

**AUSWAHL UND BEWERTUNG VON WERKSTOFFEN  
ZUR FORMGEBUNG IM TEILFLÜSSIGEN ZUSTAND**

Dipl.- Ing. T. R. Noll, Prof. Dr.- Ing. B. Friedrich<sup>1</sup>  
Dipl.- Ing. H. Meuser, Dipl.- Ing. I. Budak<sup>2</sup>

<sup>1</sup>IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling, RWTH Aachen

<sup>2</sup>IEHK Institut für Eisenhüttenkunde, RWTH Aachen

**Thixoforming, Werkstoffauswahl, Bewertung, Qualitätskriterien, Kornfeinung**

**Kurzfassung:**

In dieser Arbeit werden Ergebnisse vorgestellt, die im Rahmen von Grundlagenuntersuchungen erarbeitet wurden, die durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG gefördert werden. Ziel dieser Untersuchungen ist u.a. die Ausarbeitung eines Anforderungskataloges für Vormaterial, das bei der Formgebung von Bauteilen im teilflüssigen Zustand eingesetzt werden soll. Diese Untersuchungen beinhalten mögliche Kriterien für die Werkstoffauswahl und entsprechende Bewertungsmöglichkeiten.

Dazu wird zunächst eine Übersicht über mögliche Werkstoffe und Herstellungsverfahren vorgestellt. Am Beispiel einer ausgewählten Legierung, die mittels unterschiedlicher Herstellungs-Verfahren zu verschiedenen Werkstoff-Varianten verarbeitet wurde, wird ein Konzept zur Bewertung von Thixoforming- Vormaterial vorgestellt.

Anhand dieser beiden Werkstoffvarianten werden Unterschiede, hinsichtlich der chemischen Homogenität, der Gefügeausbildung, der mechanischen Eigenschaften und der Einfluss auf das Verhalten bei der Erwärmung in den teilflüssigen Zustand nachgewiesen und bewertet.

# 1 EINLEITUNG

Thixoforming, eines der modernen Formgebungsverfahren, gewinnt besonders für die Automobilindustrie an Bedeutung. Durch Thixoforming lassen sich komplexe Bauteilgeometrien mit verbesserten mechanischen Eigenschaften unter Einsparung von Energie und Kosten herstellen lassen. Das Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass die Formgebung der gewünschten Bauteile im teilflüssigen Zustand erfolgt und damit zwischen dem konventionellen Umformverfahren wie z.B. Schmieden und dem Urformverfahren / Gießen einzuordnen ist.

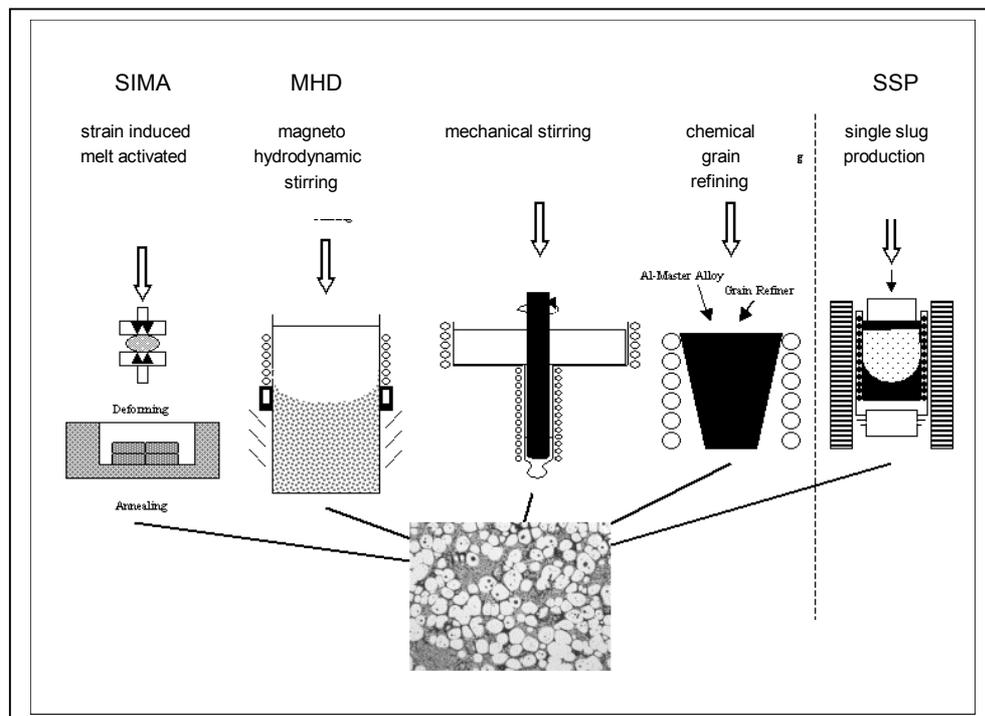
Auch heute noch besteht besonderer Handlungsbedarf bei der Erforschung von Grundlagen, die bei der Formgebung im teilflüssigen Zustand von Bedeutung sind, obwohl das Verfahren bereits 1972 am MIT (Massachusetts Institute of Technology, Cambridge) entwickelt wurde. Dies liegt vor allem daran, dass für die geforderte Verbesserung der Prozessstabilität und der Einführung von geeigneten Qualitätsmanagementsystemen zusätzliche Grundlagen erarbeitet werden müssen. Weiterhin fehlen bisher systematische Untersuchungen zur Feststellung der Bewertungskriterien, die das Anforderungsprofil für das Vormaterial beschreiben und als Grundlage für die Werkstoffauswahl dienen. Die Auswahl und Bewertung von Vormaterial zur Formgebung im teilflüssigen Zustand hat eine besondere Bedeutung, da durch die Werkstoffauswahl und die speziellen Eigenschaften eines jeden Werkstoffs bereits zu Beginn der Fertigung wesentliche Vorgaben für den späteren Ablauf der Bauteilherstellung gegeben werden.

# 2 VERFAHRENSÜBERSICHT ZUR VORMATERIALHERSTELLUNG

Bezüglich der Vormaterialherstellung haben sich mehrere Verfahrensrouten parallel zueinander entwickelt.

Für die konventionelle Thixoforming-Technologie, die über die Prozessschritte Stranggießen, Erwärmung in den teilflüssigen Zustand, Formgebung und eventuell abschließende Wärmebehandlung des Bauteils erfolgt, werden von kommerziellen Anbietern sowohl horizontal als auch vertikal stranggegossene, magnetisch-gerührte Vormaterialien angeboten.

Zur Vormaterialherstellung stehen neben diesen beiden wichtigsten Herstellungsmethoden jedoch weitere Verfahrenswege zur Verfügung, die hier vorgestellt werden **Abb. 2-1**.



