

## Alternativer Ansatz zur Vorhersage mechanischer Kennwerte bei der thermomechanischen Umformsimulation

Dr. Stefan Mecke, Matthias Schneider

Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, Salzgitter, Deutschland

### Abstract:

Mechanical Properties of press-hardened components are significantly dependent on the cooling conditions. In this study the dependence of the mechanical parameters ( $R_m$ ,  $R_{p0,2}$ ,  $A_g$ ,  $A_{5-h10}$ ) on the cooling rate is determined experimentally (22MnB5 material, sheet thickness 1.5 mm, no coating). In addition, a method is presented to calculate the cooling rate on each node of a press-hardened simulation. Based on these cooling rates of each node, the experimentally determined mechanical properties are calculated. As a result the mechanical performance of the elements can be shown in Post-processing or could be used in subordinate simulations, for example crash simulations.

### Keywords:

Presshärten, Umformsimulation, mechanische Kennwerte, Gefügeumwandlung, Abkühlrate

## 1 Einleitung

### 1.1 Forschung und Entwicklung bei der Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH

Die Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH (SZMF) entstand durch Zusammenschluss des Mannesmann Forschungsinstituts (MFI) und dem F&E Bereich des Werkstoffzentrums der Salzgitter Flachstahl GmbH. Sie gehört mit rund 300 Mitarbeitern an den beiden Standorten Salzgitter und Duisburg zu den führenden europäischen Forschungseinrichtungen im Stahlbereich.

Am Standort Salzgitter werden vor allem Warm- und Kaltband sowie zugehörige Beschichtungen entwickelt, hinsichtlich ihrer Verarbeitung sowie ihrer anwendungstechnischen Eigenschaften untersucht und erprobt sowie in enger Zusammenarbeit mit der verarbeitenden Industrie in Bauteile überführt. Dadurch wird dem Kunden ergänzend zu den Werkstoffen Anwendungsberatung geboten. Im Unternehmen wird dazu die gesamte Prozesskette, von der Stahlherstellung bis hin zur Fertigung und Erprobung von Komponenten, abgebildet.

Aktuelle Schwerpunkte der Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten der SZMF bilden vor allem höchstfeste Blechwerkstoffe und deren Verarbeitung, sowie aktuell auch die Prozesskette zur Erzeugung pressgehärteter Bauteile.

### 1.2 Warmblechumformung – Presshärten

Der Prozess des Presshärtens ermöglicht aufgrund der hohen erzielbaren Werkstofffestigkeiten in Verbindung mit hohen erreichbaren Umformgraden herausragende Werkstoffleichtbaukonzepte. Dieses Verfahren wird derzeit vorwiegend in der Automobilindustrie eingesetzt und findet in den letzten Jahren eine immer weitere Verbreitung. Warmumgeformte Blechteile werden bereits in fast allen aktuellen PKW-Modellen, vorwiegend in crashrelevanten Strukturbereichen der Fahrgastzelle, eingesetzt, um einen hohen Insassenschutz bei geringem Karosseriegewicht zu erreichen. Auf diesem Gebiet sind verstärkt Forschungsaktivitäten, vor allem mit Bezug auf die Werkstoffentwicklung und die dazugehörige Prozessierung, zu verzeichnen. Zu diesen Forschungsaktivitäten ist, gerade im Automobilbau, auch die Simulation zu zählen, da für jedes Bauteil sowohl die Herstellbarkeit als auch die Bauteileigenschaften hinsichtlich ihres Crashverhaltens simulativ untersucht werden müssen.

Beim Presshärten werden durch die integrierte Wärmebehandlung gezielt Gefügeumwandlungen im Bauteil eingestellt, die zu einer massiven Änderung der mechanischen Eigenschaften des Materials führen. Dazu wird die Platine auf Temperaturen oberhalb der Austenitisierungstemperatur erwärmt, üblicherweise werden Ofentemperaturen von etwa 950°C gewählt, um ein vollständig austenitisches Gefüge zu erzielen. Anschließend verliert die Platine Temperatur beim Transfer vom Ofen in die Presse und kühlt dort durch den Kontakt zum Werkzeug während der Umformung weiter ab. Die finale Abkühlung des Bauteils wird durch einen Haltevorgang im Werkzeug im Anschluss an die Umformung erreicht. Abhängig von den lokalen Abkühlgeschwindigkeiten stellt sich so das endgültige Gefüge im Bauteil ein. Um die mechanischen Eigenschaften des fertigen Bauteils berechnen zu können, müssen die Gefügeänderungen in der Simulation berücksichtigt werden. Ein möglicher Ansatz sind hier mathematische Materialmodelle (beispielsweise MAT244), die die Phasenumwandlung auf einer theoretischen Basis berechnen [1; 2].

