

RUB

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

# ADVANCED MATERIALS PROCESSING AND MICROFABRICATION

Urformen im Zustand Fest/Flüssig (Thixotrope Formgebung)



**Fakultät Maschinenbau**

*fortschritt studieren*

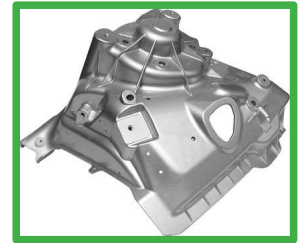
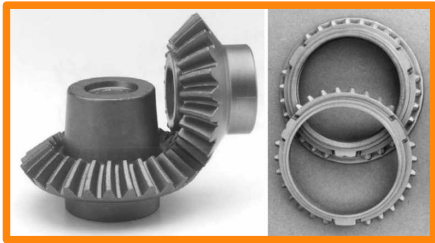
# Struktur

1. Frage- bzw. Problemstellung: Warum Warmumformung und Gießen?
2. Tafel: Binäres Phasendiagramm Al-Si
3. Thixotropie
4. Urformen Fest/Flüssig: Thixo vs. Rheo, Prozesse
5. Anwendungsbeispiele
6. Anlagentechnik
7. Verwendung für Mg- und Al-Basis-Werkstoffe
8. Verwendung für Fe-Basis-Werkstoffe
9. Werkzeugschäden
10. Aktuelle Forschung: Sintern im Gebiet Fest/Flüssig
11. Zusammenfassung & weiterführende Literatur

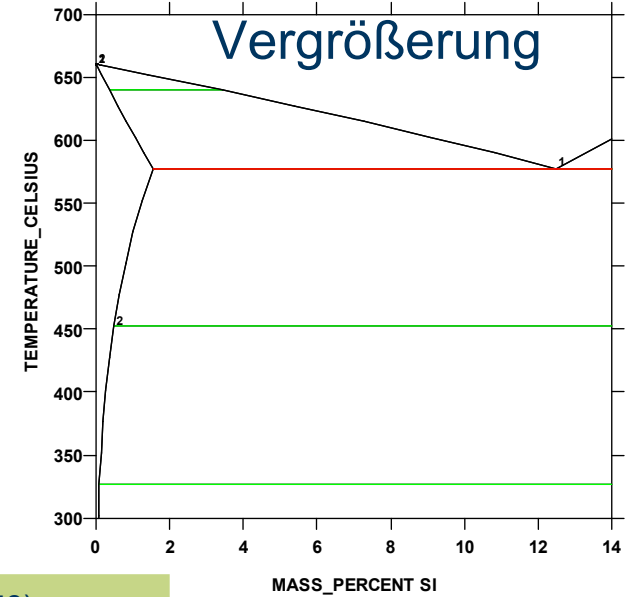
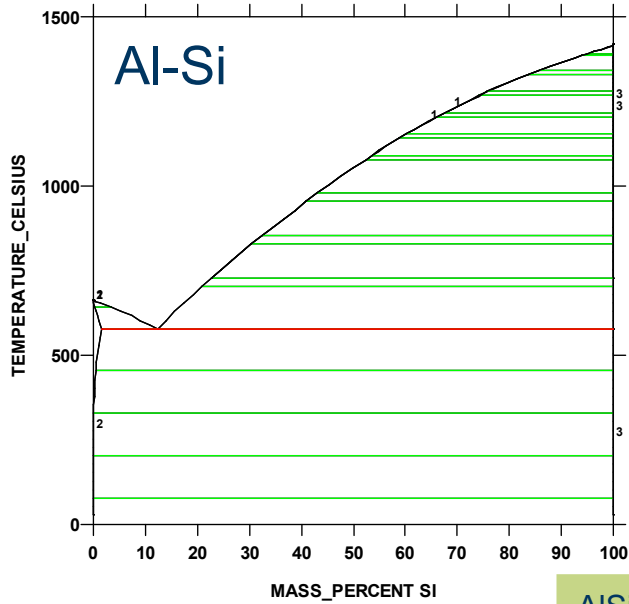
# Frage-/ Problemstellung

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



AlSi1Mg (AA6082) vs. AlSi7Mg (A356):

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

# 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



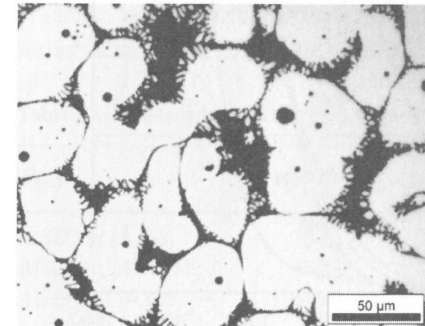
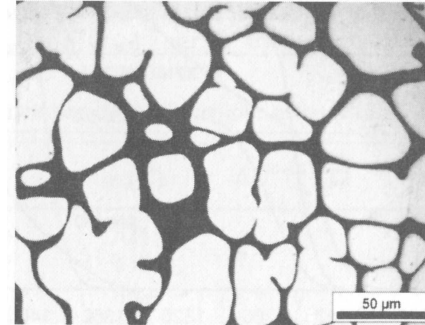
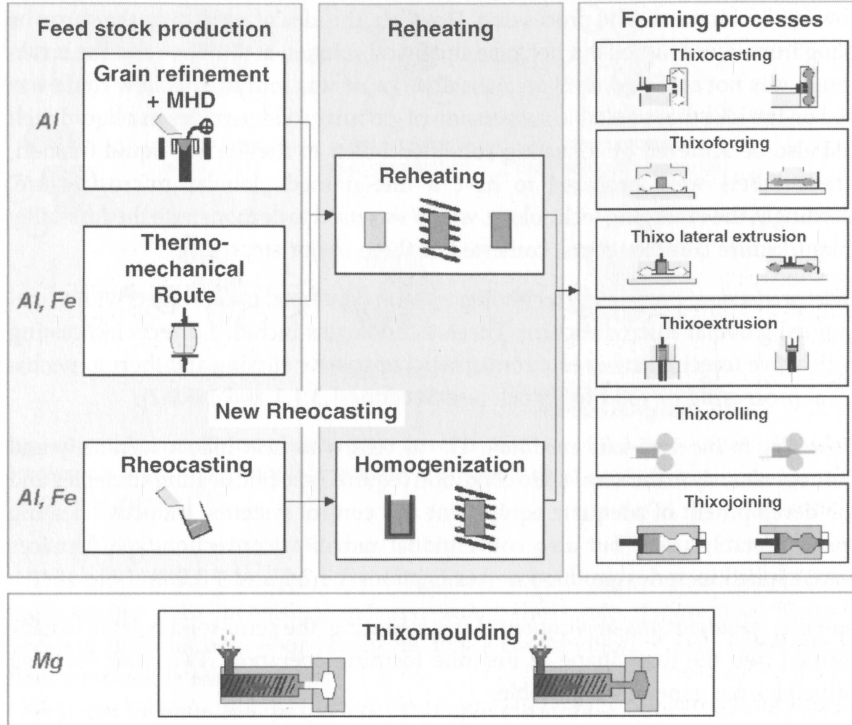
Blue Lias cliffs at Lyme Regis, Dorset, UK (Wikipedia)