**Abb. 2-1:** Übersicht möglicher Vormaterialherstellungsverfahren für das Thixoforming

Ziel der Vormaterialherstellungsverfahren ist die Bereitstellung eines teilflüssigen Gemisches aus feinkörnigen Globuliten in einer schmelzflüssigen Matrix. Ein Werkstoff, der ein derartiges Gefüge aufweist, zeichnet sich bei der Formgebung durch thixotropes Verhalten aus. Dabei erfolgt eine Verringerung der Viskosität unter Einwirkung von Scherbelastungen. Die dabei eingestellte Kornstruktur lässt sich im Anschluss an eine Formgebung im Bauteil mittels Gefügeuntersuchungen nachweisen.

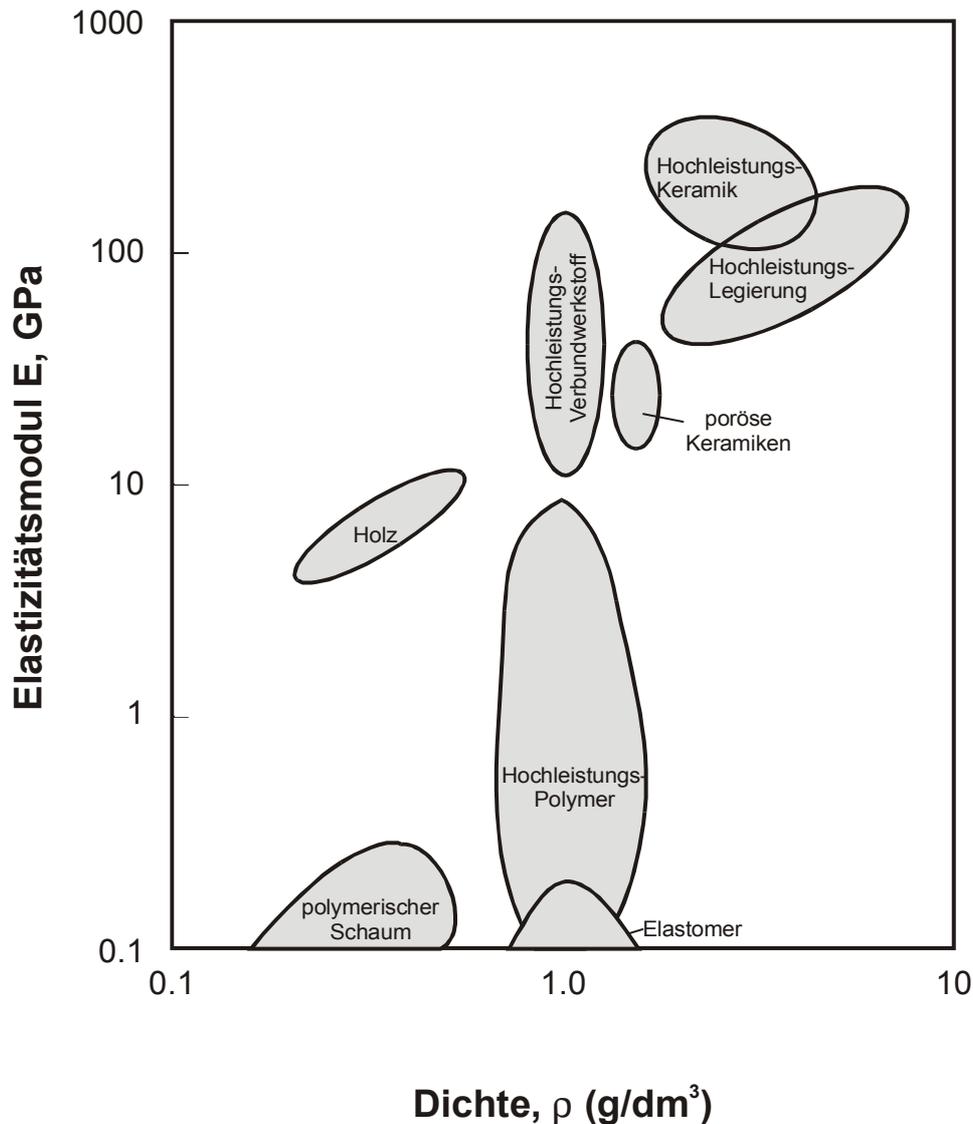
Das Eingangs erwähnte MHD-Stranggussverfahren (magneto hydrodynamic stirring) wird am häufigsten zur Vormaterialherstellung eingesetzt. Bei diesem Verfahren wird eine physikalische Kornfeinung erzielt, indem während des Stranggießens elektromagnetisch gerührt wird. Das Prinzip bei diesem Verfahren besteht darin, dass in der Schmelze eine Strömung verursacht wird. Es laufen folgende Mechanismen ab: bei dem Stranggießen bildet sich eine Randschale, von der aus Dendritenarme in die Strangmitte hineinwachsen. Die in der Schmelze hervorgerufene Strömung lässt dabei teilweise Dendritenarme abbrechen. Diese wirken während der Erstarrung zusätzlich als Keime und unterstützen auf diese Weise die Kornfeinung. Bei der chemischen Kornfeinung wird der Schmelze eine Vorlegierung (z.B. AlTi5B1), meist in Drahtform, zugegeben. Diese Vorlegierung reagiert unter Fremdkeimbildung mit der Schmelze; die Kornfeinung lässt sich auch mit dieser Methode unterstützen.

Neben diesen Verfahren sind auch neue Entwicklungen zu erwähnen. Um eine Verkürzung der Prozesskette vom Vormaterial zum Bauteil zu erreichen, wird beispielsweise bei den Verfahren der UBE Ltd. Japan und Aluminium Ritter GmbH in Deutschland das Vormaterial integriert, d.h. ohne die getrennten Prozessschritte Strangguss und Wiedererwärmung hergestellt */2/*. Bei dem UBE- Verfahren werden die globulitischen Partikel in der Schmelze durch langsame Abkühlung (0.01-3.0 °C/s) erzeugt und anschließend in den Formgebungsprozess eingebracht. Dieses Verfahren ist auch unter dem Namen Single-Slug-Production (SSP) bekannt. Es werden einzelne teilflüssige Bolzen erzeugt, die nahezu dem angestrebten Bauteilgewicht entsprechen und in Portionen auf einem Gießkarussell vom Schmelztiegel zur Gießmaschine gefördert werden. Zu dem erwähnten Aluminium-Ritter-Verfahren liegen z.Zt. noch keine näheren Informationen bezüglich der Prozesseinheiten vor.

Im Gegensatz zu Vormaterial, das nach dem UBE- oder Ritter-Verfahren hergestellt wird, erfolgt die Vormaterialherstellung nach konventioneller Thixoforming- Technologie aus dem festen Zustand. Damit sind Unterschiede in der chemischen Homogenität und der Mikrostruktur der verschiedenen Vormaterialien vorprogrammiert.

