



11. LS-DYNA Forum 2012
09.-10. Oktober 2012

SIMULATION DES PHS-PROZESSES.

AUTOREN: P. HIPPCHEM, DR. M. FLEISCHER, PROF. DR. M. MERKLEIN, A. LIPP.

**BMW
GROUP**



GLIEDERUNG.

Einleitung.

Anforderungen an die Simulation des Presshärteprozesses.

Stand Heute.

Untersuchung der Phasenumwandlungskinetik.

Modellierung der Phasenumwandlungskinetik.

Zusammenfassung.

Ausblick.



GLIEDERUNG.

Einleitung.

Anforderungen an die Simulation des Presshärteprozesses.

Stand Heute.

Untersuchung der Phasenumwandlungskinetik.

Modellierung der Phasenumwandlungskinetik.

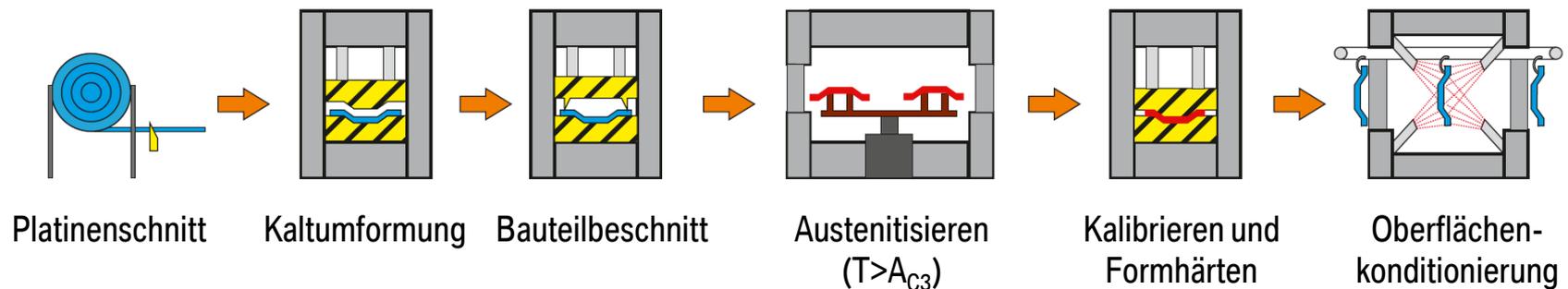
Zusammenfassung.

Ausblick.



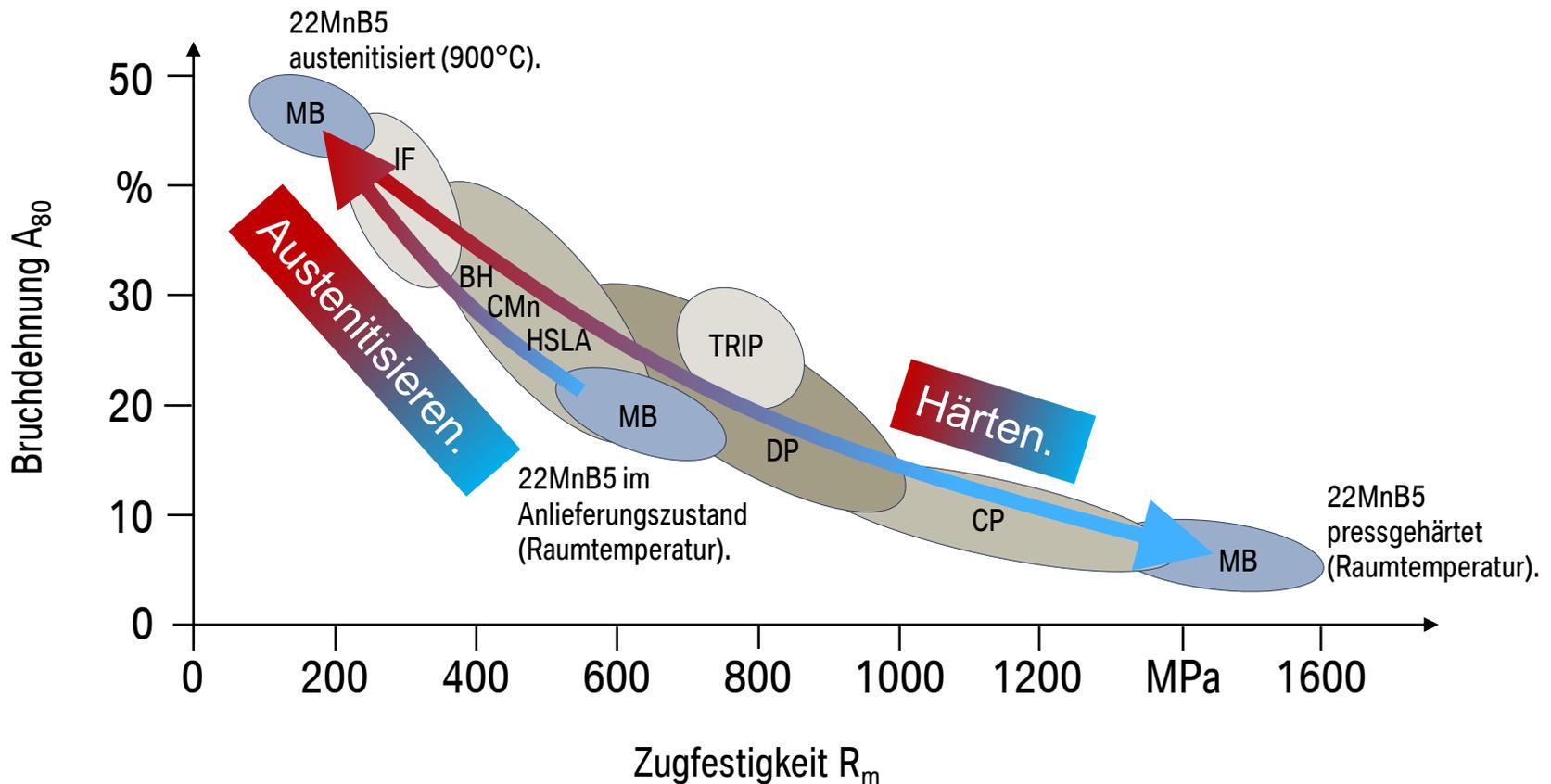
EINLEITUNG. INDIREKTER PHS-PROZESS.

- Randbedingungen:
 - Stetig steigende Anforderungen an die passive Sicherheit.
 - Reduktion des Fahrzeugesamtgewichtes zur Minimierung der CO₂-Emissionen.
- Lösungsansatz:
 - Einsatz höher- und höchstfester Stähle für Strukturbauteile der Karosserie.
 - Erhöhte Effekte der elastischen Rückfederung.
 - Herstellungsprozesse wie z.B. das Presshärten rücken in den Fokus.
- Indirekter **PHS-Prozess [1]** im Serieneinsatz bei der BMW AG:



EINLEITUNG. WERKSTOFF FÜR DEN PHS-PROZESS.

- Mechanische Eigenschaften des eingesetzten Bor-Mangan-Stahls 22MnB5 [1] während des PHS-Prozesses.



GLIEDERUNG.

Einleitung.

Anforderungen an die Simulation des Presshärteprozesses.

Stand Heute.

Untersuchung der Phasenumwandlungskinetik.

Modellierung der Phasenumwandlungskinetik.

Zusammenfassung.

Ausblick.