# Thixotropie

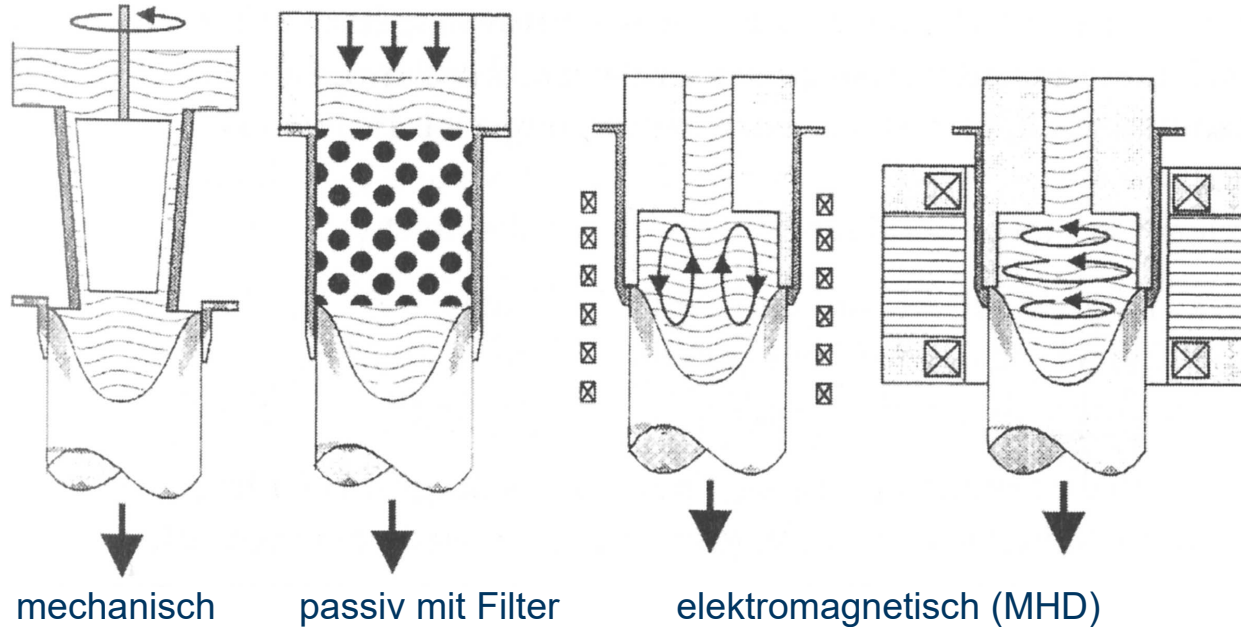
- Legierungen können im teilflüssigen Zustand thixotrop sein
- Scharfe Trennung zur „Pseudo-Plastizität“ nicht möglich, da teilflüssige Metalle eine Abhängigkeit von Zeit und Scherrate aufweisen können
- Erste Arbeiten zum Fließverhalten teilflüssiger Metalle in den 1970er Jahren durch *Flemings et al.*
- 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