### 3 AUSWAHL- UND BEWERTUNGSKRITERIEN FÜR VORMATERIAL

Zu den wichtigsten Auswahlkriterien für Werkstoffe, die bei der Formgebung im teilflüssigen Zustand eingesetzt werden sollen, gehören neben der Wirtschaftlichkeit, die Erfüllung der mechanischen Anforderungen. In sogenannten Auswahlkarten (s. **Abb.3-1**) wird beispielsweise die Dichte und Elastizität unterschiedlicher Werkstoffgruppen zusammengestellt /2/. Auswahlkarten helfen z.B. dem Konstrukteur bei der Wahl geeigneter Werkstoffe, die sich an gewünschten Anforderungen zu orientieren haben.



**Abbildung 3-1:** Beispiel einer Werkstoffauswahlkarte /2/

Diese Auswahlkarten sind für die meisten konventionellen Werkstoffe bekannt und sollten in erweiterter Form auch für Thixoforming- Werkstoffe erarbeitet werden. Denn bei den Werkstoffen, die für die Formgebung im teilflüssigen Zustand vorgesehen sind, müssen zusätzliche Kriterien berücksichtigt werden. Ein wichtiges Kriterium ist, dass die Werkstoffe ein ausgedehntes Schmelzintervall aufweisen müssen. Nur so lässt sich ein kontrollierbares fest-/ flüssig Gemisch mit definierten Phasenanteilen einstellen. In aller Regel kommen daher nur ausgewählte Legierungssysteme in die nähere Auswahl. Bei Aluminium sind dies vor allem die Legierungen vom Typ: A356 (AlSi7Mg0.3), A319 (AlSi6Cu3), AA6082 (AlSi1MgMn) und AA7075 (AlZn5.5MgCu1.5). Bei diesen Legierungen handelt es sich um konventionelle Aluminiumknet- und -Gusslegierungen. Legierungen, die speziell für die Prozesstechnik beim Thixoforming entwickelt wurden, existieren bis heute nicht.

In **Tab. 3-1** sind weitere Auswahl- und Bewertungsmöglichkeiten zusammengestellt. Dabei werden sowohl Materialeigenschaften, deren Definitionen und Kenngrößen als auch Einfluss- und Verbesserungsmaßnahmen berücksichtigt. Materialeigenschaften lassen sich zweckmäßig in chemische, physikalische, technologische und spezielle Gruppen zusammenfassen. In der Praxis sollten zur Bewertung von Werkstoffen möglichst viele der aufgeführten Kriterien angewendet werden. Der Bearbeitungsaufwand und die damit verbundenen Kosten verbieten dies jedoch, so dass sich in der Praxis nur ein Teil der aufgeführten Zusammenstellung berücksichtigen lässt. Daher wurden zusätzliche Auswahl- und Bewertungsmöglichkeiten, zur indirekten Bewertung wie z.B. Penetrationsmessungen oder Bestimmung eines sogenannten Rheologiefaktors */3/* u.ä. entwickelt. Diese Verfahren haben jedoch häufig den Nachteil, dass sie nicht genormt sind und häufig nur den Vergleich von Messwerten untereinander erlauben, da sie noch nicht allgemein anerkannt werden.

Am Beispiel von den in **Tab. 3-1** mit einem Häkchen markierten Werkstoffeigenschaften soll im folgenden eine Übersicht einiger wichtiger Bewertungskriterien gegeben werden. Bei der Auswahl, der im weiteren diskutierten Kriterien, wurde darauf geachtet, dass sich diese auf sogenannte Grunduntersuchungsmethoden, wie chemische Analyse, Metallographie, Bestimmung mechanischer Kennwerte und thermische Beschreibung des Werkstoffverhaltens bei einer Erwärmung in den teilflüssigen Zustand beschränken.

	Material-Eigenschaften	Kenngrößen/Definitionen	Bestimmungs-Methoden	Einfluss-Maßnahmen	
chemische Eigenschaften	chemische Zusammensetzung	DIN EN 1780	RFA, AAS, OES	Gattieren, Legieren	√
	Gehalt an metallischen Verunreinigungen	DIN EN 1780	RFA, AAS, OES	Verdünnung	√
	Gehalt an nichtmetallischen Verunreinigungen (Gase / Oxide)	--	z.B. CHAPEL, PODFA, LAIS Metallographie-Bildanalyse	Einsatz von Schmelzsalzen/ Filtration	--
	chemische Homogenität/ Entmischungen	--	RFA, AAS, OES	Herstellungs-Parameter	√
physikalische Eigenschaften	Randseigerungen	--	RFA, AAS, OES	Gießparameter	--
	Mikrostruktur im Randschalenbereich	Korngröße, Formfaktor, Veredelungszustand Kontiguität u.ä.	Metallographie	Trennmittelart, - Menge beim Stranggießen u.ä.	√
	Mikrostruktur im Bolzeninneren	Korngröße, Formfaktor, Veredelungszustand Kontiguität u.ä.	Metallographie	z.B. Beeinflussung der Strömungs- verhältnisse im Sumpfbereich	√
technologische Eigenschaften	Quasistatische Festigkeits-Kennwerte	$R_{p0,2}$ , Mpa $R_m$ , Mpa $A_x$ , %	Zugversuch	Kornfeinung, globulitisches Gefüge, Werkstoff, Wärme- behandlung u.s.w.	√
	Erstarrungsintervall	$T_s$ , $T_L$ , $f_L$	DTA	Legierungs- zusätze	√
	Korrosions-Beständigkeit	z.B. Spannungsriß- Korrosion EN-ISO7539 T7	z. B. CERT- Test	z.B. Legierungs- zusammen- setzung	--
	Rheologisches Verhalten	z.B. dynamische Viskosität	Rheometer- Tests	Zusammen- setzung	--
	Porosität, Risse	z.B. Porengröße und - Lage	z. B. Ultraschall, Farbeindringtest	Entgasungs- behandlung, Gießparameter	--
Herstellungs- bedingt, spezielle Eigenschaften	Ausschwitzungen	Fehlererscheinungen, die bei der Herstellung des Vormaterial mittels Stranggussverfahren auftreten können. Diese Werkstoffeigenschaften werden im wesentlichen durch Gießparameter wie z.B. Gießtemperatur, Gießgeschwindigkeit, spez. Kühlwassermenge u.ä. beeinflusst.			--
	Kaltlauf				
	Krustenverwölbung				
	Oberflächenporosität				
	Risse				

RFA: Röntgenfluoreszenzspektroskopie, AAS: Atomabsorptionsspektroskopie, OES: Optische Emissionsspektroskopie, DTA: Differential-Thermo-Analyse, CERT: Constant Extension Rate Tensile, CHAPEL: Continuous hydrogen analysis by pressure evaluation in liquids, PODFA: porous disc filtration analysis, LAIS: liquid aluminium inclusion sampler

**Tab. 3-1:** Auswahl- und Bewertungskriterien von Vormaterial für die Formgebung im teilflüssigen Zustand; √: Im Umfang der hier vorgestellten Methoden enthalten, --: nicht angewendete Methoden

#### 4 VERSUCHSMATERIAL

Als Versuchsmaterial wurden zwei unterschiedliche Werkstoffvarianten vom Typ A356 (AlSi7Mg0.3) ausgewählt. Die verwendeten Werkstoffvarianten werden im folgenden als Werkstoff A und B bezeichnet. Bei Werkstoff A handelt es sich um eine konventionelle Variante zu dessen Herstellung das MHD-Verfahren eingesetzt wurde. Bei Werkstoff B handelt es sich um eine chemisch korngefeinte Variante. Als Kornfeiner wurde AlTi5B1 eingesetzt. Die chemische Zusammensetzung der beiden Werkstoffe ist in **Tabelle 4-1** angegeben.

