

**RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM**

# **ADVANCED MATERIALS PROCESSING AND MICROFABRICATION**

Urformen im Zustand Fest-Flüssig (Thixotrope Formgebung)

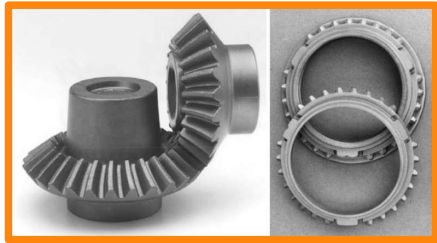
# Struktur

1. Frage- bzw. Problemstellung anhand eines Vergleichs:  
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

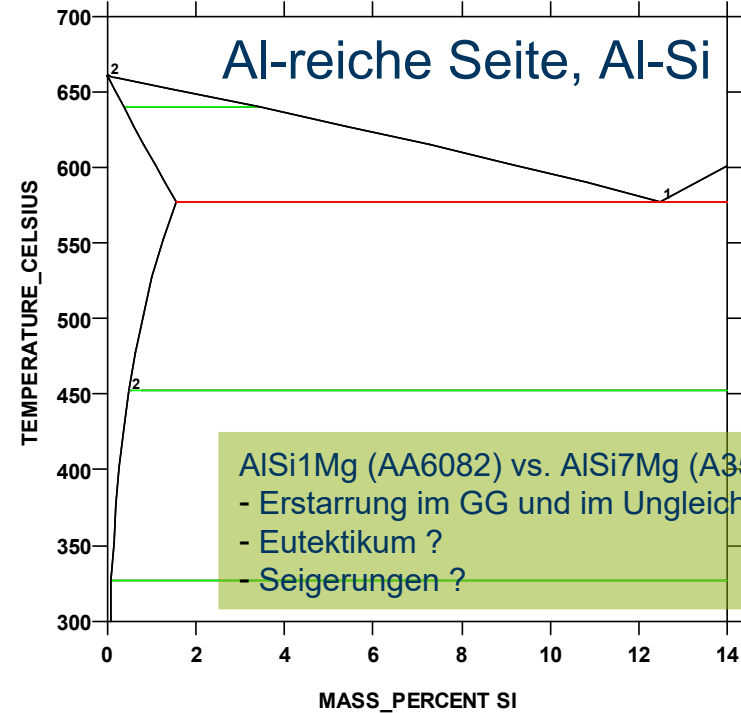
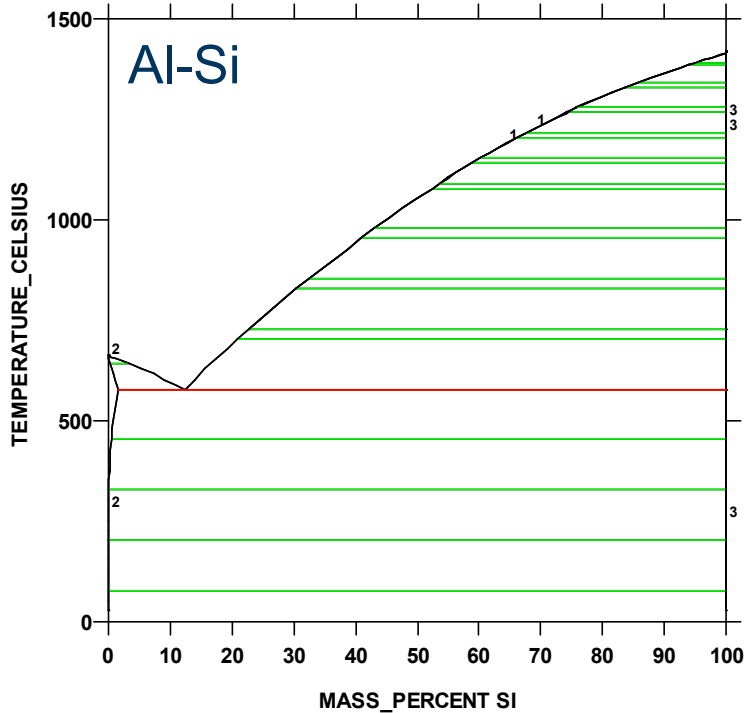
# Frage-/ Problemstellung

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



# Was bedeutet „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 Lehm Böden thixotrop verhalten (siehe Foto)
- Unterschied zu „pseudo-plastisch“: Änderung der Viskosität als Funktion der Scherrate
- In technischen Prozessen kann oftmals nicht exakt zwischen „thixotrop“ und „pseudo-plastisch“ unterschieden werden, da sowohl eine Scherraten- als auch eine Zeitabhängigkeit auftreten.



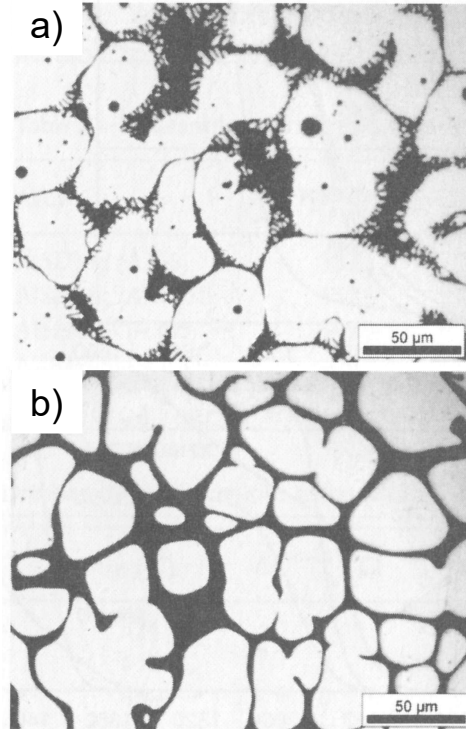
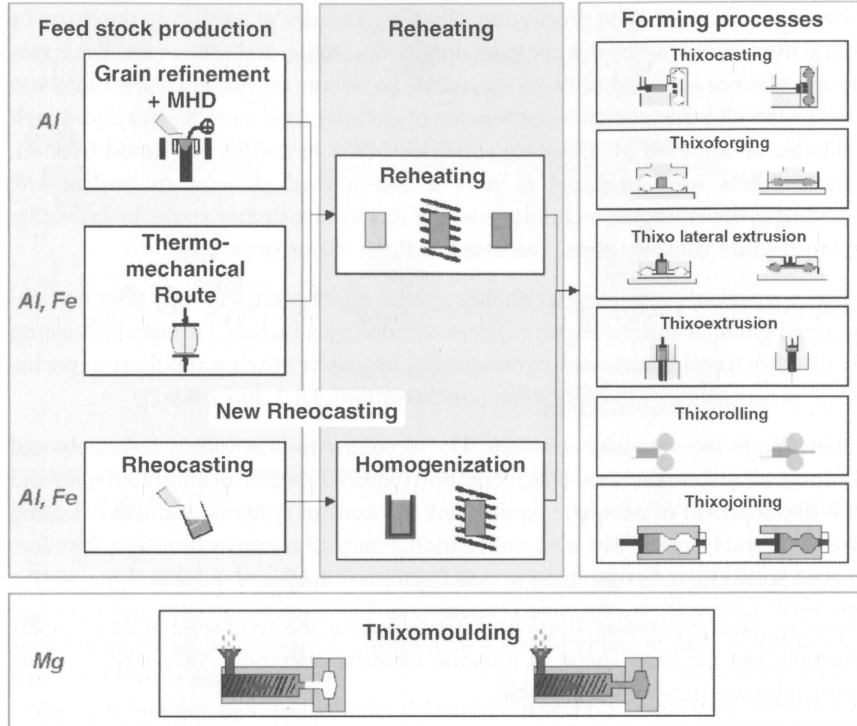
Blue Lias cliffs at Lyme Regis, Dorset, UK (Wikipedia)

