

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

# ADVANCED MATERIALS PROCESSING AND MICROFABRICATION

Urformen im Zustand Fest/Flüssig (Thixotrope Formgebung)

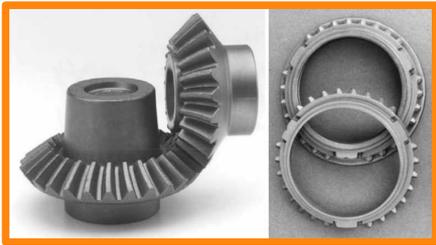
# Struktur

1. Frage- bzw. Problemstellung: Vor- und Nachteile des Gesenkschmiedens und des Druckgießens
2. Tafel: Binäres Phasendiagramm Al-Si
3. Thixotropie
4. Urformen im Fest-Flüssigen Zustand: Thixo- vs. Rheo-Prozess
5. Anwendungs- / Produktbeispiele
6. Verwendung für Mg- und Al-Basis-Werkstoffe
7. Verwendung für Fe-Basis-Werkstoffe
8. Zusammenfassung & weiterführende Literatur
9. Anhang: Sintern im Phasengebiet Fest/Flüssig

# Frage-/ Problemstellung

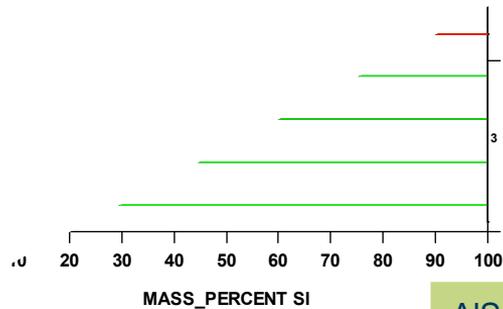
Welche grundsätzlichen Ziele verfolgen  
Warmumform- und Gießprozesse ?

Vergleichen Sie beispielhaft das **(Gesenk)schmieden**  
mit dem **Druckgießen** und identifizieren Vor- und  
Nachteile der Verfahren!



# Binäres System Al-Si

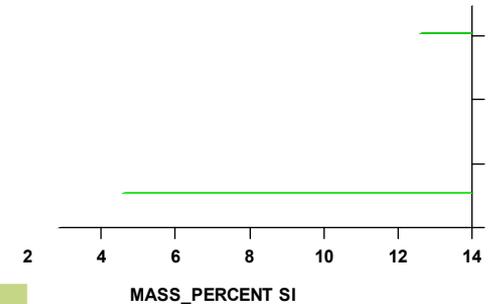
Al-Si



AlSi1Mg (AA6082) vs. AlSi7Mg (A356):

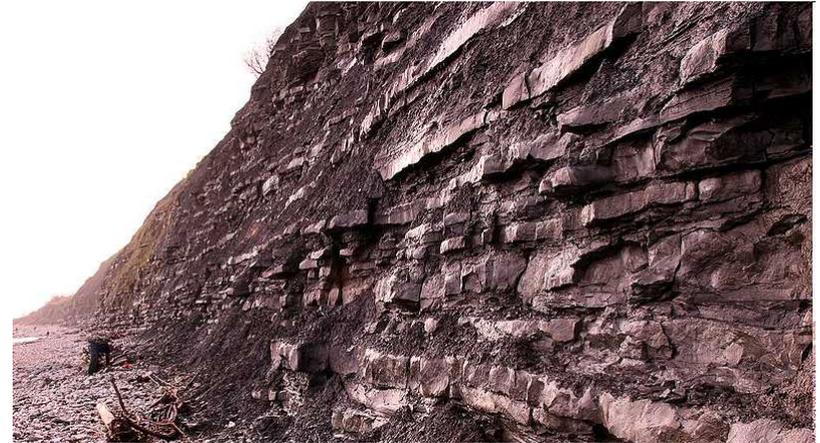
- Erstarrung im GG und im Ungleichgewicht ?
- Eutektikum ?
- Seigerungen ?

Vergrößerung



# Thixotropie

- Eigenschaft eines „festen“ Körpers, bei Einwirkung einer Scherkraft eine zeitabhängige Änderung seiner Viskosität zu zeigen.
- Beispiel: Ein Gel, das im ungesicherten Zustand eine hohe Viskosität aufweist, die jedoch durch eine Scherkraft verringert wird, was zum Fließen des Materials führt.
- Wichtige Eigenschaft in der Geologie, da sich einige Lehmböden thixotrop verhalten.
- Unterschied zu „pseudo-plastisch“: Änderung der Viskosität als Funktion der Scherrate



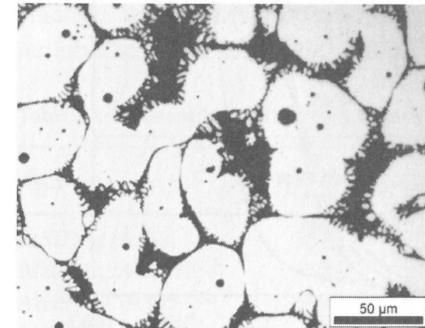
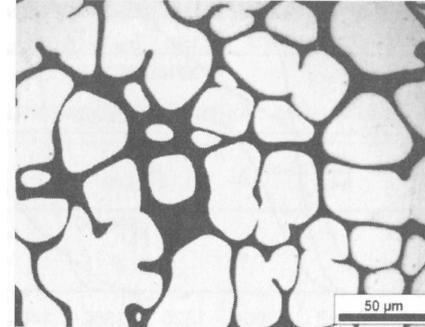
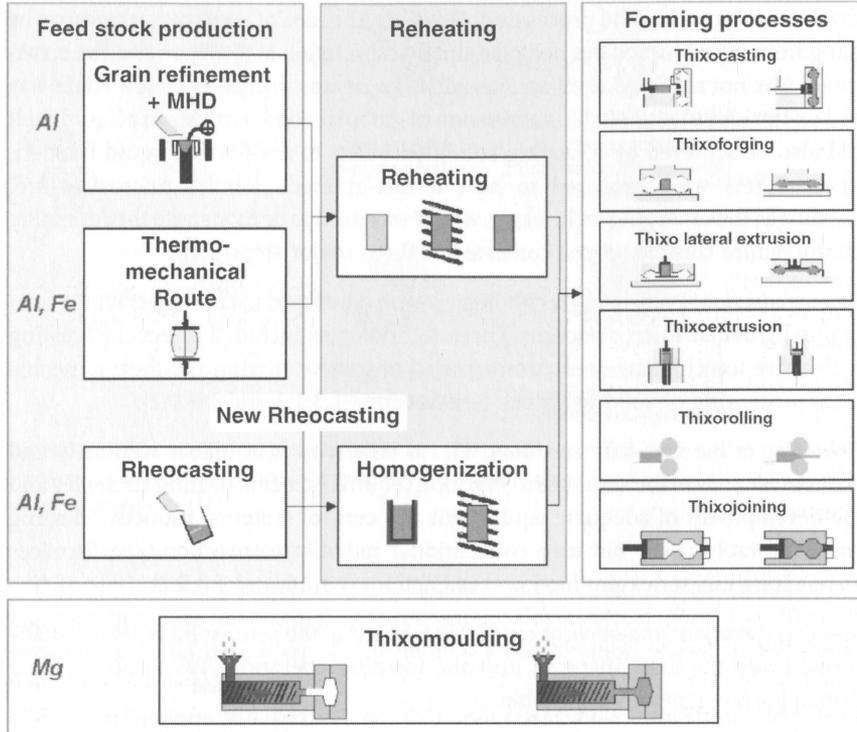
Blue Lias cliffs at Lyme Regis, Dorset, UK (Wikipedia)