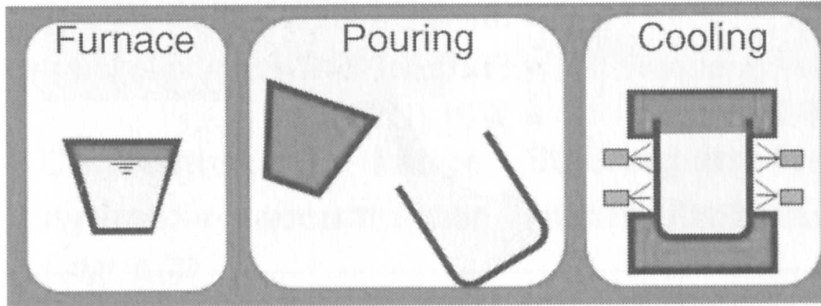
# Thixotropie vs. Rheo: Prozesse



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

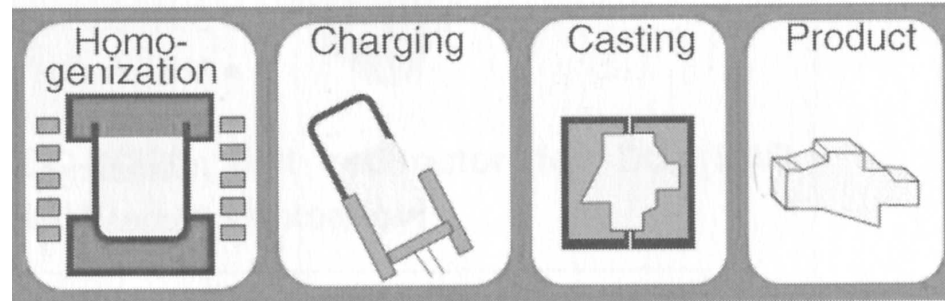


# Thixotropie vs. Rheo: Prozesse



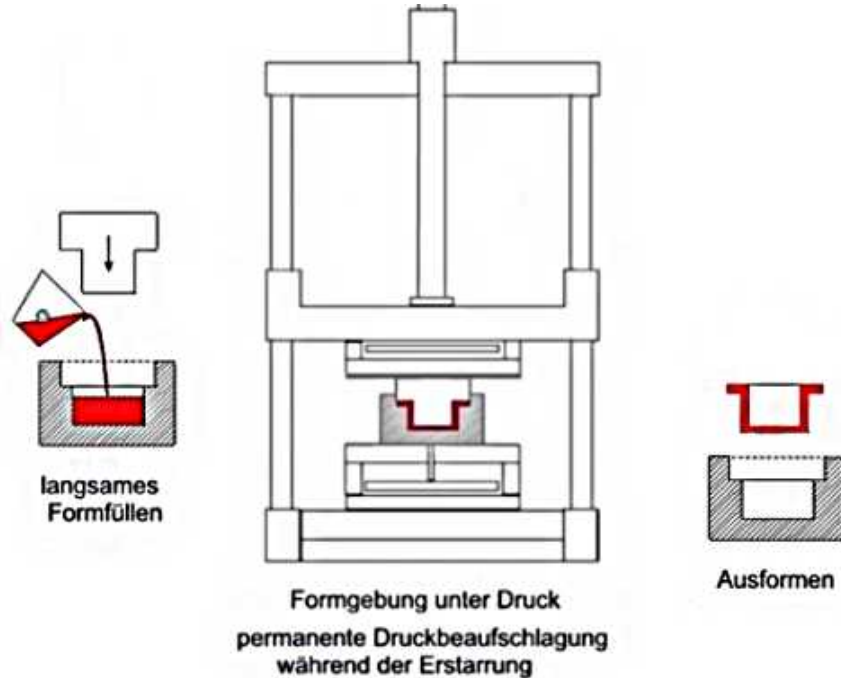
(a) von der Schmelze zum Block

(b) vom Block zum Bauteil



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

# Anlagentechnik: Ähnlich dem Druckgießen



Druckgießen

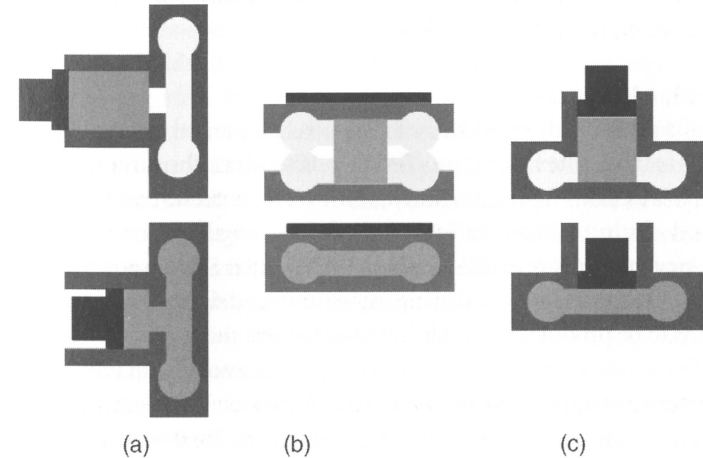
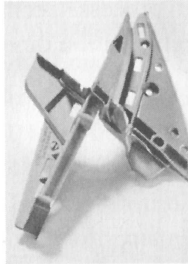


Figure 1.11 Schematic view of different thixoforming processes:  
(a) thixocasting; (b) thixoforging; (c) thixo lateral extrusion.

Thixoformen

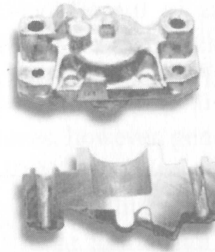
# Anwendungsbeispiele Thixoformen



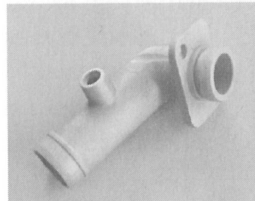
Spaceframe knot Audi A8 [SAG Thixalloy]



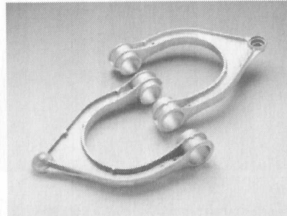
Doorframe part Audi A3 [Audi AG]



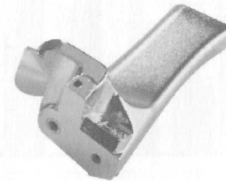
Brake master cylinder [EFU]



Connecting flange hydraulic accumulator [VW AG]



Steering arm for DC W220 [Alcan Singen GmbH]



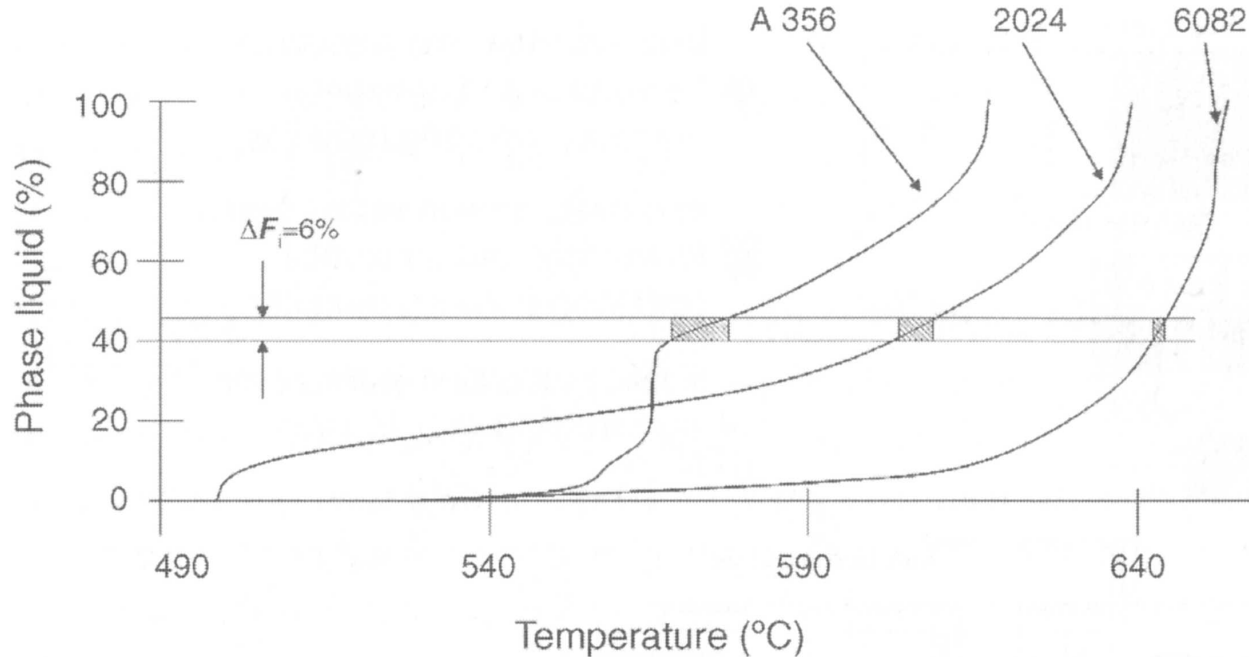
Belt redirector for DC [SAG Thixoalloy]