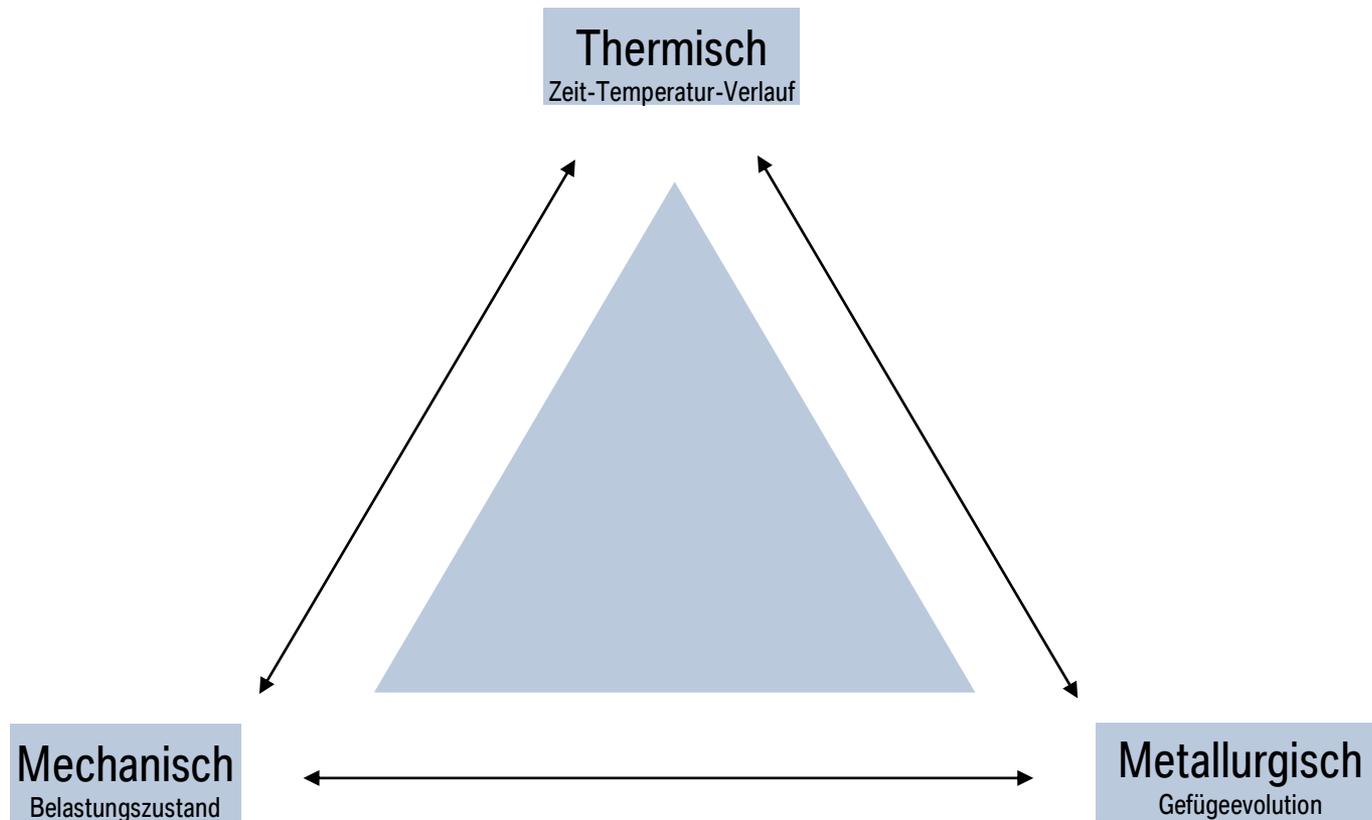


ANFORDERUNGEN AN DIE SIMULATION DES PHS-PROZESSES.

- Virtuelle Abbildung der gesamten Prozesskette des indirekten PHS-Prozesses mit LS-DYNA.
 - Realitätsnahe **Prognose der mechanischen Bauteileigenschaften** für die Stamp-Crash-Kopplung.
 - **Prognose der Bauteilendgeometrie** indirekt pressgehärteter Bauteile inklusive Bauteile mit **Tailored Properties**.
 - Berechnung der „**Rückfederung**“ direkt nach dem Härten.
 - Berechnung der **Maß- und Formänderungen** bei freier Abkühlung an Luft auf Raumtemperatur.
 - **Kompensation der Maß- und Formänderungen** auf Basis der simulativ ermittelten Bauteilendgeometrie.

ANFORDERUNGEN AN DIE SIMULATION DES PHS-PROZESSES.

- Die Anforderung an das Simulationsmodell des PHS-Prozesses sind in der Kopplung thermischer, mechanischer und metallurgischer Effekte verknüpft.



GLIEDERUNG.

Einleitung.

Anforderungen an die Simulation des indirekten Presshärteprozesses.

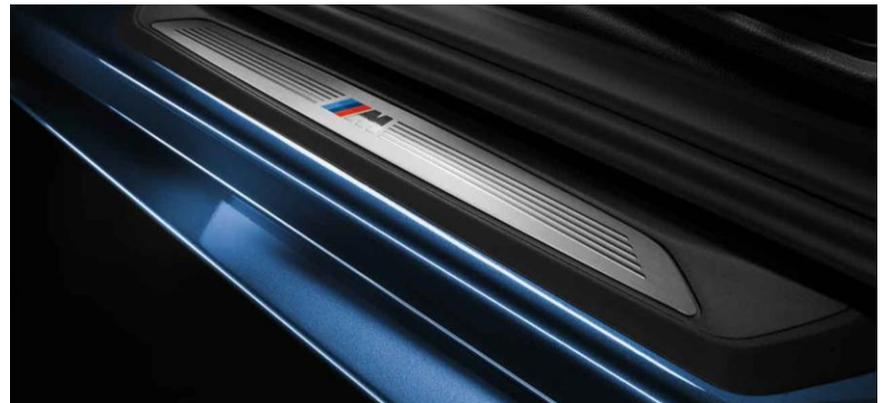
Stand Heute.

Untersuchung der Phasenumwandlungskinetik.

Modellierung der Phasenumwandlungskinetik.

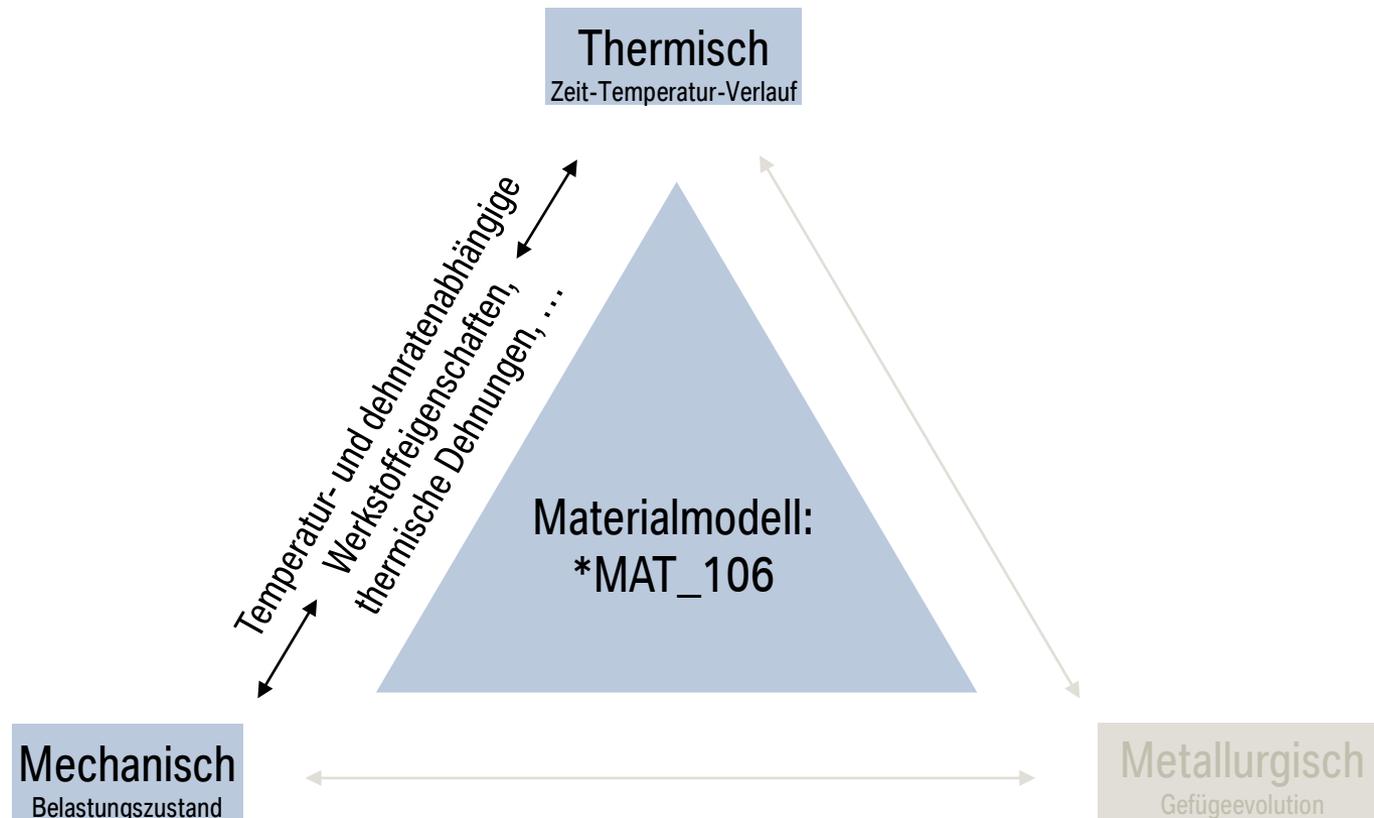
Zusammenfassung.

Ausblick.