## 2 Motivation und Zielstellung

In dem beim Presshärten üblichen Prozessfenster wird im Allgemeinen ein nahezu vollständig martensitisches Gefüge im fertigen Bauteil eingestellt. Die mechanischen Eigenschaften von Martensit sind aber wiederum signifikant von den Abkühlbedingungen abhängig. Diese Abhängigkeit ergibt sich beispielsweise aus einer Verringerung des Korngrößenwachstums bei einer schnelleren Abkühlung. Somit ergeben sich kleinere Körner, die im Allgemeinen eine höhere Härte und damit Festigkeit zur Folge haben. Außerdem tritt bei schnellerer Abkühlung eine höhere Versetzungsdichte im Gefüge auf, woraus sich ebenfalls eine erhöhte Festigkeit ergibt [3]. Diese Effekte sind auf theoretischer Basis nur eingeschränkt zu beschreiben.

Weiteren Anlass zu den in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen gab folgende Problematik: Um die mathematische Materialmodelle mit Phasenumwandlung fundiert und korrekt bedienen zu können ist ein großes Know-How in der Modellierung von Gefügeumwandlungen notwendig, das bei Spezialisten für Umformsimulationen häufig nicht vorhanden ist. Um diesen Anwendern die Unsicherheit eines schwer zu verstehenden Materialmodells zu nehmen, ihnen aber trotzdem die simulative Vorhersage mechanischer Kennwerte beim Presshärten zu ermöglichen, soll hier eine auf experimentellen Daten basierende Modellierung vorgestellt werden.

### 3 Vorgehensweise

In Bild 1 ist das übliche Prozessfenster beim Presshärten in einem schematischen Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubild (ZTU) dargestellt (vgl. Abschnitt 4.1). Das Verhalten des presshärtbaren Stahls 22MnB5 (Blechdicke 1,5mm, keine Beschichtung) in diesem Prozessfenster wurde mit Hilfe von Experimenten an einem Dilatometer (vgl. Abschnitt 4.1) untersucht. Solange man sich innerhalb des in Bild 1 dargestellten Fensters bewegt, ist die Zeit, die ein Probekörper benötigt um vom oberen Punkt der alpha-gamma-Umwandlung ( $A_{c3}$ ) auf Martensitstarttemperatur ( $M_s$ ) zu kommen von Interesse für die sich einstellenden mechanischen Eigenschaften. Diese Zeit wird im Folgenden als  $t_{Ac3-Ms}$  bezeichnet. Der Verlauf der Abkühlung hingegen hat keinen unmittelbaren Einfluss auf das Gefüge. Auf dieser Erkenntnis beruht die dieser Arbeit zu Grunde liegende Annahme, dass für jeden Knoten des Simulationsmodells einer Presshärtesimulation eine Zeit  $t_{Ac3-Ms}$  berechnet werden kann, die maßgeblich für die sich einstellenden mechanischen Eigenschaften des jeweiligen Knotens nach dem Presshärten ist.

In Versuchen am Glühsimulator der SZMF (vgl. Abschnitt 4.2) können Blechproben gezielt verschiedenen Wärmebehandlungen unterzogen werden. Die geometrische Form der Glühsimulatorproben ermöglicht die anschließende Fertigung von Zugversuchsproben, so dass den jeweiligen Wärmebehandlungsparametern mittels Zugversuchen mechanische Kennwerte zugeordnet werden können. Durch unterschiedliche Experimente können so unterschiedliche Abkühlraten innerhalb des Prozessfensters des Presshärtens realisiert werden.

Für jeden Knoten eines Simulationsmodells lassen sich nach Abschnitt 5 Abkühlzeiten  $t_{Ac3-Ms}$  berechnen. Durch Verknüpfung der experimentellen Ergebnisse mit diesen berechneten Abkühlzeiten lassen sich den Knoten experimentell ermittelte mechanische Kennwerte zuordnen. Die Kennwertverteilungen lassen sich im Post Processing graphisch darstellen und sind für Folgeoperationen (z.B. eine Crashsimulation) nutzbar.