# Thixotropie

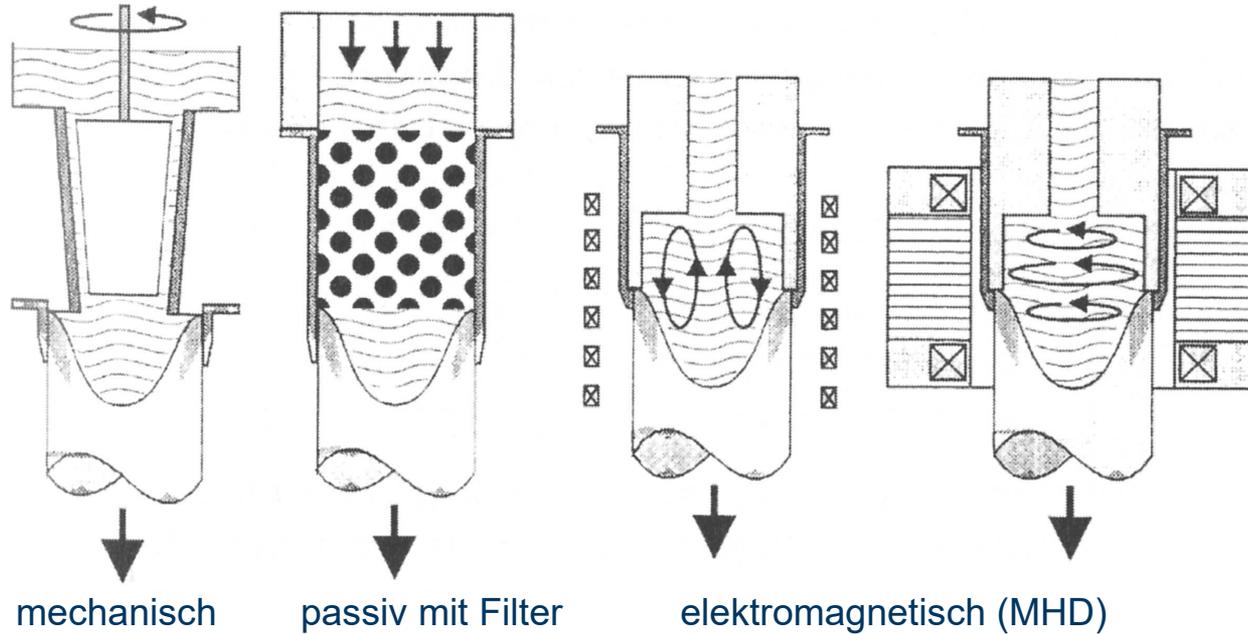
- Legierungen können im teilflüssigen Zustand thixotrop sein
- Scharfe Trennung zur „Pseudo-Plastizität“ nicht möglich, da teilflüssige Metalle eine Abhängigkeit von Zeit und Scherrate aufweisen können
- Erste Arbeiten zum Fließverhalten teilflüssiger Metalle in den 1970er Jahren durch *Flemings et al.*
- Technische Nutzung z.B. beim „Thixo-Casting“
- In Europa starkes Interesse Ende der 1980er Jahre
- Heute: Konkurrenz durch weiterentwickelte Gießverfahren im vollständig flüssigen Zustand, vor allem aufgrund:
  - Kostendruck
  - Prozessstabilität
  - Einschränkung der Materialauswahl

Flemings et al., Materials Science and Engineering 25 (1976), 103-117

# Thixotropie vs. Rheo: Prozesse

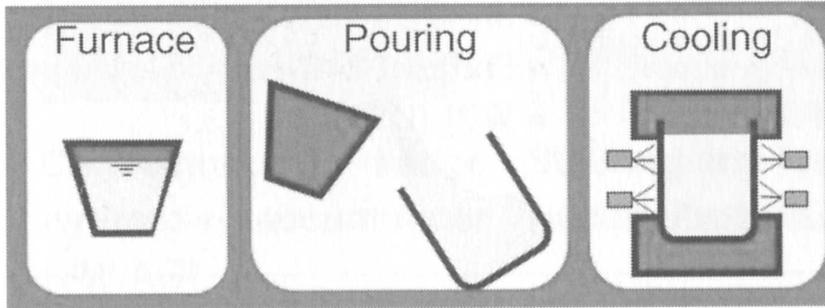


# Thixotropie vs. Rheo: Prozesse



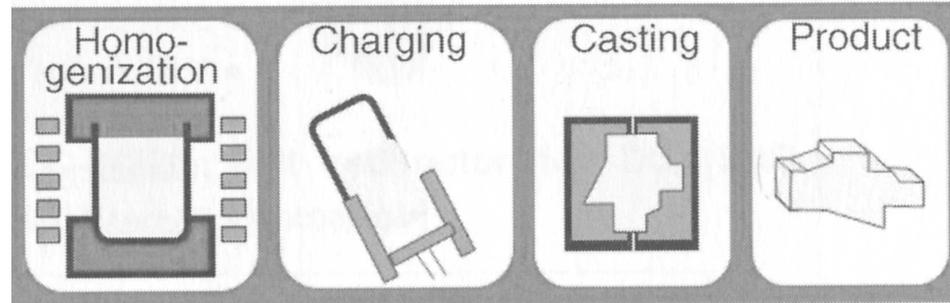
- Was ist das Ziel des Rührens der Schmelze?
- Welche Thixo-Legierungen werden so erzeugt und warum?