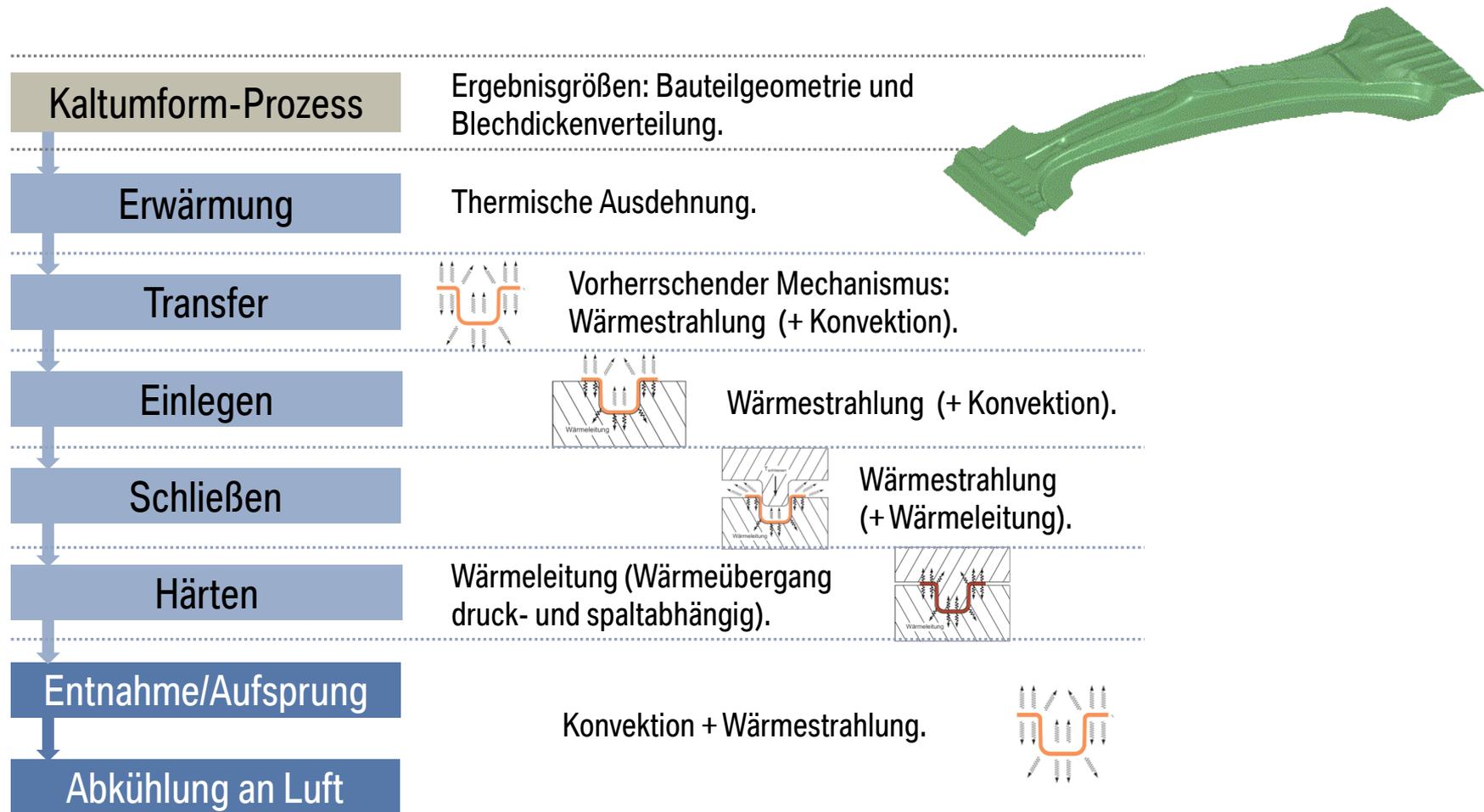


SIMULATIONSMODELL DES PHS-PROZESSES IM SERIENEINSATZ BEI DER BMW AG.

- Zum heutigen Stand wird das Simulationsmodell mit dem Materialmodell ***MAT_106 thermo-mechanisch** schwach **gekoppelt** berechnet.

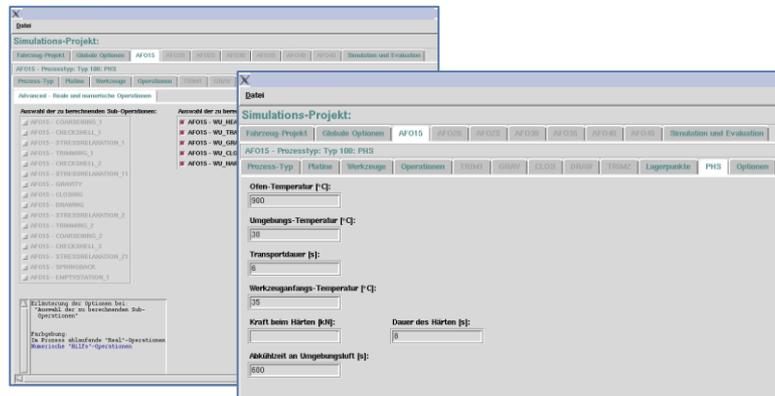


VIRTUELLE PROZESSKETTE DES PHS-PROZESSES IM SERIENEINSATZ BEI DER BMW AG.



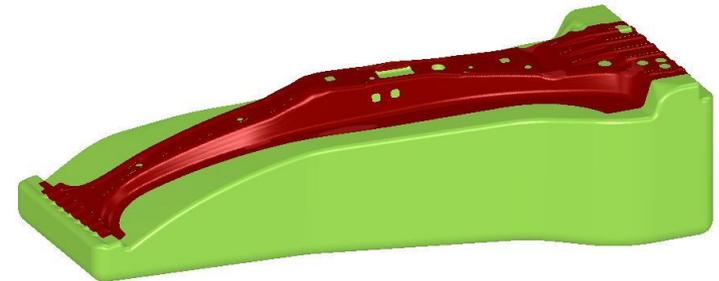
PHS-PROZESS-SIMULATION IM SERIENEINSATZ BEI DER BMW AG.

– Berechnung des PHS-Prozesses mit BMW eigenem Software-System.



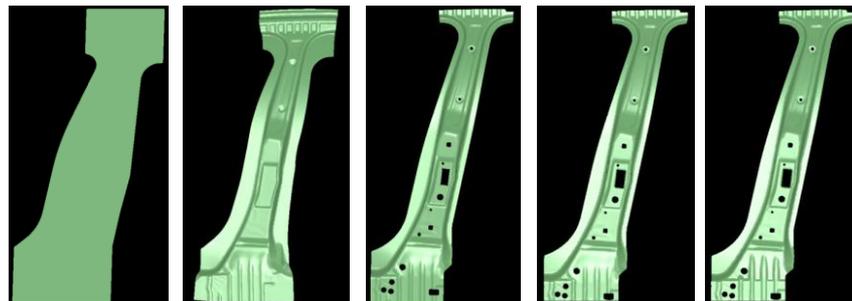
– Verstärkung B-Säule Presshärteprozess.

– Beginn des Härten t_0 .

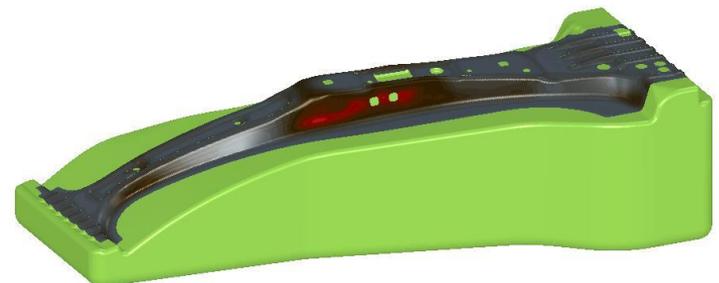


– Verstärkung B-Säule Kaltumformung.

■ Ausgangsplatine ■ Ziehprozess ■ Beschneiden ■ Abstellen ■ Nachformen

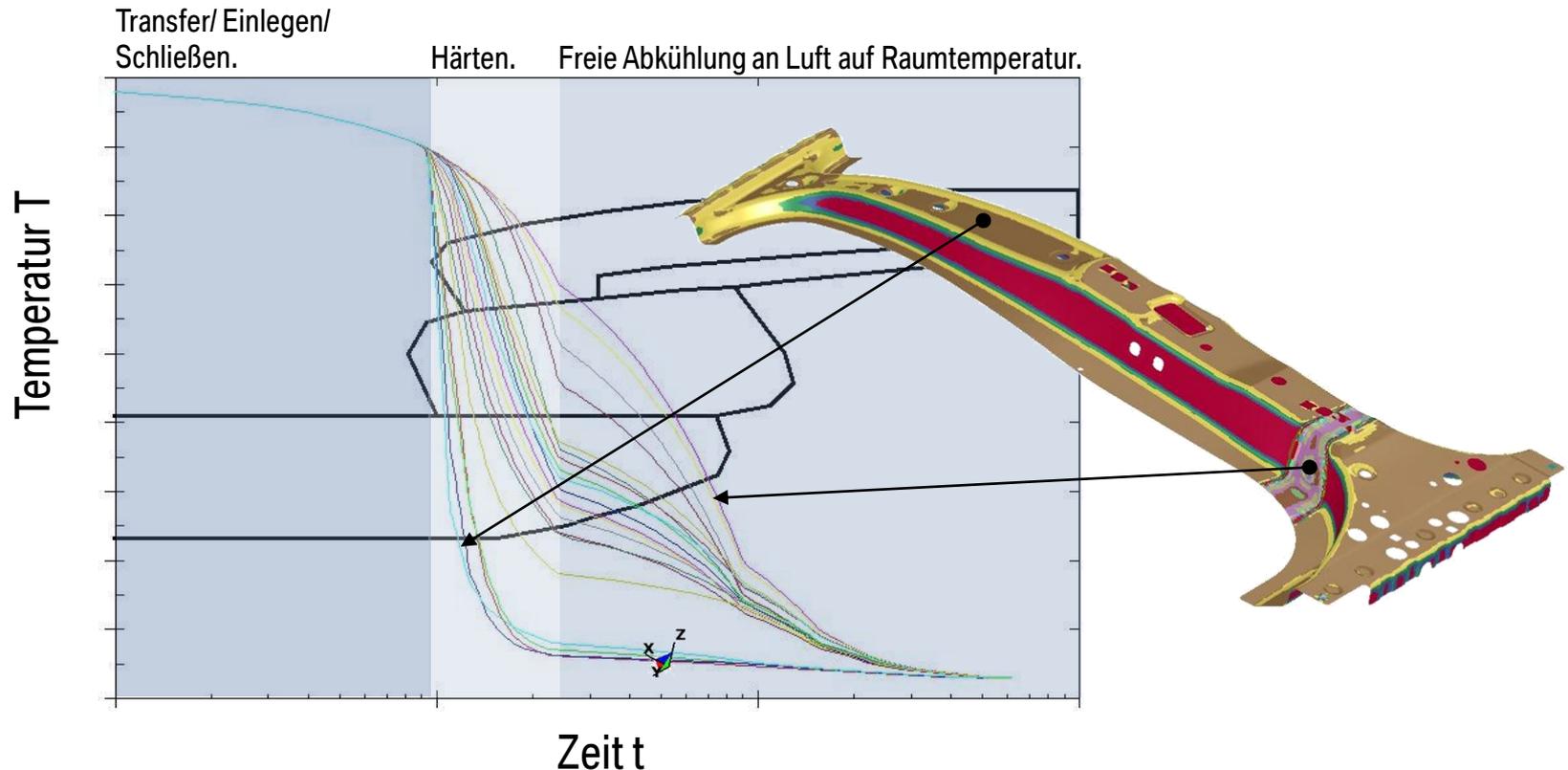


– Zeitpunkt t_1 .