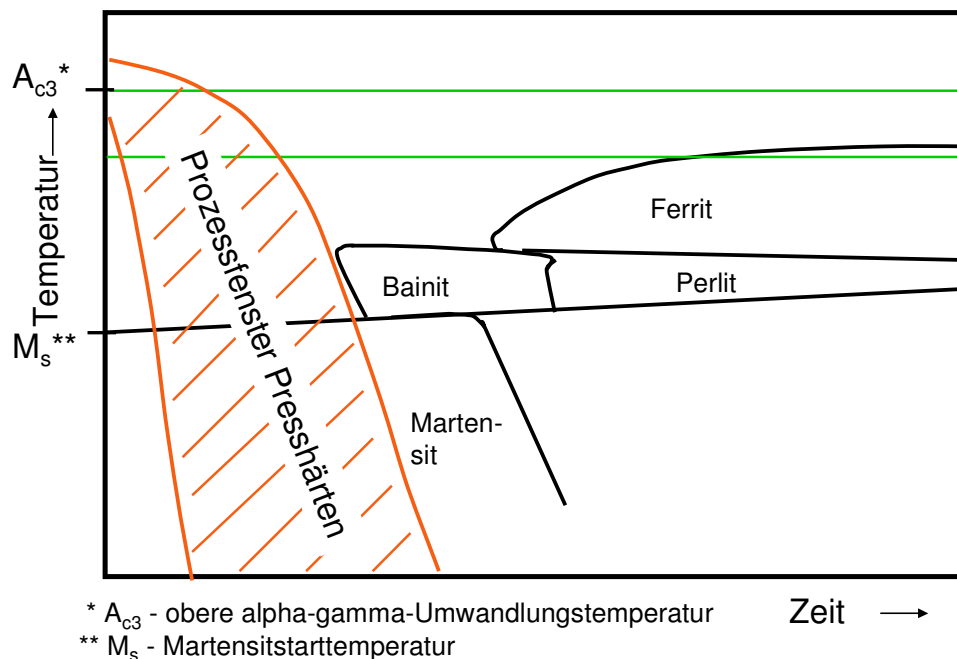


Bild 1: Schematisches ZTU-Schaubild und typisches Prozessfenster beim Presshärten

### 4 Experimentelle Durchführung

Die SZMF ist unter anderem mit einem Dilatometer, einem Glühsimulator, einer hydraulischen Umformpresse inklusive eines Wärmebehandlungsofens sowie diversen Zugprüfmaschinen ausgestattet. Mit Hilfe dieser Geräte lassen sich Gefügeumwandlungen von presshärtbaren Stählen in Abhängigkeit von der Abkühlgeschwindigkeit detailliert untersuchen und in Form von mechanischen Kennwerten der Simulation zugänglich machen.

## 4.1 Dilatometer

### 4.1.1 Technische Beschreibung

Mit Hilfe des Dilatometers der SZMF (Bild 2) können Gefügeänderungen in Werkstoffproben in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit nachgebildet werden. Hierzu wird die Temperatur von kleinen Flachproben (Standard: 8x4mm) geregelt verändert und dabei die Längenänderung der Probe gemessen. Aus diesen Werten lässt sich das Umwandlungsverhalten von Stählen und deren Gefügeausbildung in Abhängigkeit der Abkühlbedingungen in Form von ZTU-Schaubildern darstellen. Ein solches ZTU-Schaubild ist in Bild 1 schematisch dargestellt. Insbesondere durch den Einsatz von Wasserstoff als Kühlgas lassen sich hohe Abkühlraten sehr variabel einstellen, so dass sich das Gerät für Grundlagenuntersuchungen zur Erzeugung pressgehärteter Bauteile sehr gut eignet.



Bild 2: Bähr Umformdilatometer bei der SZMF

### 4.1.2 Experimentelle Durchführung und Ergebnisse

Mit Hilfe des Dilatometers werden Probekörper mit unterschiedlichen Temperaturverläufen gefahren und anschließend das sich einstellende Gefüge untersucht. Ziel dieser Experimente ist es, innerhalb des in Bild 1 schematisch dargestellten Prozessfensters drei Probekörper in der jeweils gleichen Abkühlzeit  $t_{Ac3-Ms}$  mit sich stark unterscheidenden Abkühlstrategien zu fahren und die entstehenden Gefüge zu vergleichen. Im Einzelnen wurden die Probekörper auf 950 °C erwärmt und 480 s (8 min) bei dieser Temperatur gehalten. Anschließend wurde die Temperatur innerhalb von 6,5 s auf 810 °C abgesenkt, um den Transport vom Ofen in das Werkzeug nachzustellen. Die anschließende Abkühlung auf 400 °C erfolgte auf drei unterschiedlichen Wegen, wobei die 400 °C aber jeweils nach der gleichen Zeit erreicht wurden. Die erste Probe wurde linear in 10 s von 810 °C auf 400 °C abgekühlt, die zweite in zwei Stufen erst in 2 s auf 500 °C und dann in 8 s auf 400 °C und die dritte ebenfalls in zwei Stufen erst in 8 s auf 700 °C und dann in 2 s auf 400 °C. Anschließend wurden alle Proben in 30 s auf 20 °C heruntergekühlt.

