

---

# Einfluss und Bedeutung chemischer Entmischungen auf mechanische Eigenschaften thixogeformter Bauteile

## Chemical Segregation Effect on Mechanical Properties of Thixo Formed Components

I. Budak, T. Noll, W. Bleck und B. Friedrich

---

Die RWTH Aachen zeichnet sich durch stark interdisziplinär ausgerichtete Forschung auf dem Gebiet der Produktionstechnologie und Werkstofftechnik für Metalle aus. Mit der Einrichtung des SFB 289 „Formgebung metallischer Werkstoffe im teilflüssigen Zustand“ wurde in Aachen neben den USA und Japan auch in Deutschland ein Forschungsschwerpunkt auf dem Gebiet der Formgebung metallischer Werkstoffe im teilerstarrten Zustand geschaffen.

Thixofforming ist ein endabmessungsnahes Formgebungsverfahren, bei dem die Verarbeitung zu Bauteilen im teilflüssigen Zustand erfolgt. Daher können die Vorteile der konventionellen Ur- und Umformprozesse wie Gießen und Schmieden gemeinsam genutzt werden. Gleichzeitig können jedoch für das Thixofforming typische Fehlererscheinungen auftreten. Die chemische Entmischung über ausgedehnte Bauteilbereiche, die als Makroseigerung bezeichnet wird, scheint sich als einer der wichtigsten Fehlererscheinungen beim Thixofforming herauszukristallisieren.

Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss der chemischen Entmischung und der damit verbundenen Gefügeinhomogenität innerhalb eines Bauteils auf die mechanischen Eigenschaften aufzuzeigen und zu bewerten. Die Ergebnisse von Gefügeuntersuchungen und lokalen Elementenverteilungen im Bauteil werden mit Untersuchungen zu den mechanischen Kennwerten aus Zug-, Kerbschlagbiege- und Ermüdungsversuchen korreliert. Abschließend wird die Bedeutung von Makroseigerungen, die unter ungünstigen Umständen beim Thixofforming auftreten können, auf die mechanischen Eigenschaften bewertet. Untersucht werden Prinzip-Bauteile aus den Aluminiumgusslegierungen vom Typ AlSi7Mg0,3 und Al-Si6Cu3.

Schlagworte: Thixofforming, Makroseigerung, mechanische Eigenschaften, Werkstoff-Forschung

---

Thixofforming is a near net shape forming process of semi solid billets with a stiffness, which is comparable to „butter“. Advantages of conventional forming and casting processes can be combined due to this modern forming process technology.

The objective of this investigation is to identify the effect of local chemical segregation regarding the microstructure and mechanical properties in various parts of a component. Different components and component regions – with diverse cross-sections and flow lengths – have been tested.

Tensile, charpy and fatigue tests are completed by metallography and local chemical analysis. The investigation was focused on Al-Si7Mg0.3 and AlSi6Cu3 aluminium casting alloys.

It can be confirmed, that chemical composition of the raw material and segregation are important effects on mechanical properties of components. Chemical segregation can be caused by abrupt changes in cross-section. The inhomogeneity verified by chemical analysis and metallography are important effects on mechanical properties of Thixofforming components.

In future the counteract between metal structure and processing steps regarding mechanical properties of components must be examined more intensively. The aim is to create a fundamental understanding of the relationship between the structure, chemical composition, homogeneity and characteristics of aluminium materials.

Key words: Thixofforming, macro-segregation, chemical inhomogeneity, mechanical properties, materials science

---

## 1 Einleitung

Thixofforming ist ein innovatives Formgebungsverfahren mit hohem Entwicklungspotential. Die Formgebung erfolgt innerhalb des Solidus-/Liquidus-Intervalls und lässt sich daher weder eindeutig den konventionellen Umformverfahren wie z. B. Schmieden noch den Urformverfahren wie zum Beispiel Gießen zuordnen. Aufgrund der Verarbeitung des Werkstoffes innerhalb des Erstarrungsintervalls verspricht das Thixofforming im Vergleich zu konventionellen Bauteilfertigungsverfahren Vorteile. Das Ziel der Einführung dieser Technologie besteht darin, die für das Gießen wesentlichen Vorteile in Bezug auf Gestaltungsfreiheit und Herstellungskosten für Bauteilserien und für Schmieden die sprichwörtlich gute „Schmiedequalität“ – gekennzeichnet durch dichte Gefügestruktur und guten mechanischen Eigenschaften – zugleich nutzbar zu machen.

Die typische Prozessabfolge beim Thixofforming besteht aus der Vormaterialherstellung, die auch die Bereitstellung des teilflüssigen Gemisches beinhaltet, und dem anschließenden Formgebungsschritt. Wie bei den konventionellen Ur- und Umformverfahren kann sich hieran je nach Legierungstyp eine abschließende Wärmebehandlung z. B. zur Aushärtung sinnvoll anschließen. Für die Vormaterialherstellung und Bereitstellung des teilflüssigen Gemisches stehen heute im wesentlichen die beiden Verfahrensrouten über Strangguss und Wiedererwärmung von Stranggussabschnitten – sogenannten Billets – oder das New-Rheo-Casting (NRC)-Verfahren zur Verfügung. Das NRC-Verfahren unterscheidet sich von der üblicheren Methode vor allem in der Temperaturführung während des Prozesses aus einer Hitze und dem dadurch für das NRC-Verfahren günstigeren Energieverbrauch sowie einem geringeren Schrott- und Reststoffanfall. Eine abschließende

Bewertung der beiden Vormaterialherstellungsmethoden ist zur Zeit jedoch nicht möglich [1].

Neben den „thixospezifischen“ Vorteilen sind Risiken beim Einsatz dieser modernen Technologie zu sehen. So besteht in Bezug auf die Prozessstabilität, Sicherstellung der Qualitätsstandards und Vermeidung von Ausschussteilen noch Verbesserungsbedarf. Die Qualität von Thixoformingbauteilen muss sich zum einen durch die Gewährleistung mechanischer Festigkeitseigenschaften in unterschiedlichen Bauteilbereichen, und durch Sicherstellung der Anforderungen über Bauteilserien nachweisen lassen. Das Risiko chemischer Entmischungen und einer damit verbundenen Verschlechterung von Bauteileigenschaften zeichnet sich immer deutlicher als eines der zentralen Herausforderungen beim Thixoforming ab.

Da die thixogeformten Bauteile in ihren Eigenschaften und damit möglichen Anwendungsgebieten mit herkömmlich hergestellten Bauteilen konkurrieren, ist die Bedeutung möglicher Entmischungen auf die Bauteilqualität zu diskutieren.

