Rapid Manufacturing von Aluminium-bauteilen für die Serienproduktion durch Selective Laser Melting (SLM)

D. Buchbinder[1], W. Meiners[1], K. Wissenbach[1] K. Müller-Lohmeier[2], E. Brandl[3]

[1]Fraunhofer-Institut für Lasertechnik Aachen (ILT)

Steinbachstr. 15, 52074 Aachen, Deutschland
Tel.: +49 241 8906 100
Fax: +49 241 8906 121
E-Mail: damien.buchbinder@ilt.fraunhofer.de

[2]Festo AG & Co. KG, [3]EADS Deutschland GmbH, Germany

Abstract

Das Generative Fertigungsverfahren Selective Laser Melting (SLM) wird zur direkten Herstellung von metallischen Funktionsbauteilen industriell eingesetzt. Sowohl in der Dentaltechnik als auch im Werkzeugbau ist das SLM für Serienanwendungen zunehmend etabliert. Die industrielle Akzeptanz und Anwendungsbreite hängt u. a. von der Bandbreite der verarbeitbaren Werkstoffe und der Kenntnis der mechanischen Eigenschaften der Bauteile ab. Für die Verarbeitung von Stahl- und Titanwerkstoffen liegen Untersuchungen zur Prozessführung und den resultierenden mechanischen Eigenschaften, der per SLM hergestellten Bauteile vor. Am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT) wird derzeit das SLM für die Aluminiumdruckgusslegierung AlSi10Mg qualifiziert. Für serienidentische Funktionsprototypen, Einzelteile und Kleinserien stellt die Generative Fertigung mittels SLM eine wirtschaftliche Alternative zur formgebundenen Fertigung wie z.B. Druckguss dar. Der Einsatz der generativ gefertigten Bauteile für diesen Bereich bedingt, dass die mechanischen Eigenschaften mit denen der konventionell gefertigten Bauteile vergleichbar sind. Der Einfluss von Verfahrensparametern und Wärmebehandlung auf das Gefüge und daraus resultierenden mechanischen Eigenschaften wird vorgestellt.

1 Einleitung

Aluminiumlegierungen haben aufgrund ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften ein weites Anwendungsgebiet, z.B. in der Automobilindustrie, Automatisierungstechnik oder Luft- und Raumfahrt. Aluminiumlegierungen zählen nach Stahl zu den am häufigsten eingesetzten Metalllegierungen. Das Bestreben das Gewicht von Bauteilen zu minimieren, ohne deren Funktion zu beeinträchtigen, bei einer gleichzeitig erhöhten Wirtschaftlichkeit der Fertigung führt immer häufiger dazu, dass Aluminiumbauteile in einem Produkt eingesetzt werden. Als Fertigungsverfahren für Großserien wird typischerweise der Druckguss eingesetzt. Für bestimmte Anwendungen, wie z.B. serienidentische Funktionsprototypen, Einzelteile und Kleinserien kann sich die Generative

Fertigung als vorteilhaft und wirtschaftlich darstellen.
Deshalb wird in Kooperation mit Partnern aus Forschung und Industrie im BMBF Vorhaben „Generative Fertigung von Aluminiumbauteilen für die Serienproduktion (AluGenerativ)“ das SLM für die Verarbeitung von Aluminiumwerkstoffen weiterentwickelt und qualifiziert. Erste Bauteile aus der Druckgusslegierung AlSi10Mg konnten bereits hergestellt werden. Die Kenntnis der mechanischen Eigenschaften sowie deren Einflussgrößen sind Voraussetzung für einen breiten industriellen Einsatz für Serienanwendungen der generativ gefertigten Bauteile.
Der Einfluss von Verfahrensparameter und Wärmebehandlung auf das Gefüge und den daraus resultierenden mechanischen Eigenschaften wird für die Druckgusslegierung AlSi10Mg vorgestellt.

