigenspannungsstabilität Schwingfestigkeit	20MnCrB5 18CrNiMo7-6
Welle mit Absatz	Standard / modifiziert	Eigenspannungsstabilität Schwingfestigkeit	20MnCrB5 18CrNiMo7-6

⇒ Experiment: 50 Versuche Eigenspannungsstabilität
 200 Versuche Schwingfestigkeit, $R=-1$, $N_G=5 \times 10^6$

Gliederung

- 1 Vorstellung des Forschungsvorhabens
 - 1.1 Allgemeine Projektdaten
 - 1.2 Problemstellung
 - 1.3 Zielsetzung und Lösungsweg
 - 1.4 Analytisches und experimentelles Untersuchungsprogramm
- 2 Projektstand
 - 2.1 Erweiterung SYSWELD-Funktionalität
 - 2.2 Numerische Untersuchungen

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

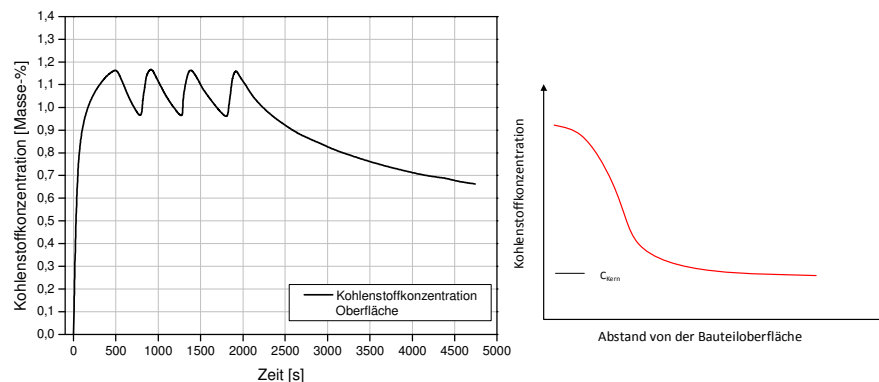
D_c - Diffusionskoeffizient

$D_c = f(c_c, T)$

- Grenzbedingungen
 - Anfangsbedingung, Modellierung Kohlenstoffgrundgehalt
 - Randbedingungen 1., 2. und 3. Art, Modellierung verschiedener Aufkohlungsverfahren wie Gas- und Niederdruckaufkohlen
- Wirkung von Legierungselementen, Legierungsfaktor k_L

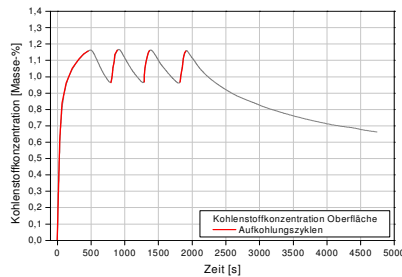
Modellierung des Niederdruckaufkohlens

- Verwendung von Kohlenwasserstoffen als Aufkohlungsgas (C_2H_2)
- Bereits nach wenigen Minuten Kohlenstoffrandgehalt in Höhe Sättigungskonzentration
- Praxis: Verwendung von Aufkohlungs- und Diffusionszyklen

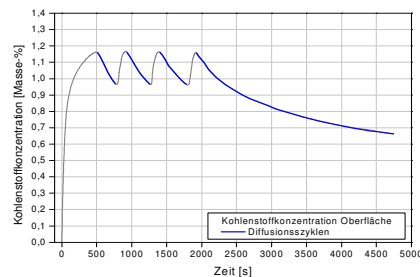


Modellierung des Niederdruckaufkohlens

- Definition der Randbedingungen (Diemar 2007)

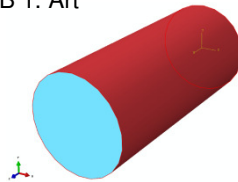


Aufkohlungszyklen RB 1. Art



Diffusionszyklen RB 2. Art

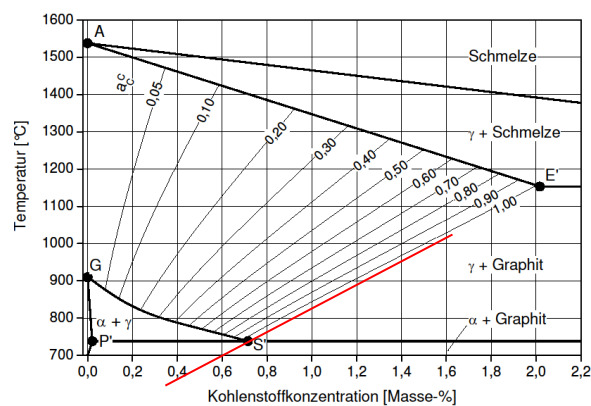
$$c_C(\mathbf{r}, t)|_{r^{(A)}} = c_{C, \text{Sätt.}}$$



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

Modellierung des Niederdruckaufkohlens

C-Sättigungskonzentration, relevanter Bereich des Eisen-Kohlenstoff-Diagramms^{1,2}

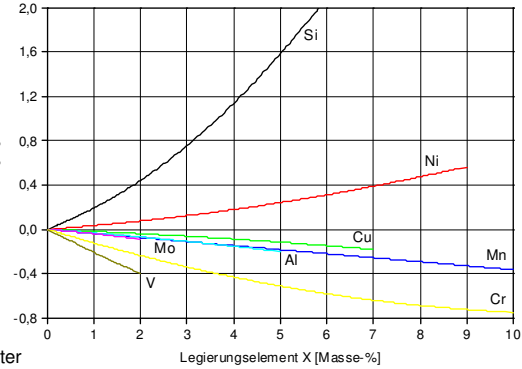
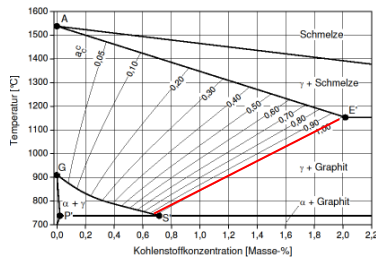


1: Grosch, J., H. Bomas, D. Liedke und H. Streng: Einsatzhärten. Grundlagen – Verfahren – Anwendungen – Eigenschaften einsatzgehärteter Gefüge und Bauteile. Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 1994

2: Liedke, D.: Merkblatt 452 Einsatz härten. Stahl-Informations-Zentrum, Düsseldorf, 2. Auflage, 1995.