# Verwendung für Mg- und Al-Legierungen

	$T_s$ [°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

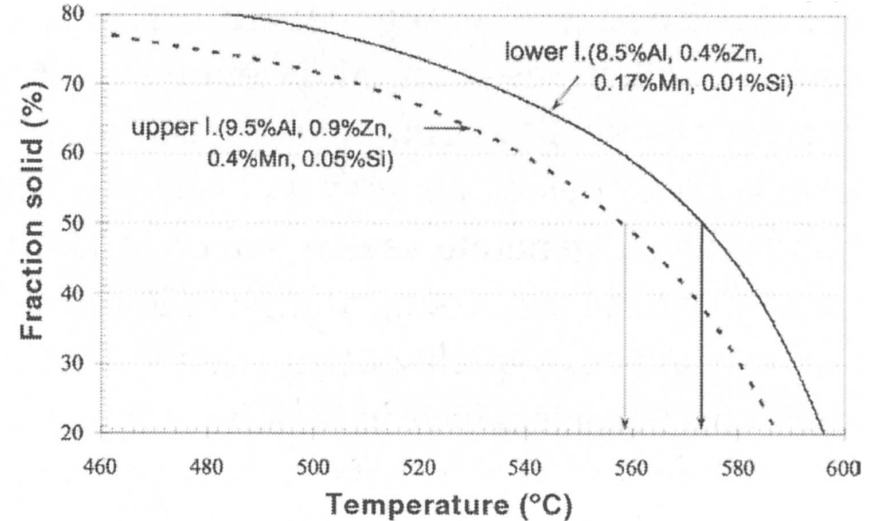
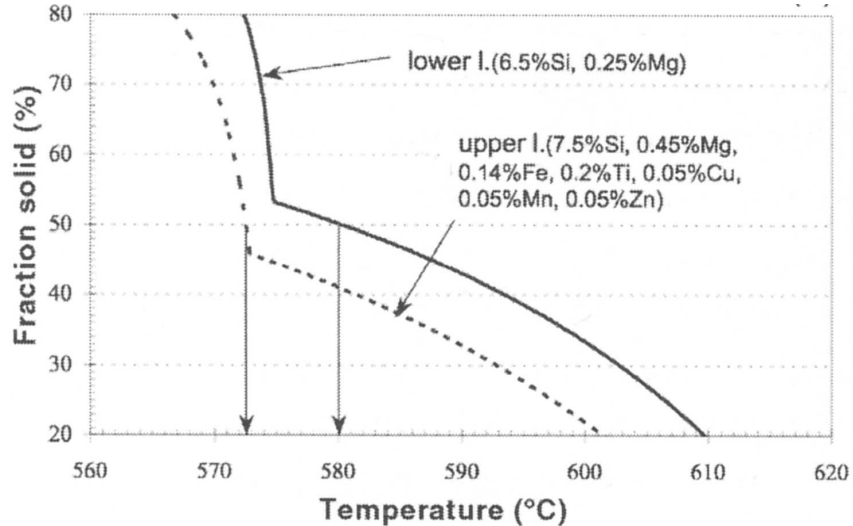
- Das Verhalten der ersten beiden Legierungen kann anhand des binären Systems Al-Si abgeschätzt werden.
- Welcher Wert wirkt sich besonders auf die Prozessstabilität aus?
- Warum sind die ersten beiden Werte für  $T_s$  gleich?

# Verwendung für Mg- und Al-Legierungen



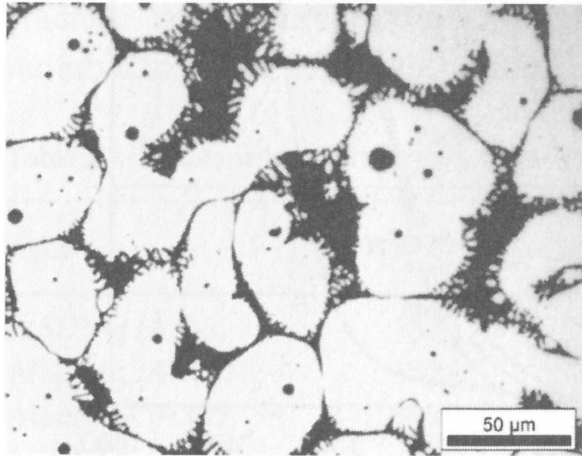
Typische Werte des Flüssigphasenanteiles: 40-60 Vol.-% für Thixocasting, 10-25 Vol.-% für Thixoforging

# Verwendung für Mg- und Al-Basis-Werkstoffe

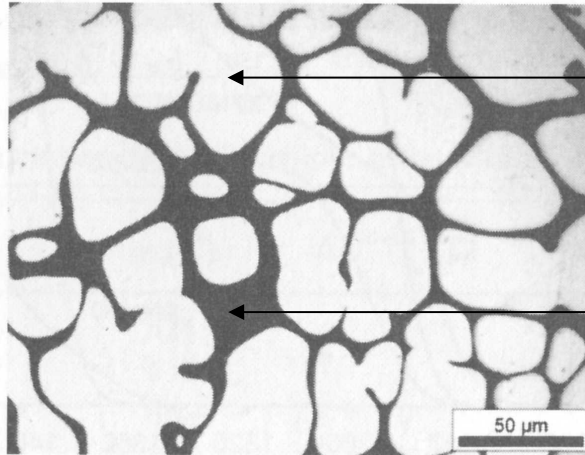


- Berechnete Flüssigphasenanteile (Vol.-%) für die obere und untere Grenze der zulässigen Legierungszusammensetzung.
- Pfeile zeigen die Verschiebung der Temperatur für einen Soll-Flüssigphasenanteil von 50 Vol.-% an.
- Was ist bei AlSi7Mg besonders kritisch?

