

Hans Albert Richard
Britta Schramm
Thomas Zipsner *Hrsg.*

Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen



Deutscher Verband für
Materialforschung und -prüfung e.V.



Springer Vieweg

Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen

Hans Albert Richard · Britta Schramm ·
Thomas Zipsner
(Hrsg.)

Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen

 Springer Vieweg

Herausgeber

Hans Albert Richard
Universität Paderborn
Paderborn, Deutschland

Thomas Zipsner
Essenheim, Deutschland

Britta Schramm
Universität Paderborn
Paderborn, Deutschland

Die Herausgeber und die Autoren haben alle Texte, Formeln und Abbildungen mit größter Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht ausgeschlossen werden. Deshalb übernehmen weder die Herausgeber noch die Autoren und der Verlag irgendwelche Garantien für die in diesem Buch abgedruckten Informationen. In keinem Fall haften die Herausgeber, die Autoren und der Verlag für irgendwelche direkten oder indirekten Schäden, die aus der Anwendung dieser Informationen folgen.

ISBN 978-3-658-17779-9
DOI 10.1007/978-3-658-17780-5

ISBN 978-3-658-17780-5 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Strasse 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Additive Fertigungsverfahren gelten als zukunftsweisend und erfreuen sich daher großer Aufmerksamkeit. Der Fertigungsprozess erfolgt schichtweise, was die Herstellung von Bauteilen hoher Komplexität sowie von filigranen und dennoch steifen und hochfesten Strukturen erlaubt. Einzelfertigung und Kleinserienfertigung ist somit möglich, bei nahezu unbegrenzter gestalterischer Freiheit. Dabei werden umfangreiche Anforderungen, wie z.B. Reproduzierbarkeit, Vorhersagbarkeit, Betriebsfestigkeit und Bruchsicherheit, an reale additiv gefertigte Bauteile und Strukturen gestellt.

Das vorliegende Fachbuch ist entstanden im Anschluss an die erste Tagung „Additiv gefertigte Bauteile und Strukturen“ des Deutschen Verbands für Materialforschung und -prüfung (DVM), die am 02. und 03. November 2016 in Berlin stattfand. Zahlreiche Referenten der Tagung konnten als Autoren für dieses Buchprojekt „Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen“ gewonnen werden. Die Autoren sind Experten aus verschiedenen Fachgebieten von Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Unternehmen.

Die Inhalte der in diesem Buch berücksichtigten Beiträge gehen dabei z. T. deutlich über die Vortragsinhalte der Tagung hinaus und beschäftigen sich u. a. mit folgenden Schwerpunktthemen:

- Anwendungsgebiete der additiven Fertigung,
- Praxisbeispiele,
- Werkstoffkennwerte für Kunststoff- und Metallbauteile,
- Einfluss der Fertigungsverfahren und der Nachbehandlungsverfahren auf die Material- und Struktureigenschaften,
- Modellierung der Werkstoffeigenschaften und Bemessungskonzepte,
- Lebensdauerbeeinflussung mittels additiver Fertigung,
- Filigrane Leichtbaustrukturen,
- Schadenstoleranzkonzepte.

In den einzelnen Beiträgen findet i. Allg. eine übergreifende Betrachtung der gesamten Schwerpunktthemen statt.

Das Buch bietet demzufolge viele aktuelle Beiträge zu anwendungsnahen Themen, die unter anderem für Ingenieure und Naturwissenschaftler in der Praxis und für Nachwuchswissenschaftler an den Forschungsinstituten von großem Interesse sind. Auch Ärzte und Medizintechniker aus den Bereichen Radiologie, Chirurgie und Orthopädie können hier Anregungen finden. Geeignet ist dieses Buch auch für Studierende der Ingenieur- und Naturwissenschaften sowie der Medizin und Medizintechnik und verwandter Gebiete an Universitäten und Fachhochschulen.

Die Herausgeber bedanken sich herzlich bei den Autoren, die durch ihre wissenschaftlichen und praktischen Beiträge zum Gelingen dieses Buches beigetragen haben. Dank geht auch an den Deutschen Verband für Materialforschung und -prüfung (DVM) und den Springer Vieweg Verlag für die Unterstützung dieses Buchprojekts.