Modellierung des Niederdruckaufkohlens

- C-Sättigungskonzentration, Wirkung von Legierungselementen^{1,2}



- Legierungsfaktor k_L

$$\lg k_L = -\sum c_X o_C^X$$

$c_X o_C^X$: Konzentration und Wirkparameter des Legierungselementes X

- Aufkohlungszyklen, Sättigungskonzentration

$$c_{C,Sätt.} = c_C^C (a_C^C = 1) \cdot k_L$$

1:Eckstein, H. J.: Technologie der Wärmebehandlung von Stahl. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 2. Auflage, 1967.

2:Neumann, F. und B. Person: Beitrag zur Metallurgie der Gasaufkohlung. Zusammenhang zwischen dem C-Potential der Gasphase und des Werkstückes unter Berücksichtigung der Legierungselemente. HTM, 23(4):296/308, 1968.

Implementation in SYSWELD

- Modul zur Analyse von Ausscheidungs- und Diffusionsvorgängen
 - Aufkohlungszyklen: RB 1. Art, Basis: $c_C(\mathbf{r}, t)|_{r(A)} = c_{C,Sätt.} = f(T, LE)$
 - Diffusionszyklen: RB 2. Art, Basis: $j_C^{(A)}(\mathbf{r}^{(A)}, t) = 1.0E - 15$
 - Diffusionskoeffizient: Basis C.A.S.H.¹ $D_C = f(T)$
- Verwendung des FE-Netzes der elastizitätstheoretischen Analyse (Datenaustausch)

1: Forschungsvorhaben: Computer Aided Simulation of Heat Treatment (C.A.S.H.)

Verifikation anhand experimenteller Ergebnisse

- FKM-Forschungsvorhaben „Einsatzhärten und Dauerfestigkeit“

- Werkstoff 20MnCrB5 (ZF-Qualität)

C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Al	V	N
0,178	1,361	0,224	0,131	1,350	0,106	0,025	0,001	0,036

- Aufkühlungstemperatur 930°C - Äthin, Härtetemperatur 860 °C

Zyklus	1	2	3	4	5	Abkühlung Härtetemperatur	Halten Härtetemperatur	2. Austen. 860 ° C
A [min]	4,0	4,0	3,0	3,0	1,0	-	-	-
D [min]	5,0	15,0	25,0	25,0	30	10,0	10,0	40,0

- FVV-Forschungsvorhaben „Betriebsfestigkeit von Hochdruckbauteilen mit kleinen Schwingspielen großer Häufigkeit“

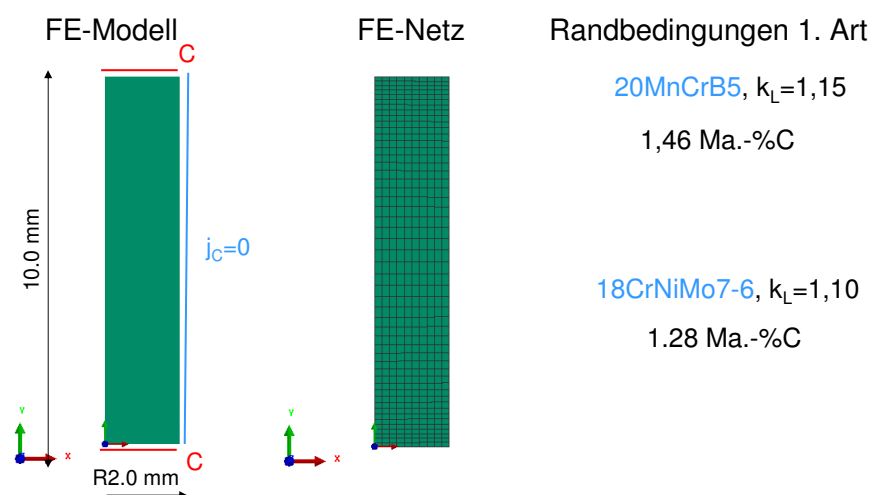
- Werkstoff 18CrNiMo7-6

C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Al	V	N
0,178	1,361	0,224	0,131	1,350	0,106	0,025	0,001	0,036

- Aufkühlungstemperatur 930°C - Äthin, Härtetemperatur 830 °C

Zyklus	1	2	3	4	5	Abkühlung Härtetemperatur	Halten Härtetemperatur	2. Austen. 860 ° C
A [min]	4,0	4,0	3,0	3,0	1,0	-	-	-
D [min]	5,0	15,0	25,0	25,0	30	10,0	10,0	40,0

Verifikation anhand experimenteller Ergebnisse



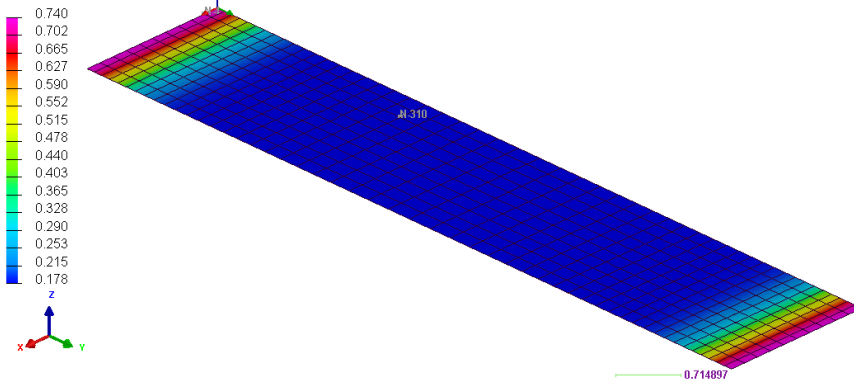
Verifikation anhand experimenteller Ergebnisse