2 Stand der Technik für die Generative Fertigung von Aluminiumbauteilen

Aufgrund der hohen industriellen Relevanz der Aluminiumwerkstoffe wird seit einigen Jahren für unterschiedliche generative Verfahren die Verarbeitung von Aluminium untersucht. Bisher existieren zwei Pulverbett basierte Verfahrensvarianten: Beim Selektiven Laser Sintern (SLS) erfolgt die Verarbeitung des Aluminiumpulvers indirekt. Bei dem speziell für dieses Verfahren entwickelten Pulverwerkstoff sind die Aluminium-Pulverpartikel mit einem Polymer umhüllt. Beim SLS wird nur die Polymerhülle versintert und dadurch ein sogenannter Grünling erzeugt. In einem anschließenden Ofenprozess wird das Polymer verdampft und der Grünling mit einem niedrigschmelzenden Werkstoff infiltriert [SERC03]. Der daraus resultierende Werkstoffverbund ist jedoch für Serienanwendungen häufig nicht geeignet. Diese Verfahrensvariante wird kommerziell von der Fa. 3D Systems angeboten. Die Firmen Concept Laser und MCP-HEK entwickeln zurzeit das Laserschmelzen, bei dem der Pulverwerkstoff durch vollständiges Aufschmelzen der Pulverpartikel direkt verarbeitet wird, für die Werkstoffe AlSi12 und AlSi10Mg weiter. Die mechanischen Kennwerte der hergestellten Bauteile sind zum Teil für AlSi12 bekannt [LOHM05].

3 Das SLM-Verfahren

Mit dem vom Fraunhofer-ILT entwickelten SLM-Verfahren werden Bauteile direkt aus 3D-CAD Daten hergestellt. Nahezu beliebig komplexe Geometrien können realisiert werden, da der Aufbauprozess schichtweise in einem Pulverbett erfolgt. Der Ausgangswerkstoff für das SLM ist Pulver. Das Pulver wird in einer geschlossenen Prozesskammer als dünne Schicht (ca. 50 µm) auf einer Substratplatte aufgebracht. Entsprechend den berechneten Flächen des CAD-Modells wird mit einem Laserstrahl die Pulverschicht selektiv aufgeschmolzen (s. Bild 1). Danach wird die Substratplatte abgesenkt und eine neue Pulverschicht aufgetragen. Die nächste Schicht wird wieder mit dem Laserstrahl selektiv aufgeschmolzen und schmelzmetallurgisch mit der unteren Schicht verbunden. Das Bauteil entsteht somit Schicht für Schicht.

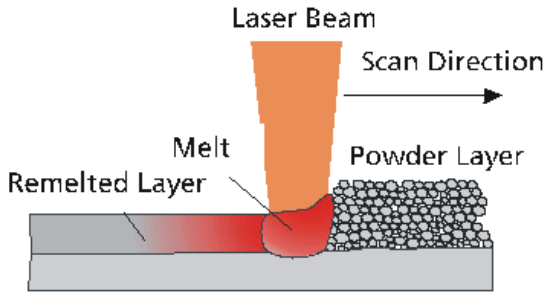

Bild 1: Schematische Darstellung des SLM–Prozesses

Die Anlagentechnik ermöglicht eine Heizung der Substratplatte während der Produktion. Das Gefüge und somit auch die mechanischen Eigenschaften des Bauteils können damit gezielt beeinflusst werden. Außerdem können Bauteileigenspannungen reduziert werden.

Für Stahl- und Titanwerkstoffe liegen Untersuchungen zur Prozessführung und den resultierenden mechanischen Eigenschaften vor. Zurzeit werden weitere Untersuchungen zu Keramiken, Kunststoffe und Kupferlegierungen am Fraunhofer-ILT durchgeführt.