Dafür müssen Bewertungsmethoden erarbeitet werden, die sich zunächst an Prinzipbauteilen zu orientieren haben. Durch die gewählte Bauteilgeometrie z.B. sprunghaften Querschnittänderungen oder Unterschieden in der Fließlänge, können Entmischungerscheinungen speziell für diese Untersuchungen „proviziert“ werden.

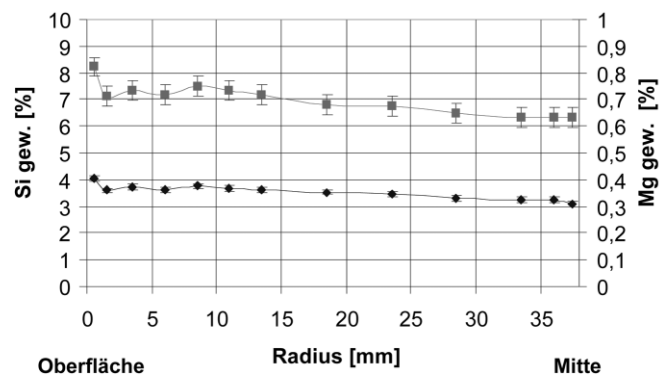
Für die Werkstoffbeschreibung ist das erzielte Gefüge, die chemische Homogenität sowie die damit erreichbare Eigenschaft bei mechanischer Belastung von besonderem Interesse. Ziel dieser Arbeit ist daher zunächst im Rahmen eines „screenings“ die Bestimmung wichtiger Einflussgrößen auf die mechanischen Eigenschaften von Bauteilen. Die Bauteileigenschaften werden im wesentlichen durch „prozessbedingte“ Fehlererscheinungen definiert.

## 2 Versuchsmaterial und experimenteller Teil

Die mechanischen Eigenschaften der durch unterschiedliche Herstellungsverfahren angefertigten Bauteile werden ermittelt sowie Einflüsse auf mechanische Eigenschaften bestimmt. Als Versuchsmaterial werden zwei unterschiedliche Legierungstypen eingesetzt, um beispielhaft einen legierungsspezifischen Einfluss zu berücksichtigen.

Die chemischen Zusammensetzungen der untersuchten Legierungen werden in *Tabelle 1* zusammengefasst.

Als Herstellungsverfahren werden das Thixogießen und das -querfließpressen eingesetzt. Aufgrund der niedrigeren Gießtemperatur beim Thixogießen und der Tatsache, dass ein Teil der Legierung schon vor Gießbeginn erstarrt, sind bei thixogegossenen Bauteilen weniger Poren als bei Druckgussteilen zu erwarten. Beim Thixoquerfließpressen gehört der beim Thixogießen übliche „Anschnitt“ – über den die Legierung bei der Formgebung in das Werkzeug geführt wird – mit zum Bauteil. Dies führt zwar zu einem geringeren Material-

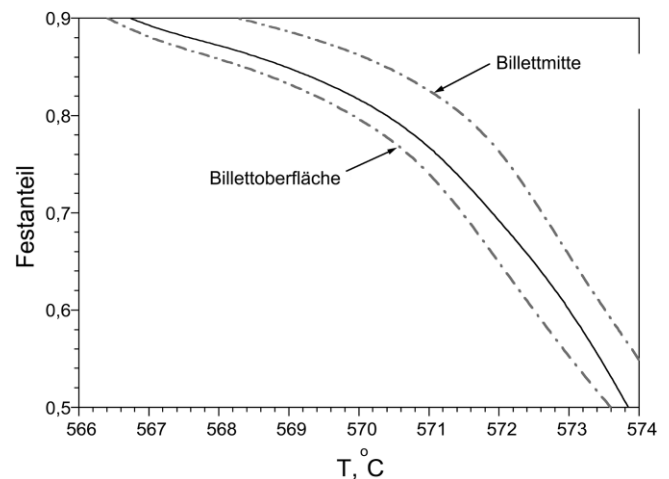


**Abb. 1.** Elementverteilung für Silizium (Si) und Magnesium (Mg) im Ausgangsmaterial am Beispiel A356 (AlSi7Mg0.3), Billettdurchmesser = 76 mm (3")

**Fig. 1.** Chemical homogeneity of the raw material (e. g. A356 – AlSi7Mg0.3), Diameter of the billet = 76 mm (3")

verlust, kann aber auch den Eintrag von Oxiden und anderen möglichen Verunreinigungen begünstigen. Beides wird sich auf die mechanischen Eigenschaften von Bauteilen auswirken.

Die Legierungselemente Silizium und Magnesium reichern sich an der Billettoberfläche des Vormaterials an. Dieser Effekt ist bei Stranggussprodukten unter der Bezeichnung umgekehrte Blockseigerung bekannt.



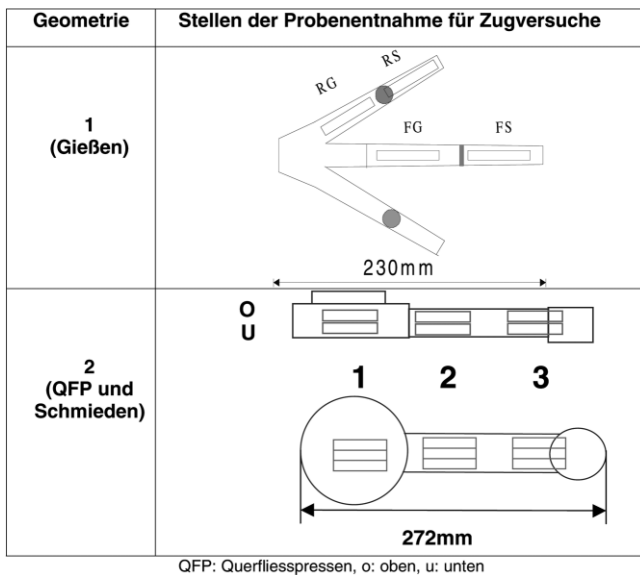
**Abb. 2.** Verringerung des Festanteils bei der Wiedererwärmung unter Berücksichtigung der umgekehrten Blockseigerung, Ausgangsmaterial: A356, Mittellinie gilt für homogene Zusammensetzung, Annahmen: thermodynamischer Gleichgewichtszustand

**Fig. 2.** Thermodynamic equilibrium calculation of solid fraction during reheating with focus on inverse segregation, raw material: A356, center line: homogeneous composition