Das Buch bietet dem Leser die Möglichkeit, sich der Thematik der Additiven Fertigung aus verschiedenen Perspektiven zu nähern. Es beinhaltet zahlreiche Ansätze und Anregungen für weitere erfolgreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

Berlin, Paderborn, Wiesbaden im Februar 2017

Hans Albert Richard, Britta Schramm, Thomas Zipsner

Inhaltsverzeichnis

Rapid Prototyping im Maschinen- und Automobilbau – Ermüdungseigenschaften additiv gefertigter Bauteile **Seite 1-20**

Einleitung, Aktueller Kenntnisstand zur additiven Fertigung, Werkstoffcharakterisierung, Mechanische Eigenschaften, Örtliches Konzept, Ermüdungseigenschaften additiv gefertigter Bauteile, Fazit

Sascha Wörner, Udo Jung, Heinrich Friederich, Heinz Thomas Beier, Michael Vormwald

Medizintechnische Anwendungen der additiven Fertigung **Seite 21-40**

Additive Fertigung in der Medizintechnik, Additive Fertigungsverfahren und Werkstoffe, Vorgehensweise bei der Entwicklung additiv gefertigter Medizinprodukte, Individuelle Bewegungs- und Belastungsrandbedingungen, Auswahl des Werkstoffs und des Fertigungsprozesses, Generierung des CAD-Modells & Produktoptimierung, Prototypen-/Bauteilfertigung & Testphase, Additive Fertigung von individuellen Esshilfen, Lebensdaueruntersuchungen an einer Hüftendoprothese, Strukturoptimierung von Hüftendoprothesen, Additive Fertigung einer Fußorthese, Ausblick

Britta Schramm, Nicola Rupp, Lena Risse, Jan-Peter Brüggemann, Andre Riemer, Hans Albert Richard, Gunter Kullmer

Entwicklung von Fahrradretzkurbelsystemen mittels additiver Fertigung **Seite 41-60**

Einleitung, Laserstrahlschmelzprozess, Strukturoptimierung einer überlangen Tretkurbel, Strukturoptimierung einer Tretkurbel mit Standardlänge, Strukturoptimierung einer Fünfstern-Tretkurbel, Zusammenfassung und Ausblick

Jan-Peter Brüggemann, Lena Risse, Andre Riemer, Wadim Reschetnik, Gunter Kullmer, Hans Albert Richard

Funktionsintegration additiv gefertigter Dämpfungsstrukturen bei Biegeschwingungen **Seite 61-74**

Einleitung, Stand der Technik, Experimentelle Untersuchungen, Einfluss des Hohlraumvolumens, Einfluss der Hohlraumlänge, Einfluss der Hohlraumhöhe, Einfluss von Hohlraumunterteilungen, Einfluss von Gitterstrukturen, Anwendungsbeispiel: Funktionsintegration von Dämpfungsstrukturen in die Ankerscheibe einer Federkraftbremse

Thomas Künneke, Detmar Zimmer

Berstdruckbestimmung an additiv gefertigten Bauteilen **Seite 75-86**

Zusammenfassung, Einleitung, Die Idee: „Rapid-Bursting-Test“, Fertigung der Prüfkörper, Ermittlung der Werkstoffeigenschaften, Skalierung und Zielwerte, Berstversuche mit Dehnungsmessung, Ergebnisdarstellung, Fazit und Ausblick

Christian Schrandt, Axel Schulz, Martin Beckert, Peter Koppa

Stabilität von additiv gefertigten Prothesen **Seite 87-104**

Grundlagen additiv gefertigter Prothesen, Ausgangssituation in der Prothetik, Bionisch inspirierte Konstruktion für den 3D-Druck, Energierückgabe von Prothesen, Konzepte und Ergebnisse bionisch optimierter Prothesen, Durchgehend digitale Prozesskette für die Orthopädietechnik, FE-Simulation als virtueller Belastungstest, Mechanische Belastungstests nach DIN EN ISO 10328:2016, Energierückgabemessung an additiv gefertigten Prothesenfüßen, Auswirkung der Ergebnisse auf die Orthopädietechnik, Verbesserung des Versuchsaufbaus, Fazit und Ausblick

Manuel Opitz, Carolin Taubmann, Felix Grundlack, Jannis Breuninger

Herstellbarkeit und mechanische Charakterisierung von lasergesinterten Gitterstrukturen **Seite 105-120**