A356	Ti [%]	Fe [%]	Mn [%]	Cu [%]	Zn [%]	Sr[%]
Werkstoff A	0,02	0,14	<0,01	<0,01	0,02	0,02
Werkstoff B	0,38	1,20	<0,01	0,06	0,02	0,03

**Tabelle 4-1:** Chemische Zusammensetzung der untersuchten Werkstoffe vom Typ A356 (AlSi7Mg0.3)

Werkstoff B wurde auf der IME-Stranggussanlage hergestellt. Die wichtigsten technischen Angaben dieser Stranggussanlage sind in **Tabelle 4-2** angeben:

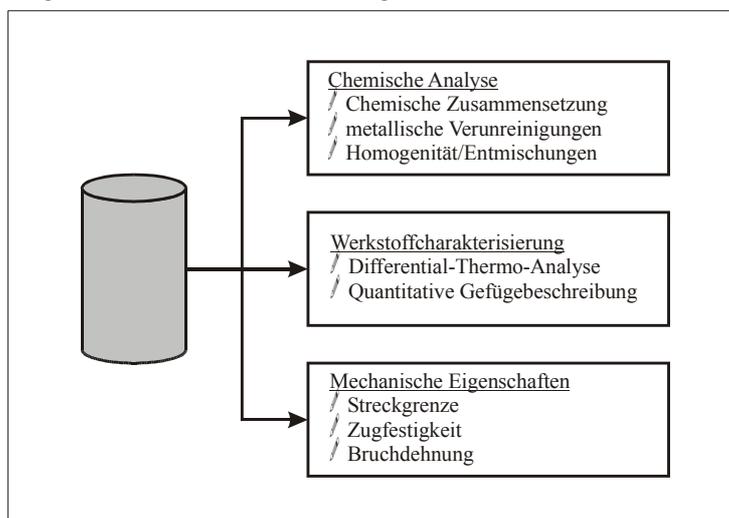
	Menge	Einheit
Ofenkapazität	45	kg Aluminium
Max. Gießgeschwindigkeit	35	mm/min
Max. Kühlwasserdurchfluss	60	l/min
Gießtemperatur (im Ofen)	700-800	°C
Max. Stranglänge	1	m
Formate (Rund) Durchmesser	76 und 101	mm
Anzahl der Stränge pro Charge	4	Stück

**Tabelle 4-2:** Technische Daten der IME-Stranggussanlage

Mit dieser Anlage lassen sich bei Bedarf auch geringere Mengen unterschiedlichster Werkstoffe zu Rundformaten verarbeiten. Die zum Gießen optimalen Parameter wurden in Vorversuchen gesondert ermittelt.

#### 5 UNTERSUCHUNGSMETHODEN

Eine Übersicht über die angewendeten Untersuchungsmethoden ist in **Abb. 5-1** dargestellt.



**Abbildung 5-1:** Untersuchungsmethoden zur Bolzencharakterisierung

Zur chemischen Untersuchung der Werkstoffvarianten wurde ein ICP (inductive coupled plasma) Gerät vom Typ Spectro- flame modular D benutzt.

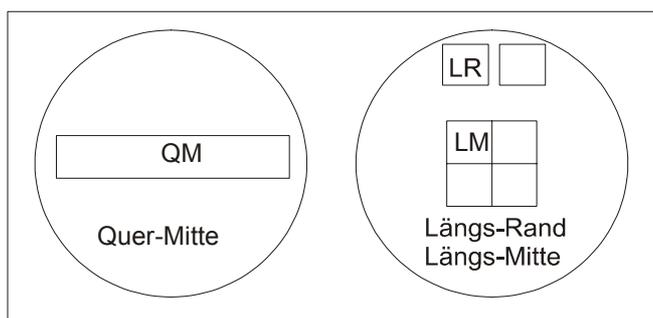
Aus der Bolzenmitte, 10 und 15mm von der Mitte entfernt und aus der Randschale wurden jeweils 10 Proben in Form von Bohrspänen entnommen. Dies ergab 80 Proben. Zusätzlich wurden jeweils von den Rundformaten auf einer Drehbank über den Umfang an acht verschiedenen Stellen weitere Proben zur Untersuchung der Homogenität genommen. Um die Späne nicht zu verunreinigen, wurde beim Bohren auf den Zusatz von Kühlemulsionen verzichtet. Die Späne wurden anschließend abgewogen, in Teflontiegeln unter Zusatz von Natronlauge heiß gelöst, um ein Abdampfen des Siliziums zu vermeiden, und anschließend mit einem Säuregemisch die übrigen noch nicht gelösten Legierungsbestandteile auch in Lösung gebracht. Die so gewonnene Lösung wurde auf ihren Silizium-, Magnesium-, Eisen-, Mangan-, Kupfer-, Zink-, Titan- und Strontiumgehalt hin analysiert. Die Datenreihen wurden mit Hilfe statistischer Methoden auch untereinander verglichen und ausgewertet.

Weiterhin erfolgte eine Charakterisierung der verwendeten Werkstoffe hinsichtlich des Schmelzintervalls, d.h. es wurde eine Bestimmung der Solidus- und Liquidustemperaturen durchgeführt. Diese Werkstoffkenndaten wurden mit Hilfe einer DTA- (Differenz-Thermo-Analyse) Anlage ermittelt. Die Ergebnisse sind in **Abb. 6-2** wiedergegeben. Mit Hilfe eines Computerprogramms wurde aus den DTA-Daten zunächst der theoretische Flüssiganteilverlauf für die jeweilige Werkstoffvariante errechnet. Das Material wurde metallographisch präpariert und weitere Werkstoffkenndaten wie z.B. mittlerer Korndurchmesser, Formfaktor, mittlerer eutektischer Phasenanteil sowie die Kontiguität des vorliegenden Materials mit Hilfe eines interaktiven Bildanalysesystems ermittelt.