# Thixotropie metallischer Legierungen

- Legierungen können in einem 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
- Konkurrenz durch weiterentwickelte Gießverfahren im vollständig flüssigen Zustand, v.a. aufgrund:
  - Kostendruck
  - Prozessstabilität
  - Einschränkung der Materialauswahl
  - Frage und Lernziel für die Vorlesung: **Warum bestehen diese Einschränkungen?**

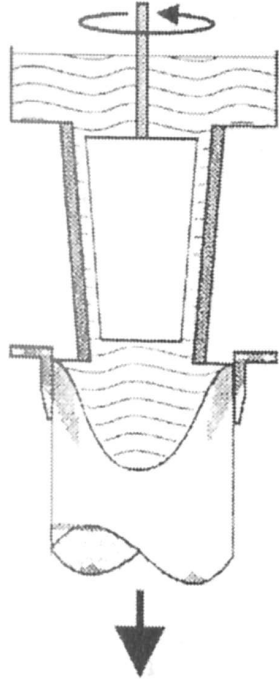
Flemings et al., Materials Science and Engineering 25 (1976), 103-117

# Thixotropie vs. Rheo: Prozesse

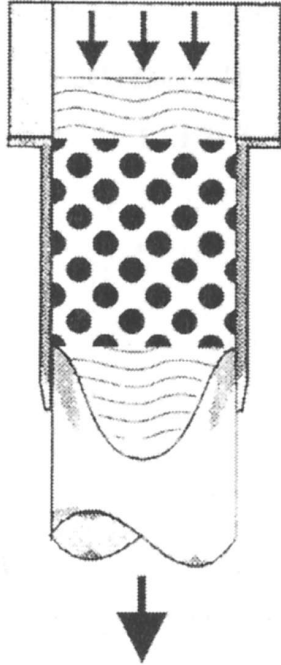


Gefüge einer Al-Si-Mg Legierung nach dem Abschrecken aus einem fest-flüssigen Zustand:  
a) „Thixo-Route“  
b) „Rheo-Route“

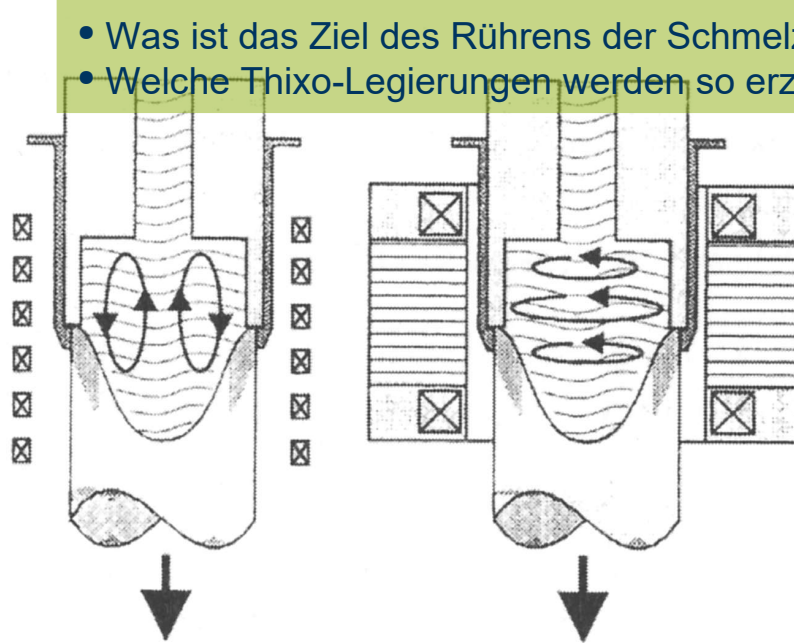
# Thixotropie vs. New Rheocasting: Prozesse



mechanisch



passiv mit Filter

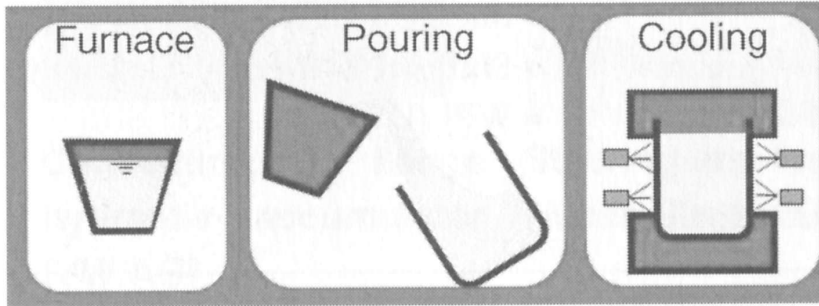


elektromagnetisch (MHD)