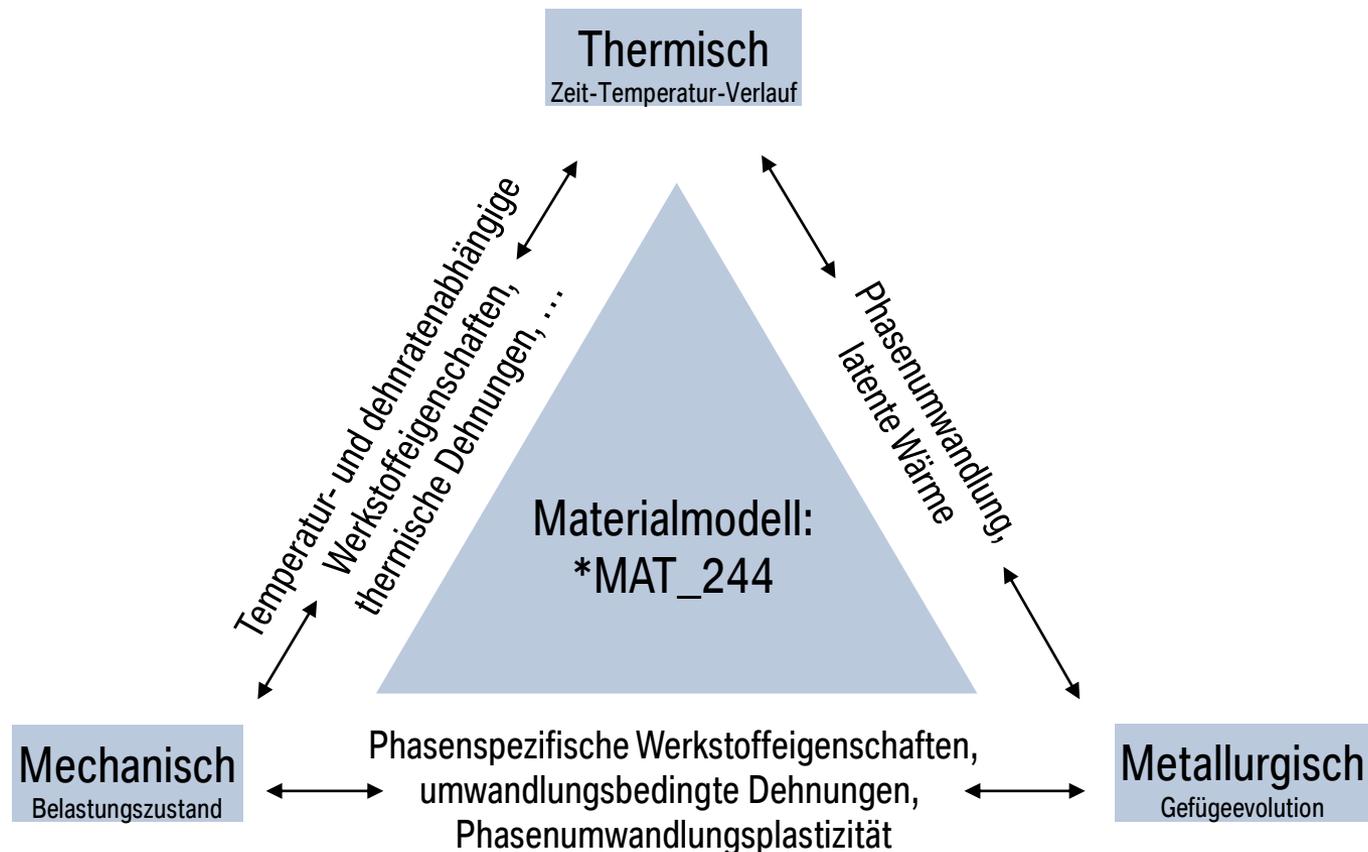
PROGNOSE DER MECHANISCHEN EIGENSCHAFTEN VON PHS-BAUTEILEN IM SERIENEINSATZ BEI DER BMW AG.

- Anwendungsbeispiel:
 - Verstärkung B-Säule eines Prototypenversuchsbauteils mit Tailored-Properties [2].



ZUKÜNFTIGE ANFORDERUNGEN AN DAS SIMULATIONSMODELL DES PHS-PROZESSES.

- Ziel ist die **Kopplung** der **Phasenumwandlungskinetik** mit einem **thermo-mechanischen** Materialmodell – Umsetzung mit ***MAT_244**.



GLIEDERUNG.

Einleitung.

Anforderungen an die Simulation des indirekten Presshärteprozesses.

Stand Heute.

Untersuchung der Phasenumwandlungskinetik.

Modellierung der Phasenumwandlungskinetik.

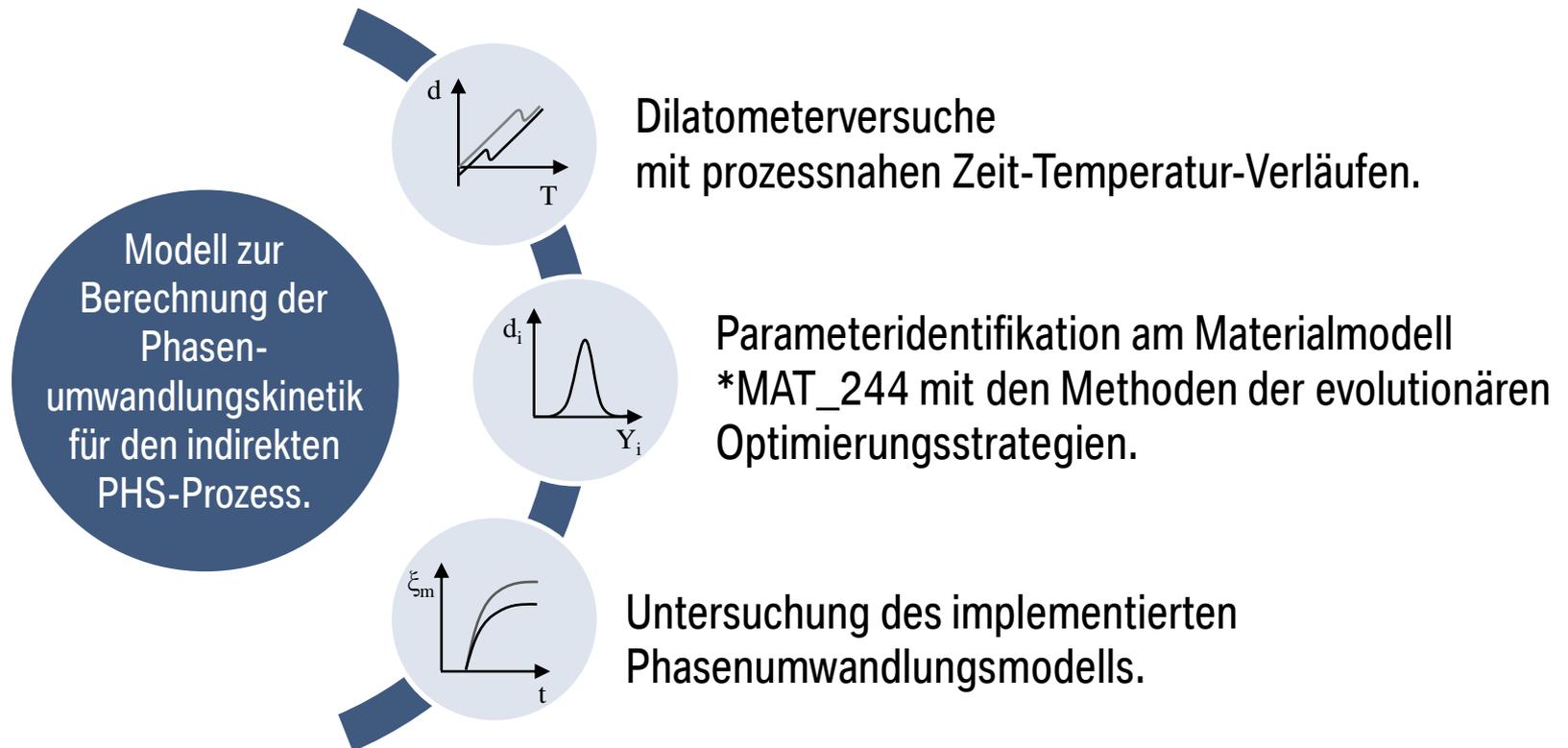
Zusammenfassung.

Ausblick.