Zu den wichtigsten Kenndaten, die zur Beschreibung des Mikrogefüges nötig sind, zählen die Korngrößenverteilung, Angabe des mittleren Korndurchmessers, sowie der Formfaktor. Der Formfaktor beschreibt den Rundheitsgrad eines Partikels. Für einen globulitischen Partikel ist er gleich 1, für alle von der runden Form abweichenden Partikel ist der Formfaktor hingegen kleiner als 1. Es gilt folgende Beziehung:

$$F = 4\pi \frac{A}{U^2}, \text{ mit } A = \text{Fläche, } U = \text{Umfang}$$

Die mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe wurden in Zugversuchen ermittelt. Dazu wurden nach DIN 50125 Rundzugproben mit Gewindekopf B5x25 aus dem Bolzenrand und der Bolzenmitte in Längs- und Querrichtung entnommen und nach DIN EN 10002 untersucht. Die Probenlage ist in **Abb. 5-2** dargestellt.



LR → Probenlängsrichtung, Rand

LM → Probenlängsrichtung, Mitte

QM → Probenquerrichtung, Mitte

**Abb. 5-2:** Darstellung der Probenlagen

Durch diese Art der Probenentnahme wurde gewährleistet, dass auch die Richtungsabhängigkeit und die Homogenität der quasistatischen Festigkeitskennwerte über den Bolzendurchmesser erfasst werden. Die Auswertung der Versuchsergebnisse wurde, durch die Gefügeaufnahmen aus den entsprechenden Bereichen, gestützt.

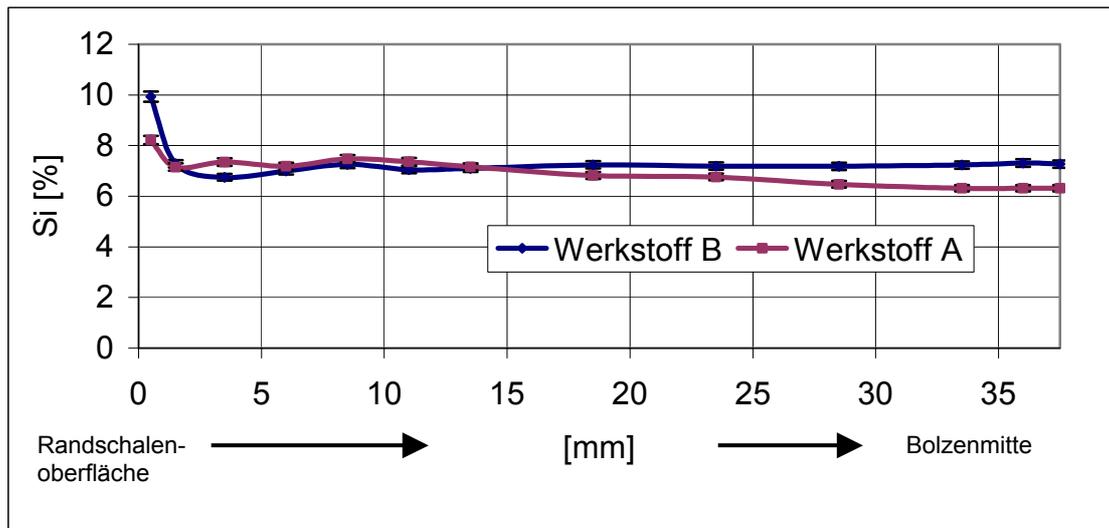
## 6 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Bei der Untersuchung der chemischen Homogenität der beiden Strangproben wurde festgestellt, dass sich die Konzentrationen siehe **Abb. 6-1**, über den Strangquerschnitt vor allem im Bereich der Randschale deutlich voneinander unterscheiden und diese Vormaterialien daher als „nicht homogen“ einzustufen sind. Bei der Untersuchung des hier verwendeten kommerziellen Materials ist an der Randschale eine geringere Anreicherung des Siliziumgehaltes zu beobachten als bei dem korngefeinten Werkstoff.

Die Konzentrationsverteilung für die beiden Prozessvarianten zeigten für die übrigen Legierungselemente und metallischen Verunreinigungen (z.B. Magnesium, Mangan und Eisen) einen entsprechenden Verlauf. Nur der Titangehalt nahm von der Oberfläche in Richtung Bolzenmitte zu.

Es konnte gezeigt werden, dass eine Charakterisierung ähnlicher Werkstoffe mit dieser chemischen Untersuchungsmethode durchgeführt werden kann. Ein Vergleich zwischen der mittleren chemischen Zusammensetzung des jeweiligen Werkstoffs und eine zusätzliche Untersuchung der chemischen Zusammensetzung im Randschalenbereich kann dabei als wichtiges Bewertungskriterien gelten, und den benötigten Untersuchungsaufwand für die Zukunft verringern.

Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung und der chemischen Homogenität müssen sich auch auf andere technologisch wichtige Werkstoffeigenschaften auswirken. Eine Darstellung der dabei geltenden Zusammenhänge wird Schwerpunkt zukünftiger Arbeiten sein. Eine Beschreibung der Auswirkung von chemisch inhomogenen Werkstoffe auf rheologische Eigenschaften hat dabei im Vordergrund zu stehen.