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

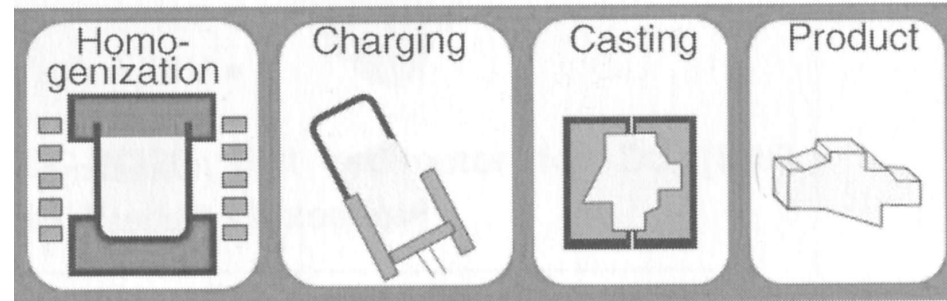


# Thixotropie vs. New Rheocasting: Prozesse



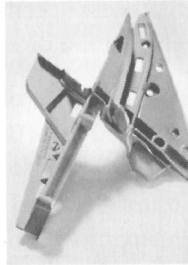
(a) von der Schmelze  
zum Block

(b) vom Block  
zum Bauteil



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

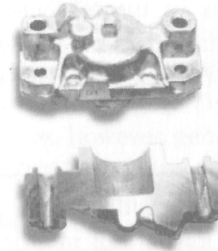
# Anwendungsbeispiele Thixoformen



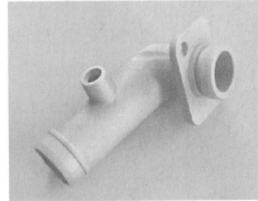
Spaceframe knot Audi A8 [SAG Thixalloy]



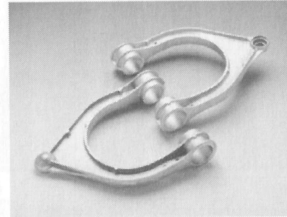
Doorframe part Audi A3 [Audi AG]



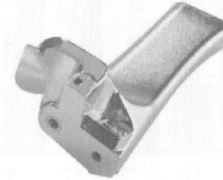
Brake master cylinder [EFU]



Connecting flange hydraulic accumulator [VW AG]



Steering arm for DC W220 [Alcan Singen GmbH]



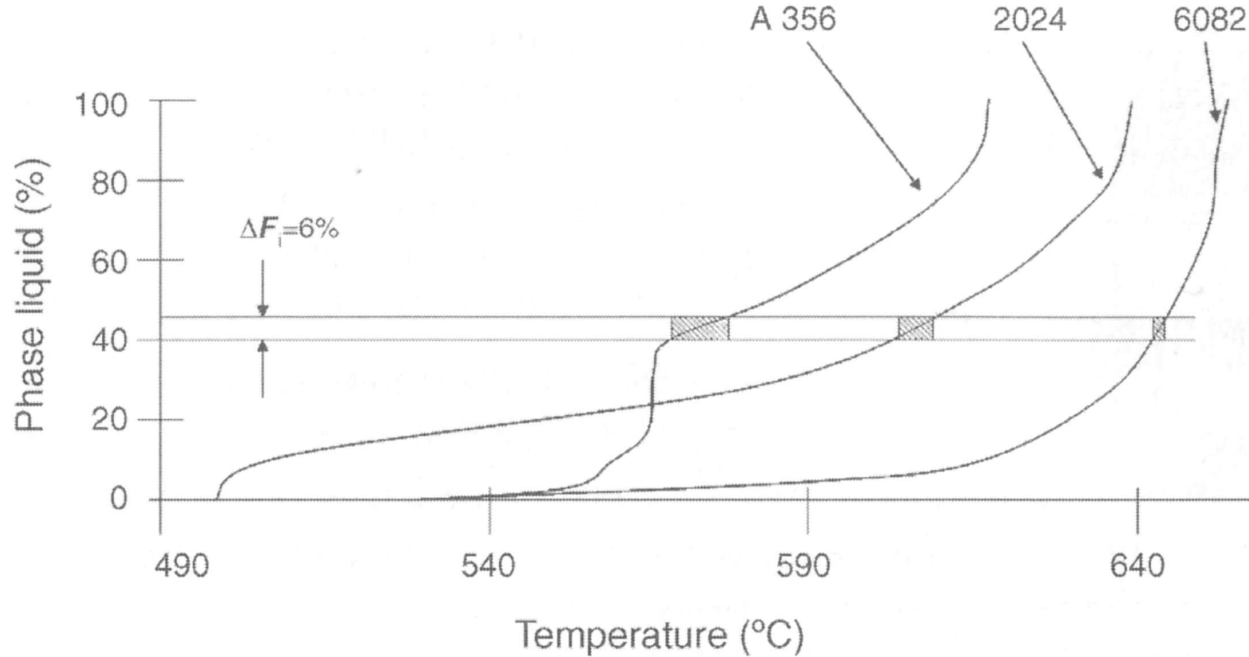
Belt redirector for DC [SAG Thixoalloy]

# Verwendung für Mg- und Al-Legierungen

	$T_s [^{\circ}\text{C}]$	$T_l [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta T^{40-60} [^{\circ}\text{C}]$	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
AZ91	470	600	22	-	Rest	-	0,15	0,4-1,0	8,3-9,7