Werkstoff 20MnCrB5, simulierte Kohlenstoffkonzentration

TEST LOW PRESSURE CARBURIZING MATERIAL 20MnCrB5

CHEMICAL_ELEMENT_ACTIVITY_NOD_1(1,1)
min=0.178 at NODE 310 in LPC_TEST_V_POST1000.fdb
max=0.740 at NODE 4 in LPC_TEST_V_POST1000.fdb

66 / 10500.000000

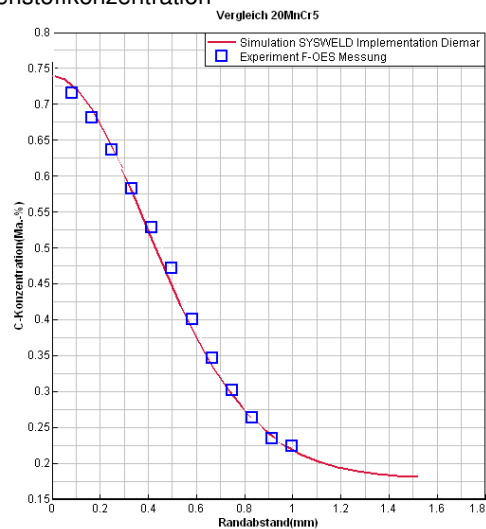
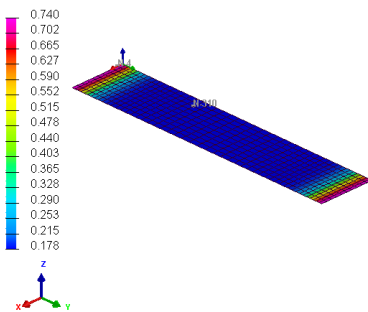


Verifikation anhand experimenteller Ergebnisse

Werkstoff 20MnCrB5, simulierte Kohlenstoffkonzentration

TEST LOW PRESSURE CARBURIZING MATERIAL 20MnCrB5
CHEMICAL_ELEMENT_ACTIVITY_NOD_1(1,1)
min=0.178 at NODE 310 in LPC_TEST_V_POST1000.fdb
max=0.740 at NODE 4 in LPC_TEST_V_POST1000.fdb

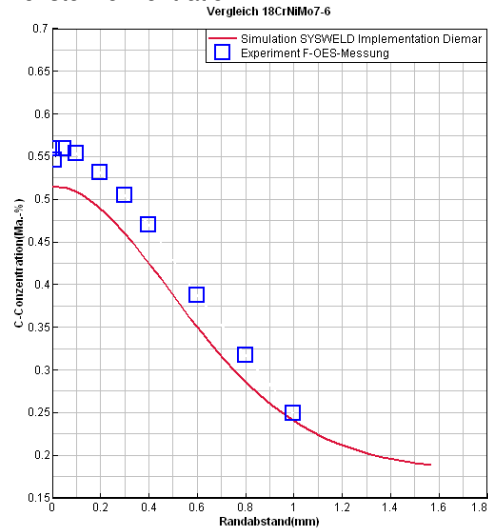
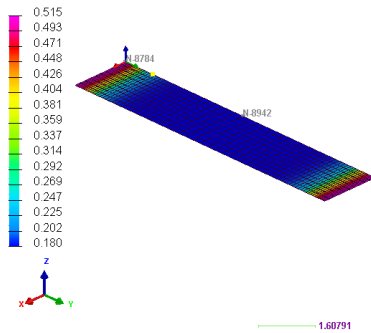
66 / 10500.000000



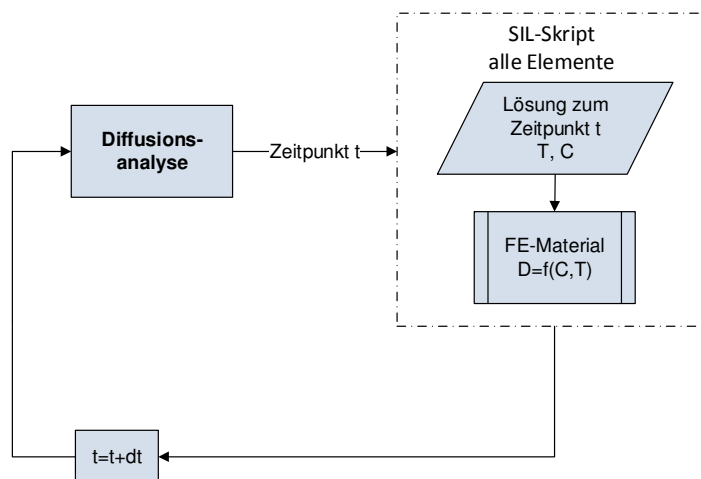
Verifikation anhand experimenteller Ergebnisse

Werkstoff 18CrNiMo7-6, simulierte Kohlenstoffkonzentration

TEST LOW PRESSURE CARBURIZING MATERIAL 18CRNIMO7-
CHEMICAL_ELEMENT_ACTIVITY_NODE(1,1) 31 / 12420 000000
min=0.180 at NODE 8942 in LPC_TEST_V_POST1000.fdb
max=0.515 at NODE 8784 in LPC_TEST_V_POST1000.fdb



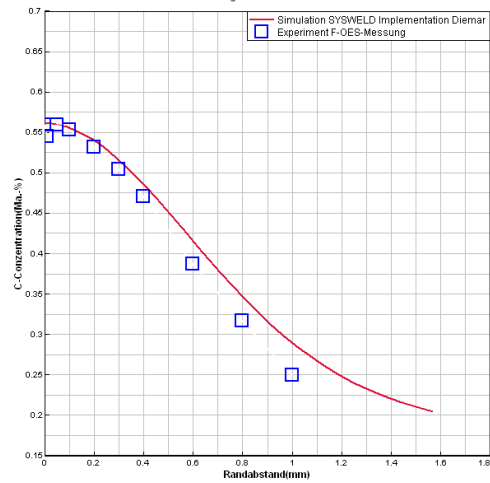
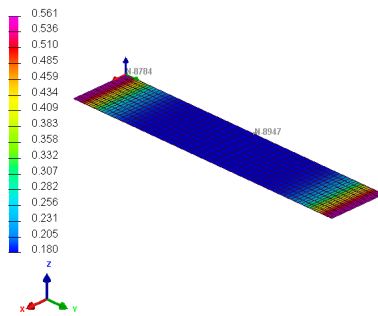
SYSWELD, C- und T-abhängiger Diffusionskoeffizient