**Tabelle 1.** Chemische Zusammensetzungen der untersuchten Werkstoffe (alle Angaben in mass. % und ppm)

**Table 1.** Chemical compositions of investigated alloys (mass. % / mass. ppm)

Werkstoff	Elemente								
	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Ni [%]	Zn [%]	Sr [ppm]	Ti [%]
A356 (AlSi7Mg0.3)	7,0	0,13	< 0,01	< 0,01	0,35	< 0,01	0,02	190–255	0,02
A319 (AlSi6Cu3)	7,0	0,15	3,8	0,02	0,37	< 0,01	0,02	200	0,02



**Abb. 3.** Bauteilgeometrien und Probenentnahmestellen für Zugversuche

**Fig. 3.** Geometries of components and sample positions for tensile tests

Die an der Billettoberfläche angereicherten Legierungsbestandteile bewirken bei gleicher Temperatur einen im Vergleich zum restlichen Billett angereicherten Flüssigphasenanteil. Bei der Formgebung wird üblicherweise ein Vormaterial mit einem Festphasenanteil von 40–60% eingesetzt. Dies entspricht für den Werkstoff A356 einer Wiedererwärmungszieltemperatur von etwa 570–580 °C. Für den Werkstoff A319 liegt die Arbeitstemperatur entsprechend bei etwa 545–555 °C. Das verwendete Vormaterial hat für beide verwendeten Werkstoffe einen Außendurchmesser von 76 mm (3"). Der Einfluss unterschiedlicher Vormaterialien, der chemischen Zusammensetzung und Homogenität sowie das Gefüge sind für die Auswahl der Werkstoffe für das Thixoforming wichtige Kriterien und sind für die Verarbeitungseigenschaft während der folgenden Prozessschritte von Bedeutung [1].

Zur Ermittlung der quasistatischen Festigkeitskennwerte werden an den Bauteilen Zugversuche gemäß /DIN EN 10002/ bei RT durchgeführt. Um den Einfluss der Entmischungerscheinungen nachzuweisen, werden die Proben nach einem definierten Muster genommen und im Anschluss daran mit Hilfe eines „Inductive Coupled Plasma“ (ICP) – Gerätes die chemischen Analysen zur Bestimmung der Konzen-

trationsverteilung der Legierungselemente über das Bauteil bestimmt. Die Probenentnahmestellen im Bauteil unterscheiden sich durch Querschnitt und Fließlänge. Die Bauteilgeometrie und die Stellen der Probenentnahmen zeigt *Abb. 3*.

Die Kerbschlagbiegeversuche werden gemäss der europäischen Norm DIN EN 10045 durchgeführt. Bei Bauteilgeometrie 1 wird aus dem Bauteilbereich RG beprobt. Eine Entnahme aus anderen Bauteilbereichen ist nicht geeignet, da ausschließlich genormte Probengeometrien verwendet werden sollen. Bei Bauteilgeometrie 2 kann dahingegen aus allen Bauteilbereichen geeignet beprobt werden. Die Nomenklatur der Probenbezeichnungen zeigt ebenfalls *Abb. 3*.

Die zyklische Biegewechselfestigkeit der Bauteile wird durch Ermüdungsversuche nach DIN 50100 untersucht. Als Prüfkörper werden flache ungerkerbte Prüfstäbe mit den Abmessungen 70 × 10 × 5 mm eingesetzt.

Die Proben werden bei Bauteilgeometrie 1 aus den Bauteilbereichen RG und RS, bei Bauteilgeometrie 2 aus den Bauteilbereichen 2 und 3 entnommen. Als Probenentnahmestellen werden diejenigen Bereiche ausgewählt, in denen die höchsten Zugfestigkeitswerte ermittelt wurden. Als Grenzwertzahl werden die für Aluminiumlegierungen üblichen  $10^7$  Lastwechsel ausgewählt. Für die Ermittlung der Biegewechselfestigkeit werden Versuchsserien mit 15 Proben geprüft. Die Auswertung erfolgt statistisch nach dem Treppenstufenverfahren nach Dixon&Mood [3].

Zur Untersuchung der chemischen Homogenität werden stichprobenartig drei repräsentative Proben einer jeweiligen Bauteil-Variante ausgewählt. Von jedem Bauteil werden dazu zwischen 20 und 30 Proben (Bohrspäne  $\varnothing = 3$  mm,  $h = 5$  mm) entnommen und nasschemisch der Silizium-, Magnesium- und Kupfergehalt bestimmt.

### 3 Ergebnisse und Diskussion

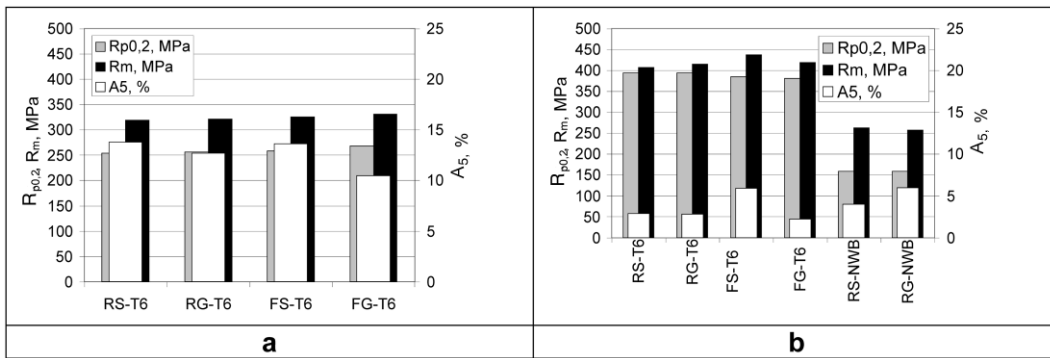
Die Herstellungsparameter der einzelnen Bauteilserien sind *Tabelle 2* zu entnehmen. *Abb. 4a* zeigt die quasistatischen Festigkeitseigenschaften von thixogegossenen Bauteilen aus der Legierung A356. Die Versuchsergebnisse dieser Bauteile zeigen eine homogene Verteilung der Festigkeitswerte über das gesamte Bauteil. In unterschiedlichen Bauteilbereichen werden Streckgrenzen zwischen 255 bis 270 MPa und Zugfestigkeitswerte zwischen 320 und 330 MPa ermittelt. Die Bruchdehnung liegt zwischen 11 und 14%. Bei den metallographischen Gefügeuntersuchungen werden keine signifikanten Abweichungen der Gefügebestandteile ( $\alpha$ -Aluminium und eutektische Al-Si-Phase) festgestellt. Diese Beobachtung wird