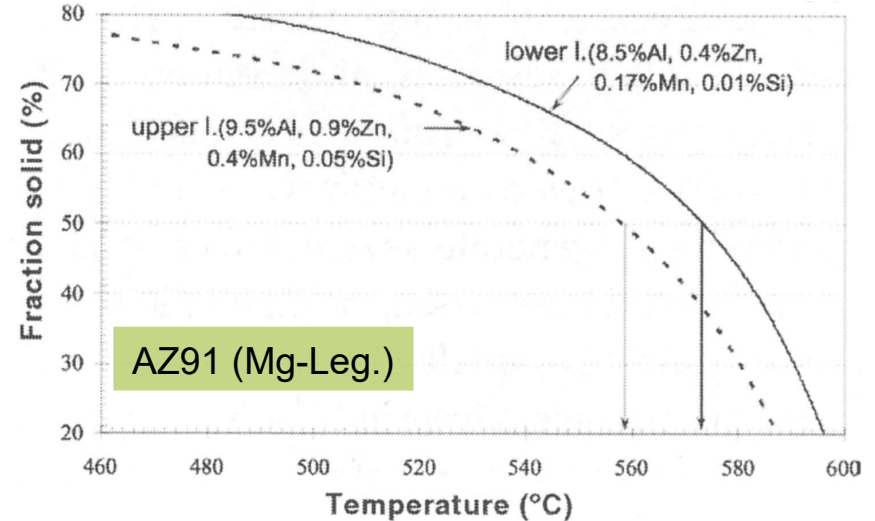
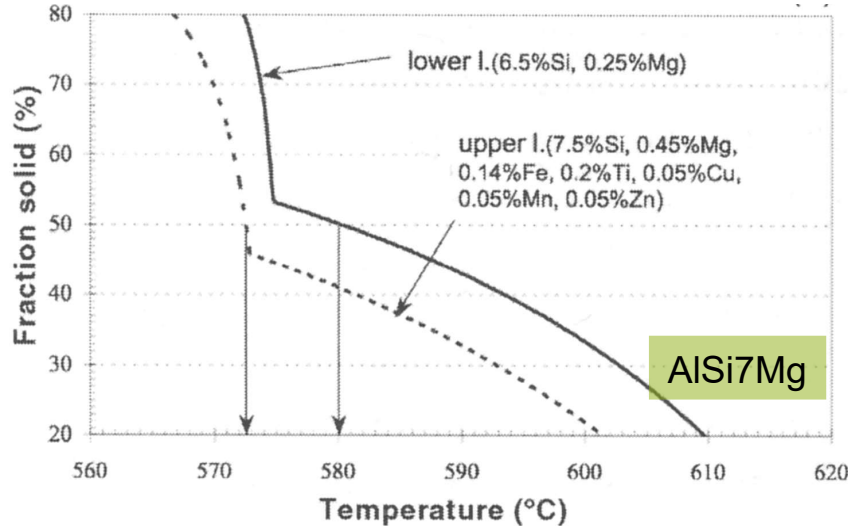
- Das Verhalten der ersten beiden Legierungen, AlSi7Mg und AlSi1Mg, kann anhand des binären Systems Al-Si abgeschätzt werden.
- Welcher Wert wirkt sich besonders auf die Prozessstabilität aus?
- Warum sind die ersten beiden Werte für  $T_s$  gleich?

# Verwendung für Mg- und Al-Legierungen



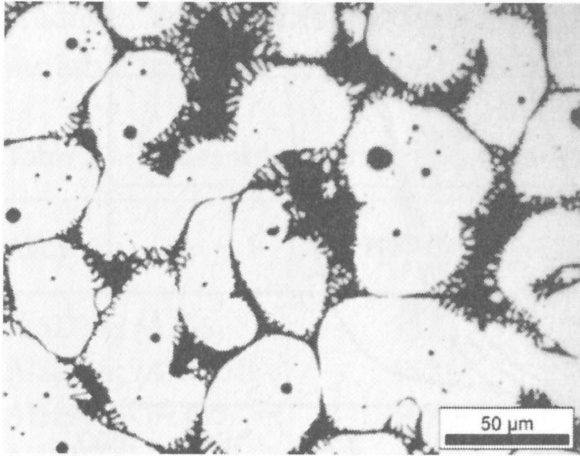
Typische Werte des Flüssigphasenanteiles: 40-60 Vol.-% für Thixocasting, 10-25 Vol.-% für Thixoforging

# Verwendung für Mg- und Al-Basis-Werkstoffe

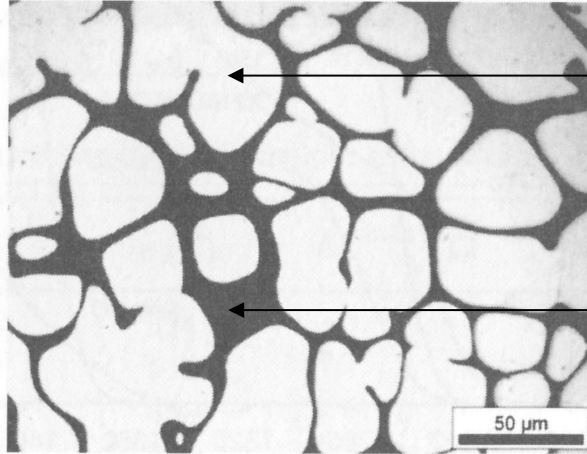


- Berechnete Festphasenanteile („fraction solid“, Vol.-%) für die obere und untere Grenze der zulässigen Legierungszusammensetzung.
- Pfeile zeigen die Verschiebung der Temperatur für einen Soll-Festphasenanteil von 50 Vol.-% an.
- Was ist im Falle der Legierung AlSi7Mg besonders kritisch?

# Verwendung für Mg- und Al-Basis-Werkstoffe



(a)



(b)

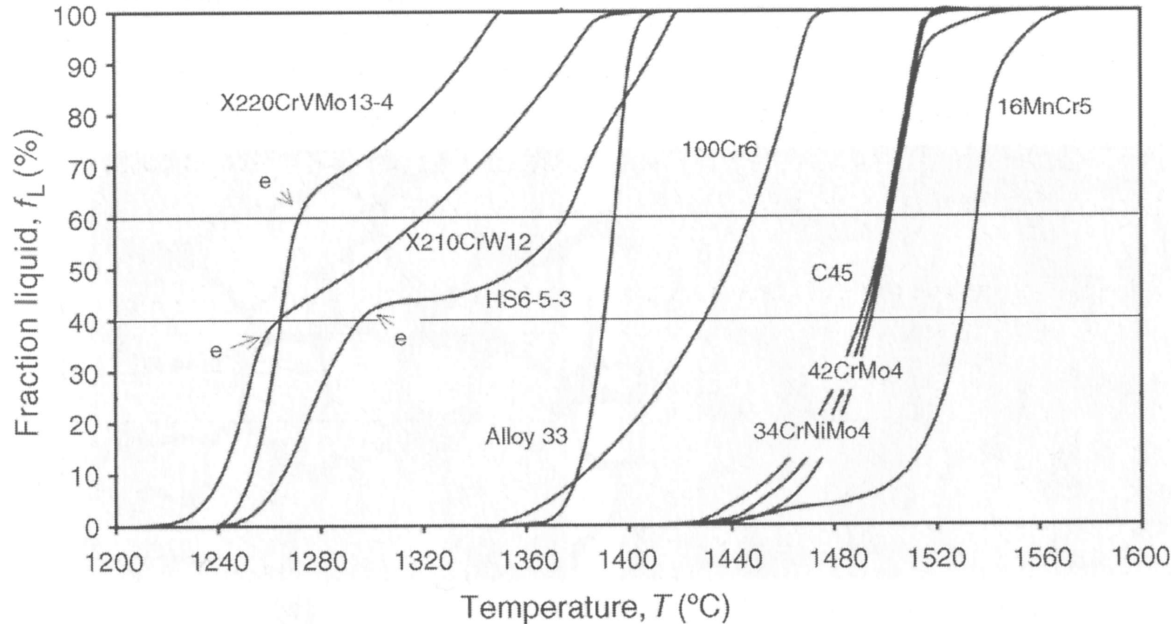
- Thixo-Vormaterial A356: (a) Thixo-Route (b) Rheo-Route
- In (a) eingeschlossene Flüssigphase, bedingt durch den Prozess
- Wichtig: Separation von Flüssigphase und Festphase bei der Erwärmung

# Verwendung für Fe-Basis-Werkstoffe

	$T_s [^{\circ}\text{C}]$	$T_L [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta T^{40-60} [^{\circ}\text{C}]$	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 ?