4 Eigenschaften von SLM-Bauteilen aus AlSi10Mg

4.1 Dichte und Gefüge

Primäres Ziel bei der Qualifizierung eines Werkstoffs für das SLM ist eine Bauteildichte von ca. 100%. Dazu werden die Verfahrensparameter Scangeschwindigkeit und Laserleistung ermittelt, mit denen Bauteile mit einer Dichte von ca. 100% herstellbar sind.

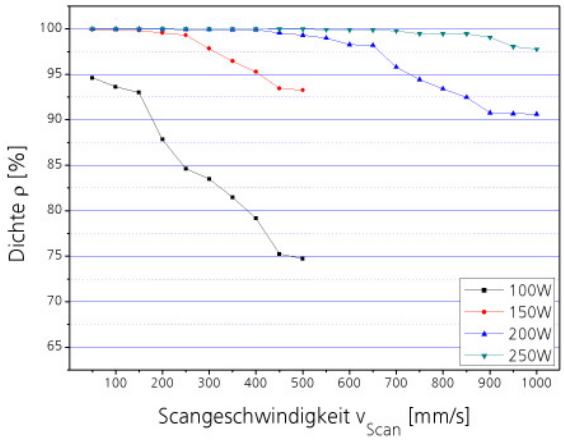

Bild 2: Bauteildichte von SLM-Bauteilen aus AlSi10Mg in Abh. von Scangeschwindigkeit und Laserleistung bei einer Schichtdicke von 50 µm

Zur Bestimmung der Dichte werden Würfel mit einer Kantenlänge von 10 mm hergestellt. Die Dichte wird mittels Lichtmikroskopie an Querschliffen der Würfel ermittelt. In Bild 2 ist die Bauteildichte in Abhängigkeit der Scangeschwindigkeit für verschiedene Laserleistungen für eine Schichtdicke von 50 µm dargestellt.
Für den Parameterbereich, der typischerweise für Stahlwerkstoffe angewendet wird (P_L = 100 W, v_{Scan} = 100 mm/s), wird für die Aluminiumlegierung AlSi10Mg nur max. eine Dichte von 93% erreicht. Gründe sind die im Vergleich zu z.B. Stahl relativ hohe Reflexion und Wärmeleitfähigkeit von Aluminium. Selbst bei einer für den SLM Prozess relativ langsamen Scangeschwindigkeit von 50 mm/s und einer Laserleistung von 100 W wird keine akzeptable Bauteildichte um 100% erreicht. Erst ab einer Laserleistung von 150 W wird eine Dichte von 100% bei langsamen Scangeschwindigkeiten (≤ 100 mm/s) erreicht. Bei Verwendung einer Laserleistung von 250 W kann die Scangeschwindigkeit auf ca. 500 mm/s gesteigert werden, was eine entsprechende Erhöhung der Aufbaurate bewirkt. In Bild 3 werden die Ergebnisse anhand der Querschliffe ausgewählter Proben verdeutlicht.

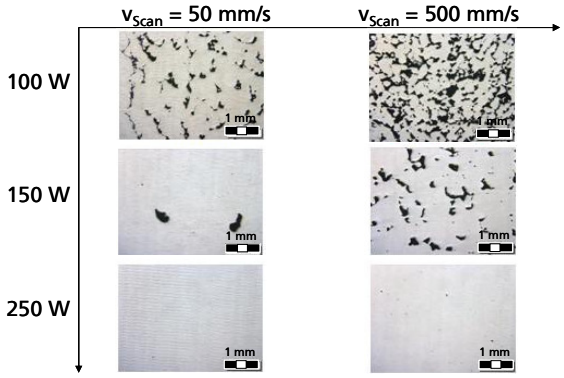

Bild 3: Querschliffe von SLM-Proben aus AlSi10Mg für unterschiedliche Scangeschwindigkeiten und Laserleistungen für eine Schichtdicke von 50 µm