In Bild 3 sind Schlibfbilder der drei Probekörper dargestellt. Die Auswertung dieser Bilder ergibt in allen drei Fällen ein zu 100 % martensitisches Gefüge. Die sich einstellenden Härtewerte (HV5 und HV0,5) wurden nach DIN EN ISO 6507 [4] ermittelt. Sowohl die Gefügezusammensetzung als auch die Härtewerte der Proben lassen den Schluss zu, dass sich bei gleicher Abkühlzeit  $t_{Ac3-Ms}$  unabhängig von der Temperaturführung vergleichbare Gefüge mit vergleichbaren mechanischen Eigenschaften einstellen.

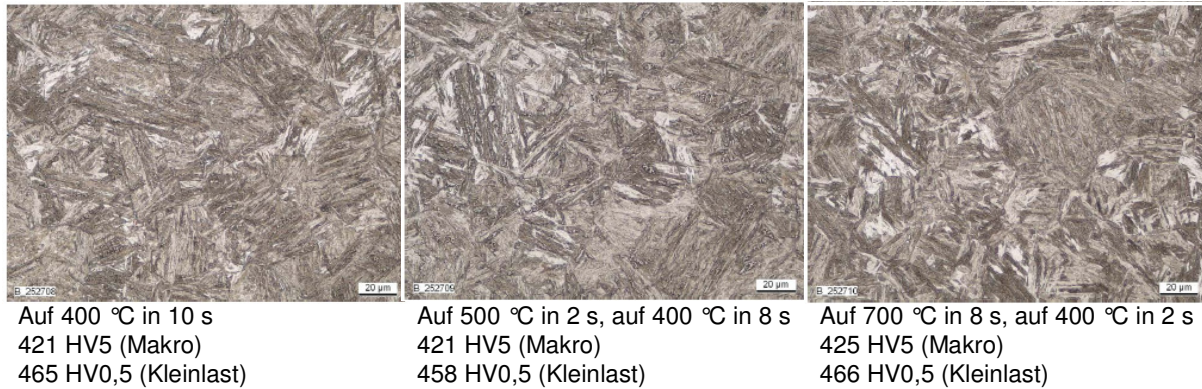


Bild 3: Gefügeschliffe und gemessene Härtewerte Dilatometerversuch

## 4.2 Glühsimulator

### 4.2.1 Technische Beschreibung

Mit Hilfe des Glühsimulators der SZMF (Bild 4) kann die Erwärmung und Abkühlung von Stahlbändern experimentell simuliert werden. Es werden streifenförmige Proben (Standard: 450mmx200mm) eingesetzt, aus denen im Anschluss an die Wärmebehandlung Zugproben hergestellt werden können.

### 4.2.2 Experimentelle Durchführung und Ergebnisse

Es werden drei unterschiedliche Kühlraten experimentell untersucht, die sich in der Nähe der Grenze zur bainitischen Umwandlung befinden (vgl. Bild 4). Die sich nach der Wärmebehandlung ergebenden Gefüge sind in Bild 5 dargestellt. Es zeigt sich, dass sich bei einer Abkühlrate von 17 K/s erwartungsgemäß ein martensitisches Gefüge mit einem höheren Bainitanteil (10%) ergibt. Bei den Abkühlraten von 29 K/s und 52 K/s stellt sich ein nahezu rein martensitisches Gefüge ein.