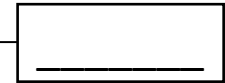
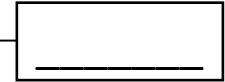
# Verwendung für Mg- und Al-Basis-Werkstoffe



(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

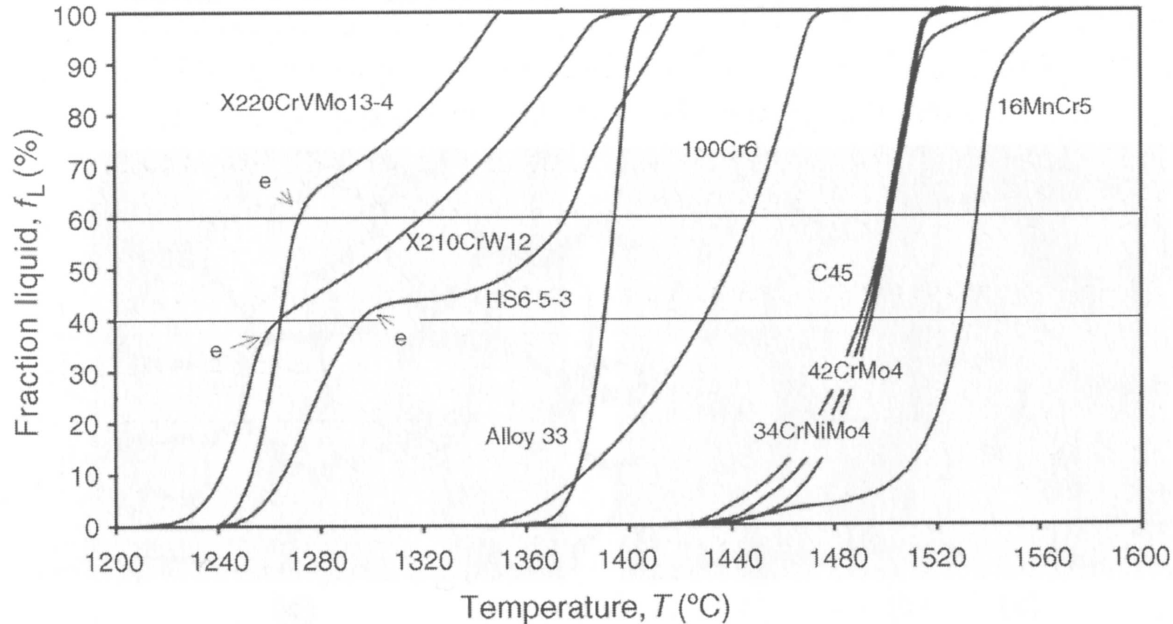
# Verwendung für Fe-Basis-Werkstoffe

	$T_s$ [°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 ?

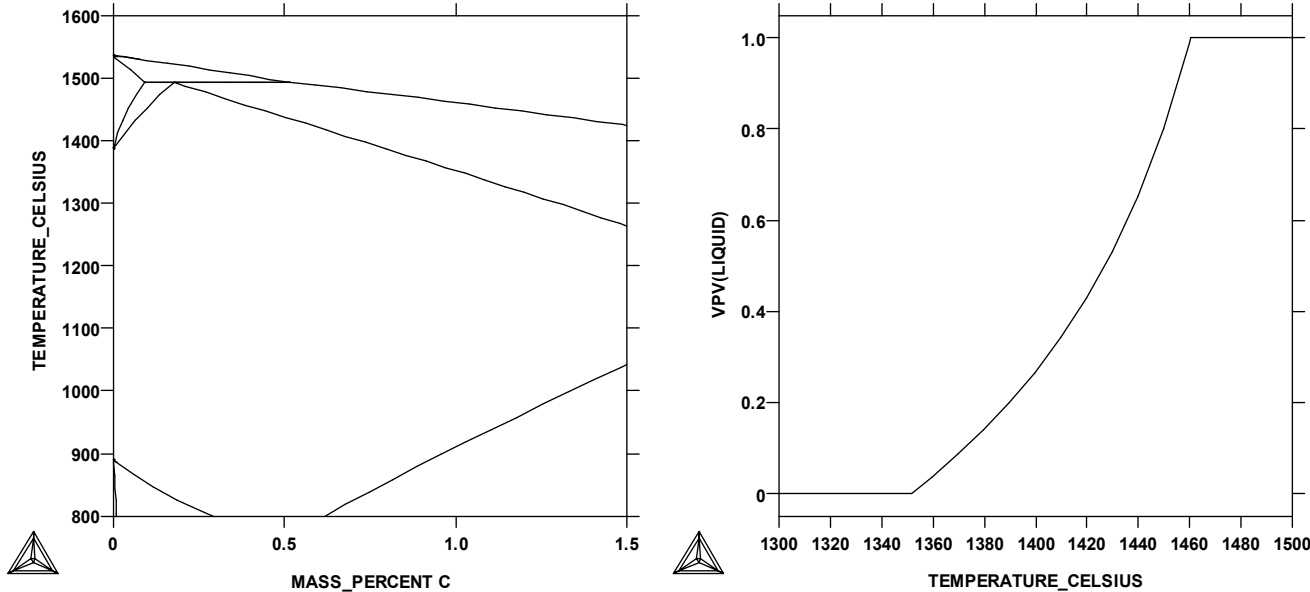


# Verwendung für Fe-Basis-Werkstoffe



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

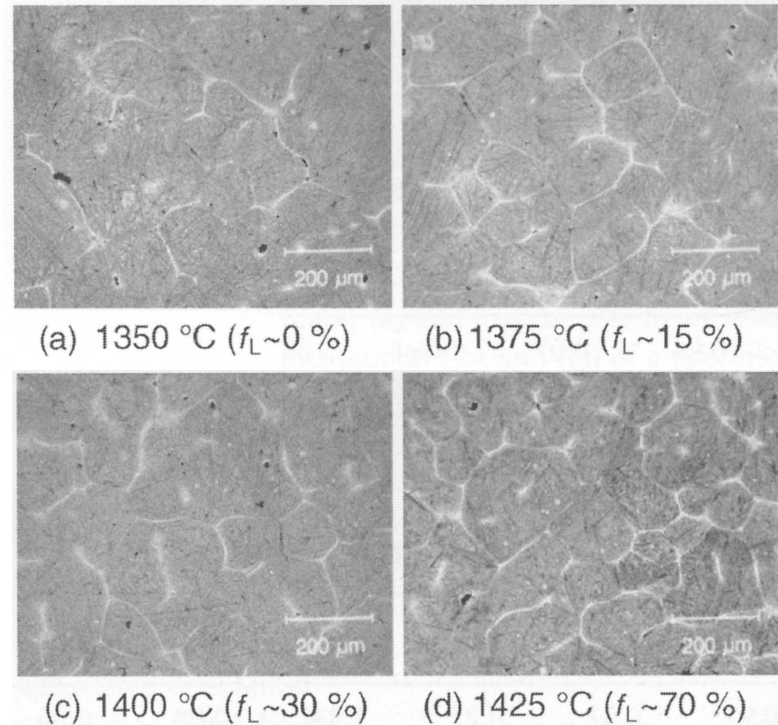
# Verwendung für Fe-Basis-Werkstoffe: 100Cr6