4.2 Mechanische Eigenschaften

4.2.1 Härte

Beim SLM liegt die Wechselwirkungszeit der Laserstrahlung mit dem Pulverwerkstoff im Bereich von ca. $4x10^{-3}$ bis $4x10^{-4}$ s. Daraus resultiert eine im Vergleich zum z.B. Druckguss extrem hohe Erstarrungsgeschwindigkeit in der Größenordnung von ca. $7x10^{6}$ K/s. Die Erstarrungsgeschwindigkeit kann durch die Scangeschwindigkeit und Vorwärmtemperatur beeinflusst werden [OVER03]. Zur Bestimmung des

Einflusses der Verfahrensparameter auf das Gefüge der Bauteile wird zunächst die Härte von Proben verglichen, die mit Scangeschwindigkeiten von 50 mm/s und 500 mm/s aufgebaut wurden sowie von Proben, die ohne Vorwärmung und mit einer Vorwärmtemperatur von 300°C aufgebaut wurden (Bild 4). Die Proben wurden mit einer Laserleistung von 250 W und einer Schichtdicke von 50 µm hergestellt. Die dargestellten Werte sind Mittelwerte aus 10 Messungen.

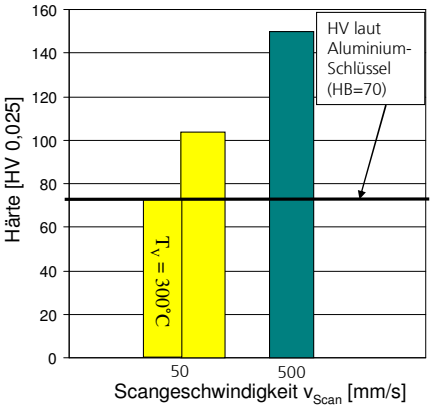

Bild 4: Härte in Abhängigkeit von Scangeschwindigkeit u. Vorwärmtemperatur

Bei einer Scangeschwindigkeit von 500 mm/s wird eine Härte von ca. 150 HV 0,025 erreicht. Durch die Verkleinerung der Scangeschwindigkeit auf 50 mm/s wird die Erstarrungsgeschwindigkeit verringert und es bildet sich ein grobkörnigeres Gefüge und somit verkleinert sich die Härte auf ca. 105 HV 0,025. Durch eine Vorwärmtemperatur von 300°C nimmt die Härte weiter auf ca. 73 HV 0,025 ab, was dem Mindestwert für druckgegossene Teile aus AlSi10Mg entspricht (laut Aluminiumschlüssel ca. 73 HV 0,025).

4.2.2 Statische Belastung

Zur Bestimmung des Einflusses der Scangeschwindigkeit und der Vorwärmung auf Zugfestigkeit, Dehngrenze und Bruchdehnung werden Probenformen gemäß DIN 50125 für Zugversuche mit v_{Scan} = 50 mm/s und v_{Scan} = 500 mm/s sowie ohne und mit einer Vorwärmtemperatur von 300°C aufgebaut. Um den Einfluss der Aufbaurichtung zu untersuchen, werden die Proben in drei unterschiedlichen Richtungen (0°, 45°, 90° zur Krafteinleitung) aufgebaut (s. Bild 5). Die Zugproben werden anschließend spanend nachbearbeitet, um eine glatte Oberfläche zu gewährleisten. Eine Charge wird nicht nachbearbeitet, um den Einfluss der rauen SLM-Oberfläche zu bestimmen.