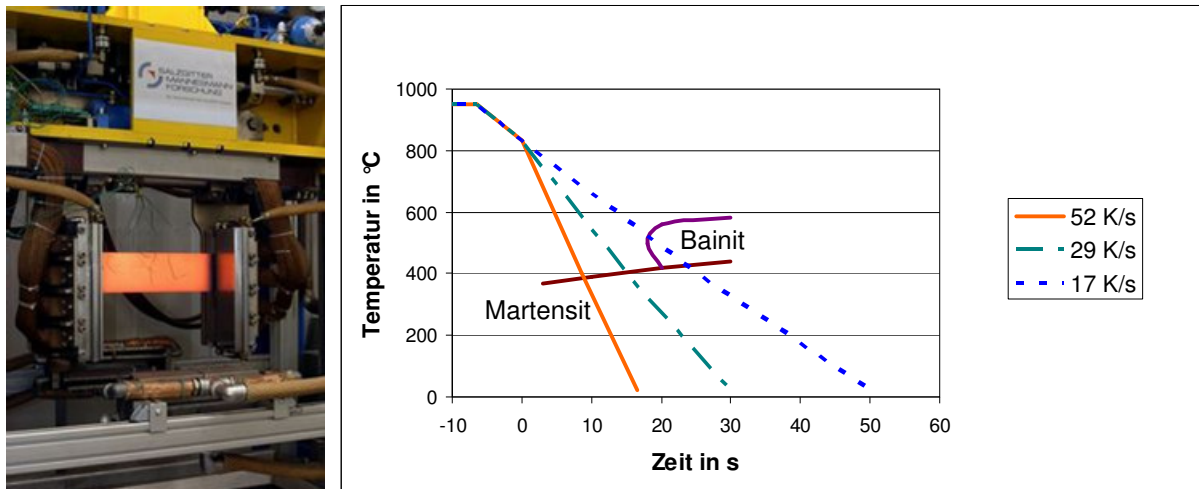
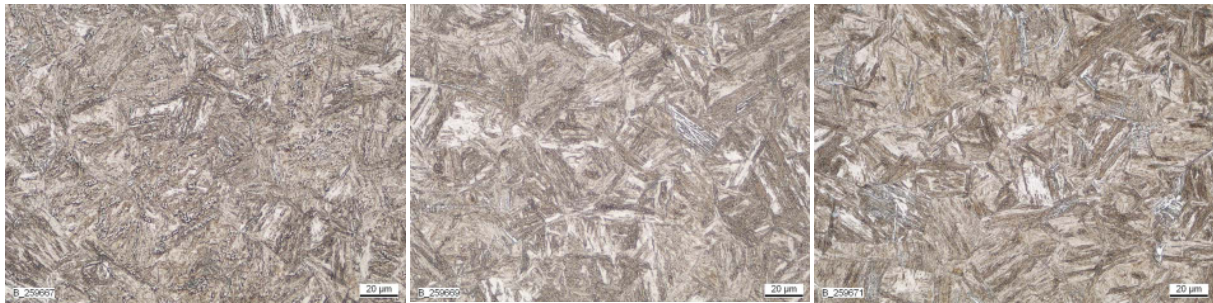


Bild 4: Glühsimulator bei der SZMF und realisierte Abkühlkurven



Abkühlrate: 52 K/s  
100% Martensit

Abkühlrate: 29 K/s  
99% Martensit  
1% Bainit

Abkühlrate: 17 K/s  
90% Martensit  
10% Bainit

Bild 5: Gefügeschliffe und –zusammensetzung Glühsimulatorversuche

### 4.3 Ofen und Presse

#### 4.3.1 Technische Beschreibung

Um das Prozessfenster auf der Seite hoher Abkühlraten experimentell zu beschreiben wird zusätzlich zu den Glühsimulatorproben auf Proben zurückgegriffen, die in einem praxisnahen Presshärtversuch hergestellt wurden. Dafür werden ebene Blechzuschnitte in einem Kammerofen der Firma *Nabertherm* (Bild 6) in einem definierten Zeitraum bei einer vorgegebenen Innenraumtemperatur erwärmt. Im Anschluss daran erfolgt der Transfer in ein modulares Werkzeug, das in einer hydraulischen Umformpresse der Firma *Dieffenbacher* eingebaut ist (Bild 6).



Pressdaten	
• Druckkraft Stößel	10.000 kN
• Ziehkissenkraft	5.000 kN
• Ziehkissenhub	300 mm
• Stößel auswerfer	100kN
• Stößelhub	1000 mm
• Werkzeugeinbauhöhe	1.500 mm
• Tisch/ Stößelgröße	2.500x1.300 mm <sup>2</sup>
• Umformgeschwindigkeit:	1 - 500mm/s

Bild 6: Hydraulische Tryout-Pressen und Ofen bei der SZMF

Das eingesetzte Werkzeug ist in Bild 7 dargestellt. Es besteht aus mehreren Segmenten und ermöglicht es unter anderem Flachproben unter definierten Bedingungen (u. a. auch verzögert) abzukühlen.



Bild 7: Versuchswerkzeug zur Wärmebehandlung von Flachproben

#### 4.3.2 Experimentelle Durchführung und Ergebnisse

Es werden zuvor erwärmte Zuschnitte der Größe 450mm x 180mm zwischen den Flachbacken definiert abgekühlt. Der Temperaturverlauf in der Platine wird mit Hilfe von Thermoelementen aufgezeichnet. Aus diesen Messdaten wird eine mit den Glöhsimulatorversuchen vergleichbare Abkühlrate ermittelt, die bei 600 K/s liegt (vgl. Bild 9). Aus den gehärteten Probeblechen erfolgt die Probenentnahme für die Zugversuche.