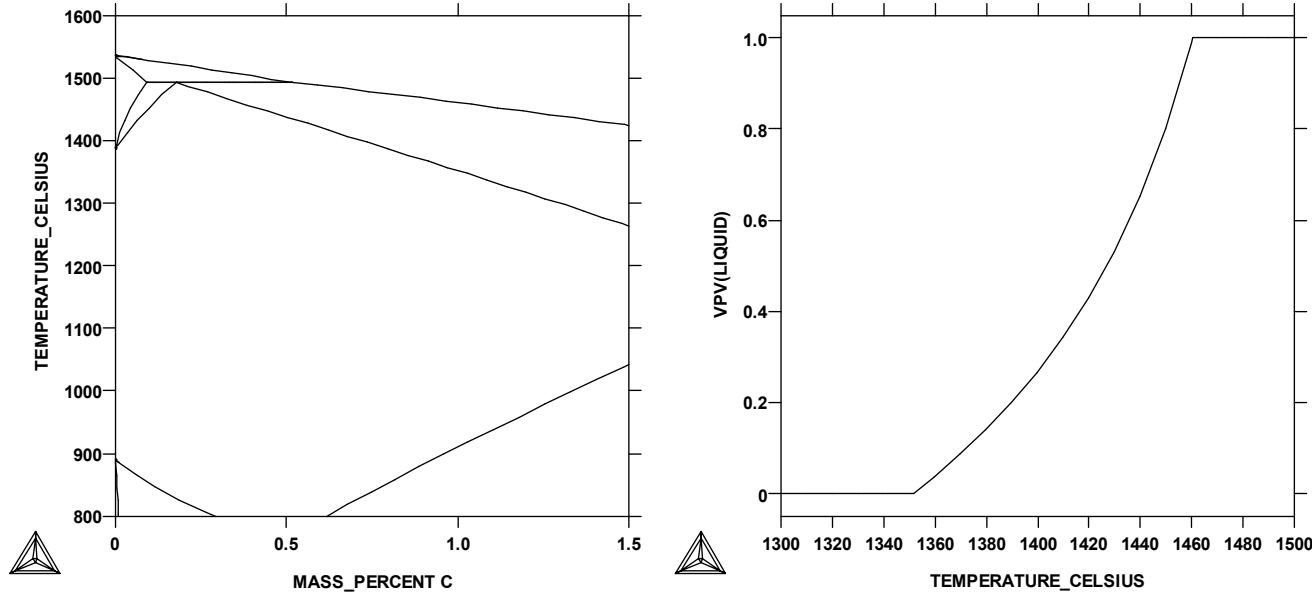
# Verwendung für Fe-Basis-Werkstoffe



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



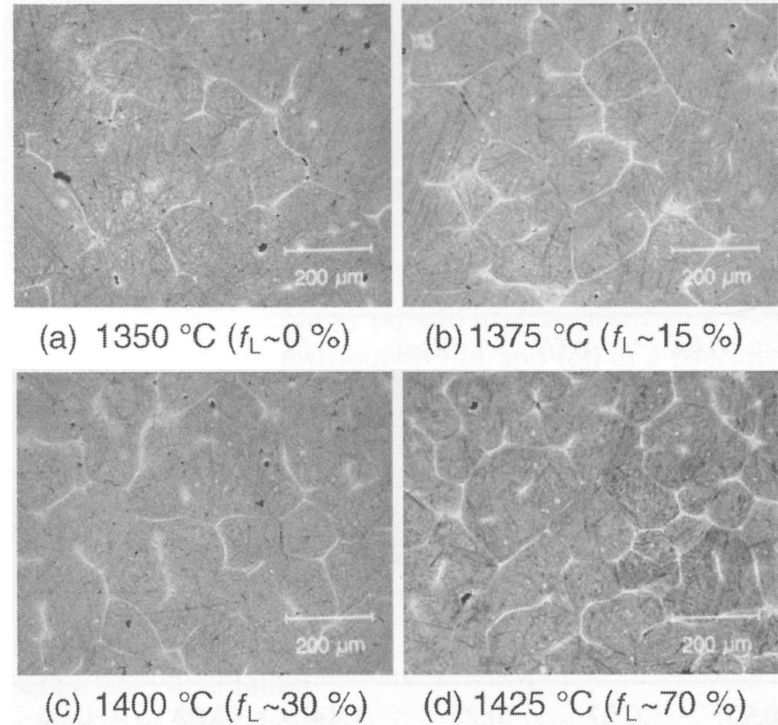
# Verwendung für Fe-Basis-Werkstoffe: 100Cr6



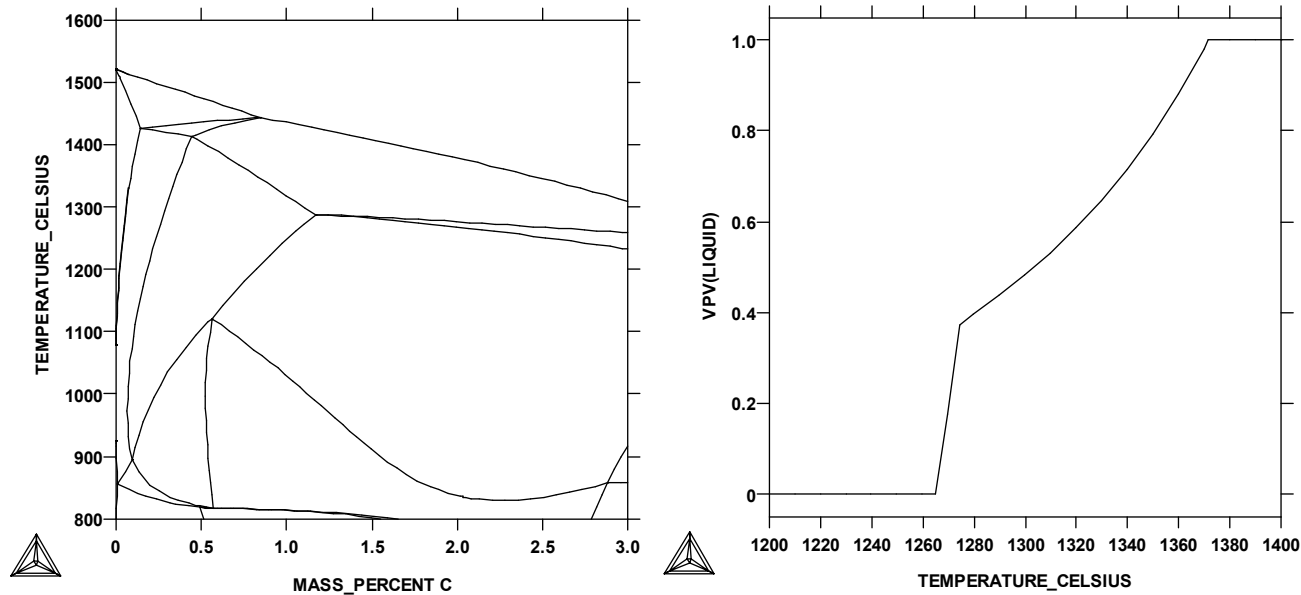
- Welche Phasenfelder liegen vor ?
- Wie erfolgt die Erstarrung ?
- Was sind die berechneten Werte von  $T_s$  und  $T_l$ ?