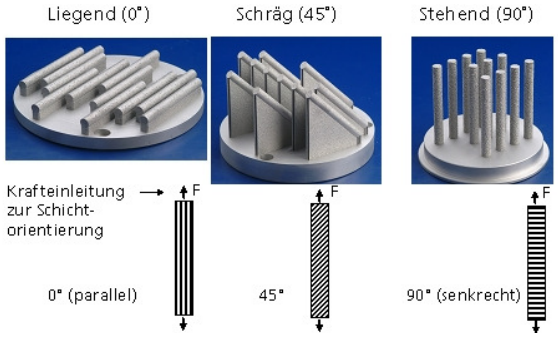

Bild 5: Unterschiedliche Aufbaurichtungen mit deren Orientierung der Schichten zur Krafteinleitung

Zur Ermittlung der Festigkeit werden die Kennwerte aus dem Zugversuch nach DIN EN 10002 ermittelt. Die dargestellten Werte sind Mittelwerte aus 7 Einzelversuchen. Die Zugfestigkeit hängt tendenziell von der Aufbaurichtung ab. Die stehend aufgebauten Proben weisen die geringste Festigkeit auf, die liegend aufgebauten die höchste aufgrund der zu den Schichtlagen parallelen Krafteinleitung in das Bauteil [MEIN99].

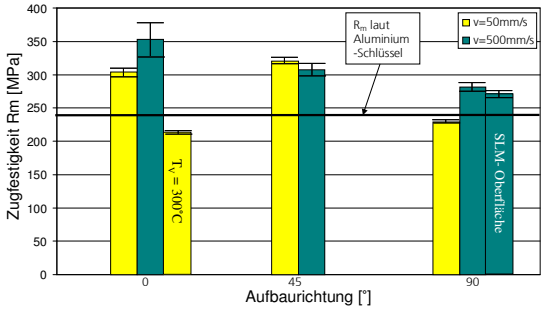

Bild 6: Zugfestigkeit R_m in Abh. von Scangeschwindigkeit, Aufbaurichtung und Vorwärmtemperatur

Die Zugfestigkeit für v_{Scan} = 500 mm/s liegt unabhängig von der Aufbaurichtung oberhalb der Normangaben des Aluminiumschlüssels für Druckguss aus AlSi10Mg (s. Bild 6) und reicht bis R_m = 355 MPa. Bei Verringerung der Scangeschwindigkeit auf 50 mm/s nimmt die Zugfestigkeit nur geringfügig ab. Die Vorwärmung reduziert die Zugfestigkeit signifikant um ca. 30%. Der Einfluss der SLM-Oberfläche auf die Zugfestigkeit R_m = 260 MPa ist nicht signifikant.
Im Gegensatz zur Zugfestigkeit wird die Dehngrenze deutlicher durch die Scangeschwindigkeit beeinflusst. Die Aufbaurichtung hat hingegen kaum Einfluss auf die Dehngrenze. Die Dehngrenze $R_{p0,2}$ liegt mit ca. 250 MPa bei v_{Scan} = 500 mm/s für alle Aufbaurichtungen deutlich höher als der im Aluminiumschlüssel angegebene Mindestwert von 140 MPa für druckgegossene Bauteile aus AlSi10Mg (s. Bild 7).

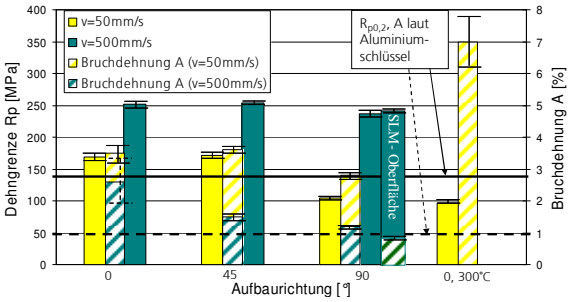

Bild 7: Dehngrenze $R_{p0,2}$ und Bruchdehnung A in Abh. von Scangeschwindigkeit, Aufbaurichtung und Vorwärmtemperatur