Verifikation anhand experimenteller Ergebnisse

Werkstoff 18CrNiMo7-6, simulierte Kohlenstoffkonzentration, $D=f(C,T)$

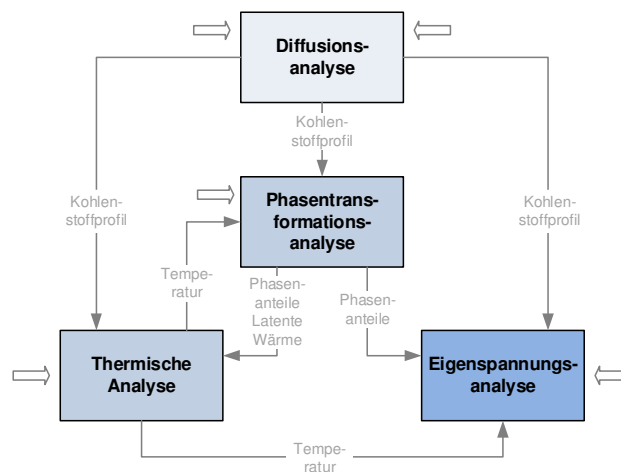
TEST LOW PRESSURE CARBURIZING MATERIAL 18CRNIMO7-
CHEMICAL_ELEMENT_ACTIVITY_NOD_1(L1) 31 / 12420.000000
min=0.180 at NODE 1047 in LPC_TEST_V_POST1000.000
max=0.561 at NODE 8708 in LPC_TEST_V_POST1000.000



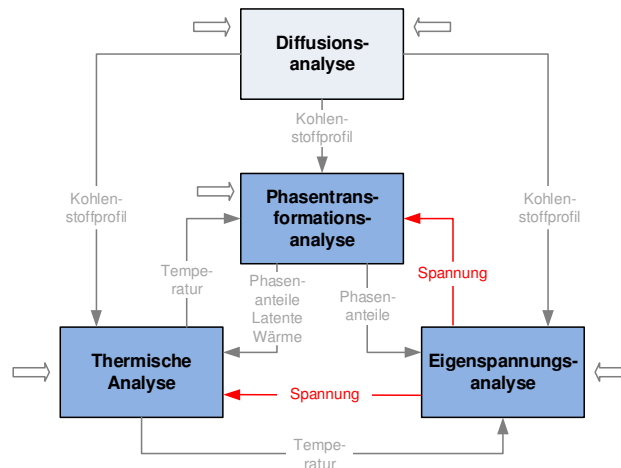
Definition des Diffusionskoeffizienten:

Tibbets, G.G., Diffusivity of carbon in iron and steels at high temperatures. J. Appl. Phys., 1980. 51: p. 4813-4816.

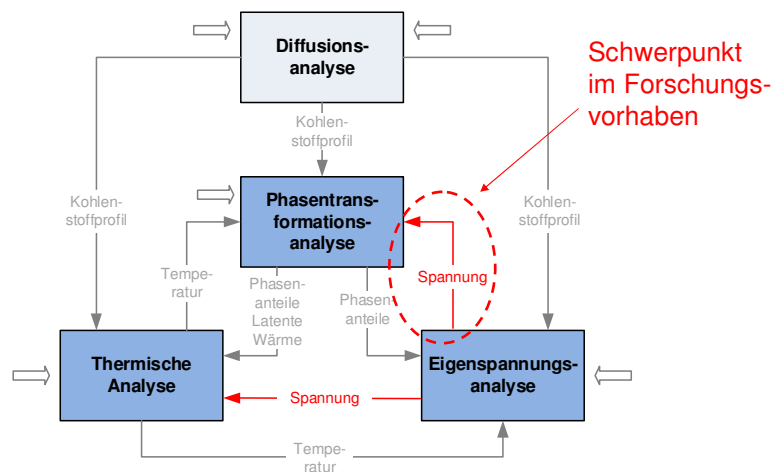
Bisheriger Stand Simulationsmodell Einsatzhärten



Erweiterung Simulationsmodell Einsatzhärten

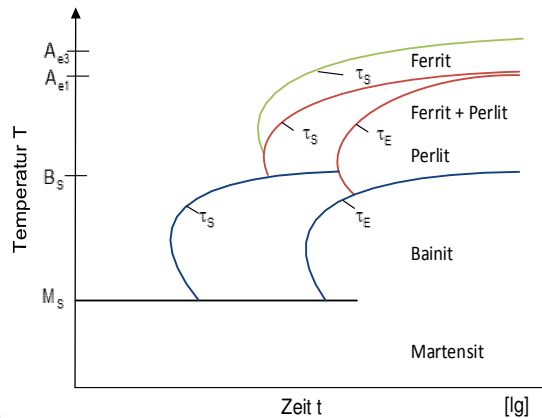


Erweiterung Simulationsmodell Einsatzhärten



Mögliche Phasenumwandlungen beim Abkühlen

- Umwandlungen mit vollständiger / eingeschränkter Diffusion:
 - Austenit => Ferrit
 - Austenit => Perlit
 - Austenit => **Bainit**
- Diffusionslose Umwandlung:
 - Austenit => **Martensit**
- Darstellung: ZTU-Schaubilder
 - experimentelle Daten nur für wenige C-Konzentrationen verfügbar