# 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

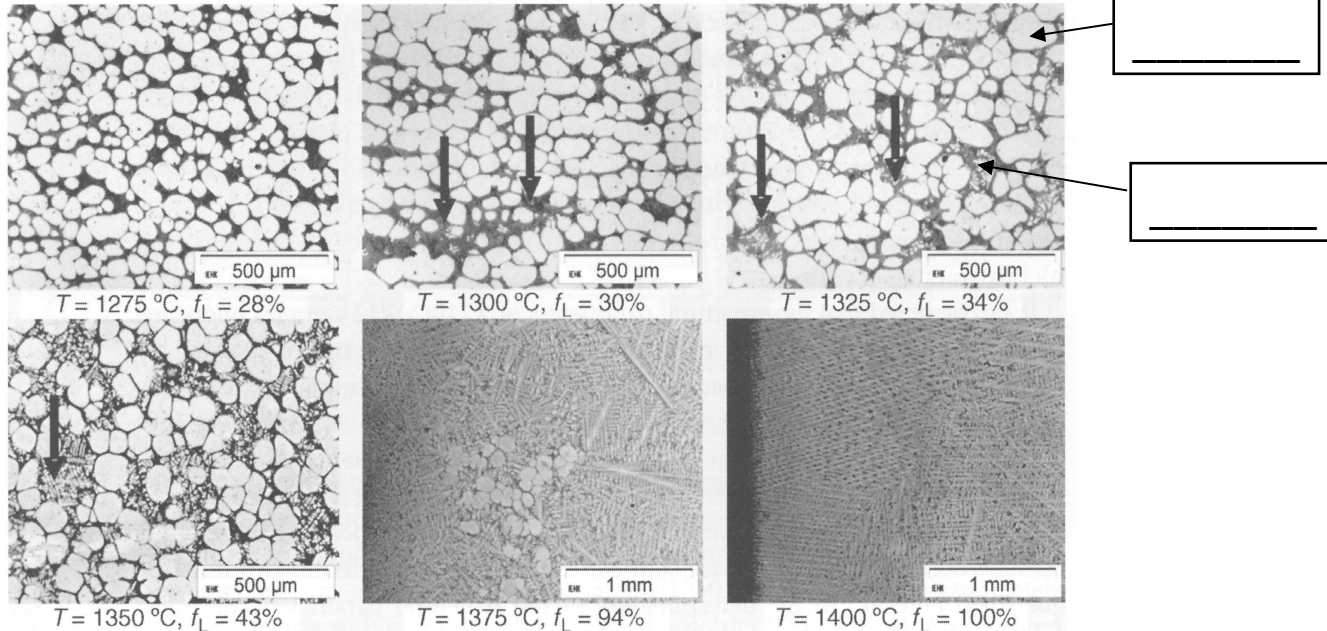


# Verwendung für Fe-Basis-Werkstoffe: X210CrW12



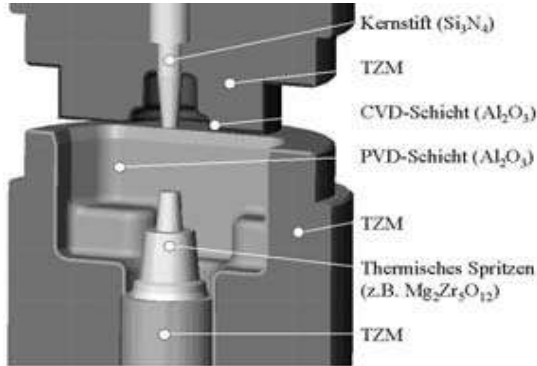
- Welche Phasenfelder liegen vor (bei  $C=C_{\text{nom}}$  und  $T > 1100^\circ\text{C}$ )?
- Wie erfolgt die Erstarrung ?
- Was sind die berechneten Werte von  $T_s$  und  $T_l$ ?

# Verwendung für Fe-Basis-Werkstoffe



Gefüge des Kaltarbeitsstahles X210CrW12 nach Abschrecken von unterschiedlichen Temperaturen,  $f_L$ =Flüssigphasenanteil nach DTA

# Werkzeugschäden durch Thixoschmieden von 100Cr6



Thixoschmieden von 100Cr6 bei 1420°C



Korrosion im Gesenk



Gratbildung



Verschleiß an Stempel  
nach 8 Schmiedungen

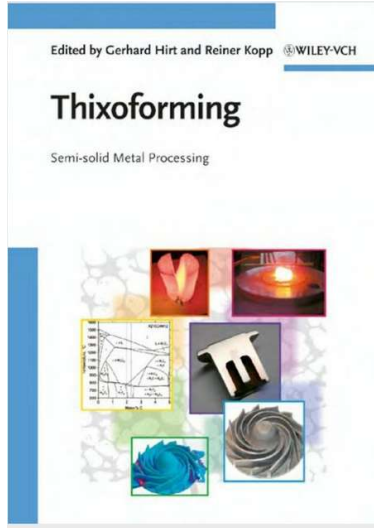
# Zusammenfassung

- „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 bei Prozesstemperatur.
- „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 und andere hochschmelzende metallische Systeme.
- 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)