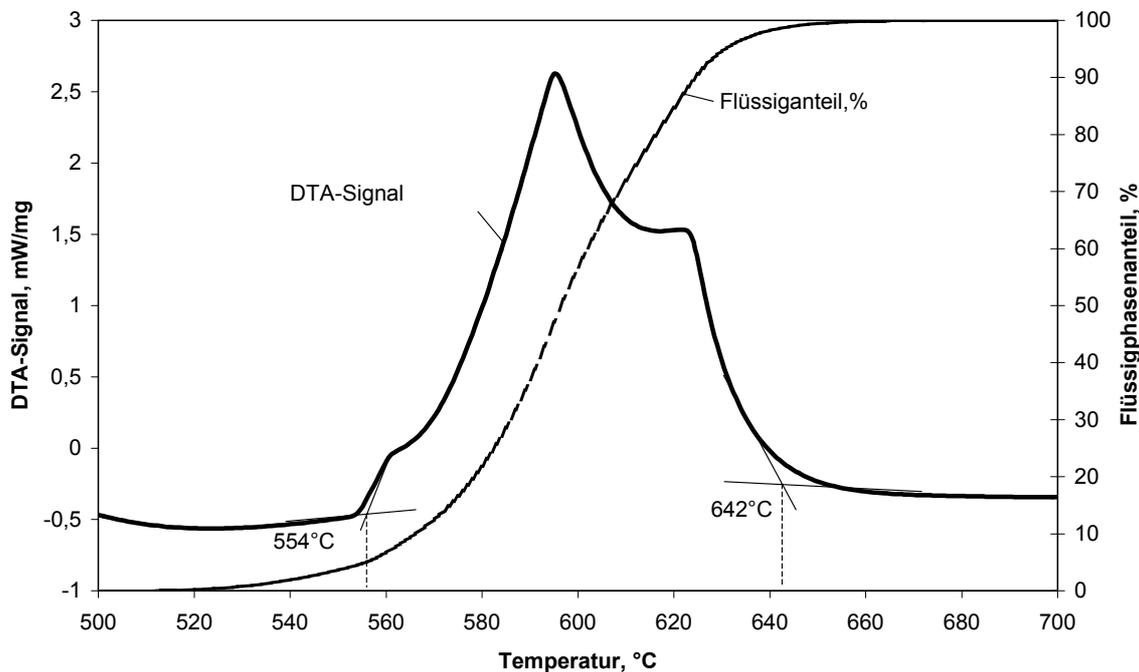


**Abb. 6-1: Verteilung des Siliziumgehaltes für den Werkstoff A (konventionell) und B (korngefeint)**

Die Kenntnis der Solidus-/ Liquidustemperaturen, des Flüssiganteilverlaufs und quantitativer Kenndaten wie Formfaktor, Kontiguität und Phasenanteile sind von weiterer Bedeutung für die Beschreibung des rheologischen Verhaltens der Werkstoffe im semi-solid Bereich. Der Verlauf der DTA- Kurve sowie die Entwicklung des Flüssiganteils als Funktion der Temperatur erleichtert das Verständnis für die Gefügeentwicklung der Werkstoffe während des Thixoforming Prozesses. Weiterhin dienen diese Kennwerte zur Bestimmung und Optimierung der Prozessparameter für die Bauteilherstellung.

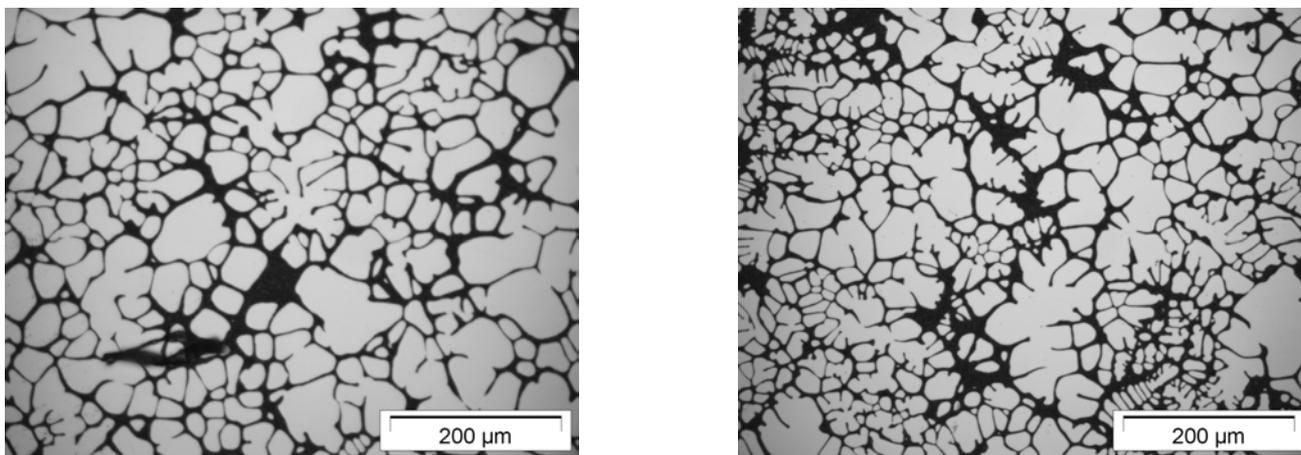
**Abb.6-2** zeigt den Verlauf des DTA- Signals und des Flüssigphasenanteils als Funktion der Temperatur für den Werkstoff A. Die DTA- Kurve weist dabei zwei Maxima auf, welche bestimmten Gefügeentwicklungen zugeordnet werden können. Das erste Maximum liegt bei 634°C und kann durch die beginnende Ausscheidung des  $\alpha$ -Mischkristalls erklärt werden. Das zweite Maximum tritt bei ca. 577°C auf und fällt somit mit der eutektischen Temperatur zusammen. Bei dieser Temperatur wird ein eutektisches Gefüge gebildet, welches aus einem  $\alpha$ -Mischkristall und Silizium zusammengesetzt ist. Der mittels eines Computerprogramms ermittelte Flüssiganteilverlauf ist hier gestrichelt dargestellt. Für

die Verwendung des Materials im Thixoforming-Prozess ist neben anderen Parametern ein Flüssiganteil von 30-60 Vol. % im semi-solid Bereich wichtig. Dieses Kriterium ist bei den hier untersuchten Werkstoffen gegeben. Der Flüssiganteil im semi-solid Bereich ist der **Abb. 6-2** zu entnehmen.



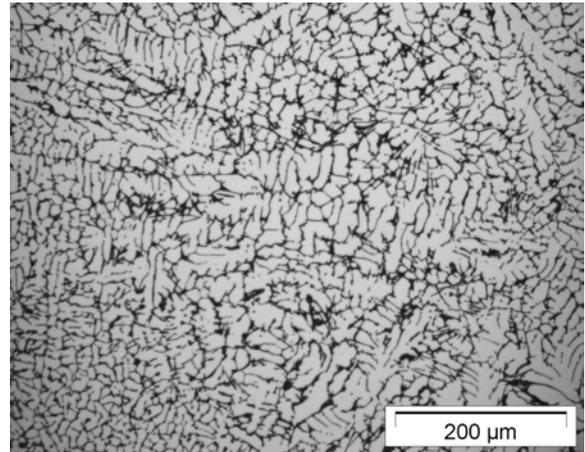
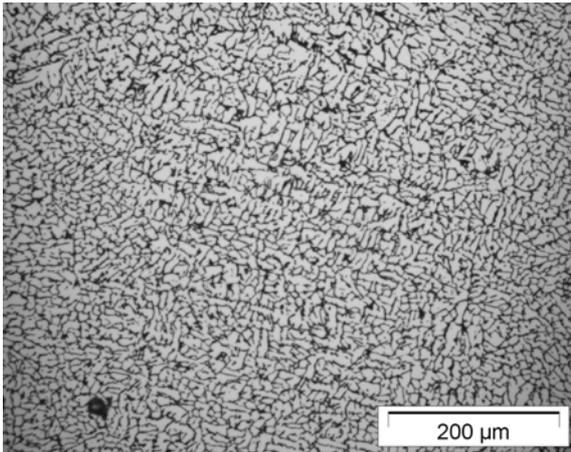
**Abb. 6-2:** DTA- Signal und berechneter Flüssiganteilverlauf des Werkstoffes A,  $T_S = 554^\circ\text{C}$  und  $T_L = 642^\circ\text{C}$

Die Ergebnisse der metallographischen Untersuchungen des Werkstoffes A sind in **Abb. 6-3** und die des Werkstoffes B in **Abb. 6-4** dargestellt.