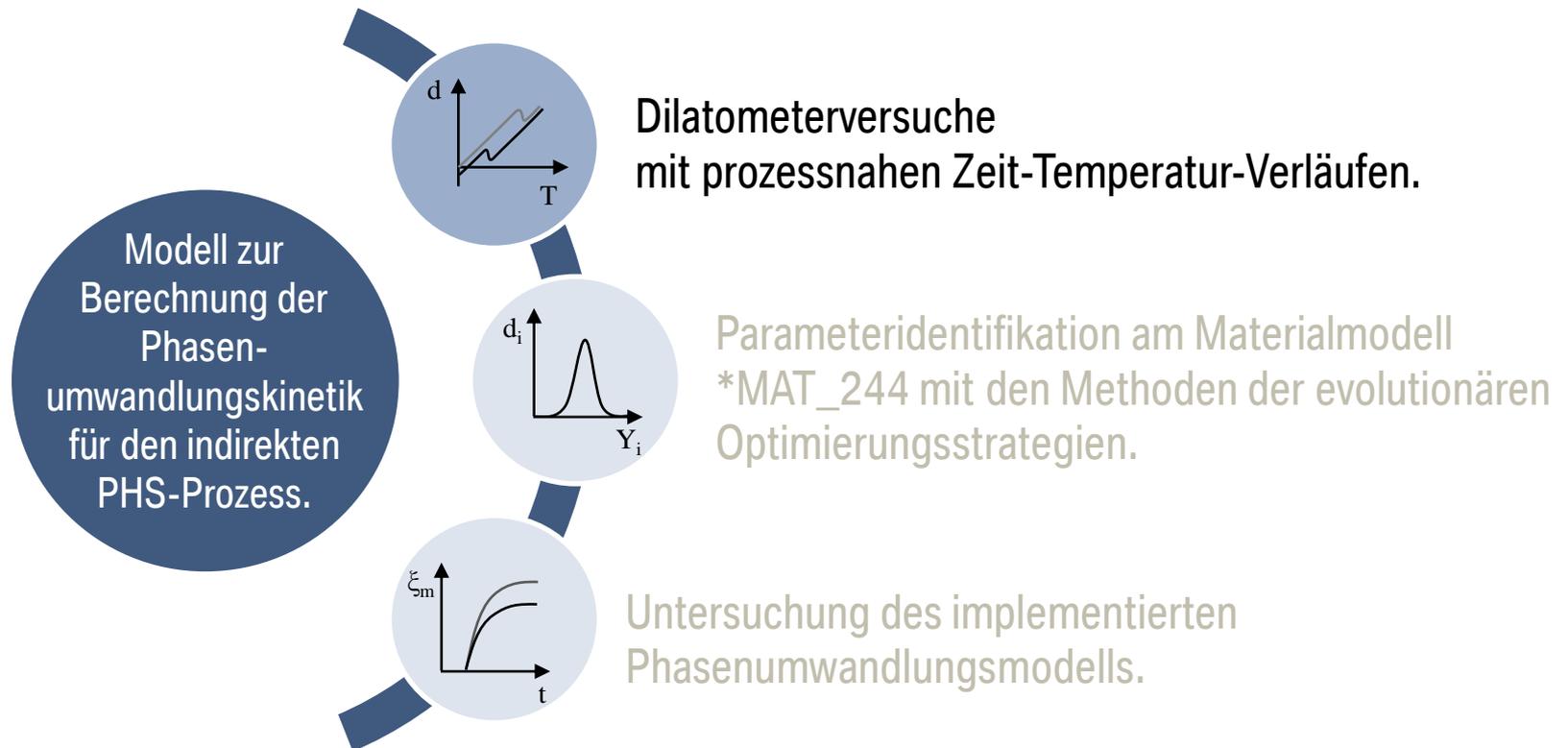
UNTERSUCHUNG UND MODELLIERUNG DES PHASENUMWANDLUNGSVERHALTENS.

Methodische Vorgehensweise:



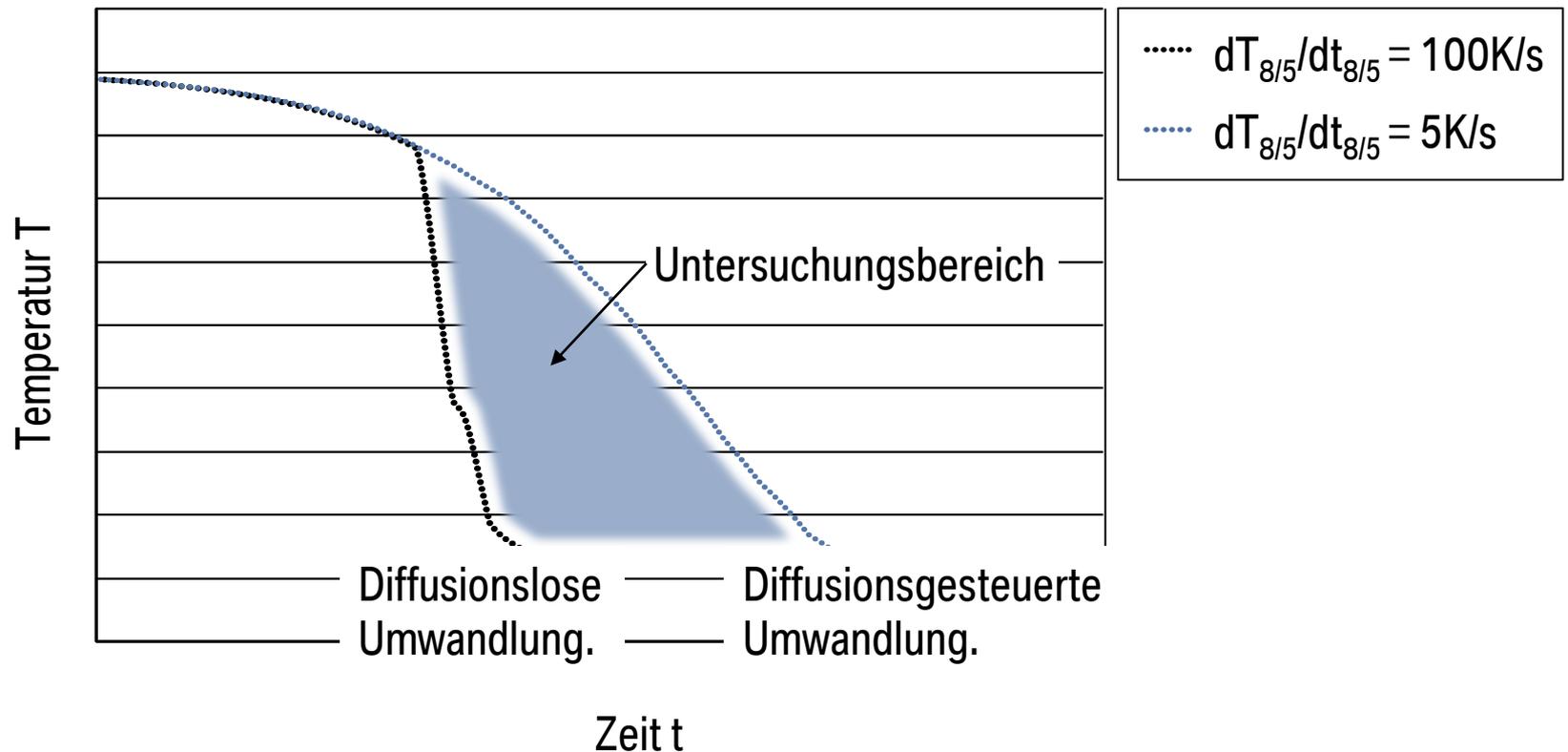
UNTERSUCHUNG UND MODELLIERUNG DES PHASENUMWANDLUNGSVERHALTENS.

Methodische Vorgehensweise:



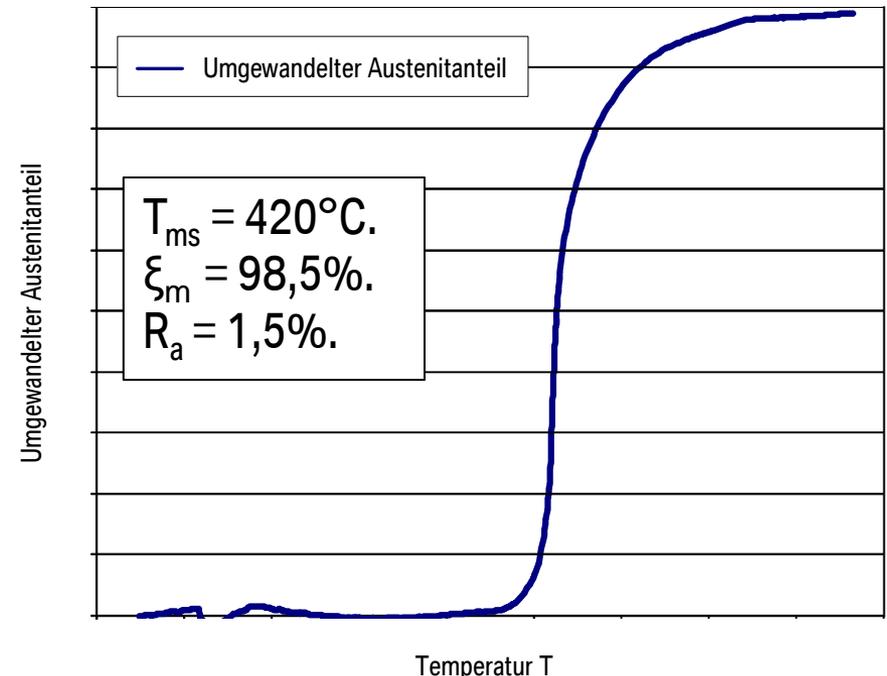
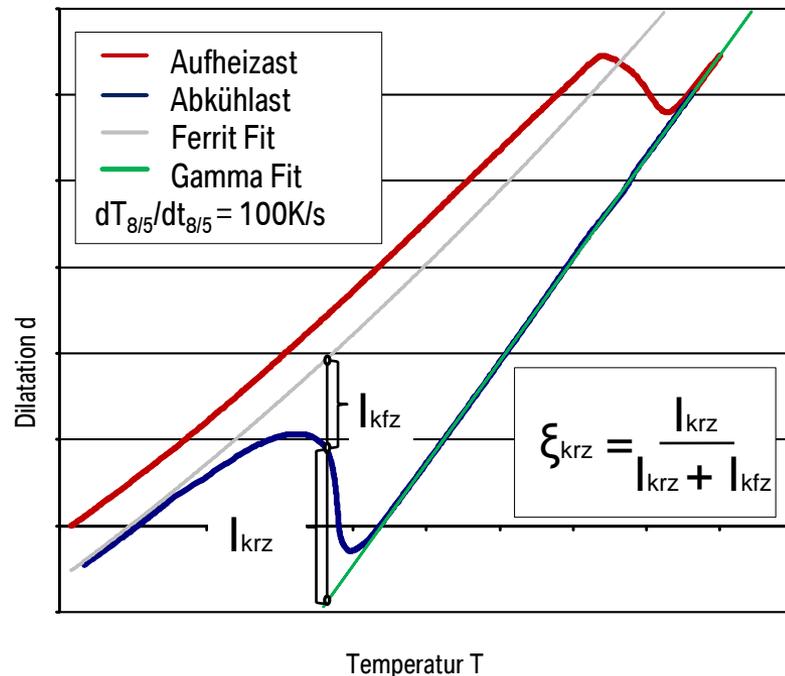
UNTERSUCHUNG DER PHASENUMWANDLUNGSKINETIK UNTER SERIENPROZESSBEDINGUNGEN.