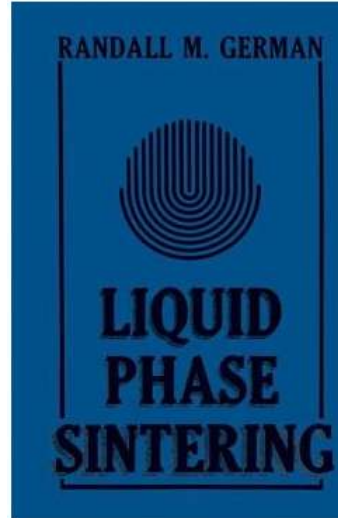
# Überprüfungsfragen

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°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  
Jirónka Hana\*, Adam David, Mašek Bohuslav

**ARTICLE INFO**  
Received 1 June 2009  
Received in revised form 10 February 2010  
Accepted 23 February 2010  
Available online 1 March 2010

**Keywords:**  
Thixoforming  
Semi-solid state  
Phase sintering  
Microstructural analysis

**ABSTRACT**  
Thixoforming technological processes allow 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 our experiment, thixoforming technology was employed by processing X210Cr12 steel with rapid solidification of the liquid phase. The steel is isothermally in its liquid state and, after conventional heat treatment, it is usually used in the state of temperature hardening. Thixoforming in the liquid between the solid and liquid state with rapid cooling, a directional mode use of 80% of globular austenite formation with the rest consisting of a carbide network is obtained from the liquid dispersion of primary and secondary carbides distributed in a ferrite matrix. 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 its behavior during mechanical testing. The microstructures were analyzed by light and scanning electron microscopy. The volume fraction of individual phases were determined by means of X-ray diffraction analysis. The hardness of individual components varies from 320 to 480 HBW for austenite formation and approx. 150 HBW for the carbide network. © 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 conventionally used industrial materials, thus allowing some interesting combinations of not only mechanical but also physical properties. This is possible due to the formation of a semi-solid state as a result of uneven distribution of chemical elements in both the liquid and solid phases. For metals the liquid phase is highly enriched by alloying elements, which – together with the high amount of carbon – plays a significant role in the subsequent phase transformations. The solid phase mostly occurs in the form of globular sintering particles with a lower content of alloying elements [1]. In order to master the processes, it is important to exactly understand the principles, describe the structural development and determine individual structural 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 technologies.

In order to achieve a high-quality half semi-product, the semi-solid state must form a compositionally uniform and isotropic microstructure during the casting process. In thixoforming, the structure is similar to a casting structure. It is generally formed by globular particles (Fig. 1).

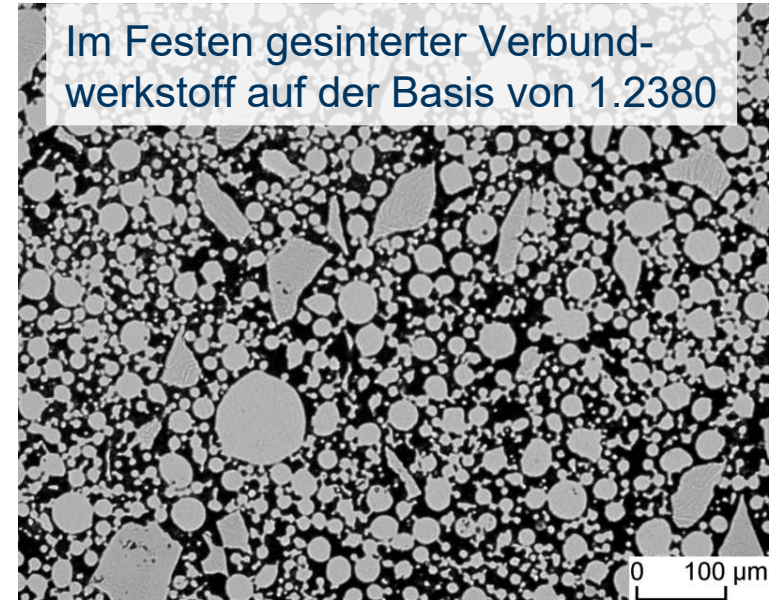
**1.2. Experimental method**  
An industrially employed steel X210Cr12 (Table 1) was used for the experiment. It is a high-carbon, high-chromium austenitic steel suitable for cold forming with a high wear resistance. High compression strength and high deformation during heat treatment are its main properties. The material was prepared by casting and rapidly solidified in a water bath. The samples were prepared by casting and rapidly solidified in a water bath. The samples were prepared by casting and rapidly solidified in a water bath. The samples were prepared by casting and rapidly solidified in a water bath.

Publikation zum  
Thixoforming des  
Kaltarbeitsstahl  
X210Cr12

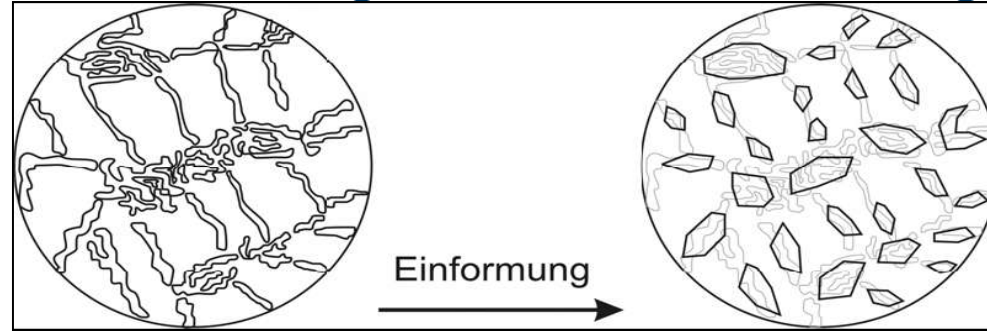
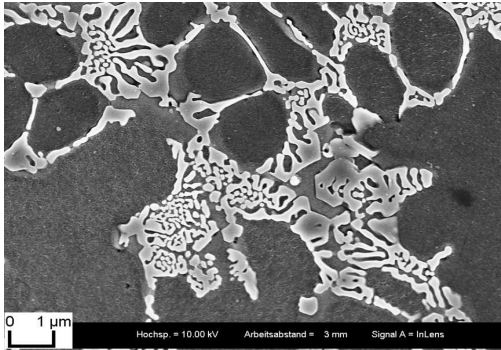
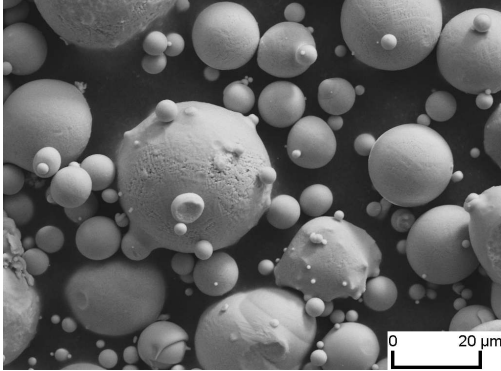