# Thixotropie vs. Rheo: Prozesse



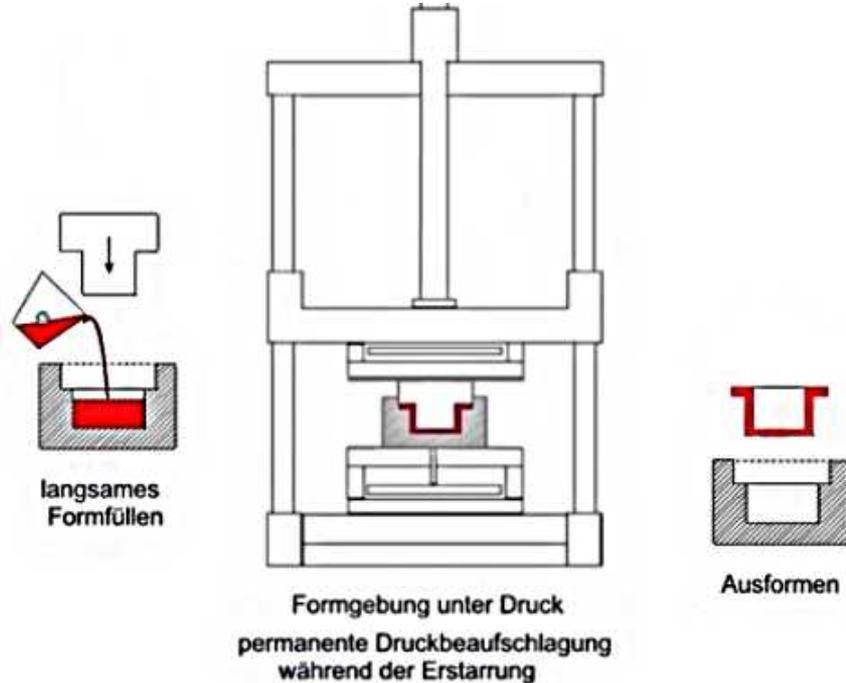
(a) von der Schmelze zum Block

(b) vom Block zum Bauteil



Der (kontinuierliche) „New Rheocasting“ (RCP) Prozess

# Anwendungsbeispiele Thixoformen



Druckgießen

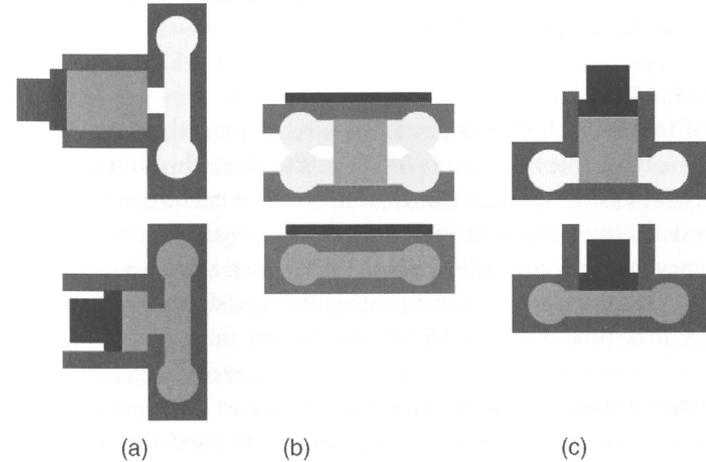
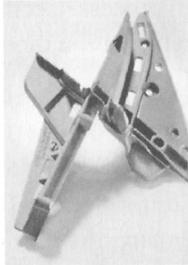


Figure 1.11 Schematic view of different thixoforming processes:  
(a) thixocasting; (b) thixoforging; (c) thixo lateral extrusion.

Thixoformen

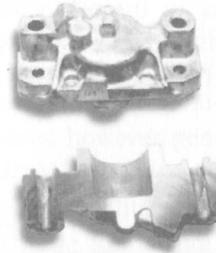
# Anwendungsbeispiele Thixoformen



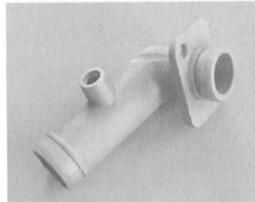
Spaceframe knot Audi A8 [SAG Thixalloy]



Doorframe part Audi A3 [Audi AG]



Brake master cylinder [EFU]



Connecting hydraulic accumulator [VW AG]



Steering arm for DC W220 [Alcan Singen GmbH]



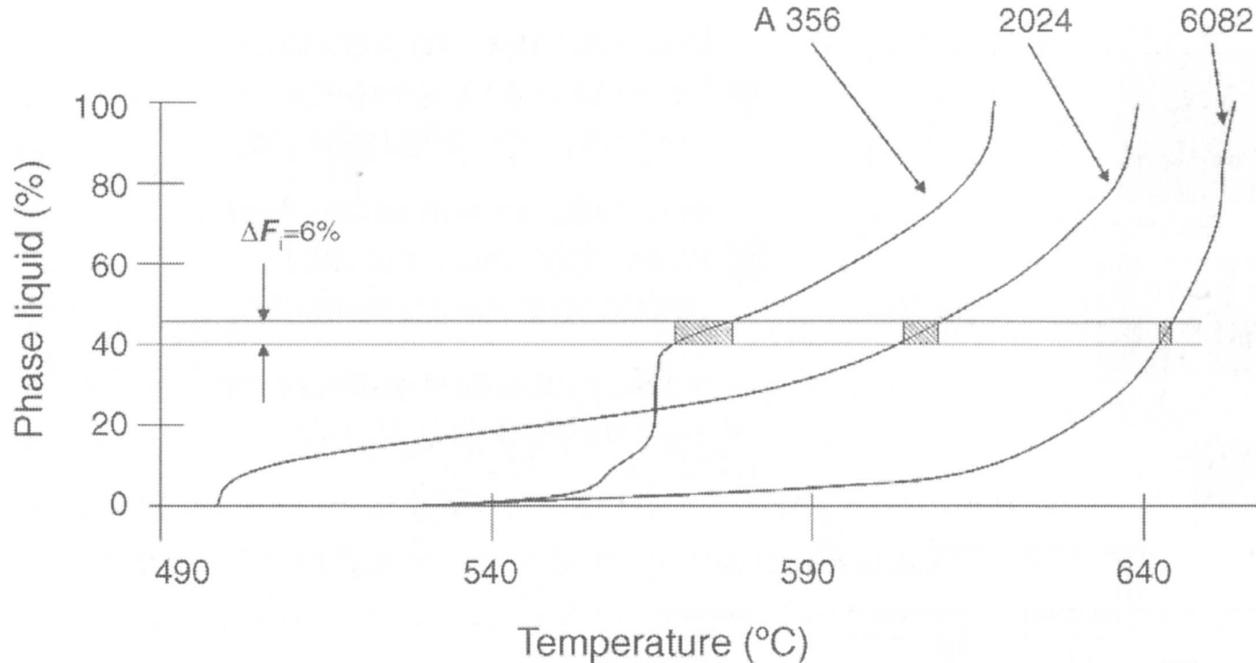
Belt redirector for DC [SAG Thixoalloy]

# Verwendung für Mg- und Al-Legierungen

	$T_s$ [°C]	$T_l$ [°C]	$\Delta T^{40-60}$ [°C]	Si	Mg	Cu	Mn	Zn	Al
AlSi7Mg (A356)	557	614	17	6,5-7,5	0,3-0,4	-	-	-	Rest
AlSi1Mg (AA6082)	557	647	7	0,7-1,3	0,6-1,2	-	0,4-1,0	-	Rest
AlSi9 (A380)	548	603	10	7,5-9,5	-	3,0-4,0	-	-	Rest
<b>AZ91</b>	470	600	22	-	Rest	-	0,15	0,4-1,0	8,3-9,7