### 4.4 Zugprüfmaschine

#### 4.4.1 Technische Beschreibung

Mit Hilfe von Zugversuchen lässt sich eine Vielzahl von Materialkennwerten ermitteln, die charakteristisch für das spätere Verhalten eines Bauteils im Einsatz sind. Sie werden daher als Standarduntersuchung zur Prozess- und Werkstoffauslegung für die Warmumformung praktiziert [5; 6; 7]. Dabei kommen verschiedene Zugprobengeometrien nach DIN 50125 [8] zum Einsatz. Die Ermittlung der mechanischen Kennwerte ist, insbesondere mit Bezug auf Gleichmaß- und Bruchdehnung, stark von der Zugprobengeometrie abhängig. Um eine geeignete Zugprobengeometrie zu ermitteln, wurden entsprechende Versuchsreihen durchgeführt [9]. Es hat sich herausgestellt, dass bei Verwendung der in Bild 8 dargestellten Probengeometrie die geringsten Streuungen insbesondere bei der Bruchdehnung auftreten. Die Untersuchungen in dieser Arbeit werden daher mit dieser Probenform durchgeführt.

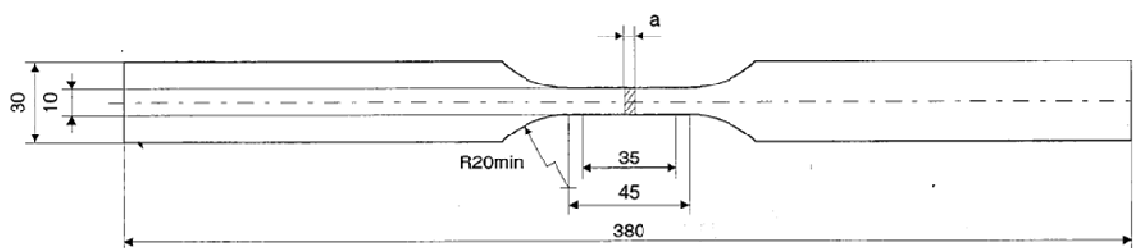


Bild 8: Verwendete Zugprobengeometrie in Anlehnung an DIN 50125 [7]

#### 4.4.2 Experimentelle Durchführung und Ergebnisse

Die mittels Zugversuchen ermittelten mechanischen Kennwerte wurden den Abkühlgeschwindigkeiten der Proben aus den Vorversuchen zugeordnet (Bild 9). Mittels einer linearen Approximation können Geradengleichungen bestimmt werden, die den Zusammenhang zwischen der Abkühlgeschwindigkeit und der jeweiligen Kenngröße beschreiben.

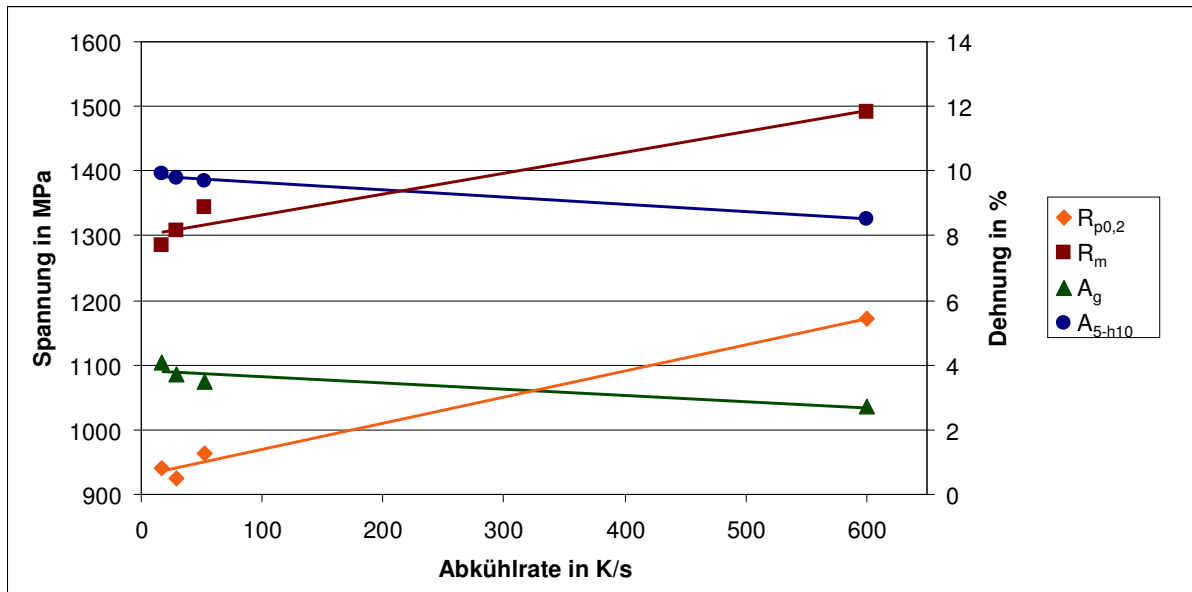


Bild 9: Abhängigkeit mechanischer Kennwerte von der Abkühlrate (Werkstoff 22MnB5)