# Anhang: Sintern im Phasengebiet Fest / Flüssig

- 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  
**S**uper-**S**olidus **L**iquid **P**hase **S**intering (SLPS)
- Ähnliche Grundlagen wie bei der thixotropen Formgebung



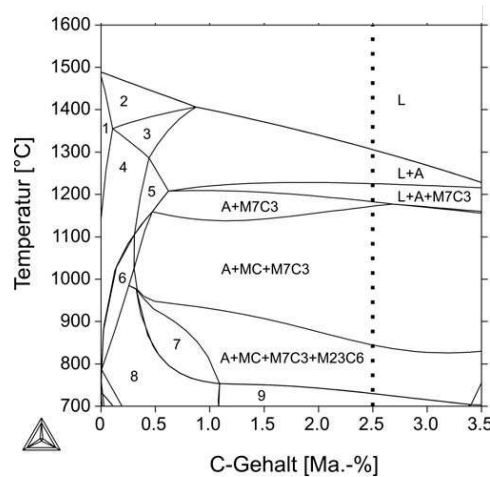
# Anhang: Sintern im Phasengebiet Fest / Flüssig



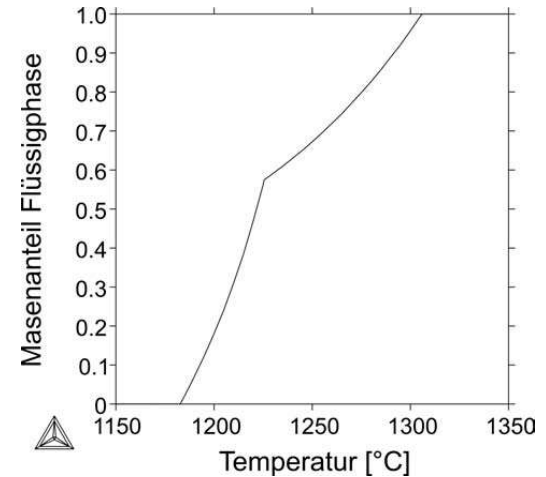
- Einformung der eutektischen Karbide (v.a.  $M_7C_3$ ) während der Erwärmung auf Sintertemperatur
- Das Aufschmelzen erfolgt entlang der eutektischen Bereiche der Pulverstruktur wenn  $T > T_{sol}$
- Eine Separation in kleine Partikel findet statt, die in Flüssigphasen eingebettet sind
- Rasche Verdichtung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

# Anhang: Sintern im Phasengebiet Fest / Flüssig

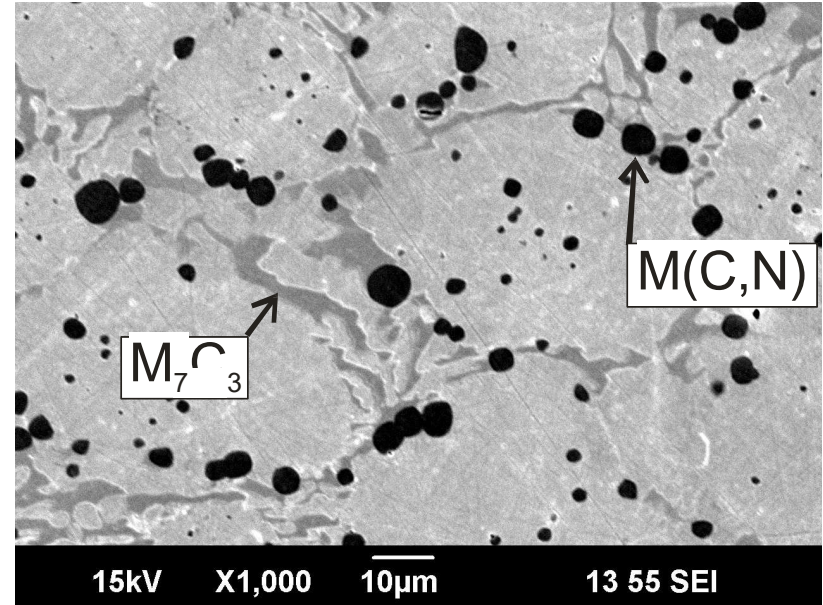
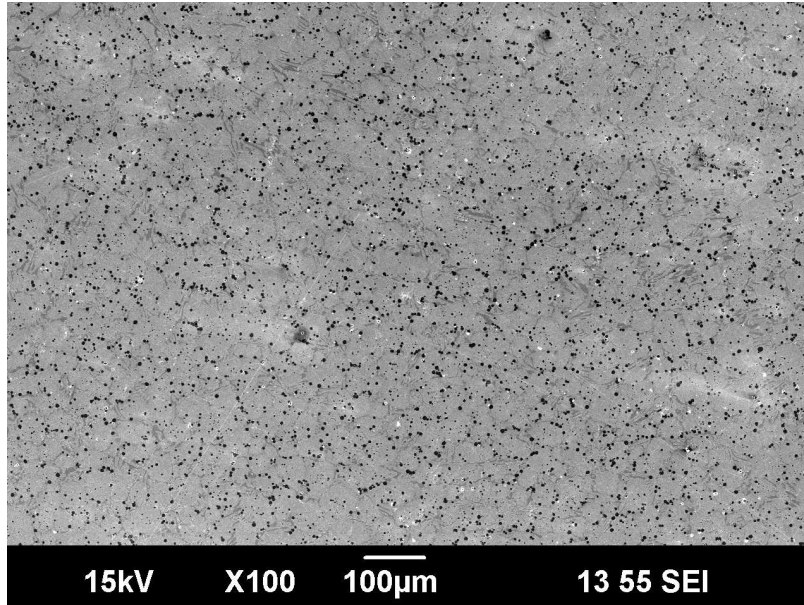
	$T_s [^{\circ}\text{C}]$	$T_l [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta T^{40-60} [^{\circ}\text{C}]$	C	Mo	V	Cr
X220CrVMo13-4 (1.2380)	1223 (ber.)	1353 (ber.)	46 (ber.)	2,2	1,1	4,0	12,5



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  
D-44801 Bochum