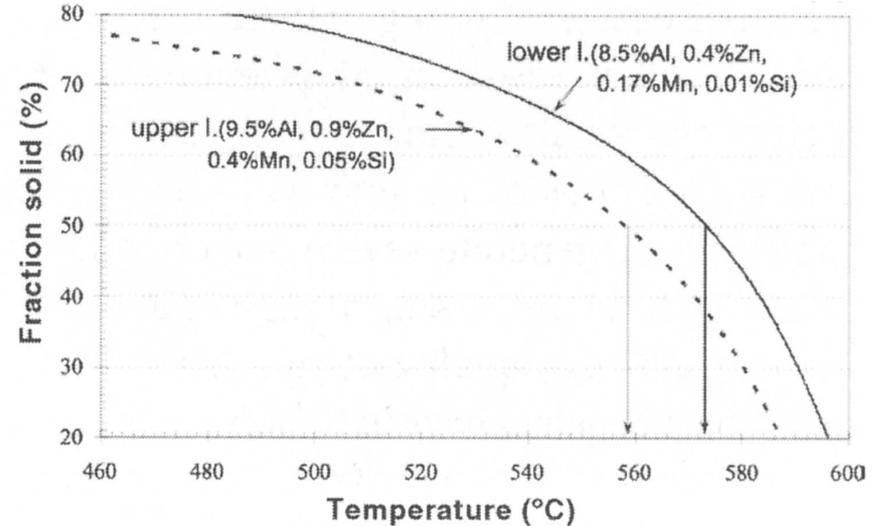
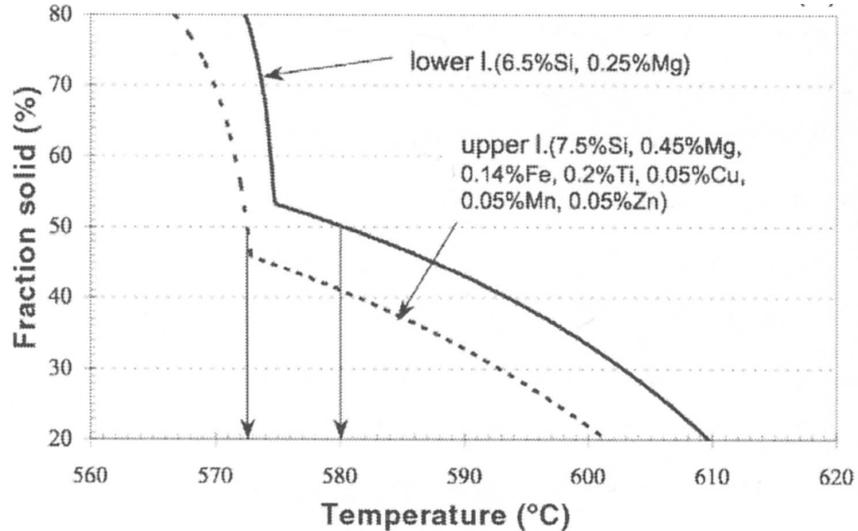
- Das Verhalten der ersten beiden Legierungen kann anhand des binären Systems Al-Si abgeschätzt werden.
- Welcher Wert wirkt sich besonders auf die Prozessstabilität aus?
- Warum sind die ersten beiden Werte für  $T_s$  gleich?

# Verwendung für Mg- und Al-Legierungen



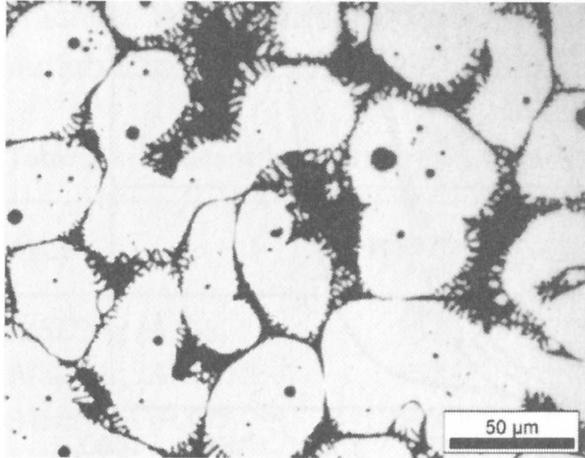
Typische Werte des Flüssigphasenanteiles: 40-60 Vol.-% für Thixocasting, 10-25 Vol.-% für Thixoforging

# Verwendung für Mg- und Al-Basis-Werkstoffe

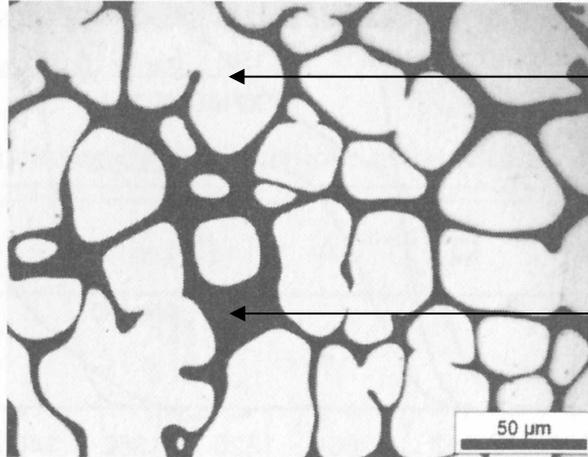


- Berechnete Flüssigphasenanteile (Vol.-%) für die obere und untere Grenze der zulässigen Legierungszusammensetzung.
- Pfeile zeigen die Verschiebung der Temperatur für einen Soll-Flüssigphasenanteil von 50 Vol.-% an.
- Was ist bei AlSi7Mg besonders kritisch?

# Verwendung für Mg- und Al-Basis-Werkstoffe



(a)



(b)

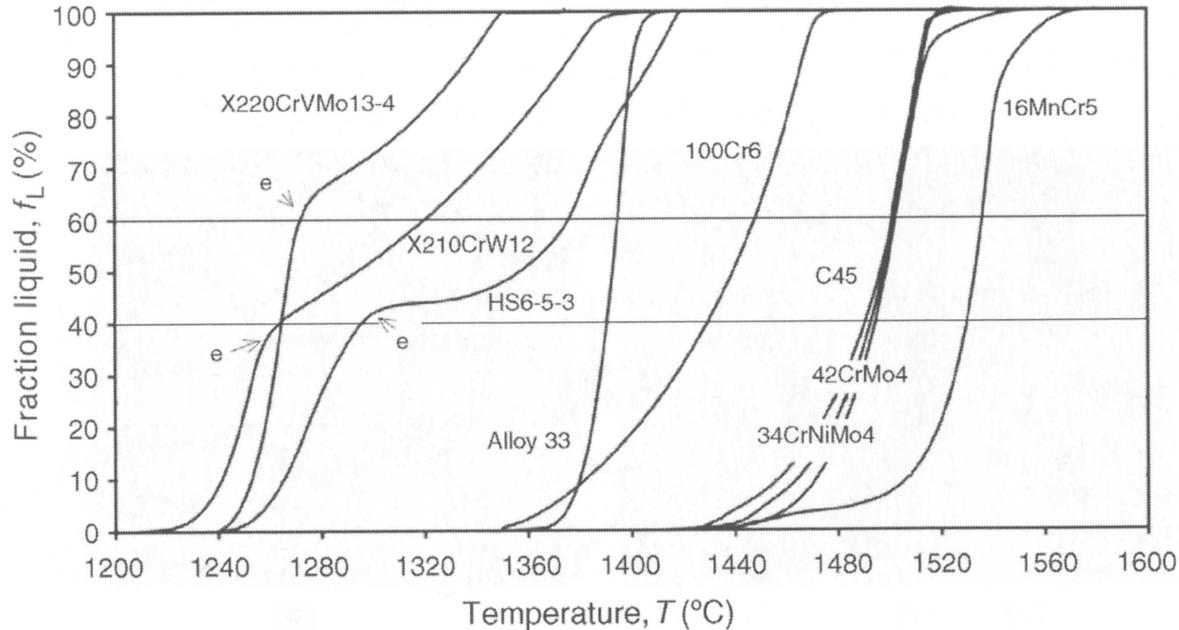
- Thixo-Vormaterial A356: (a) Thixo-Route (b) Rheo-Route
- In (a) eingeschlossene Flüssigphase, bedingt durch den Prozess
- Wichtig: Separation von Flüssigphase und Festphase bei der Erwärmung