**Tabelle 2.** Herstellungsparameter einzelner Bauteilserien

**Table 2.** Production parameter for several components

Legierung	AlSi7Mg0.3	AlSi6Cu3	AlSi7Mg0.3
Verfahren	G	G	Q
Billettemperatur	591 °C	569 °C	585 °C
Schmiermittel	W7000	W7000	Bornitrid
Oxidhautentfernung	ja	ja	nein
Pressgeschwindigkeit	50 mm/s	50 mm/s	70 mm/s
kleinster Querschnitt	$\varnothing \sim 15$ mm	$\varnothing \sim 15$ mm	$\sim 35 \times 30$ mm
Haltezeit bei der Wiedererwärmung	8 s	11 s	15 s
Werkzeugtemperatur	200 °C	210 °C	250 °C

G Thixogegossen; Q Thixoquerfließgepresst



**Abb. 4a.** Festigkeits- und Dehnungswerte der Legierung A356; thixogegossen; Bauteilgeometrie 1; Wärmebehandlung: T6

**Fig. 4a.** Strength and elongation values of alloy A356; thixo casted; component geometry 1; heat treatment: T6

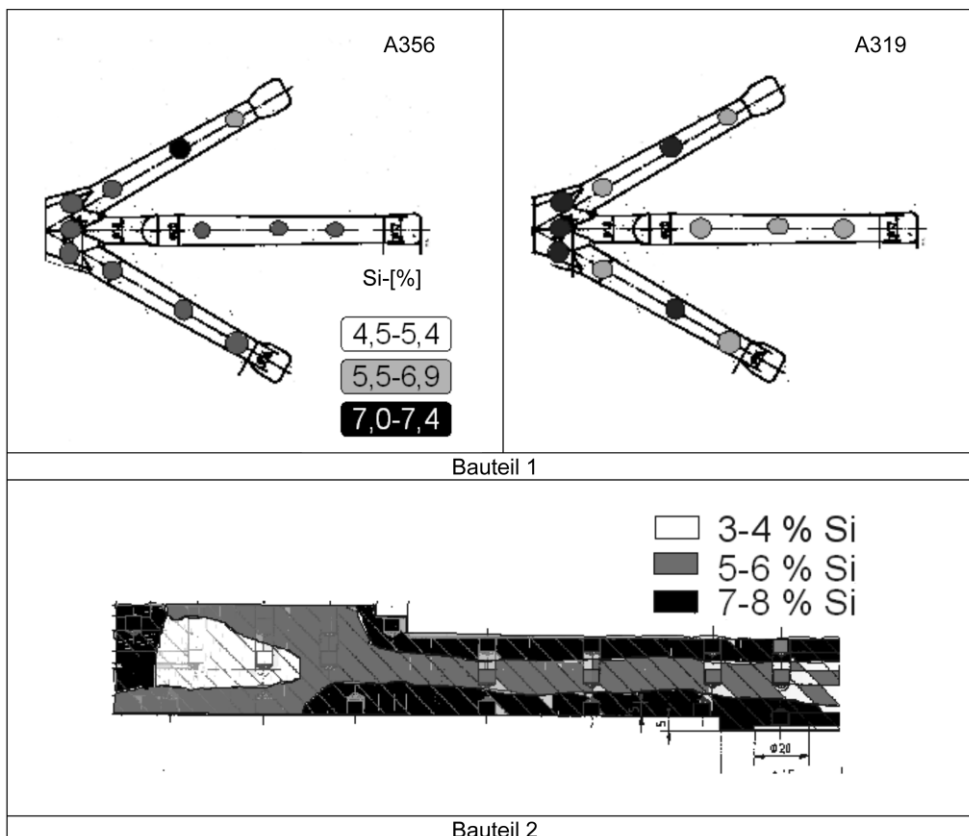
**Abb. 4b.** Festigkeits- und Dehnungswerte der Legierung A319; thixogegossen; Bauteilgeometrie 1; Wärmebehandlung: T6 und nicht WB

**Fig. 4b.** Strength and elongation values of alloy A319; thixo casted; component geometry 1; heat treatment: T6 and not

auch durch die chemischen Analysen bestätigt. Über das gesamte Bauteil werden Si-Gehalte von 6,5 bis 7,5% nachgewiesen (Abb. 5).

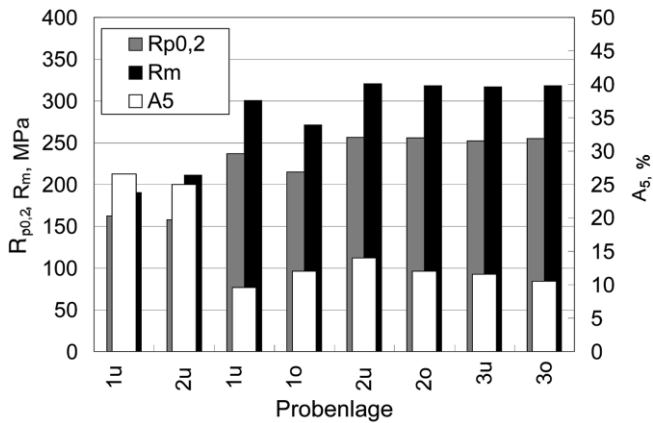
Bei dieser geringen Schwankung der Legierungselementgehalte ist die Entmischung als unbedeutend zu bewerten und ein homogenes Bauteil zu erwarten. Auswirkungen auf die mechanischen Kennwerte konnten nicht nachgewiesen werden. Die geringe Streuung der Bruchdehnung kann auf Mikroporen (etwa 5–10 µm) zurückgeführt werden, die durch eine metallographische Untersuchung festgestellt werden konnten.

Abb. 6 zeigt quasistatische Festigkeitseigenschaften der Proben aus der thixoquerfließgepressten Legierung A356 – Bauteilgeometrie 2. Die Versuchsergebnisse zeigen bei den wärmebehandelten Bauteilen eine homogene Verteilung der Festigkeitseigenschaften in den Bereichen 2 und 3. Im Bereich 1 wird dagegen eine deutlich geringere Festigkeit ermittelt. Über das gesamte Bauteil werden Streckgrenzen zwischen 215 bis etwa 260 MPa, Zugfestigkeitswerte zwischen 270 bis 320 MPa und Bruchdehnungen zwischen 10 und 15% bestimmt. Bei den nicht wärmebehandelten Proben werden nur



**Abb. 5.** Verteilung des Si-Gehalts in den Bauteilen (in mass. %)

**Fig. 5.** Distribution of Si-content in the component (mass. %)



**Abb. 6.** Festigkeits- und Dehnungswerte aus unterschiedlichen Bauteilbereichen; Bauteilgeometrie 2; A356, thixoquerfließgepresst; Wärmebehandlung: T6 und nicht WB