	Randbereich	Mittenbereich
mittlerer Korndurchmesser, $\mu\text{m}$	19	26
Formfaktor	0,70	0,68
Mittlerer Anteil an eutektischer Phase, %	48	30

**Abb. 6-3:** Ausgangsgefüge und Werkstoffkennwerte des Werkstoffes A (MHD-Vormaterial, A356)



	Randbereich	Mittenbereich
mittlerer Korndurchmesser, $\mu\text{m}$	11	14
Formfaktor	0,46	0,47
mittlerer Anteil an eutektischer Phase, %	48	42

**Abb. 6-4:** Ausgangsgefüge und Kennwerte des untersuchten, korngefeinten Werkstoffes B (A356)

Ein Vergleich der Gefügeaufnahmen von Werkstoff A und B zeigt, dass der konventionell hergestellte Werkstoff A (**Abb. 6-3**) erwartungsgemäß über den gesamten Bolzenquerschnitt eine gröbere  $\alpha$ -Mischkristall Phase aufweist als der korngefeinte Werkstoff B (**Abb. 6-4**). Weiterhin zeigen sich bei Werkstoff A Abweichungen bezüglich der ermittelten Kennwerte im Rand- und im Mittenbereich. Der mittlere Korndurchmesser nimmt vom Randbereich zum Mittenbereich hin offensichtlich deutlich zu. Der Formfaktor ist über den Bolzenquerschnitt für Werkstoff A hingegen nahezu konstant. Zwischen Randbereich und Mittenbereich lässt sich auch eine Abnahme des mittleren eutektischen Phasenanteils beobachten. Werkstoff B zeigt bei allen ermittelten Kenngrößen die gleiche Tendenz wie Werkstoff A, nur liegt der mittlere Korndurchmesser unter dem von Werkstoff A. Werkstoff B zeigt im Vergleich zu Werkstoff A wegen der länglichen Ausbildung der Körner einen schlechteren Formfaktor jedoch einen ähnlichen Anteil an eutektischer Phase.

Welcher Werkstoff ein besseres Wiedererwärmungsverhalten zeigt, und sich damit für das Thixoforming besser eignet, muss mit Hilfe von Abschreckversuchen noch untersucht werden.

Die Ergebnisse aus den Zugversuchen sind in der **Tab. 6-1** und **Tab. 6-2** aufgeführt. Die Streckgrenze  $R_{p0,2}$  und die Zugfestigkeit  $R_m$  des Werkstoffes B ist wegen der Kornfeinung gestiegen. Die Abnahme der Bruchdehnung  $A_5$  ist zum einen auf die längliche dendritenähnliche Ausbildung der Körner, **Abb. 6-3** und **Abb. 6-4**, zum anderen auf den höheren mittleren eutektischen Phasenanteil (**Abb. 6-3** und **Abb. 6-4**) zurückzuführen. Der Vergleich der Festigkeitskennwerte bei den Proben in Längs- und Querrichtung bestätigt die bessere Homogenität des Werkstoffes B. Dieses Ergebnis steht somit im Einklang mit der chemischen Analyse und den Untersuchungen zur Mikrostruktur. Im Vergleich zu Werkstoff A ist bei Werkstoff B die Richtungsabhängigkeit der Streckgrenze und der Bruchdehnung (Quer- oder Längsrichtung) und der Entnahmestelle (Bolzenrand- oder -mitte) geringer. Die Streuung der Zugfestigkeitswerte sind hingegen bei Werkstoff B höher. Das hier untersuchte, korngefeinte Material zeichnet sich insgesamt also im Vergleich zu dem konventionell hergestelltem Material bezüglich der Gefügeausbildung und der mechanischen Kennwerte als homogener Werkstoff aus.

	LR			LM			QM		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
$R_{p0,2}$ [MPa]	132	139	133	127	125	126	132	130	130
$R_m$ [MPa]	251	239	251	245	241	236	242	242	240
A [%]	12,5	10,5	10,3	17,6	17,2	14,2	22,2	21,6	19,0

**Tabelle 6-1:** Mechanische Kennwerte des Werkstoffs A  $R_{p0,2}$ = Streckgrenze,  $R_m$ = Zugfestigkeit  
 $A_5$ = Bruchdehnung

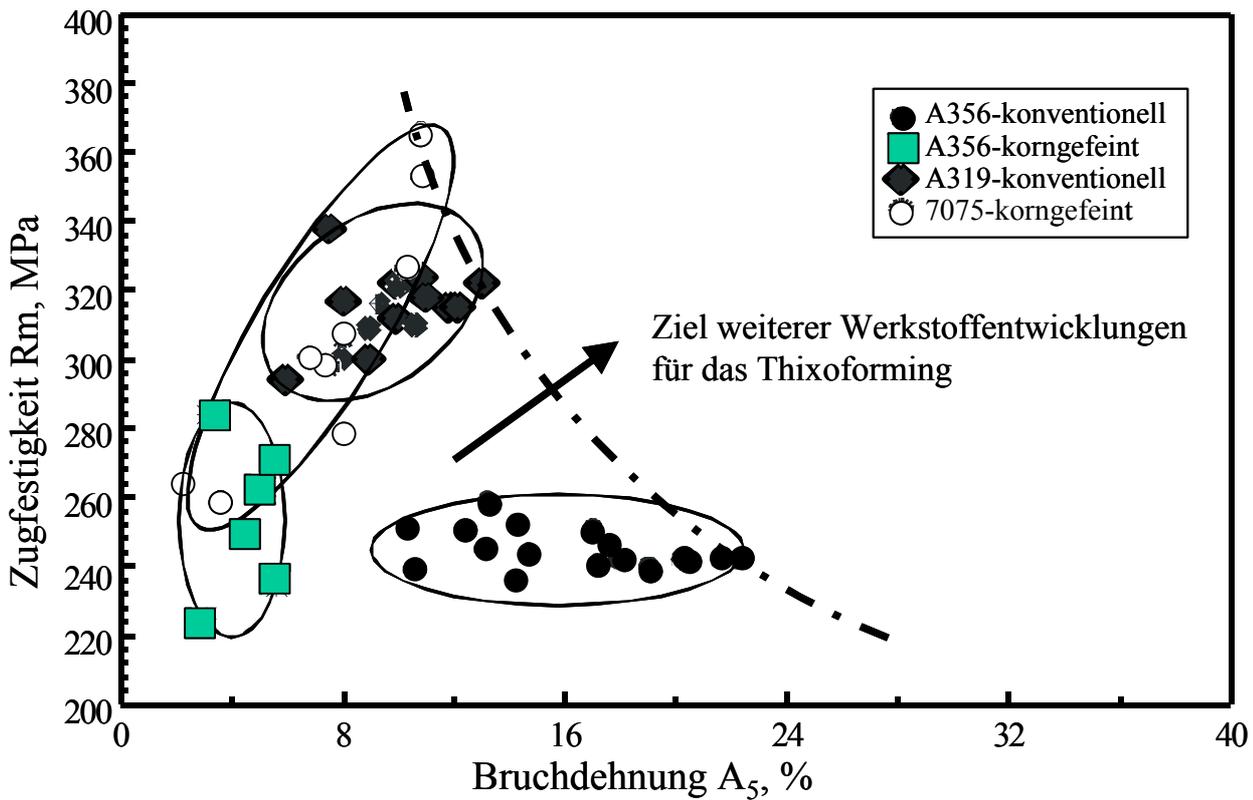
	LR			LM			QM		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
$R_{p0,2}$ [MPa]	150	154	155	151	148	144	150	149	153
$R_m$ [MPa]	284	225	271	234	249	263	249	255	265
A [%]	--	3,1	5,6	--	4,4	5,2	--	5,2	4,8