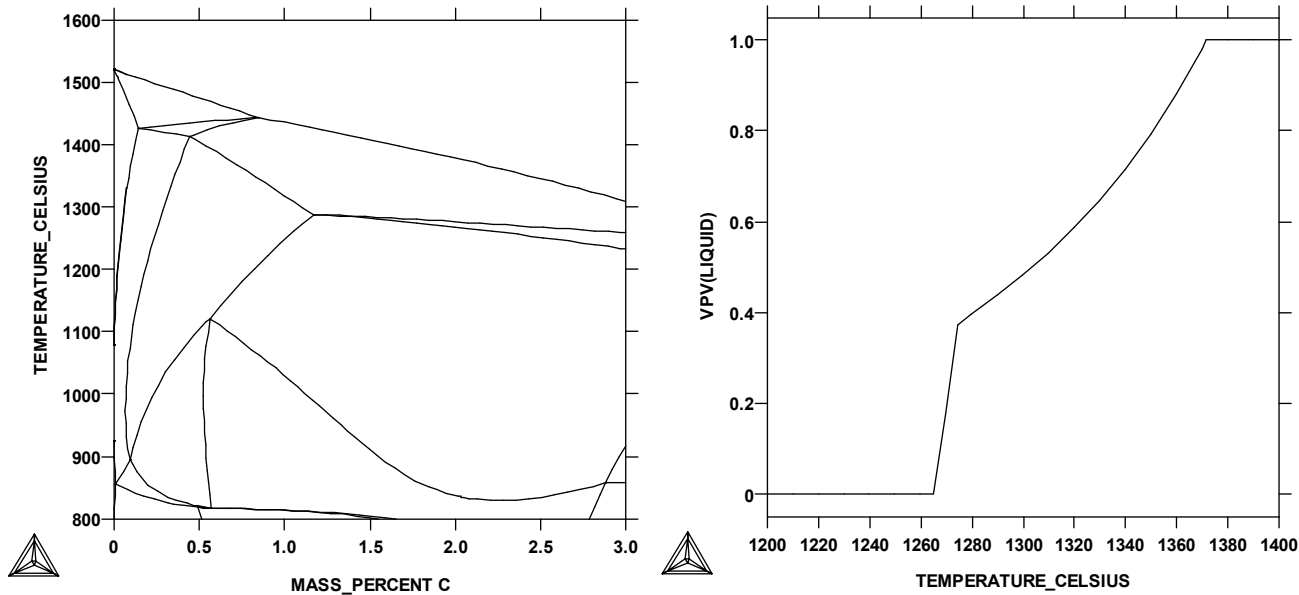
- Welche Phasenfelder liegen vor ?
- Wie erfolgt die Erstarrung ?
- Was sind die berechneten Werte von  $T_s$  und  $T_l$ ?

# 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

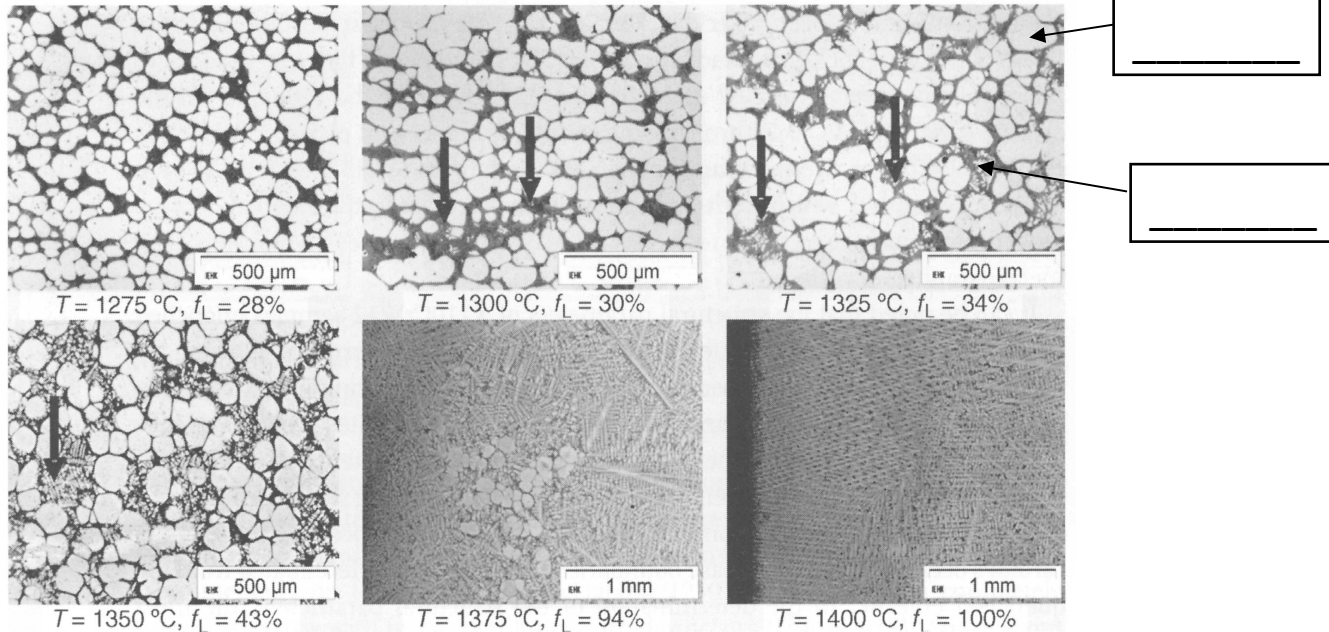


# Verwendung für Fe-Basis-Werkstoffe: X210CrW12



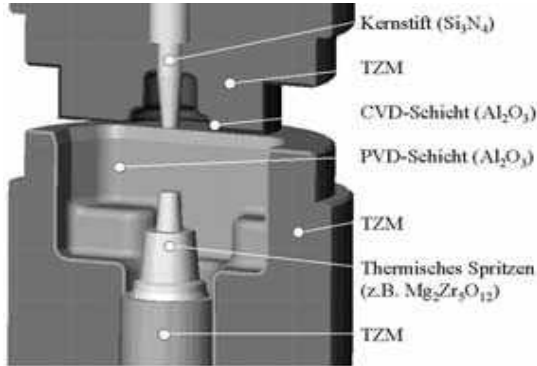
- Welche Phasenfelder liegen vor (bei  $C=C_{\text{nom}}$  und  $T > 1100^\circ\text{C}$ )?
- Wie erfolgt die Erstarrung ?
- Was sind die berechneten Werte von  $T_s$  und  $T_f$ ?