# Verwendung für Fe-Basis-Werkstoffe

	$T_s$ [°C]	$T_L$ [°C]	$\Delta T^{40-60}$ [°C]	C	W	Mo	V	Cr
100Cr6 (1.3505)	1348	1461	19	0,93-1,05	-	<0,1	-	1,35-1,6
X210CrW12 (1.2436)	1221	1366	50	2-2,3	0,6-0,8	-	-	11-13
HS6-5-2 (1.3343)	1175	1432	35	0,86-0,94	5,9-6,7	4,7-5,2	1,7-2,1	3,8-4,5

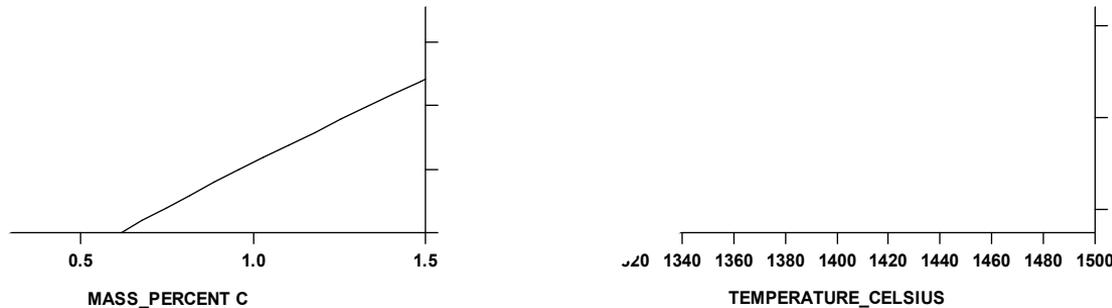
- Auch hier: Unterschiede durch Legierungsgrenzen sind zu erwarten
- Was bedeuten die Werte für  $T_s$  und  $T_L$  für den Prozess ?
- Welche Legierung erstarrt z.T. eutektisch? Art des Eutektikums ?
- Qualitativ: Eignung für Semi-Solid-Processing ?

# Verwendung für Fe-Basis-Werkstoffe



Erstarrungskurven unterschiedlichen Eisenbasis-Werkstoffe, (e) indiziert einen eutektischen Punkt. Welche Werkstoffe sind geeignet?

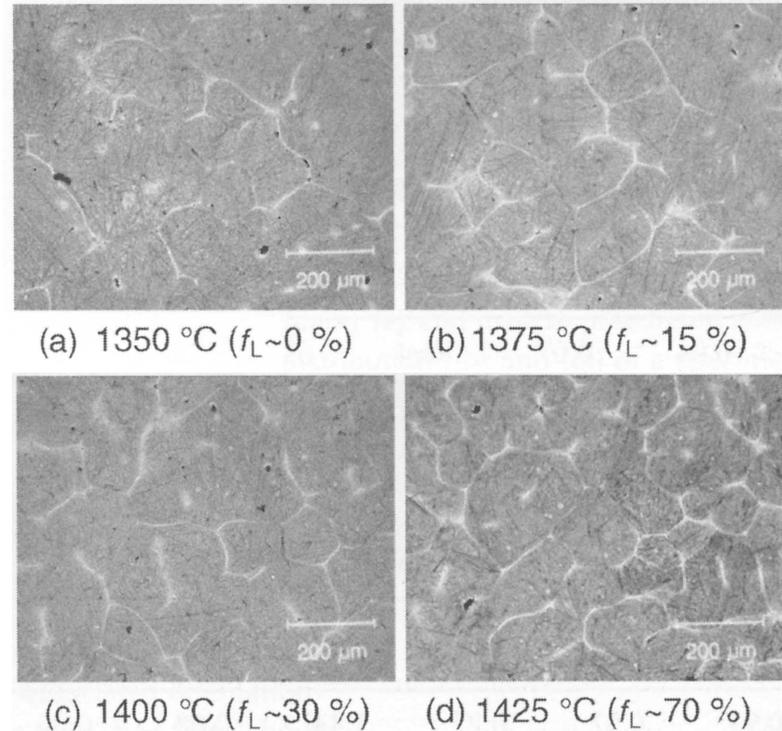
# Verwendung für Fe-Basis-Werkstoffe: 100Cr6



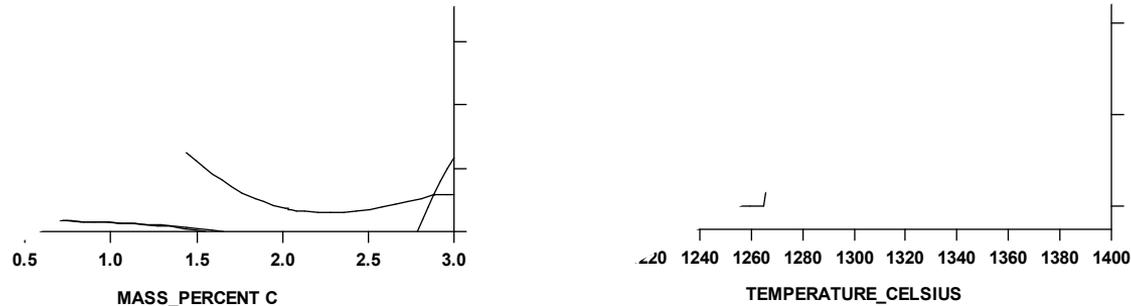
- Welche Phasenfelder liegen vor ?
- Wie erfolgt die Erstarrung ?
- Was sind die berechneten Werte von  $T_s$  und  $T_i$ ?

# Verwendung für Fe-Basis-Werkstoffe: 100Cr6

- Gefüge von 100Cr6 nach dem Abschrecken in Wasser aus dem teilflüssigen Zustand
- Heller Bestandteil im Wesentlichen RA
- Keine Quantifizierung  $f_L$  mit Metallographie möglich => DTA