**Fig. 6.** Strength and elongation values in several component parts; component geometry 2; thixo transverse impact extruded; heat treatment: T6 and not treated

die Bereiche 1 und 2 untersucht, um eine Vergleichsgrundlage zwischen den wärmebehandelten und nicht wärmebehandelten Proben aufzubauen. Hierbei werden Streckgrenzen zwischen etwa 160 und 165 MPa, Zugfestigkeitswerte zwischen

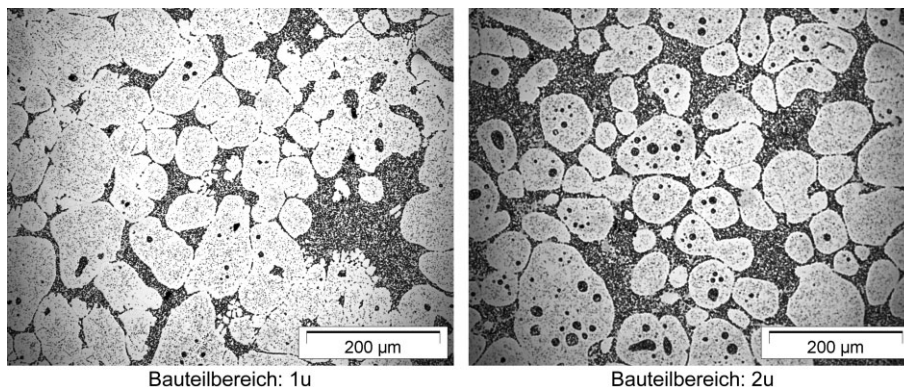
190 bis 210 MPa sowie Bruchdehnungen zwischen 25 und 27% ermittelt.

Abb. 7 zeigt hierzu ergänzend die Gefügeausbildung der Bauteilbereiche 1u und 2u im wärmebehandelten Zustand (T6). Das Gefüge des Bereichs 1u zeigt deutlich weniger Eutektikum (10%) als im Bereich 2u (35%). Bereich 1 ist identisch mit dem Einlegebereich des Bauteils, aus dem zu Beginn der Umformung die flüssige Phase – das spätere Eutektikum –, offensichtlich herausgedrückt wurde. Dieses führt zu einer Verarmung an eutektischer Phase, geringeren Siliziumgehalt und damit zu einer verminderten Festigkeit.

Diese Entmischung wird auch durch die chemische Analyse bestätigt. Im Bereich 1 ist der Siliziumgehalt bis auf einen Gehalt von 3% vermindert worden (Abb. 5). (ansonsten durchschnittlich 7% Si).

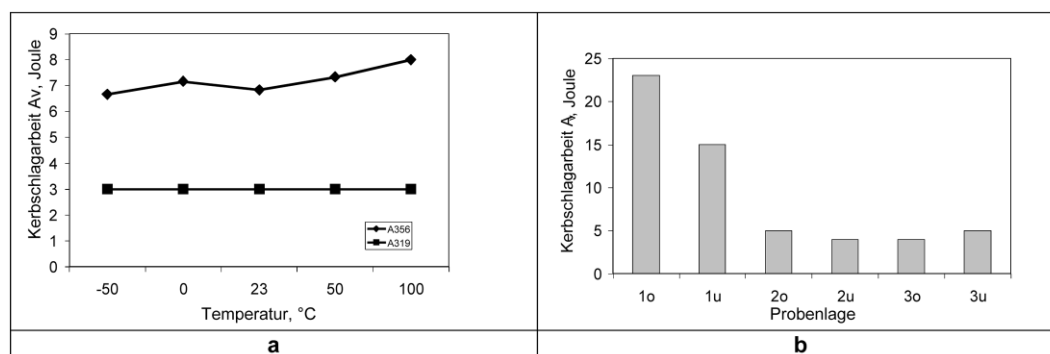
Abb. 4b zeigt die quasistatischen Festigkeitseigenschaften der thixogegossenen Legierung A319-Bauteilgeometrie 1. Die Streckgrenze und die Zugfestigkeitswerte der wärmebehandelten Bauteile zeigen eine homogene Verteilung der Messergebnisse über den gesamten Bauteilbereich. Damit werden die Ergebnisse zum Werkstoff AlSi7Mg0.3 bestätigt. Es werden Streckgrenzen zwischen 380 bis 395 MPa und Zugfestigkeiten zwischen 405 bis 440 MPa ermittelt. Die Bruchdehnungen liegen zwischen 2,2 bis 5,9% (Abb. 5). Das Bauteil ist als homogen zu bezeichnen.

Die Kerbschlagarbeit-Temperatur-Verläufe der Proben aus den thixogegossenen Legierungen A356 und A319 im wärmebehandelten Zustand sind in Abb. 8a wiedergegeben.



**Abb. 7.** Gefügeausbildung aus unterschiedlichen Bauteilbereichen; Bauteilgeometrie 2; A356, thixoquerfließgepresst; Wärmebehandlung: T6 und nicht WB

**Fig. 7.** Microstructure in several component parts; component geometry 2; thixo transverse impact extruded; heat treatment: T6 and not treated

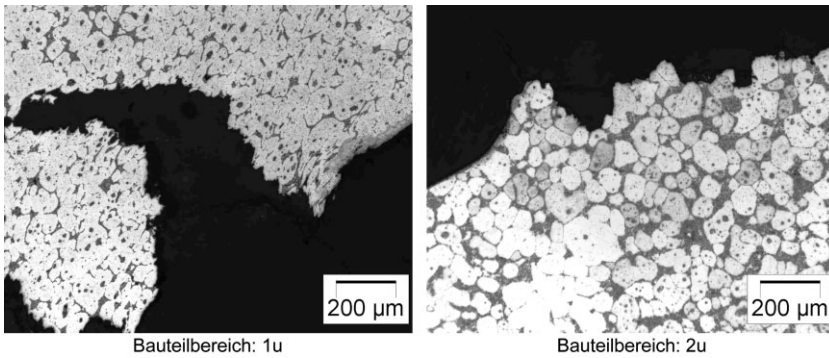


**Abb. 8a.** Kerbschlagarbeit-Temperatur-Verläufe der Proben aus der thixo-gegossenen Legierungen; Bauteilgeometrie 1; Wärmebehandlung: T6

**Fig. 8a.** Charpy energy-temperature-characteristics of thixo casted alloys: component geometry 1; Heat treatment: T6

**Abb. 8b.** Kerbschlagarbeit in unterschiedlichen Bauteilbereichen der Bauteilgeometrie 2; A356; Wärmebehandlung: T6; thixoquerfließgepresst

**Fig. 8b.** Charpy energy in several parts of component 2; A356; heat treatment: T6; thixo transverse impact extruded



**Abb. 9.** Bruchbilder aus unterschiedlichen Bauteilbereichen; Kerbschlagbiegeversuch; A356; thixoquersfließgepresst; Bauteilgeometrie 2; Wärmebehandlung: T6

**Fig. 9.** Damaged samples from several component parts; charpy impact test; A356; thixo transversal impact extruded; component geometry 2; Heat treatment: T6

Eine Abhängigkeit der Kerbschlagarbeit von der Temperatur kann nicht nachgewiesen werden. Generell ist aber die Kerbschlagarbeit für den Werkstoff A319 niedriger als für A356. Die niedrige Kerbschlagarbeit (Legierung A319) stimmt mit den ermittelten niedrigen Bruchdehnungswerten dieses Legierungstyps überein.