ZTU-Verhalten - Einfluss des Spannungszustandes

- Wirkung der unterschiedlichen Spannungsanteile
 - Dekomposition des Spannungstensors σ

$$\sigma = s + pI$$

s – deviatorischer Anteil

p – hydrostatischer Anteil $p = \frac{1}{3} \text{tr}(\sigma)$

I – Einheitstensor

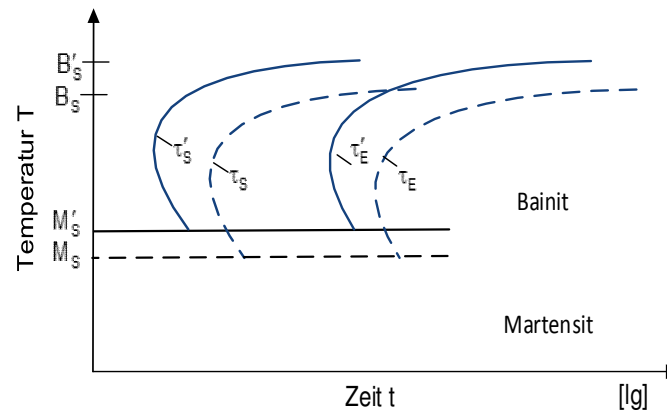
- von Mises Vergleichsspannung

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} s : s}$$

ZTU-Verhalten - Einfluss des Spannungszustandes

- Wirkung von positiven hydrostatischen Spannungen

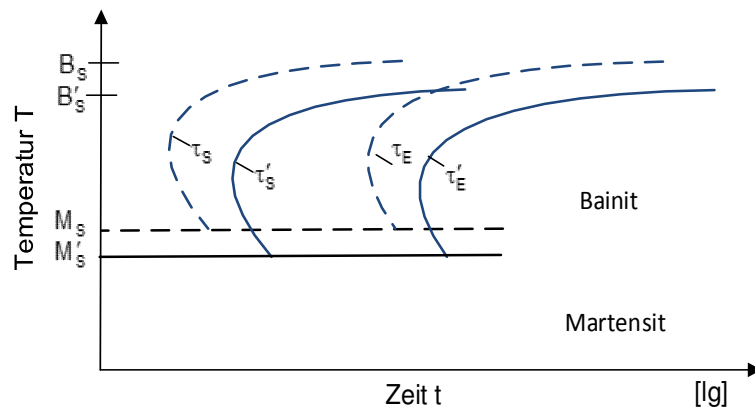
$$\tau_S \rightarrow \tau'_S \text{ bzw. } \tau_E \rightarrow \tau'_E$$



ZTU-Verhalten - Einfluss des Spannungszustandes

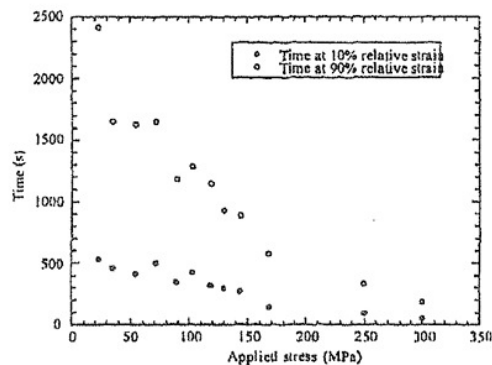
- Wirkung von negativen hydrostatischen Spannungen

$$\tau_S \rightarrow \tau'_S \text{ bzw. } \tau_E \rightarrow \tau'_E$$



ZTU-Verhalten - Einfluss des Spannungszustandes

- Umwandlung Bainit
 - Untersuchungen von *Veaux*¹, Stahl 40CMD8, 320°C



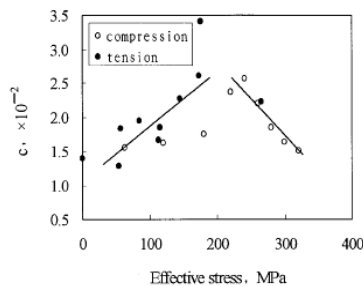
¹: Veaux, M., et al., Bainitic transformation under stress in medium alloyed steels. *J. Phys. IV France*, 2001. **11(PR4): p. Pr4-181-Pr4-188.**

ZTU-Verhalten - Einfluss des Spannungszustandes

- Umwandlung Martensit
 - Koistinen-Marburger Gleichung

$$V_{Mart} = 1 - \exp(-c(M_s - T))$$

c: kinetischer Materialparameter
 M_s , T: Martensitstarttemperatur, Temperatur
 - Untersuchung von *Liu*¹: Beeinflussung des Parameters c



Stahl mit Fe-0.25C-0.26Si-0.26Mn-1.75Cr-0.40Mo-3.3Ni-0.14V

¹: Liu, C., et al., Study of the effects of stress and strain on martensite transformation: Kinetics and transformation plasticity. *Journal of Computer-Aided Materials Design*, 2000. **7(1): p. 63-69.**

ZTU-Verhalten, Einfluss des Spannungszustandes

- Umwandlung Martensit

- Spannungszustand beeinflusst M_S

- nach Inoue¹

$$\Delta M_S = A \cdot p + B \cdot \sigma_e$$

A, B: Materialparameter

p : hydrostatische Spannung

σ_e : von Mises-Vergleichsspannung

- Materialparameter A und B nach Denis², Material 60NCD11

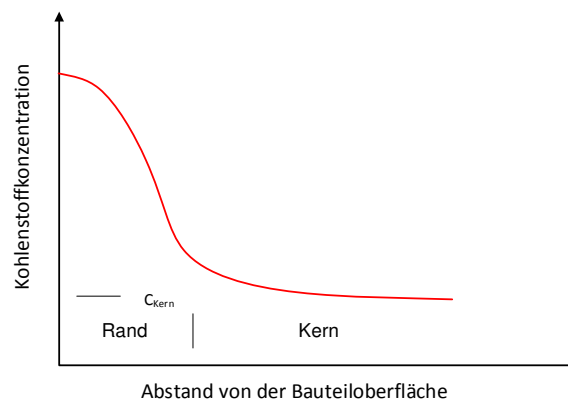
$$A = 5 \cdot 10^{-2} \text{KN}^{-1} \text{mm}^2$$

$$B = 0,33 \cdot 10^{-2} \text{KN}^{-1} \text{mm}^2$$

1: Inoue, T., Metallo-Thermo-Mechanics—Application to Quenching, in Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel, G.E. Totten, M.A.H. Howes, and T. Inoue, Editors. 2002, ASM International: Materials Park, Ohio. p. 296-311.