- Untersuchte **Zeit-Temperatur-Verläufe** des indirekten **PHS-Prozesses**.



PHASENUMWANDLUNGSKINETIK UNTER SERIENPROZESSBEDINGUNGEN.

- Bestimmung des **Umwandlungsfortschrittes von Austenit** sowie der **reaktionskinetischen Größen** und **umwandlungsbedingten Dehnungen** in Dilatometerversuchen.



GLIEDERUNG.

Einleitung.

Anforderungen an die Simulation des indirekten Presshärteprozesses.

Stand Heute.

Untersuchung der Phasenumwandlungskinetik.

Modellierung der Phasenumwandlungskinetik.

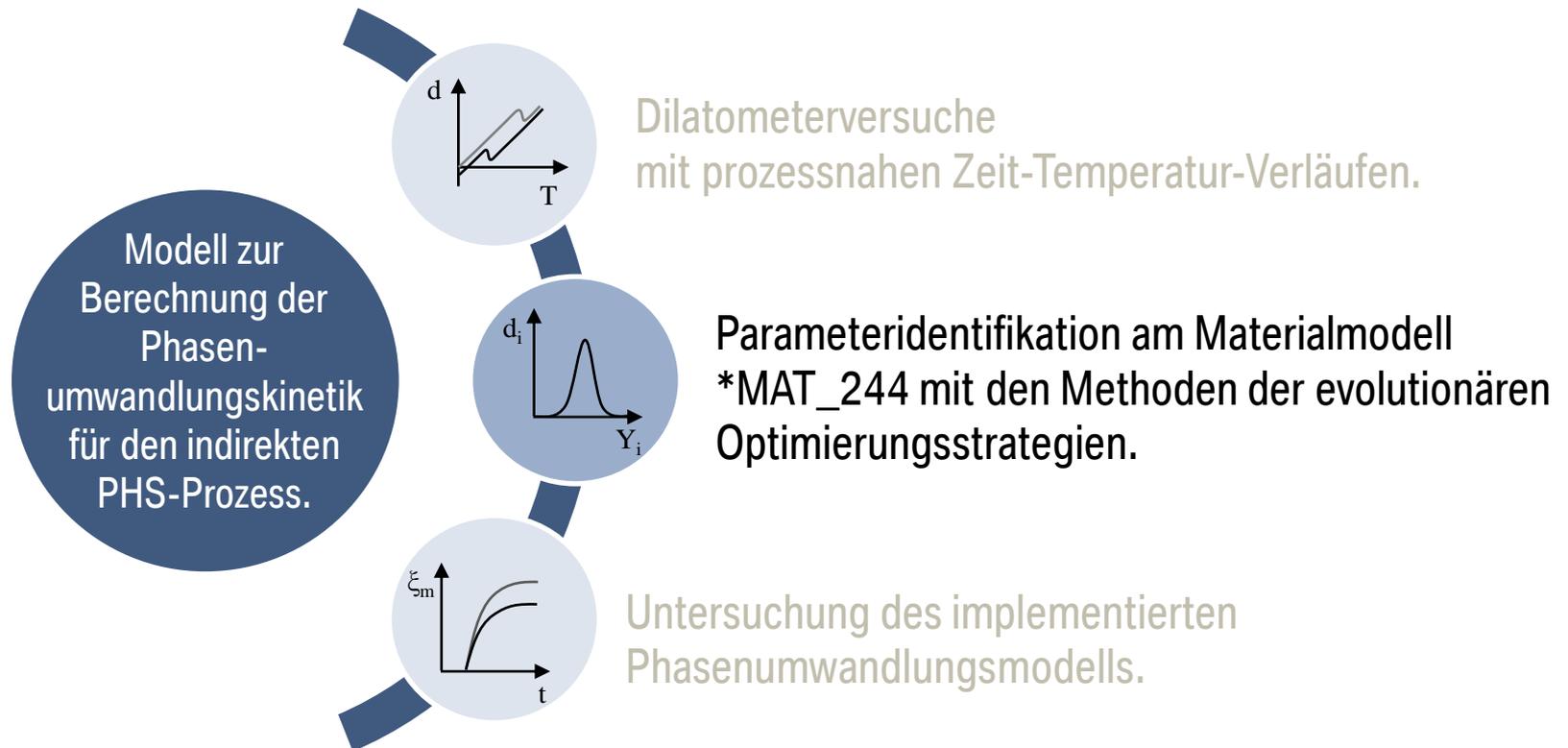
Zusammenfassung.

Ausblick.



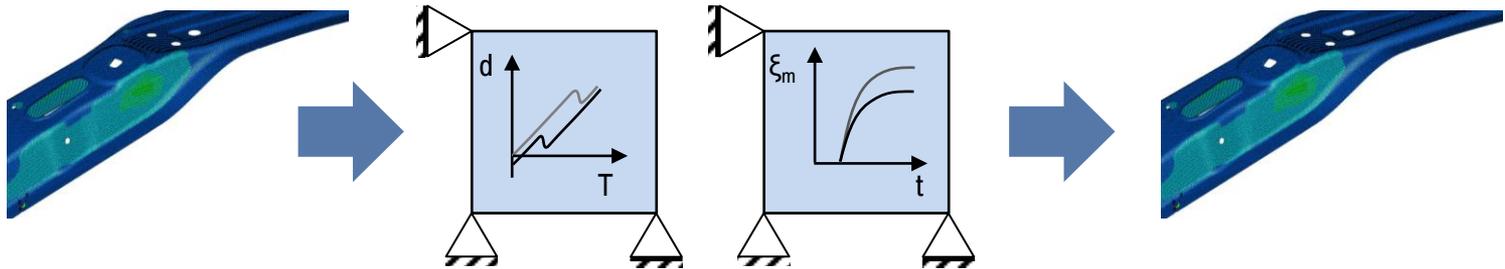
UNTERSUCHUNG UND MODELLIERUNG DES PHASENUMWANDLUNGSVERHALTENS.

Methodische Vorgehensweise:



METHODISCHE VORGEHENSWEISE BEI DER PARAMETERIDENTIFIKATION.

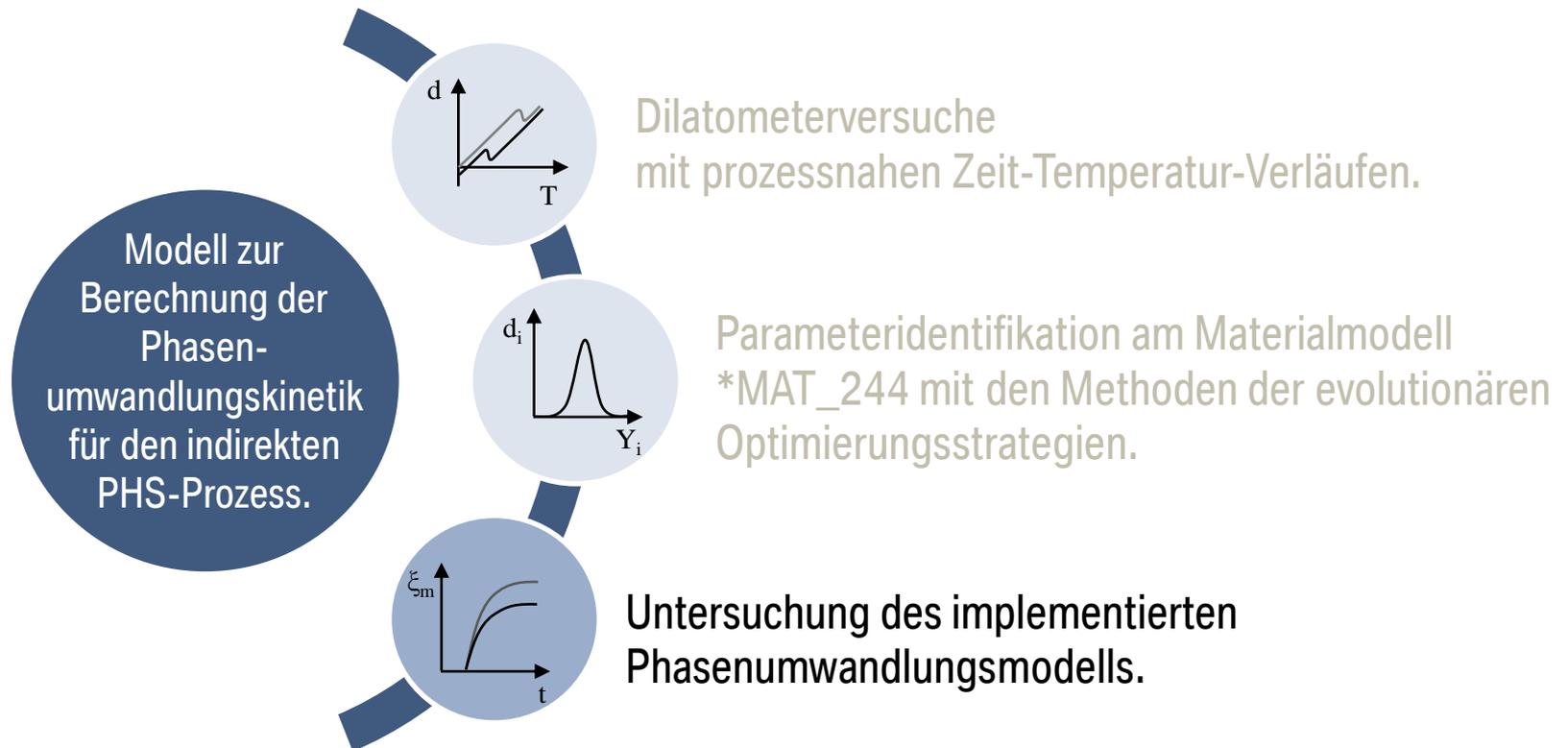
- 1-Element-Modell.
 - Separierung der Effekte und analytische Validierung des FE-Modells.