Da sich bei den Ergebnissen der bisherigen Versuchsserien (Abb. 8a) bereits erkennbar abzeichnet, dass die Temperatur keinen signifikanten Einfluss auf die Kerbschlagarbeit für beide untersuchten Werkstoffe hat, werden weitere Untersuchungen für den Werkstoff A356 – Bauteilgeometrie 2 verworfen.

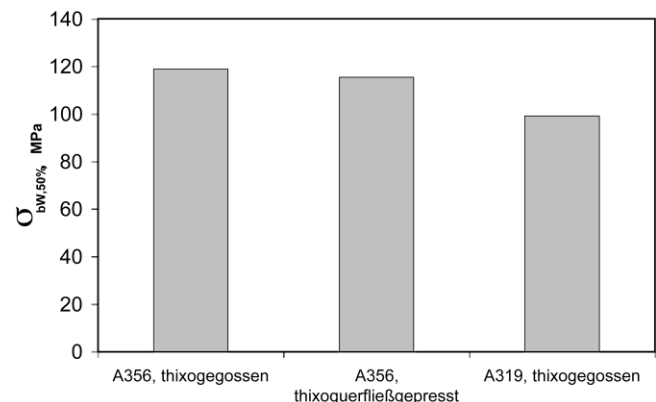
Der Einfluss der Makroseigerungen auf das Zähigkeitsverhalten soll ebenfalls untersucht werden. Die Bauteilgeometrie 2 ist für die Untersuchung besonders geeignet, da sowohl durch die chemische Analyse als auch durch den Gefügebefund eine deutliche Entmischung nachgewiesen wird. Um die Vergleichsmöglichkeit zu verbessern, werden die Proben nach dem gleichen Muster für die Zugproben gekennzeichnet und bei RT auf die notwendige Kerbschlagarbeit geprüft (Abb. 8b).

Der Einfluss der Gefügeentmischungen auf die Zähigkeit ist deutlich größer als auf die quasistatische Festigkeitseigenschaften. Im Bauteilbereich 1 werden bis zu fünf mal größere Kerbschlagarbeiten gemessen als in den Bauteilbereichen 2 und 3. Die Kerbschlagarbeitswerte innerhalb des Bereichs 1 streuen auch untereinander. Das ist darauf zurückzuführen, dass sich innerhalb dieser ausgedehnten Bauteilbereiche auch Unterschiede zwischen den Legierungselementgehalten nachweisen lassen (Abb. 5).

In Abb. 9 sind typische Bruchformen der Proben aus verschiedenen Bauteilbereichen nach dem Kerbschlagbiegeversuch wiedergegeben. Bei der Probe aus dem Bereich 1u – mit deutlich geringerem  $\alpha$ -Phasenanteil – ist ein ausgeprägter Anteil mit plastischer Verformung zu erkennen. Im Vergleich hierzu ist der Anteil an plastischer Verformung im Bereich 2u deutlich geringer. Die höhere plastische Verformung führt erwartungsgemäß zu einer höheren Energieaufnahme, wodurch die Kerbschlagbiegearbeit entsprechend höher ausfällt. Im Bauteilbereich 2u ist ein interkristalliner Bruch zu erkennen, während bei der Probe 1u sich die Körner deutlich gestreckt haben und hauptsächlich transkristallin versagt haben. Für den Fall, dass die  $\alpha$ -Aluminiumphase (weiß) in der eutektischen Phase (grau) gleichmäßig verteilt und vollständig umgeben ist, breitet sich der Riss vorzugsweise durch die sprödere eutektische Phase – ohne nennenswerte plastische Verformung – aus. Wenn aber in einem Bauteilbereich eine Ansammlung der  $\alpha$ -Aluminiumphase vorliegt, wird ein einmal initiiertes Riss an der  $\alpha$ -Phasengrenze gestoppt und kann erst dann weiter laufen, wenn das Korn durch die plastische Verformung der Matrix getrennt wird. Durch diesen Mechanismus werden die genannten unterschiedlichen Rissverläufe getragen.

In Abb. 10 sind die Biegewechselfestigkeitswerte der thixogeformten Legierungen für eine 50%ige Überlebenswahrscheinlichkeit wiedergegeben. Bei der Legierung A356 werden die höchsten Dauerfestigkeitswerte ermittelt. Beide Bauteilserien zeigen ähnliche Wechselfestigkeitswerte. Die thixogegossene und thixoquersfließgepresste Serie zeigen ähnliche Biegewechselfestigkeitswerte (Thixocasting: 116 MPa; Thixoquersfließpressen: 119 MPa). Obwohl die quasistatische Festigkeit der Legierung A319 höher ausfällt als für die Legierung A356, ist die Biegewechselfestigkeit dieses Legierungstyps doch deutlich niedriger (100 MPa). Die Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche zeigen, dass diese Legierung spröde Werkstoffeigenschaften aufweist. An spröden Proben zeigt sich wegen der Kerbwirkung bei zyklischer Belastung die hohe Kerbempfindlichkeit. Die hier untersuchten Proben weisen zwar keine eigentlich geometrischen Kerbe auf; im Vergleich zu den Bauteilen aus A356 wird aber eine höhere Anzahl an Bauteil- und Gefügefehlern, die als Werkstoffkerbe interpretiert werden können, metallographisch nachgewiesen.