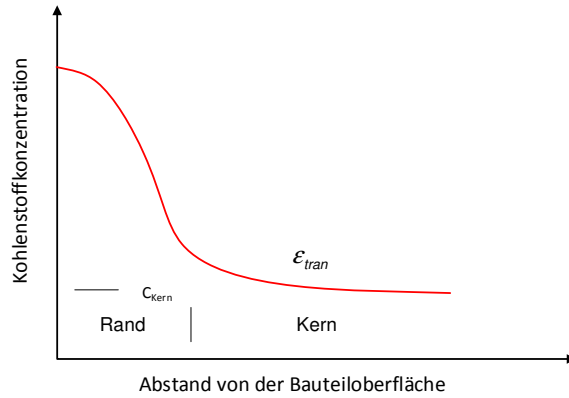
2: Denis, S., et al., Stress-phase transformations interactions - principles, modelling, and calculation of internal stresses. Materials Science and Technology, 1985. 1: p. 805-814.

Folgerungen aus dem Kohlenstoffverlauf



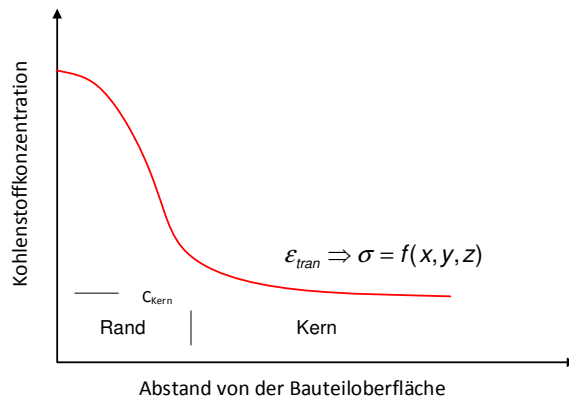
- Unterschiedliche thermophysikalische Werkstoffkennwerte
- Unterschiedliche thermomechanische Werkstoffkennwerte
- **Unterschiedliches ZTU-Verhalten**

Folgerungen aus dem Kohlenstoffverlauf



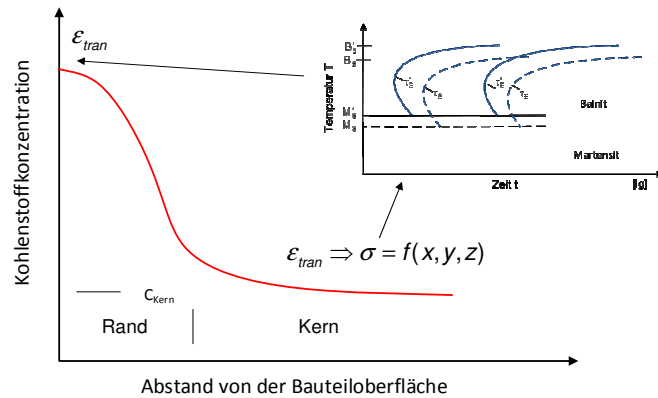
- i. A. Beginn der Phasenumwandlungen im Bauteilkern

Folgerungen aus dem Kohlenstoffverlauf



- i. A. Beginn der Phasenumwandlungen im Bauteilkern
- Einfluss des induzierten Spannungszustandes auf andere Bauteilbereiche

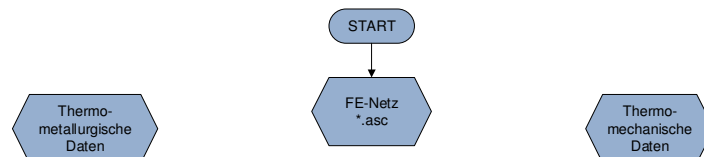
Folgerungen aus dem Kohlenstoffverlauf



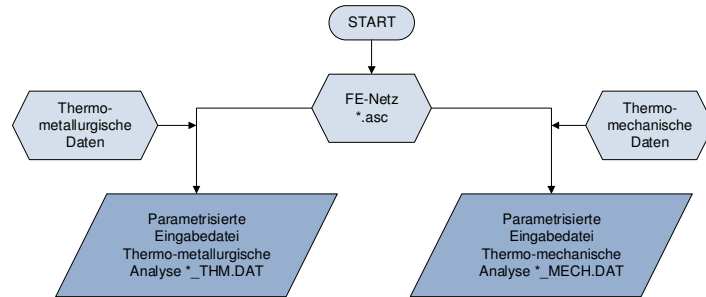
- i. A. Beginn der Phasenumwandlungen im Bauteilkern
- Einfluss des induzierten Spannungszustandes auf andere Bauteilbereiche