## 5 Berechnung der $t_{Ac3-Ms}$ Zeit und der korrelierenden mittleren Abkühlgeschwindigkeit

In diesem Abschnitt wird die Vorgehensweise zur Zuordnung und zur graphischen Darstellung der mechanischen Kennwerte auf dem simulierten Bauteil dargestellt. Um die Rechenzeit bei der Simulation des Presshärtens zu minimieren, werden der Umform- und der Abkühlschritt in zwei getrennten Rechnungen mit angepassten Zeitschritten dargestellt. In den jeweiligen Simulationen werden für die Berechnung von  $t_{Ac3-Ms}$  sowie die anschließende Zuordnung von mechanischen Kennwerten verschiedene LS-PrePost Makros und Fortran-Skripte genutzt, deren Funktionen sowie ihr Ineinandergreifen in Bild 10 dargestellt sind.



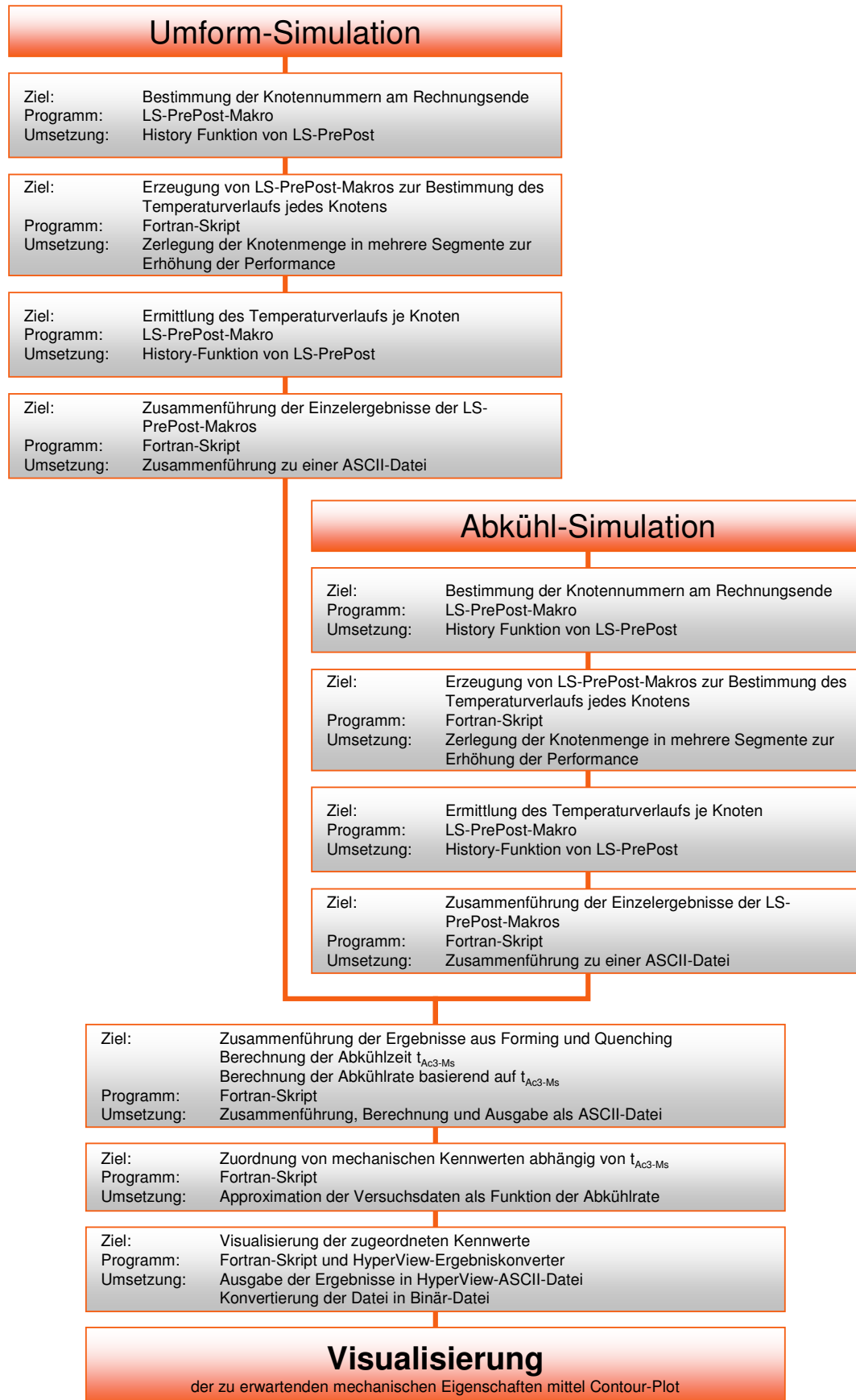


Bild 10: Ablaufdiagramm der Simulations-Auswerteroutine

Die für die Zuordnung von mechanischen Kennwerten zu den Knoten des simulierten Bauteils entscheidende Berechnung der Abkühlraten soll hier näher erläutert werden. Nach der