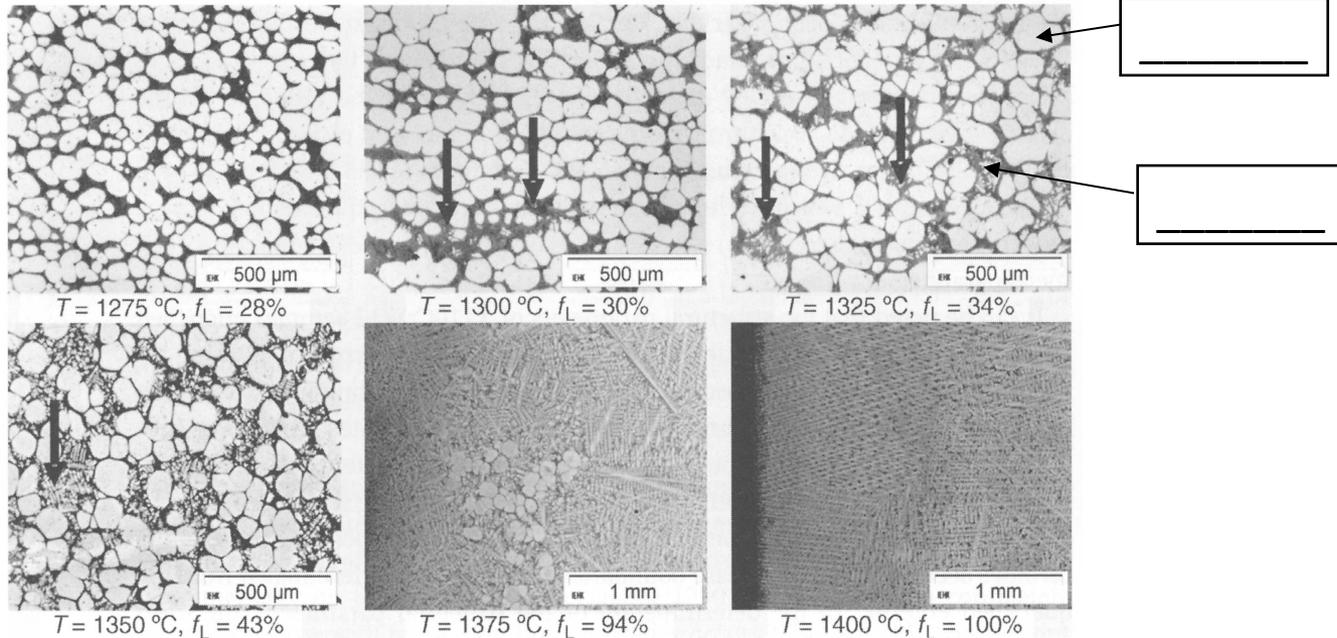


# Verwendung für Fe-Basis-Werkstoffe: X210CrW12



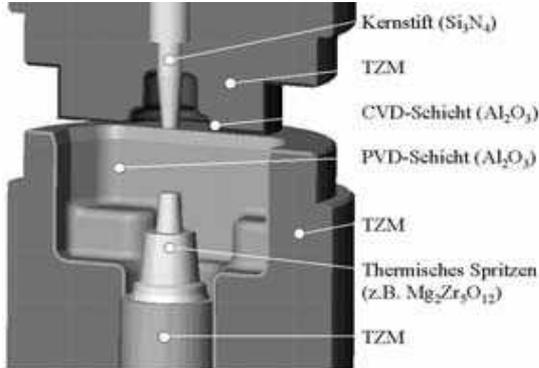
- Welche Phasenfelder liegen vor (bei  $C=C_{\text{nom}}$  und  $T>1100^{\circ}\text{C}$ )?
- Wie erfolgt die Erstarrung ?
- Was sind die berechneten Werte von  $T_s$  und  $T_l$ ?

# Verwendung für Fe-Basis-Werkstoffe



Gefüge des Kaltarbeitsstahles X210CrW12 nach Abschrecken von unterschiedlichen Temperaturen, f<sub>L</sub>=Flüssigphasenanteil nach DTA

# Werkzeugschäden durch Thixoschmieden von 100Cr6



Thixoschmieden von 100Cr6 bei 1420°C



Korrosion im Gesenk



Gratbildung



Verschleiß an Stempel  
nach 8 Schmiedungen

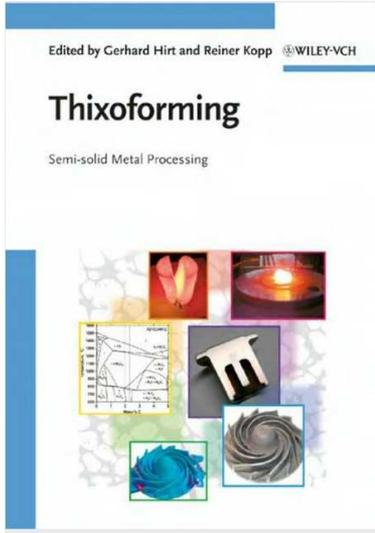
# Zusammenfassung

- „Thixotropie“ ist definiert als zeitliche Änderung der Viskosität
- Metallische Werkstoffe in einem teilflüssigen Zustand können thixotrope Eigenschaft haben
- „semi solid processing“ ist der englische Fachbegriff für diese Verfahren
- Entscheidender Einfluss durch Mikrostruktur: Verteilung Fest-/Flüssigphase
- „semi solid processing“ ist nur geeignet für Legierungen, nicht für reine Metalle
- Mehrere „klassische“ Fertigungsverfahren lassen sich thixotrop durchführen
- Prozessstabilität u.a. abhängig von dem Fest-Flüssigphasenanteil als  $f(T)$
- Thixocasting ist etabliert und gut geeignet für Al- und Mg-Legierungen
- I.d.R. zu hohe Prozesstemperaturen verhindern Nutzung für Fe-Legierungen
- Einfluss der Legierungszusammensetzung (Variation innerhalb der durch die Norm gegebenen Spannen), v.a. in Bezug auf Eutektika, muss beachtet werden
- Verfahren mit ähnlichen Grundlagen: SLPS (*super solidus liquid phase sintering*, siehe Anhang)

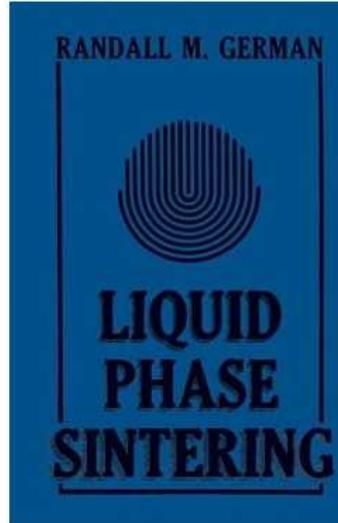
# Überprüfungsfragen

1. Benennen Sie Vor- und Nachteile des (Gesenk-) Schmiedens, des Thixoformings und des (Druck-) Gießens.
2. Was bedeutet „Thixotropie“? Wie muss das Gefüge einer metallischen Werkstoffe aussehen, damit sich ein Zustand mit thixotropem Verhalten einstellen lässt?
3. Ist es möglich, reines Aluminium mittels Thixocasting zu verarbeiten? Begründen Sie Ihre Antwort!
4. Was unterscheidet „Thixocasting“ und „New Rheocasting“?
5. Skizzieren Sie den Verlauf von  $V_{liq}$  als  $f(T)$  von RT bis  $700^{\circ}\text{C}$  für eine Al-Si-Legierung mit eutektischer Zusammensetzung (vgl. Folie 4).
6. Was verstehen Sie unter der Größe  $\Delta T_{40-60}$ ?
7. Welche Werkstoffe werden momentan im technischen Maßstab thixotrop verarbeitet?
8. Auf welche Weise können sich Eutektika negativ auswirken? Erläutern Sie!
9. Welche Stähle eignen sich für die thixotrope Formgebung und warum? Was schränkt die Nutzung dieser Verfahren für Stähle dennoch stark ein?
10. Was verstehen Sie unter SLPS? Beschreiben Sie den Prozess.