Nach DIN EN 1706 beträgt die Zugfestigkeit für druckgegossene Bauteile der Legierung A356 > 250 MPa und für die Legierung A319 > 160 MPa bei Bruchdehnungswerten von  $A_5$ : > 8 % (A356) und  $A_5$ : 1–3% (A319). Ein Vergleich mit den hier untersuchten thixogeformten Bauteilen zeigt, dass die untersuchten Thixofarmingbauteile ähnlich gute mechanische Eigenschaften wie druckgegossene Bauteile aufweisen und in den homogenen Bauteilbereichen deutlich bessere Ergebnisse erzielen. Durch unterschiedliche Wärmebehandlungsstrategien können die quasistatischen Eigenschaften



**Abb. 10.** Biegewechselfestigkeiten der thixogeformten Legierungen bei 50% Überlebenswahrscheinlichkeit;  $R = -1$ ;  $N_G = 10^7$

**Fig. 10.** Bending fatigue strength of thixo formed alloys at 50% survival probability;  $R = -1$ ; number of cycles  $10^7$

**Tabelle 3.** Typische Fehlererscheinungen von Thixobauteilen im Vergleich zu konventionellen Schmiede- und Gußbauteilen  
**Table 3.** Representative defects of Thixoforming components in comparison to conventional forging and casting

	Thixoforming	Gießen	Schmieden
Stofffluss	laminar	laminar bis tubulent	(laminar)
Gefüge nach der Formgebung	globulitisch	dendritisch	Verformungsgefüge
Bauteil-Schrumpfung	gering	hoch	gering
Nachbearbeitungsaufwand	gering	normal	hoch
Typische Bauteilfehler	Makroseigerungen/Entmischungen, Mikrolunker, Risse	homogen, Poren und Lunker	weitgehend homogen, sehr dichtes Gefüge, kaum Mikrolunker oder Risse

ten der thixogeformten Legierung vom Typ A356 (Al-Si7Mg0.3) und A319 (AlSi6Cu3) bereits heute in einem breiten Spektrum gezielt eingestellt werden [4, 9]. Das bessere Ermüdungsverhalten der thixogeformten im Vergleich zu druckgegossenen Werkstoffen ist auf die verminderte Porenanteil, auf das globulare Gefüge und auf Vermeidung der Ausbildung der plattenförmigen  $\beta$ -Al<sub>3</sub>FeSi und nadelförmigen Al<sub>15</sub>(Fe-, Mn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> Phasen aufgrund der hohen Abkühlgeschwindigkeit während der Formgebung zurückzuführen [5].

Die eigenen Untersuchungen und weitere Literaturangaben haben gezeigt, dass die mechanischen Eigenschaften der thixogeformten Bauteile aus Aluminium-Legierungen, mit denen aus konventionell hergestellten Bauteilen zumindest vergleichbar bzw. besser sind [6–9].

*Tabelle 3* zeigt für das Thixoforming, Gießen und Schmieden wichtige Fertigungs-Charakteristika unter besonderer Berücksichtigung typischer Fehlererscheinungen.

Beim Thixoforming können im Vergleich zu konventionellen Bauteilherstellungsverfahren mit Hilfe des Gießen und Schmieden vor allem Makroseigerungen als typische Fehlererscheinungen auftreten. Daneben können jedoch die beim Gießen möglichen Fehler Poren und Lunker sowie die bei der Erstarrung auftretende Bauteilschrumpfung vermindert werden. Die mit Hilfe des Schmiedens einstellbare Bauteilqualität lässt sich jedoch mit Hilfe des Thixoforming nicht erreichen. Dafür zeichnet sich das Thixoforming jedoch durch seine Gestaltungsfreiheit und die Möglichkeit zur endabmessungsnahen Bauteilgeometrie aus.

## 4 Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden quasistatische und zyklische Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften thixogeformter Bauteile in Abhängigkeit von dem verwendeten Legierungstyp, dem Verarbeitungsverfahren und unter dem Einfluss von Seigerungserscheinungen untersucht. Entmischungen können ebenso wie die chemische Zusammensetzung der Legierungen als wichtige Einflussgrößen auf die mechanischen Eigenschaften von Bauteilen bestätigt werden und können beim Thixoforming durch abrupte Querschnittänderungen provoziert werden. Die Bauteilgeometrie sowie das angewendete Formgebungsverfahren – Thixocasting/Thixoquerfließpressen – sind von großer Bedeutung.

Die in den Untersuchungen mit Hilfe von chemischen Analysemethoden oder metallographischen Untersuchungen nachgewiesenen Entmischungen sind für die mechanischen Eigenschaften von Bedeutung.

Der Einfluss der Entmischungen ist hierbei vor allem für das Zähigkeitsverhalten wichtig; quasistatische Festigkeitseigenschaften werden eher weniger betroffen. Mit Kerbschlagbiegeversuchen wird gezeigt, dass die Kerbschlagarbeit der untersuchten thixogeformten Aluminiumlegierungen in dem Temperaturbereich von – 50 °C bis 100 °C keine nennenswerte Abhängigkeit von der Temperatur zeigt. Die Versuche an den thixoquerfließgepressten und anschließend T6-wärmebehandelten Bauteilen haben ergeben, dass die verfahrensbedingten Makroseigerungen einen wichtigen Einfluss auf die Kerbschlagarbeit haben. Bei den Bauteilbereichen mit Silizium- bzw. Eutektikumverarmung im Einlegebereich werden bis zu fünf mal größere Kerbschlagarbeiten gemessen als in den anderen Bereichen.

Die Legierung A356 weist im Vergleich zur Legierung A319 höhere Bruchdehnungs- und Kerbschlagarbeitswerte auf. Die zyklische Festigkeit der Legierung A356 ist aufgrund der geringen Kerbanfälligkeit hoch. Die Legierung A319 weist zwar die höchste quasistatische Festigkeit auf; aufgrund der niedrigen Zähigkeit ist die Kerbempfindlichkeit aber unter schlagartiger zyklischer Belastung hoch. Deshalb hat diese Legierung eine geringere Schwingfestigkeit als die Legierung A356.

Entmischung haben somit unabhängig vom verwendeten Werkstoff und Formgebungsverfahren einen offensichtlichen Einfluss auf das Zähigkeitsverhalten, das mit Hilfe von Kerbschlagbiegeversuchen, untersucht werden kann.

Entmischungen lassen sich mit Hilfe chemischer Analysen und metallographischen Untersuchungen nachweisen. Mit Hilfe metallographischer Untersuchungen lassen sich neben dem Vorhandensein unterschiedlicher Legierungsbestandteile auch Poren und Verunreinigungen z. B. durch Oxide nachweisen.