=> Unterschiedliches ZTU-Verhalten

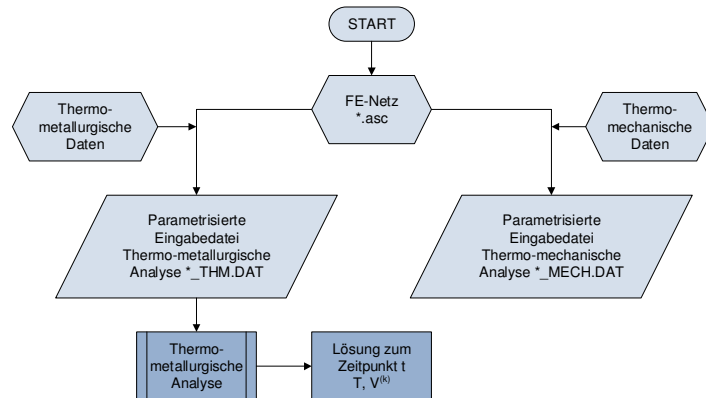
Implementation in SYSWELD



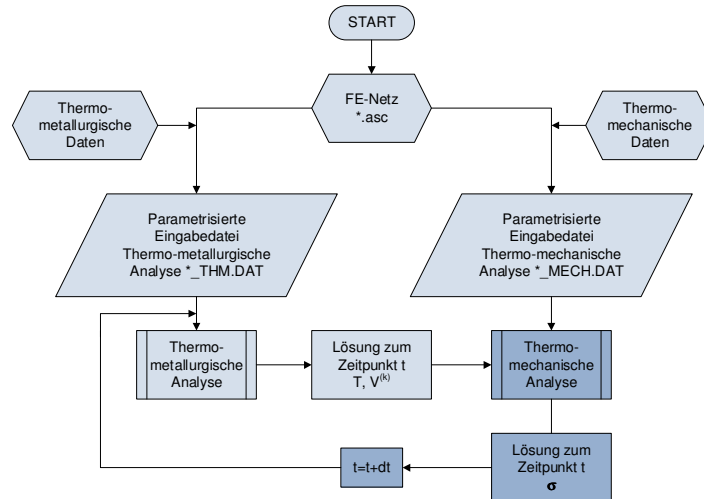
Implementation in SYSWELD



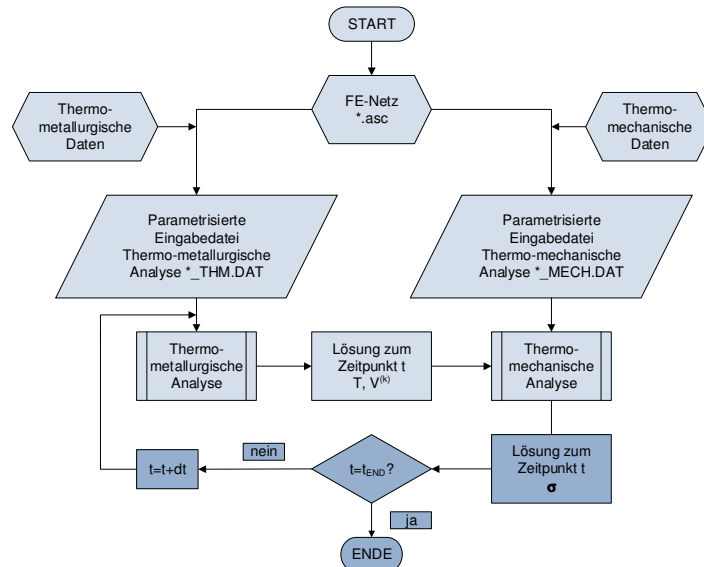
Implementation in SYSWELD



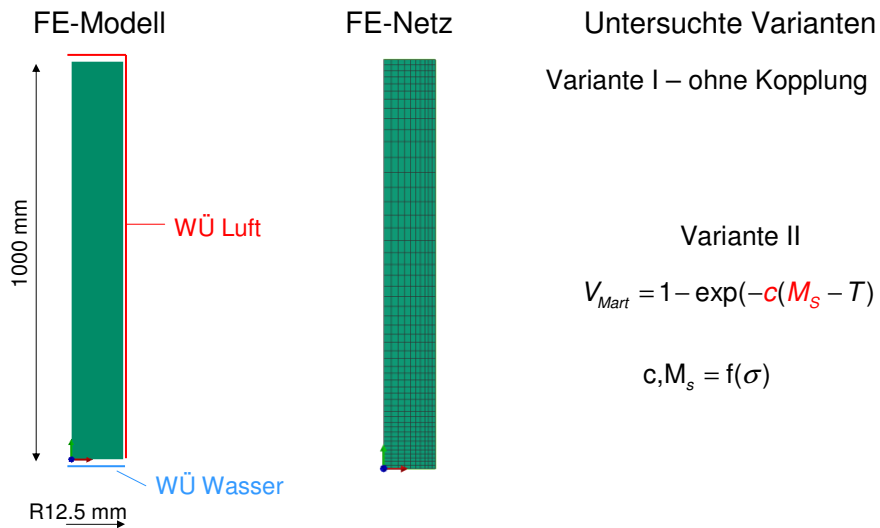
Implementation in SYSWELD



Implementation in SYSWELD

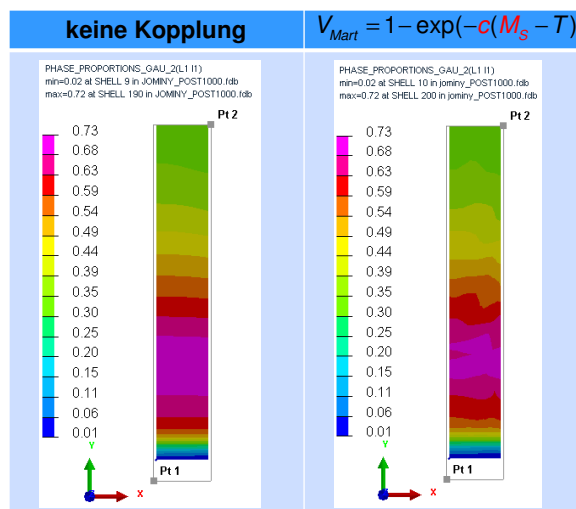


Beispiel Jominy-Probe, Einsatzstahl 16MnCr5



Beispiel Jominy-Probe, Einsatzstahl 16MnCr5

t=1000 s, Volumenfraktion Bainit

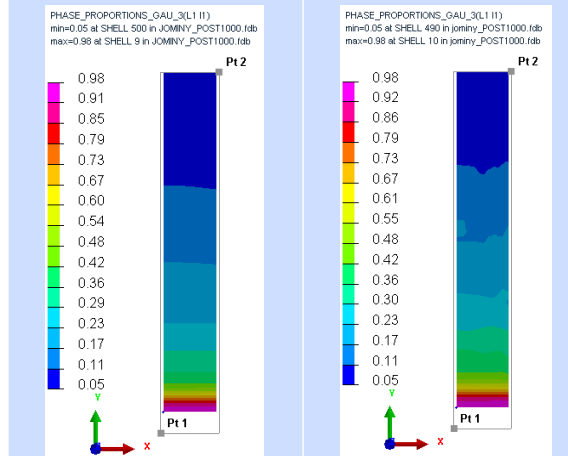


Beispiel Jominy-Probe, Einsatzstahl 16MnCr5

t=1000 s, Volumenfraktion Martensit

keine Kopplung

$$V_{Mart} = 1 - \exp(-c(M_s - T))$$

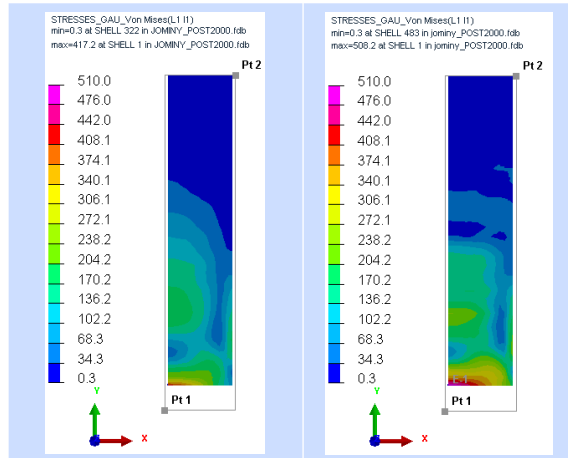


Beispiel Jominy-Probe, Einsatzstahl 16MnCr5

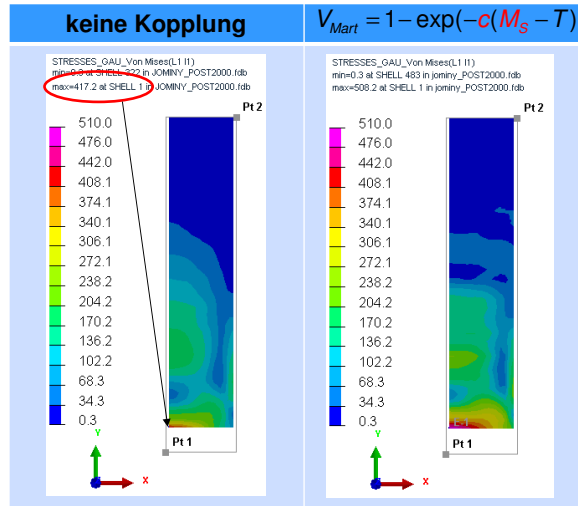
t=1000 s, von Mises Vergleichsspannung [N/mm²]

keine Kopplung

$$V_{Mart} = 1 - \exp(-c(M_s - T))$$



Beispiel Jominy-Probe, Einsatzstahl 16MnCr5

t=1000 s, von Mises Vergleichsspannung [N/mm²]

Gliederung

- 1 Vorstellung des Forschungsvorhabens
 - 1.1 Allgemeine Projektdaten
 - 1.2 Problemstellung
 - 1.3 Zielsetzung und Lösungsweg
 - 1.4 Analytisches und experimentelles Untersuchungsprogramm
- 2 Projektstand
 - 2.1 Erweiterung SYSWELD-Funktionalität