# Literatur



G. Hirt, R. Kopp (eds.):  
Thixoforming  
Wiley-VCH, 2009



R.M. German,  
Liquid Phase Sintering, Kluwer  
Academic Publishers Group,  
2002



Unconventional structure of X210Cr12 steel obtained by thixoforming  
Jirková Hana<sup>a</sup>, Adnan David, Mašek Bohušlav

**ARTICLE INFO**  
 Received 1 June 2009  
 Received in revised form 15 February 2010  
 Accepted 21 February 2010  
 Available online 1 March 2010

**Keywords:**  
 Thixoforming  
 X210Cr12  
 Liquid phase sintering  
 Microstructure analysis

**ABSTRACT**  
 The present investigation describes the formation of unconventional structures with specific mechanical properties even when using conventional materials. One of many possibilities is the treatment of metal alloys in the semi-solid state. In this experiment the technology was developed by processing X210Cr12 steel with rapid solidification of the liquid phase. The steel is isothermally annealed and after conventional heat treatment it is usually used in the form of a casted part. The results of the X-ray diffraction analysis, metallographic analysis, and mechanical testing are presented. The steel after thixoforming was subjected to the heat treatment with the aim of obtaining a stable structure. The aim of this experiment was to describe the structure and confirm its stability under various conditions of the subsequent heat treatment, and also determine the effect of the heat treatment on the mechanical properties. The results of the X-ray diffraction analysis, metallographic analysis, and mechanical testing are presented. The hardness of individual components varies from 300 to 400 HV0.05 for different heat treatments and ages. © 2010 Elsevier B.V. All rights reserved.

**1. Introduction**  
 One new processing procedure is rapid solidification from the semi-solid state after or during the course of deformation. This procedure enables the creation of new types of structures of variously used industrial materials, thus allowing some interesting combinations of their mechanical properties. One of the most important results of special distributions of chemical elements in both the liquid and solid phases for metal alloys is highly controlled by alloying elements, which – together with the high content of carbon – plays a significant role in the subsequent phase transformations. The solid phase mostly occurs in the form of globular particles with a lower content of alloying elements [1]. In order to master the process, it is important to exactly understand the physical processes that result in the structure and composition of individual components and their properties.

**1.1. Thixoforming**  
 One of the forming methods which makes use of heating to a temperature between the solidus and liquidus temperature is thixoforming [2], where the advantages of both casting and forming are combined [3]. This technology enables complex, shaped components to be produced [4–6]. The basis of this is the forming of a semi-product which becomes partly liquid and partly solid after heating to the forming temperature. The semi-product heating temperatures are higher than for common processing techniques.

In order to achieve a high quality final semi-product, the semi-solid state must be formed by controlled cooling of the liquid phase with rapid solidification [7].

**1.2. Experimental method**  
 An industrially evaluated steel X210Cr12 (see used for the experiment; it is a high-carbon chromium-bearing steel suitable for hot forming such as hot-chamber die casting) with high compressive strength and high deformation during hot-chamber die casting. The steel was prepared by conventional casting and secondary distribution of chemical elements in the form of steel [8]. The thermodynamic parameters of the steel are given in Table 1. The thixoforming process was carried out in a furnace with a temperature of 1200 °C. The thixoforming process was carried out in a furnace with a temperature of 1200 °C. The thixoforming process was carried out in a furnace with a temperature of 1200 °C. The thixoforming process was carried out in a furnace with a temperature of 1200 °C.

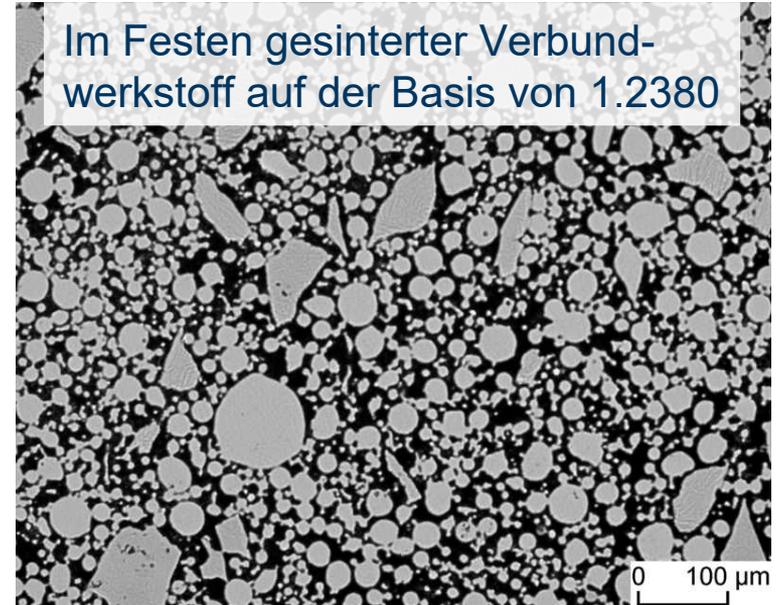
**Table 1**  
 Chemical composition of the experimental material.

C	Cr	Mn	Si	Ni	P	S
1.8	18	0.2	0.8	0.02	0.01	0.005

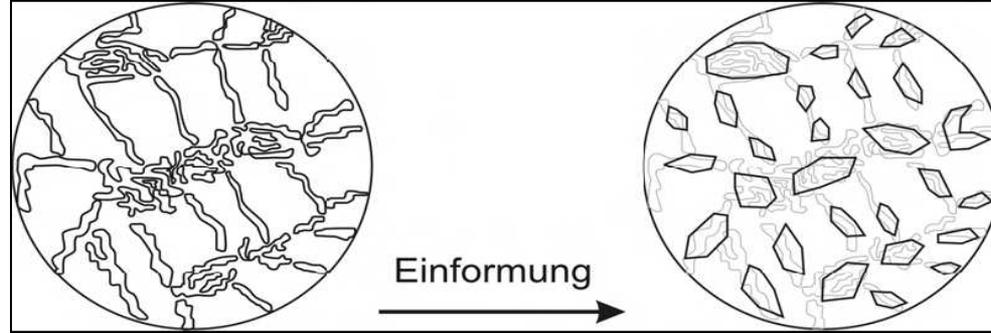
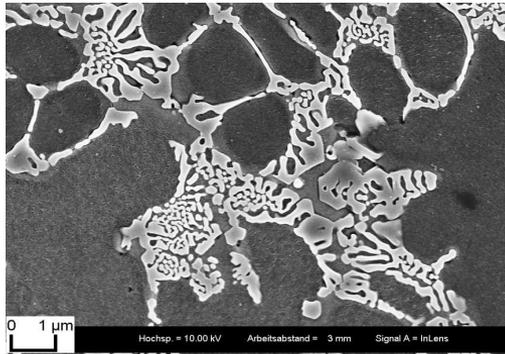
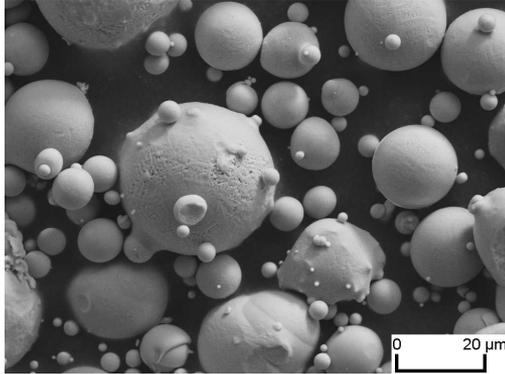
Corresponding author. Tel.: +420 571 03 8020; fax: +420 571 03 8022.  
 E-mail address: g.hirt@wzlab.vch.de (G. Hirt).  
 0925-2362/\$ – see front matter © 2010 Elsevier B.V. All rights reserved.  
 doi:10.1016/j.jallcom.2010.02.127