- Im Dilatometerversuch gemessene **Zeit-Temperatur-Verläufe** können als **Dirichlet-Randbedingung** modelliert werden.
- Ziel der Untersuchungen am 1-Element Modell:
 - **Realitätsnahe Abbildung der Phasenumwandlungskinetik** mit ***MAT_244**.
 - Abbildung **umwandlungsbedingter Dehnungen** und **Plastizität** mit ***MAT_244**.

UNTERSUCHUNG UND MODELLIERUNG DES PHASENUMWANDLUNGSVERHALTENS.

Methodische Vorgehensweise:



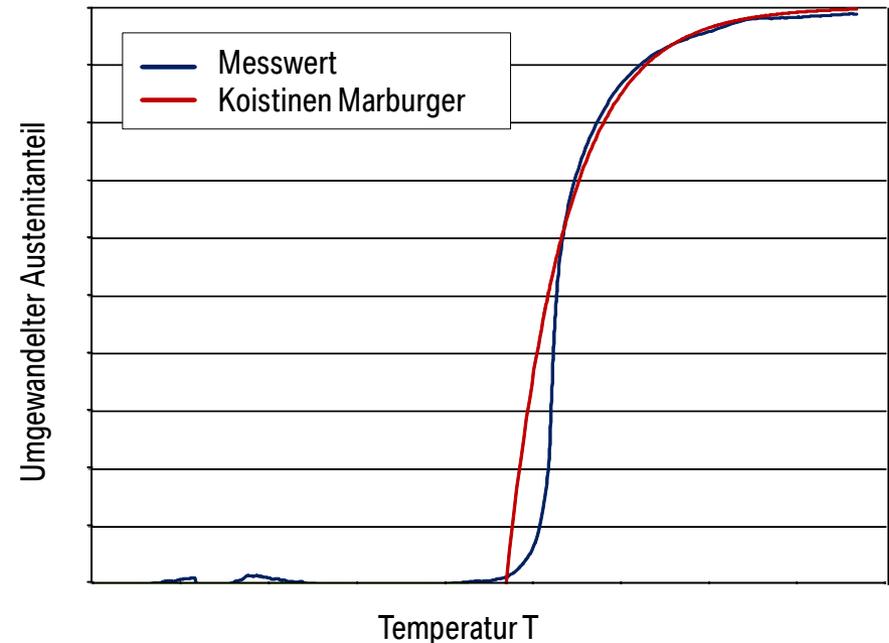
MATERIALMODELLUNTERSUCHUNG. DIFFUSIONSLOSE PHASENUMWANDLUNG.

- **Abgleich** des **simulativ** und **messtechnisch** ermittelten Umwandlungsfortschrittes von Austenit in Martensit unter Berücksichtigung des in *MAT_244 implementierten Ansatzes von **Koistinen und Marburger** [4] zur Berechnung **diffusionsloser Phasenumwandlung**.
- Koistinen Marburger.

$$\xi_M = \xi_A \left(1 - e^{-\alpha(T_{Ms} - T)} \right)$$

↓ Restaustenit
↑ Unterkühlung

$$\xi_A = 1 - \xi_F - \xi_P - \xi_B \Big|_{T=T_{Ms}}$$



MATERIALMODELLUNTERSUCHUNG. DIFFUSIONSLOSE PHASENUMWANDLUNG.

- **Abgleich** des **simulativ** und **messtechnisch** ermittelten Umwandlungsfortschrittes von Austenit in Martensit unter Berücksichtigung der Ansätze von **Koistinen und Marburger** [4] sowie von **Wildau und Hougardy** [5].

- Koistinen Marburger.

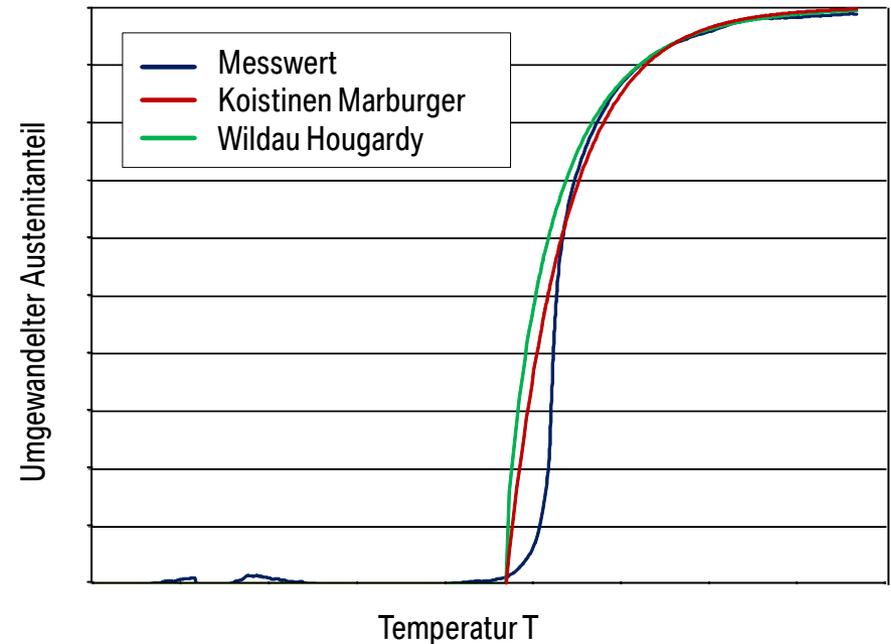
$$\xi_M = \xi_A \left(1 - e^{-\alpha(T_{Ms} - T)} \right)$$

↓ Restaustenit
↑ Unterkühlung

- Wildau Hougardy.

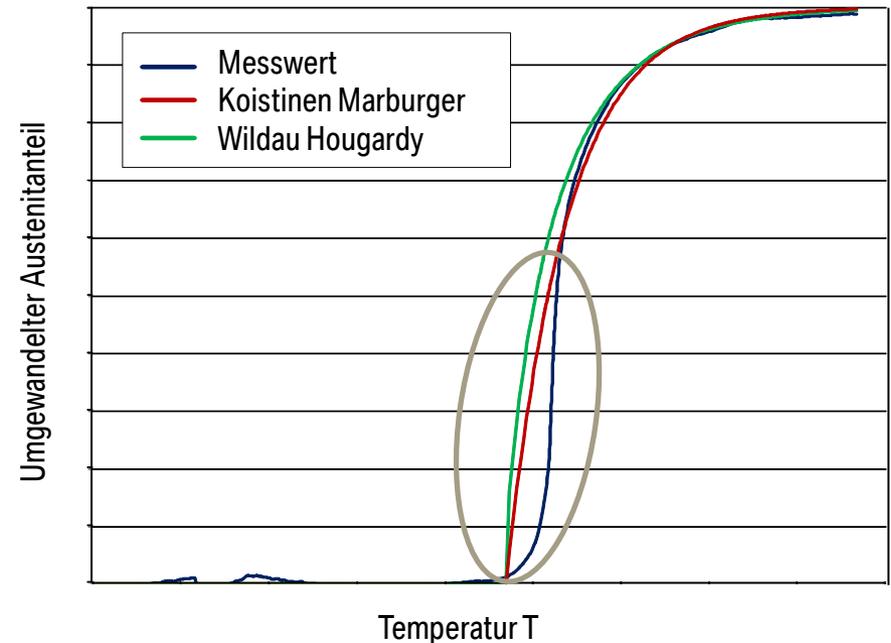
$$\xi_m = \xi_a \left[1 - e^{-\alpha(T_{Ms} - T)^n} \right]$$

↓ Restaustenit
↑ Fit-Parameter
↑ Unterkühlung



MATERIALMODELLUNTERSUCHUNG. DIFFUSIONSLOSE PHASENUMWANDLUNG.