 - 2.2 Numerische Untersuchungen

Niederdruckaufkohlung Welle mit Absatz

- Simulation anhand Flachprobendaten 20MnCr5
 - FKM-Forschungsvorhaben „Einsatzhärten und Dauerfestigkeit“
 - Werkstoff 20MnCrB5 (ZF-Qualität)
 - Aufkohlungstemperatur 930°C - Äthin, Härtetemperatur 860 °C

C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Al	V	N
0,178	1,361	0,224	0,131	1,350	0,106	0,025	0,001	0,036

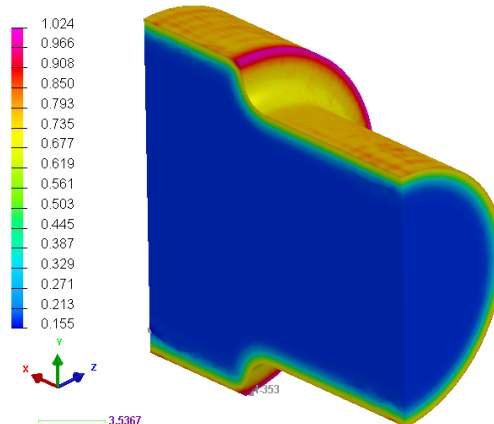
Zyklus	1	2	3	4	5	Abkühlung Härtetemperatur	Halten Härtetemperatur	2. Austen. 860 ° C
A [min]	4,0	4,0	3,0	3,0	1,0	-	-	-
D [min]	5,0	15,0	25,0	25,0	30	10,0	10,0	40,0

- FE-Modell der elastizitätstheoretischen Analyse

Niederdruckaufkohlung Welle mit Absatz

- Kohlenstoffkonzentration am Ende des Aufkohlens

TEST LOW PRESSURE CARBURIZING MATERIAL 20MNCR5
 CHEMICAL_ELEMENT_ACTIVITY_NOD_1(L1)
 min=0.155 at NODE 319 in LPC_TEST_V_POST1000.rdb
 max=1.024 at NODE 353 in LPC_TEST_V_POST1000.rdb



Niederdruckaufkohlung Welle mit Absatz

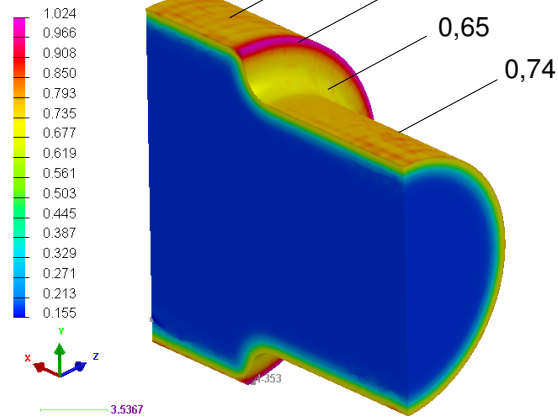
- Kohlenstoffkonzentration am Ende des Aufkohlens Ma.-%

TEST LOW PRESSURE CARBURIZING MATERIAL 20MNCr5

CHEMICAL_ELEMENT_ACTIVITY_NOD_1(0.1)

min=0.155 at NODE 319 in LPC_TEST_V_POST1000.fdb

max=1.024 at NODE 353 in LPC_TEST_V_POST1000.fdb



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!