# 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



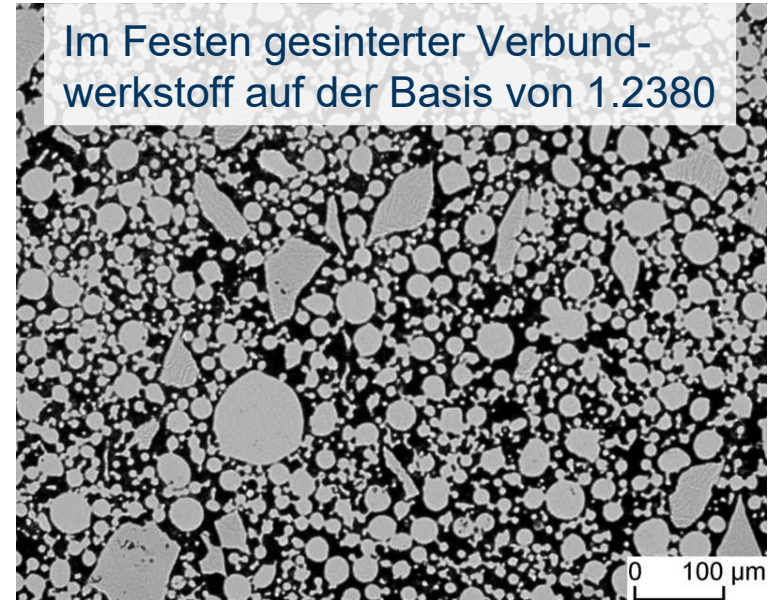
Gratbildung



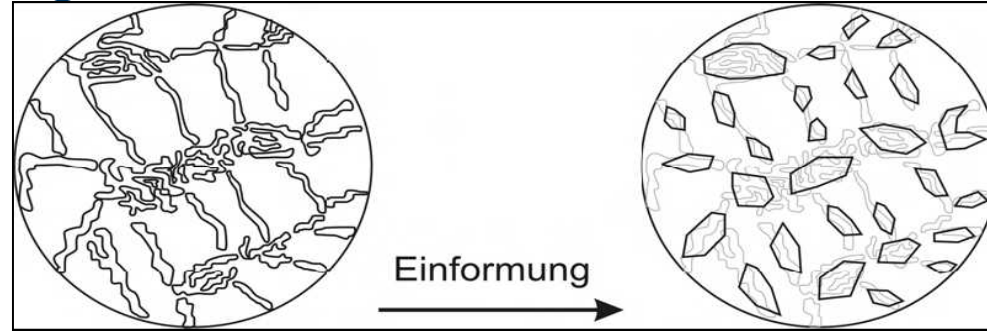
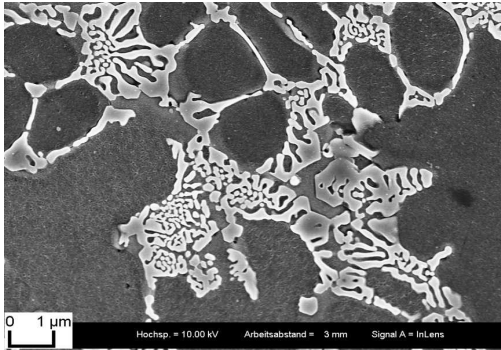
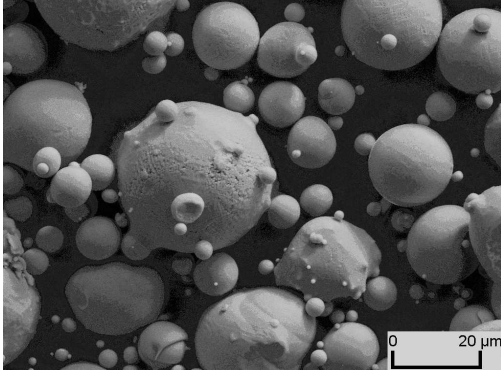
Verschleiß an Stempel  
nach 8 Schmiedungen

# Aktuelle Forschung: Sintern im Phasenfeld 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



# Aktuelle Forschung: Sintern im Phasenfeld Fest/ Flüssig

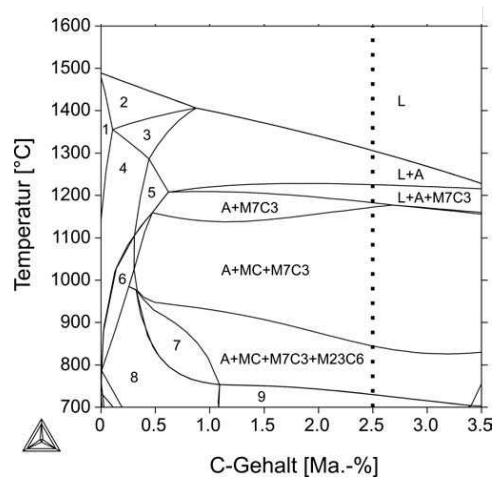


- Einformung der eutektischen Karbide (v.a.  $M_7C_3$ ) während der Erwärmung auf Sintertemperatur
- Das Aufschmelzen erfolgt entlang der eutektischen Bereiche der Pulverstruktur wenn  $T > T_{sol}$
- Eine Separation in kleine Partikel findet statt, die in Flüssigphasen eingebettet sind
- Rasche Verdichtung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