# Anhang: Sintern im Phasengebiet Fest / Flüssig

- Kaltarbeitsstahl X220CrVMo13-4 (1.2380)
- z.B. für verschleißbeständige Bauteile und Verbundwerkstoffe
- Herstellung durch HIP teuer: Kapselung und HIP-Zyklus
- Sintern im Festen nicht möglich: geringe Sinteraktivität (Bild!)
- Lösung: Sintern mit Flüssigphase  
**Super-Solidus Liquid Phase Sintering (SLPS)**
- Ähnliche Grundlagen wie bei der thixotropen Formgebung



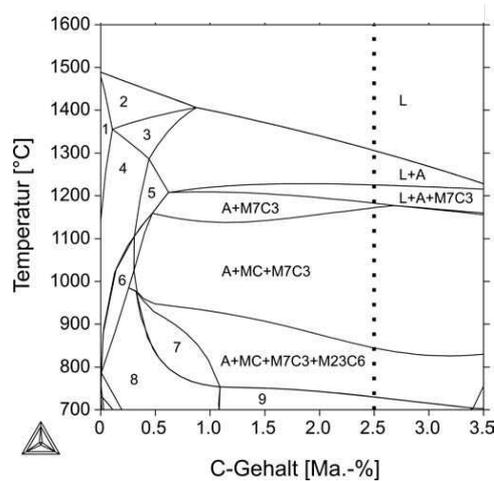
# Anhang: Sintern im Phasengebiet Fest / Flüssig



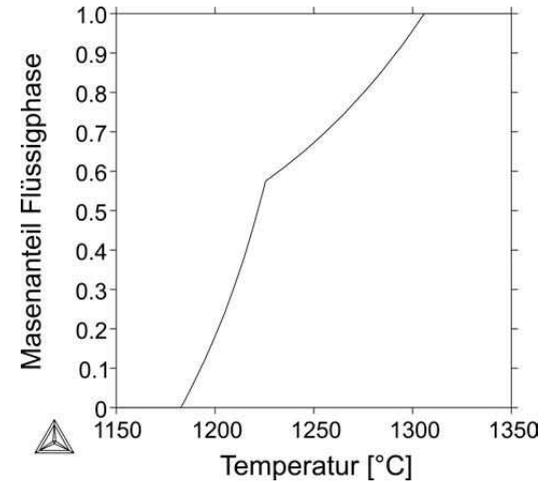
- Einförmung der eutektischen Karbide (v.a.  $M_7C_3$ ) während der Erwärmung auf Sintertemperatur
- Das Aufschmelzen erfolgt entlang der eutektischen Bereiche der Pulverstruktur wenn  $T > T_{sol}$
- Eine Separation in kleine Partikel findet statt, die in Flüssigphasen eingebettet sind
- Rasche Verdichtung innerhalb von Sekunden!

# Anhang: Sintern im Phasengebiet Fest / Flüssig

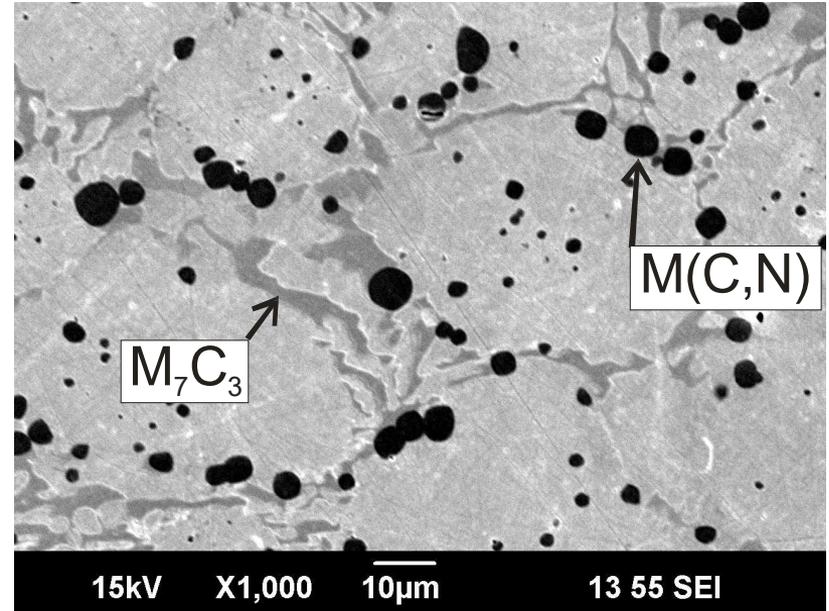
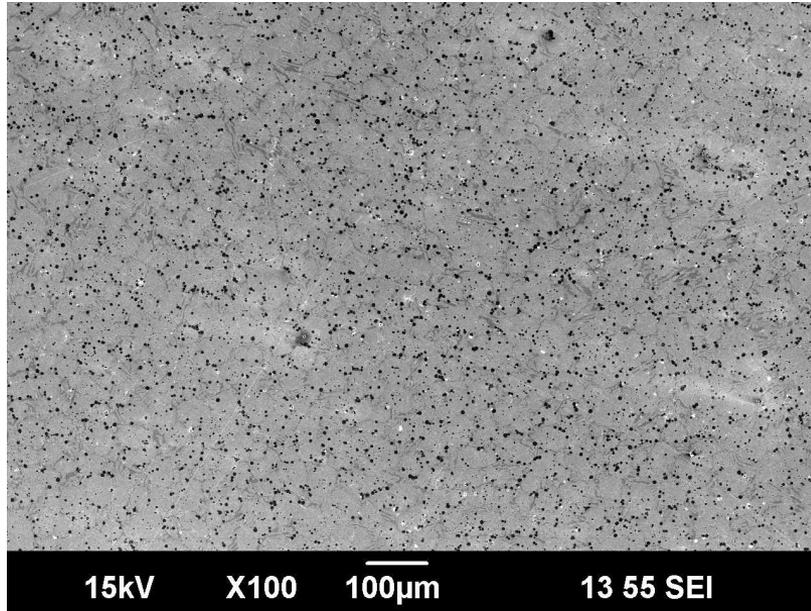
	$T_s$ [°C]	$T_l$ [°C]	$\Delta T^{40-60}$ [°C]	C	Mo	V	Cr
X220CrVMo13-4 (1.2380)	1223 (ber.)	1353 (ber.)	46 (ber.)	2,2	1,1	4,0	12,5



Wäre dieser Stahl geeignet für Thixocasting ?



# Anhang: Sintern im Phasengebiet Fest / Flüssig



Gefüge des Kaltarbeitsstahles 1.2380 nach Sintern in stickstoffhaltiger Atmosphäre bei  $T=1230^{\circ}\text{C}$  für 30min

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit und Ihre Mitarbeit !

Prof. Dr.-Ing. Sebastian Weber  
Fakultät für Maschinenbau  
Lehrstuhl Werkstofftechnik  
Universitätsstr. 150, IC 03-319  
D-44801 Bochum