Zusammenführung der Temperaturverläufe aus der Umform- und der Abkühlsimulation werden die Abkühlzeit  $t_{Ac3-Ms}$  und daraus die durchschnittliche Abkühlrate berechnet. Dazu tastet das Fortran-Skript so lange die Temperaturverlaufskurve ab, bis das erste Mal ein Temperaturwert kleiner  $A_{c3}$  auftritt und geht dann wieder einen Zeitschritt zurück. Dieser letzte Temperaturwert, der größer als  $A_{c3}$  ist, sowie die zugehörige Zeit werden herausgeschrieben. Auf die gleiche Weise werden der letzte Zeit- sowie Temperaturwert, der größer als  $M_s$  ist, ermittelt. Die Zeitdifferenz, die zwischen diesen beiden Zeitwerten liegt, entspricht  $t_{Ac3-Ms}$ . Aus der Temperaturdifferenz dividiert durch  $t_{Ac3-Ms}$  ergibt sich dann die durchschnittliche Abkühlrate dieses Knotens, der im Anschluss die mechanischen Kennwerte gemäß Bild 9 zugeordnet werden.

## 6 Ausblick

Um die in dieser Arbeit ermittelten Abhängigkeiten der einzelnen mechanischen Kennwerte von der Abkühlgeschwindigkeit zu erhärten sind weitere Versuche notwendig. Insbesondere sollten Zugproben mit mittleren Abkühlraten hergestellt und untersucht werden, um die in Bild 9 dargestellten Approximationen mit einer größeren Zahl von Stützstellen zu berechnen. Die Vorhersagegenauigkeit bezüglich der Kennwertverteilung auf einem simulierten Bauteil muss außerdem noch über Bauteilbehebungen und einen Abgleich mit der Simulation experimentell validiert werden.

## 7 Zusammenfassung

Die mechanischen Eigenschaften von pressgehärteten Bauteilen sind signifikant von den Abkühlbedingungen abhängig. In dieser Arbeit werden experimentell die Abhängigkeiten mechanischer Kenngrößen ( $R_m$ ,  $R_{p0,2}$ ,  $A_g$ ,  $A_5-h_{10}$ ) von der Abkühlrate bestimmt (Werkstoff 22MnB5; Blechdicke 1,5mm; ohne Beschichtung). Zusätzlich wird eine Vorgehensweise vorgestellt, für jeden Knoten einer Presshärt-Simulation die Abkühlrate zu berechnen. Auf Basis dieser Abkühlraten werden für jeden Knoten die experimentell ermittelten mechanischen Kennwerte berechnet. Im Ergebnis lassen sich die erreichbaren Bauteileigenschaften im Postprocessing auswerten bzw. an nachgeordnete Simulationen, beispielsweise eine Crashsimulation, übergeben.

## 8 Literatur

- [1] Shapiro, A.: "Using LS-Dyna for Hot Stamping", 7<sup>th</sup> European LS-Dyna Conference, 2009
- [2] Olle, P.: „Numerische Simulation des Presshärtprozesses unter Berücksichtigung der Gefügeumwandlung“, 6. LS-Dyna Anwendungsforum, 2007, C-II-1-10
- [3] Jäniche, W., et al.: „Werkstoffkunde Stahl“, Springer-Verlag, 1985
- [4] DIN EN ISO 6507: „Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers“, Beuth-Verlag, 2006
- [5] Wilsius, J.; Hein, P.; Kefferstein, R.: "Status and future trends of hot stamping of Usibor 1500 P". Tagungsband 1. Erlanger Workshop Warmumformung, Meisenberg-Verlag Bamberg, Erlangen, 2006
- [6] Behrens, B.-A.; Hübner, S.; Schäffner, C.; Olle, P.; Schäfer, F.: Process Optimisation of Press Hardening. BLECHbusiness 07, Congress: Technologies to Maximise Productivity in Sheet Metal Working, Warschau, Polen, 2007
- [7] Braun, M., Schäffner, C.: "Hot Sheet Metal Forming - R&D along the Process Chain inside the Salzgitter Group". CHS2, 1st International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High Performance Steel, Kassel, 2009
- [8] DIN 50125: „Prüfung metallischer Werkstoffe – Zugproben“, Beuth-Verlag, 2009
- [9] Schäffner, C., et al.: „Charakterisierung und Verarbeitung warm umgeformter Blechwerkstoffe“, Tagungsband: 3rd International Conference on Accuracy in Forming Technology ICAFT 2009 in Verbindung mit 16. Sächsische Fachtagung Umformtechnik SFU Chemnitz, 2009