Die Wechselwirkung zwischen der inneren Metallstruktur mit Verarbeitungsschritten und -verfahren sowie resultierenden Eigenschaften der Produkte muss in Zukunft deutlich intensiver untersucht werden. Das Ziel ist ein grundlegendes Verständnis der Beziehung zwischen der Struktur und den Eigenschaften von Aluminiumwerkstoffen bei der Verarbeitung zu schaffen. Hieraus resultieren für die Zukunft ein gezieltes Suchen nach einer entsprechend optimierten Kombination von Legierungszusammensetzungen, Herstellungs- und Verarbeitungsverfahren auch mit dem Ziel, das technische Niveau der Endprodukte zu heben und gleichzeitig ein robustes System zwischen Werkstoff und Verarbeitungsschritt zu gewährleisten. Dabei soll der Prozess einen möglichst großen Arbeitsbereich aufweisen, um die Produkteigenschaften reproduzierbar in einem engen Qualitätsbereich zu halten.

## 5 Danksagung

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

Gedankt wird auch der ehem. Gesellschaft für Ur- und Umformtechnik GmbH (EFU) in Simmerath und dem Institut für Bildsame Formgebung der RWTH Aachen (IBF) für die Bereitstellung der Versuchsbauteile.

## 6 Schrifttum

1. Noll, T., Friedrich, B., Meuser, H., Budak, I., Auswahl und Bewertung von Werkstoffen zur Formgebung im teilflüssigen Zustand, *Giesserei* 88 (2001), Nr. 8; S. 60–66.
2. Kopp, R. et al., RWTH Aachen, SFB 289 „Formgebung metallischer Werkstoffe im teilerstarten Zustand und deren Eigenschaften, Arbeits- und Ergebnisbericht 1999/2000/2001.
3. Hück, M., Ein verbessertes Verfahren für die Auswertung von Treppenstufenversuchen. *Z. Werkstofftech.* 14 (1983) 406–417.
4. Winterbottom, W.L., Semi-Solid Forming applications: High Volume Automotive Products, Proc. 6th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Turin, September 2000, S. 73–78.
5. Samuel, A.M., Samuel, F.H., A metallographic study of porosity and fracture behaviour in relation to the tensile properties in 319.2 end chill casting, *Metallurg. Mater. Trans. A*, Vol. 26A (1995) 2359–2372.

6. Chiarmetta, G., Thixoforming of automobile components, Proc. 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Sheffield, June 1996, S. 204–207.
7. Idegomeori, T., Hirono, H., Ito, O., Kimishima, S., Mizoue, K., The Manufacturing of automobile Parts Using Semi-Solid Metal Processing, Proc. 5th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Golden Colorado, June 1998, S. 71–77.
8. Sukumaran, K., Pillai, S.G.K., Ravikumar, K.K., Praveen, K.S., Kelukutty, V.S., Soman, T., Microstructure and mechanical properties of mechanically stirred Al-7Si-0.3Mg Alloy in Stir Cast and thixoforged conditions, Proc. 5th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Golden, Colorado, June 1998, S. 379–385.
9. Bergsma, S.C., Kassner, M.E., Evangelista, E., Cerri, E., The Optimized Tensile and Fatigue Properties of Electromagnetically Stirred and Thermally Transformed Semi-Solid 357 and Modified 319 Aluminium Alloys Semi-Solid Forming applications-High Volume Automotive Products: Proc. 6th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Turin, September 2000, S. 319–324.

Univ. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bleck, Dipl.-Ing. Irfan Budak, IEHK Institut für Eisenhüttenkunde, RWTH Aachen, –Intzestr. 1, 52072 Aachen

Univ. Prof. Dr.-Ing. Bernd Friedrich, Dipl.-Ing. Tony Noll, IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling, RWTH Aachen Intzestr. 3, 52072 Aachen

Eingangsdatum für endgültige Form: 23.7.02 [T 524]

## DVM-Arbeitskreis „Bruchvorgänge“

### Ermüdungsrischwachstum

Im Zusammenhang mit der 35. Tagung des Arbeitskreises Bruchvorgänge veranstaltet der DVM dieses Seminar

17. Februar 2003

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik Freiburg (i. Breisgau)

- Welche Faktoren bestimmen den Rissausbreitungswiderstand eines Werkstoffs?
- Wie werden die zyklischen Risspitzenbeanspruchungen berechnet? Wie werden die Einflüsse von Risschließeffekten, Eigenspannungen, Mixed-Mode-Belastungen und Grenzflächen in Werkstoffverbunden berücksichtigt?
- Welche Treffsicherheit kann von bruchmechanischen Lebensdauerberechnungen erwartet werden?
- Welche Softwarepakete sind zur Lebensdauerberechnung von Bauteilen mit Rissen verfügbar?  
Das Vortragsprogramm umfasst folgende Themen (schriftliche Ausarbeitungen werden zu Beginn des Seminars ausgegeben):
- Einführung in die Ermüdungsbruchmechanik
- Ermüdungsrisssausbreitung in Werkstoffverbunden, in und an Grenzflächen
- Schwingungsrissskorrosion und Kriechermüdungsrisssausbreitung
- Mess- und Auswerteverfahren zur Analyse und Bewertung der Ermüdungsrisssausbreitung
- Lebensdauerberechnung bei kleinen/kurzen Rissen sowie Rissen in/an Kerben

- 3D-Simulation von Rissausbreitungsvorgängen und Lebensdauerberechnung bei variablen Amplituden
  - Demonstration einer bruchmechanischen Lebensdauerrechnung mit verfügbaren Softwarepaketen
  - Beispiele zur Berechnung der Restfestigkeit, Festlegung von Inspektionsintervallen, Analyse von Schadensfällen
- Interessenten an dem Weiterbildungsseminar wenden sich bitte an den Leiter der Gemeinschafts-AG „Materialermüdung“ von dVM und DGM
- Prof. Dr. rer. nat. Michael Schaper  
Institut für Werkstoffwissenschaft der TU Dresden  
D-01062 Dresden  
Telefon: (03 51) 46 33-37 20-33 32 – Telefax: (03 51) 46 33-32 07  
E-Mail: schaper@mailbox.tu-dresden.de  
oder an  
Dr.-Ing. Hubert Döker  
DLR, Institut für Werkstoffforschung  
Linder Höhe, D-51147 Köln  
Tel: + 49-22 03-6 01-25 45, Fax: + 49-22 03-69 64 80  
E-Mail: hubert.doeker@dir.de

Das endgültige Programm des Weiterbildungsseminars wird allen Interessenten rechtzeitig zugeschickt. Aktuelle Informationen finden Sie auf den Internet-Seiten:

DVM: <http://www.dvm-berlin.de/events.html>  
TU Dresden: <http://www.tu-dresden.de/mwivw/wz/dvm-wb-seminar>

Anschließend an das Weiterbildungsseminar findet am 18. und 19.02.2003 die 35. Tagung des DVM-Arbeitskreises „Bruchvorgänge“ statt. Die Teilnahme an der Tagung kann unabhängig von einer Teilnahme am Seminar erfolgen.