**Tabelle 6-2:** Mechanische Kennwerte der Werkstoff B  $R_{p0,2}$ = Streckgrenze,  $R_m$ = Zugfestigkeit  
 $A_5$ = Bruchdehnung

Die **Abbildung 6-5** zeigt die Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Bruchdehnung für unterschiedliche Werkstoffvarianten. Um einen Überblick bezüglich der mechanischen Kennwerte unterschiedlicher Werkstoffsorten zu ermöglichen, wurden in diesem Diagramm zwei weitere Werkstoffe dargestellt. Bei diesen Werkstoffen handelt es sich um ein konventionell hergestelltes Vormaterial aus der Gusslegierung A319 (AlSi6Cu3) und korngefeintes Material aus der Knetlegierung 7075 (AlZn5.8MgCu). Für beide Werkstoffe besteht z.Zt. für den Einsatz beim Thixoforming ein Interesse.

Durch die Kornfeinung kann die Festigkeit des Werkstoffes B nicht deutlich gesteigert werden. Das fehlende globulitische Gefüge, sowie der höhere Eisengehalt führt offensichtlich zu schweren Einbußen der Bruchdehnung.

Mit einer Gewährleistung einer optimierten Wiedererwärmungsstrategie kann vermutlich eine bessere Einformung der Dendriten bei der Verarbeitung des Werkstoffes B zu einem verbesserten Werkstoffverhalten führen. Auch eine Modifikation der Legierungszusammensetzung durch eine Verringerung des schädlichen Eisengehalts, Zusatz von Mangan und dem Zusatz von weiteren Legierungselementen, die eine Kornfeinungs-Wirkung und Einformung des Werkstoffes bei der Wiedererwärmung begünstigen, können eine weitere Verbesserung des Werkstoffverhaltens herbeiführen.



**Abb. 6-5:** Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Bruchdehnung für unterschiedliche Werkstoffe

Die bisher untersuchten Werkstoffe lassen sich vereinfachend in zwei Gruppen einordnen. Die einen Werkstoffe, zu denen auch die untersuchte, korngefeinte Gusslegierung vom Typ A356, A319 sowie die korngefeinte Knetlegierung AW7075, zeichnen sich durch hohe Zugfestigkeit bei gleichzeitig mittlerer Bruchdehnung aus. Die konventionelle Gusslegierung A356 zeichnet sich dahingegen durch eine mittlere Zugfestigkeit bei gleichzeitig hoher Bruchdehnung aus. Wünschenswert ist die Entwicklung von Werkstoffen mit hohen Zugfestigkeiten und sehr guten Bruchdehnungswerten (Entwicklungstendenz hier mit einem Pfeil in **Abb. 6-5** angedeutet).

## 7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dieser Arbeit wurden mögliche Auswahl und Bewertungskriterien für Werkstoffe, die bei der Formgebung im teilflüssigen Zustand verwendet werden sollen, vorgestellt. Eine einleitende Verfahrensübersicht zur eigentlichen Vormaterialherstellung verdeutlicht dabei, dass die zur Fertigung eingesetzten Werkstoffe sich deutlich voneinander unterscheiden können. Es wird gezeigt, dass sich ein entsprechender Bewertungskatalog aus einer Vielzahl möglicher Kriterien zusammensetzen kann, der sich vor allem an chemischen, physikalischen, technologischen und weiteren herstellungsbedingten speziellen Eigenschaften zu orientieren hat. Der dazu benötigte Bearbeitungsaufwand und die damit verbundenen Kosten erlauben es jedoch nicht, dass alle vorgestellten Kriterien eine praktische Anwendung finden können, so dass eine Auswahl sinnvoller Kriterien getroffen werden muss.

Am Beispiel eines Legierungstyps (A356- AISi7Mg0.3), der z.Zt. noch am häufigsten beim Thixoforming Anwendung findet, wird ein komprimiertes Bewertungsschema für Vormaterialien zur Formgebung im teilflüssigen Zustand vorgestellt, das sich auf chemisch und metallographische Grunduntersuchungen, Bestimmung der mechanischen Kennwerte und einer Beschreibung des Verhaltens bei einer Erwärmung in den teilflüssigen Zustand beschränkt.

An Hand dieses Beispiels konnte gezeigt werden, dass sich auch für ansonsten sehr ähnliche Werkstoffe, die beispielsweise auch zu einer Legierungsgruppe zählen können, mit Hilfe dieser ausgewählten Untersuchungsmethoden sehr wohl eine Werkstoffcharakterisierung durchgeführt werden kann. Durch einen Vergleich zwischen korngefeintem und konventionellem Vormaterial konnten dabei neue Möglichkeiten für eine weiterführende Entwicklung bestehender Legierungssysteme in Aussicht gestellt werden. Die Definition von Mindestanforderungen an Thixoforming- Werkstoffen soll ein zukünftiges Untersuchungsziel sein, bei dem das hier vorgestellte Bewertungsschema angewendet werden soll.

## 8 DANKSAGUNG

Diese Arbeit wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG, im Rahmen der Förderung des Sonderforschungsbereiches SFB 289 „Formgebung metallischer Werkstoffe im teilerstarrten Zustand und deren Eigenschaften“, unterstützt. Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG für die finanzielle Unterstützung.

## 9 SCHRIFTTUM

- 
- 1 Wabusseg-H; Kaufmann-H; Uggowitzer-P-J; ETH Zürich, CH; Leichtmetall Kompetenzzentrum Ranshofen LKR, A, Struktur und Eigenschaften von 'New Rheocasting- Bauteilen. Zeitschriftenaufsatz: Giesserei, Band 87 (2000) Heft 3, Seite 39-43
  - 2 Ashby-M.F.; Criteria for selection the compontens and composites; Acta metal. Mater. Vol.41; No.5; Seite 1313-1335; 1993
  - 3 M. Garat, L. Maenner, Thixogießen- Erweiterung der Legierungsreihe und Anwendungen, Gießerei 86 (1999), Nr. 5, 14. Mai, S. 76-81.