Bei den Proben mit v_{Scan} = 50 mm/s verringert sich die Dehngrenze auf maximal 165 MPa. Durch die Vorwärmung wird die Dehngrenze ebenfalls signifikant beeinflusst und verringert sich auf 100 MPa. Die Bruchdehnung korreliert ebenfalls mit der Scangeschwindigkeit und der Vorwärmtemperatur. Die Bruchdehnung der Proben mit v_{Scan} = 50 mm/s beträgt unabhängig von der Aufbaurichtung ca. 3% und ist größer als für die Proben mit v_{Scan} = 500 mm/s. Der Normwert aus dem Aluminiumschlüssel von 1% wird für alle Proben mindestens erreicht. Die Vorwärmung bewirkt eine Steigerung der Bruchdehnung auf ca. 7%. Insgesamt zeigen die Ergebnisse eine deutliche Korrelation der mechanischen Eigenschaften von den Verfahrensparametern. Mit geringerer Scangeschwindigkeit und höherer Vorwärmtemperatur entsteht ein grobkörnigeres und somit duktileres Gefüge, was sich durch geringere Härte, geringere Festigkeit und größerer Bruchdehnung äußert.

4.2.3 Dynamische Belastung

Für die dyn. Untersuchungen wurden Proben gemäß ASTM E 466 erstellt. Die Proben wurden, wie die statischen Proben, in unterschiedlichen Richtungen (0°, 45°, 90°) und Scangeschwindigkeiten (50 mm/s, 500 mm/s) aufgebaut (s. Bild 5). Eine 300°C-Vorwärmung und SLM-Oberfläche sind ebenfalls berücksichtigt. Getestet wird im Zugschwellbereich (Spannungsverhältnis R = 0,1). Um noch Brüche zu erzeugen, wird teilweise oberhalb der Dehngrenze $R_{p0,2}$ geprüft. Ein Vergleich der Ergebnisse (s. Bild 8) zeigt folgende Tendenzen deutlich: Die 0°-Proben haben eine höhere dyn. Festigkeit als die 45°-Proben, diese wiederum eine höhere als die 90°-Proben. Die mit der geringeren Scangeschwindigkeit von 50 mm/s aufgebauten Proben haben eine höhere dyn. Festigkeit als die Proben mit 500 mm/s. Durch die Vorwärmung mit 300°C fällt die dyn. Festigkeit stark ab, da bei diesen Prozessbedingungen vereinzelt Poren im Gefüge entstehen. Die Dauerfestigkeit sinkt um ca. 130 MPa ab im Vergleich zu den Proben ohne Vorwärmung. Die Proben mit der ursprünglichen, rauen SLM-Oberfläche zeigen ein durchwegs geringeres dyn. Festigkeitsniveau als vergleichbare, nachbearbeitete Proben. Die Dauerfestigkeit sinkt hierbei um ca. 25 MPa ab. Nach DIN EN 1706 liegt die Biegewechselfestigkeit von DG-AlSi10Mg bei $5x10^7$ Lastspielen in einem Bereich von S_O = 60-90 MPa. Die Probencharge, die mit den Parametern aufgebaut wurde, die sich als maximal ungünstig erwiesen (SLM-Oberfläche, 90°-

Aufbaurichtung, v_{Scan} = 500 mm/s), hat eine dyn. Festigkeit unterhalb dieses Bereichs.

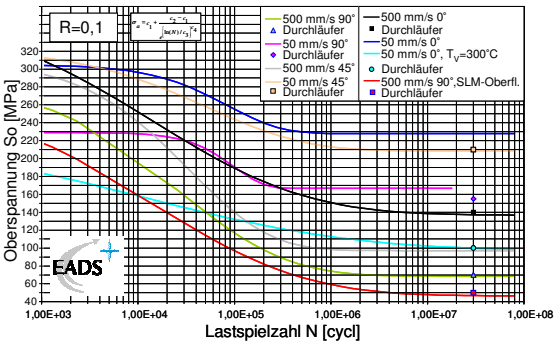

Bild 8: Wöhlerkurven für SLM-Proben aus AlSi10Mg

Die dyn. Festigkeit einer Probencharge liegt innerhalb dieses Bereichs, die übrigen Probenchargen übertreffen diesen Bereich. Dabei sei bemerkt, dass dieser Vergleich mit der Biegewechselfestigkeit aus DIN EN 1706 äußerst konservativ ist: Der zulässige Oberspannungsbereich bei der Biegewechselbeanspruchung (R = -1) ist tendenziell höher als bei der Wechselbeanspruchung (R = -1) und dieser wiederum ist tendenziell höher als bei der hier untersuchten Zugschwellbeanspruchung (R = 0,1).