- Die Martensitbildung wird zum Beginn der Phasenumwandlung mit den vorgestellten Ansätzen von **Koistinen und Marburger** [4] in *MAT_244 sowie von **Wildau und Hougardy** [5] unzureichend abgebildet.
- Problematisch für die Berechnung umwandlungsbedingter Dehnungen bei diffusionsloser Phasenumwandlung.
- Alternativer Ansatz zur Berechnung der Martensitbildung erforderlich.



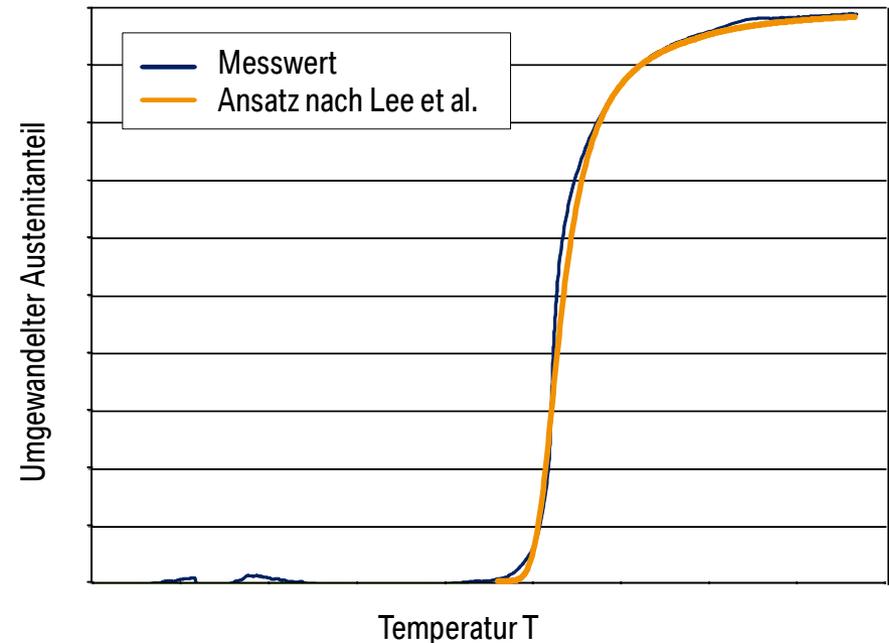
MATERIALMODELLUNTERSUCHUNG. DIFFUSIONSLOSE PHASENUMWANDLUNG.

- Ein möglicher Ansatz zur realitätsnahen Abbildung der Martensitbildung geht auf Untersuchungen von **Lee et al.** [6] zurück.
- Lee et al. postulieren für die Martensitbildung einen nach der Temperatur differenzierten Ansatz .
- Implementierung des Lee et al. Ansatzes in einem eigenem Phasenumwandlungsmodell.
- Umsetzung mit MATLAB.

$$\frac{d\xi_m}{dT} = \alpha (M_s - T)^n \xi_m^\phi (1 - \xi_m)^\psi$$

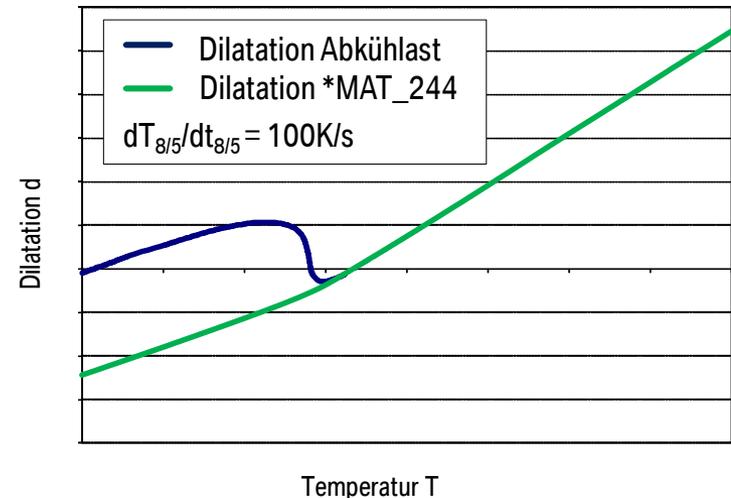
↓ Unterkühlung
↑

Bereits umgewandelter Anteil



MATERIALMODELLUNTERSUCHUNG. UMWANDLUNGSBEDINGTE DEHNUNGEN.

- **Abgleich** der **simulativ** und **messtechnisch** ermittelten Dilatation während der Abkühlung von $T=900^{\circ}\text{C}$ auf $T=100^{\circ}\text{C}$.
- Umwandlungsbedingte Dehnungen werden in *MAT_244 derzeit nicht berücksichtigt.
- Ansätze zur Berechnung umwandlungsbedingter Dehnungen:
 - Berechnung über die Änderung der gemittelten Gitterkonstante ($d\varepsilon_{\text{th+tr}}$) [7].
 - Berechnung über die Längenänderung bei vollständiger Umwandlung ($d\varepsilon_{\text{tr}}$) [8].
 - Berechnung über die Änderung der Dichte der einzelnen Phasen ($d\varepsilon_{\text{th+tr}}$) [9].



GLIEDERUNG.

Einleitung.

Anforderungen an die Simulation des indirekten Presshärteprozesses.

Stand Heute.

Untersuchung der Phasenumwandlungskinetik.

Modellierung der Phasenumwandlungskinetik.

Zusammenfassung.

Ausblick.



ZUSAMMENFASSUNG.

- Phasenumwandlungskinetik wurde auf Basis serienprozessnaher Abkühlverläufe untersucht.
- Modellparameter des Materialmodells *MAT_244 wurden mit den Methoden der evolutionären Optimierungsstrategien identifiziert.
- Untersuchungen zum Materialmodell *MAT_244 zeigen folgende Optimierungspotentiale auf:
 - Martensitbildungsrate wird zu Beginn der Phasenumwandlung mit den untersuchten Ansätzen nach **Koistinen und Marburger** [4] sowie **Wildau und Hougardy** [5] nicht realitätsnah abgebildet.
 - Ansatz nach **Lee et al.** [6] wurde untersucht.
 - Ergebnisse in guter Übereinstimmung zu den Messergebnissen.
 - Umwandlungsbedingte Dehnungen können derzeit **nicht** berechnet werden.
 - Ansätze zur Berechnung der umwandlungsbedingten Dehnungen wurden benannt.

GLIEDERUNG.

Einleitung.

Anforderungen an die Simulation des indirekten Presshärteprozesses.

Stand Heute.

Untersuchung der Phasenumwandlungskinetik.

Modellierung der Phasenumwandlungskinetik.

Zusammenfassung.

Ausblick.



AUSBLICK.

- Implementierung des Ansatzes nach Lee et al. [6] zur realitätsnahen Abbildung der Martensitbildung ist zu empfehlen.
- Implementierung eines Ansatzes zur Abbildung umwandlungsbedingter Dehnungen ist erforderlich.
- Untersuchungen zur diffusionsgesteuerten Phasenumwandlungskinetik werden derzeit durchgeführt.
 - Basis der Untersuchungen:
 - Messergebnisse aus Dilatometerversuchen.
 - Eigenes in MATLAB programmiertes Phasenumwandlungsmodell.
- Versuchstechnische Untersuchungen zur Evolution des Spannungszustandes bei gezielter Zeit-Temperatur-Führung sind geplant.
 - Ziel ist die simulative Untersuchung der Phasenumwandlungsplastizität in *MAT_244.

LITERATURVERZEICHNIS.

- [1] Voestalpine Produktprospekt phs-ultraform: Presshärtender Stahl von voestalpine.
http://www.voestalpine.com/stahl/de/site/downloads/product_brochures.ContentPar.6767.File.tmp/phs_Folder_deu_i.pdf (06.12.2011)
- [2] Hochholdinger, B.: Simulation des Presshärteprozesses und Vorhersage der mechanischen Bauteileigenschaften nach dem Härten ETH-Zürich, Dissertation, 2012
- [3] Harrington, J.: The desirability function. Industrial quality control: Journal of the American Society of Quality C, 1965, S. 494-498
- [4] Koistinen, D. P.; Marburger, R. E.: A general equation prescribing the extent of the austenite-martensite transformation in pure iron-carbon alloys and plain carbon steels. Acta Metallurgica 7, 1959, S. 59-60
- [5] Hougardy, H.: Werkstoffkunde Stahl, Bd. 1: Grundlagen. Düsseldorf: Springer-Verlag. Berlin/New York/Tokyo: Verlag Stahleisen, 1984
- [6] Lee, Seok-Jae et al.: Kinetics modeling of austenite decomposition for an end-quenched 1045 steel. In: Materials Science and Engineering A527, 2010, S. 3186-3194
- [7] Olle, P.: Numerische und experimentelle Untersuchungen zum Presshärten, Leibnitz Universität Hannover, Dissertation, 2007
- [8] Trapp, N.: Methoden und Strategien zur Simulation der Wärmebehandlung komplexer Bauteile aus 20MnCr5, Universität Karlsruhe, 2010
- [9] Miettinen, J.: Calculation of Solidification-related Thermophysical Properties for Steels. In: Metallurgical and Materials Transactions B, 1997, S. 281-296
- [10] Kirkaldy, J. S.; Venugopalan, D.: Prediction of microstructure and hardenability in low alloy steels. In: Marder, A. R. (Hrsg.); Goldstein, J. I. (Hrsg.): International Conference on Phase Transformations in Ferrous Alloys, 1983, S. 125-148
- [11] Li, V.; Niebuhr, D.; Meekisho, L.; Atteridge, D.: A Computational Model for the Prediction of Steel Hardenability. Metallurgical and Materials Transaction B, 1998, S. 661-672

VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT.