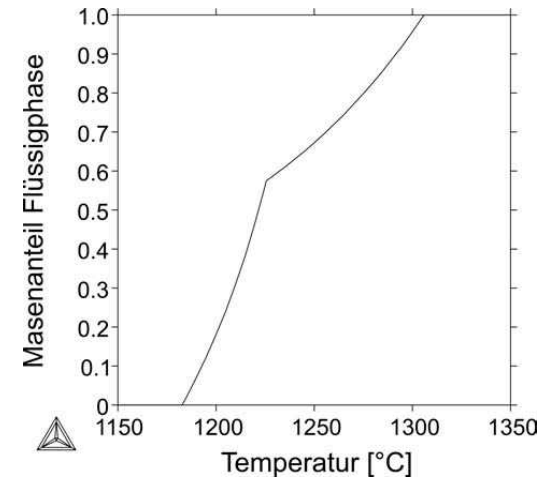


# Aktuelle Forschung: Sintern im Phasenfeld Fest/ Flüssig

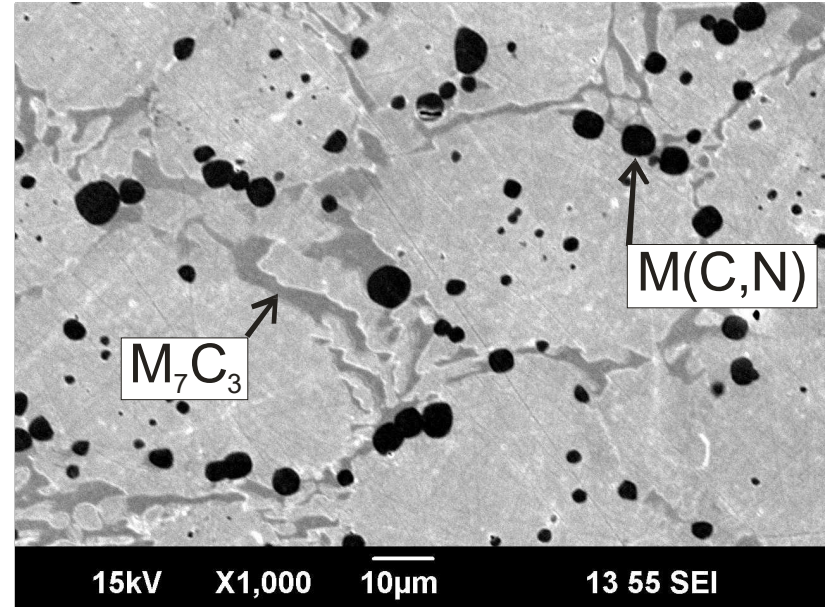
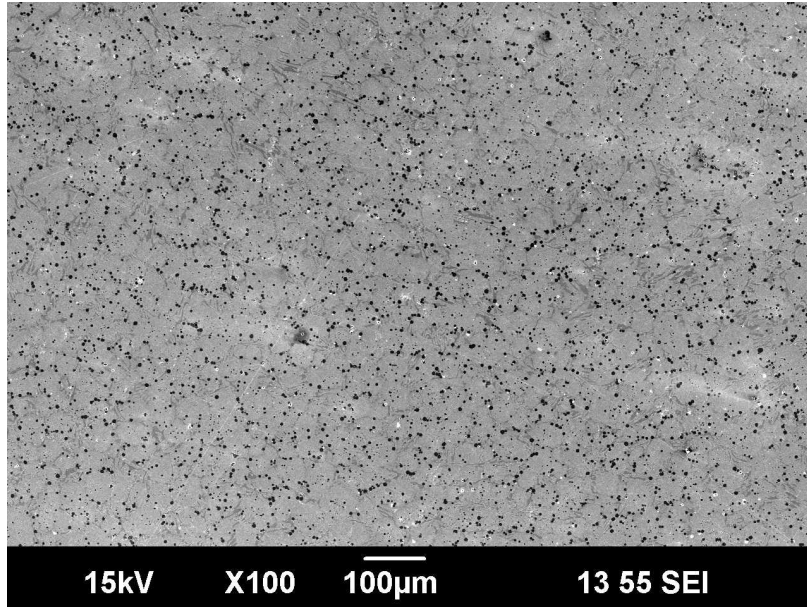
	$T_s$ [°C]	$T_l$ [°C]	$\Delta T^{40-60}$ [°C]	C	Mo	V	Cr
X220CrVMo13-4 (1.2380)	1223 (ber.)	1353 (ber.)	46 (ber.)	2,2	1,1	4,0	12,5



Wäre dieser Stahl geeignet für Thixocasting ?



# Aktuelle Forschung: Sintern im Phasenfeld Fest/ Flüssig



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

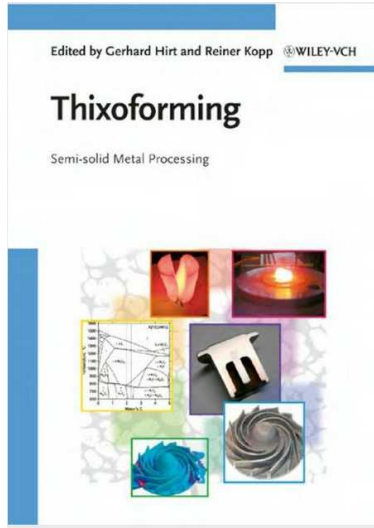
# Zusammenfassung

- Thixotropie als zeitliche Änderung der Viskosität
- Metallische Werkstoffe in einem teilflüssigen Zustand können thixotrope Eigenschaft haben
- „semi solid processing“
- Entscheidender Einfluss durch Mikrostruktur: Verteilung Fest-/Flüssigphase
- Nur geeignet für Legierungen, nicht für reine Metalle
- Mehrere „klassische“ Fertigungsverfahren lassen sich thixotrop durchführen
- Prozessstabilität u.a. abhängig von Fest-Flüssigphasenanteilen als  $f(T)$
- Etabliert und geeignet für Al- und Mg-Leg.
- I.d.R. zu hohe Prozesstemperaturen für Fe-Leg.
- Einfluss der Legierungslage, v.a. in Bezug auf Eutektika
- Verfahren mit ähnlichen Grundlagen: SLPS (super solidus liquid phase sintering)

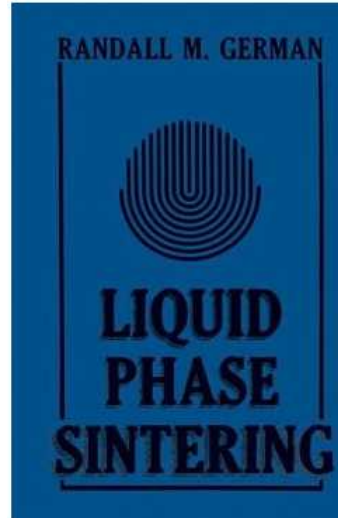
# Überprüfungsfragen

1. Benennen Sie Vor- und Nachteile des Schmiedens, des Thixoformings und des Gießens.
2. Was bedeutet „Thixotropie“? Wie muss das Gefüge einer metallischen Werkstoffe aussehen, damit sich dieser Zustand einstellt?
3. Ist es möglich, reines Aluminium mittels Thixocasting zu verarbeiten?
4. Was unterscheidet „Thixocasting“ und „New Rheocasting“?
5. Welche Werkstoffe werden momentan thixotrop verarbeitet?
6. Wie können sich Eutektika negativ auswirken?
7. Welche Stähle eignen sich für die thixotrope Formgebung und warum?
8. 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

# 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