5 Anwendungsbeispiel

Für den Projektpartner Festo ist ein erstes Bauteil gefertigt worden (s. Bild 9).

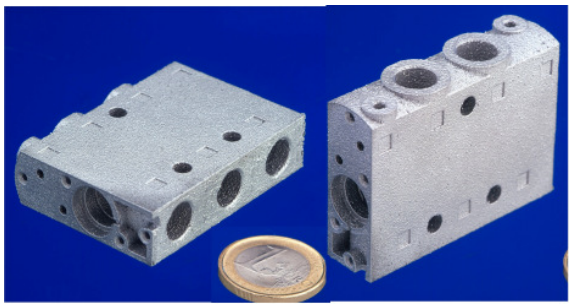

Bild 9: Bauteil aus AlSi10Mg, Festo Ventil

Das bereits am Markt eingeführte Großserien-Pneumatik-Ventil (DG-AlSi10Mg), wird als Referenz-Bauteil bzgl. der Eignungsbewertung dieser werkzeuglosen Fertigungstechnik für Kleinst- und Kleinserien herangezogen. Dies könnte sowohl kundenspezifische Sonderlösungen als auch Funktionsprototypen im Serien-Neuheitenentstehungsprozess umfassen, bei denen entsprechende Druckgusswerkzeuge zu teuer und/oder zeitaufwändig wären. Die (generative) Bauzeit beträgt für 2 Bauteile ca. 11,5 Std. Das SLM-Bauteil wird weiteren Vergleichs- und Funktionstests unterzogen.

6 Zusammenfassung

Für die Aluminiumlegierung AlSi10Mg wird eine Qualifizierung zur Generativen Fertigung mittels SLM vorgestellt. Sowohl statische als auch dynamische Kennwerte werden beschrieben. Die Ergebnisse zeigen, dass die mechanischen Eigenschaften die einschlägigen Festigkeitswerte der Serienbauteile erreichen. Der Einfluss der Prozessführung auf die daraus resultierenden mechanischen Eigenschaften ist bestimmt worden. Diese Kenntnis ist für den industriellen Einsatz der Technologie eine wichtige Voraussetzung. In weiteren Arbeiten wird die Korrelation von Verfahrensparametern u. Wärmebehandlung auf das Gefüge und mechanische Eigenschaften tiefergehend untersucht, sowie der Einfluss einer nachträglichen Wärmebehandlung auf die mechanischen Eigenschaften bestimmt. Weitere Aluminiumlegierungen werden qualifiziert.
Die Ergebnisse werden im Rahmen des durch den BMBF geförderten Projektes „Alugenerativ“ erarbeitet.

7 Literaturverzeichnis

[SERC03] T.B.Sercombe and G.B.Schaffer, Rapid Manufacturing of Aluminum Components, Science, 301 (2003) pp 1225-1227

[LOHM05] K. Müller-Lohmeier, Stahl und Aluminiumteile: Praktische Erfahrungen mit generativem Prototyping, 3. Swiss Rapid Forum, St. Gallen, 19. Mai 2005

[OVER03] C. Over, Generative Fertigung von Bauteilen aus Werkzeugstahl X38CrMOV-1 und Titan TiAl6V4 mit „Selective Laser Melting“, Dissertation RWTH Aachen, Shaker Verlag, Aachen 2003

[MEIN99] W. Meiners, Direktes Selektives laser Sintern einkomponentiger metallsicher Werkstoffe, Dissertation RWTH Aachen, Shaker Verlag, Aachen 1999