Einleitung, Stand der Technik, Herstellbarkeit, Mechanische Charakterisierung, Mechanische Untersuchung mittels Biegeprüfung, Mechanische Untersuchung mittels Druckprüfung, Zusammenfassung und Ausblick

Dennis Menge, Stefan Josupeit, Patrick Delfs, Hans-Joachim Schmid

**Physikalische Modellbildung für das Additive Sintern
von Kunststoffmaterialien** **Seite 121-136**

Zusammenfassung, Einleitung, Physikalische Modellbildung in der Literatur, Frenkels Modell, Frühe und späte Phase des Sinterns, Viskoelastische Modellierung, Berücksichtigung von Gasdiffusionseffekten, Fazit und Ausblick

Florian Wohlgemuth, Ingo Alig

**Prüfverfahren und numerische Simulation von
mechanischen Eigenschaften 3D-gedruckter
thermoplastischer Kunststoffe** **Seite 137-158**

Stand der Technik, Prüfnormen für additiv gefertigte Materialien, Prüfverfahren für additiv gefertigte Bauteile und Materialien, Material und experimentelle Bedingungen, Material und Drucktechnologie, Probenform und -herstellung, Experimentelle Bedingungen, Untersuchungsergebnisse, Experimentelle und numerische Simulation, Zugversuche, Relaxationsversuche, Wöhler-Versuche, Mikroskopische Analyse, Zusammenfassung und Diskussion, Ausblick

Rainer Franke, Daniela Schob, Matthias Ziegenhorn

**Thermische Alterung und Eigenschaften von
Polymermaterialien für das Selektive Lasersintern** **Seite 159-172**

Einleitung, Experimentelles, Materialien, Gelpermeationschromatographie, Dynamische Differenzkalorimetrie, Lichtmikroskopie, Dynamisch-mechanische Analyse, Schmelzerheologie, ATR-FTIR-Spektroskopie, Thermogravimetrie, Kerbschlagversuch, Ergebnisse und Diskussion, Einfluss der Alterungszeit auf die Molmasse, Veränderung der rheologischen Eigenschaften durch thermische Alterung, Zusammenfassung

Konrad Schubert, Johannes Kolb, Florian Wohlgemuth, Dirk Lellinger, Ingo Alig

**Optimierung der Werkstoffperformance
lasergeschmolzener metallischer Werkstoffe** **Seite 173-188**

Einleitung, Titanlegierung TiAl6V4, Allgemeine Informationen, Werkstoffverhalten bei monotoner Lastaufbringung, Werkstoffverhalten bei zyklischer Lastaufbringung, Rissfortschrittsverhalten, Austenitischer Stahl X2CrNiMo17-12-2, Allgemeine Informationen, Werkstoffverhalten bei monotoner Lastaufbringung, Werkstoffverhalten bei zyklischer Lastaufbringung, Rissfortschrittsverhalten, Fazit

Andre Riemer, Stefan Leuders, Hans Albert Richard, Gunter Kullmer

Beeinflussung des Risswachstums durch Kerben in additiv gefertigten Strukturen **Seite 189-200**

Einleitung, Beeinflussung des Risswachstums, Additive Fertigung, Finite-Elemente-Analysen von Kerbgeometrien, Experimentelle Untersuchungen, Fahrradvorbau, Zusammenfassung und Ausblick

Wadim Reschetnik, Jan-Peter Brüggemann, Hans Albert Richard, Gunter Kullmer, Lena Risse

Numerische und mechanische Untersuchung additiv gefertigter TiAl6V4 Gitterstrukturen **Seite 201-214**

Einleitung, Stand der Technik Offen-zelluläre Leichtbaugitterstrukturen, Finite-Elemente-Methode, Digitale Bildkorrelation, Experimentelle Untersuchungen, Zusammenfassung

Alexander Taube, Wadim Reschetnik, Lorenz Pauli, Kay-Peter Hoyer, Gunter Kullmer, Mirko Schaper

Einfluss prozessinduzierter Defekte auf das Ermüdungsverhalten additiv-gefertigter AlSi12-Strukturen bei hohen und sehr hohen Lastspielzahlen **Seite 215-226**

Einleitung, Experimentelles Vorgehen, Ergebnisse und Diskussion, Mikrostruktur, Quasistatisches Verformungsverhalten, Zyklisches Verformungsverhalten, Bruchflächenanalyse, Zusammenfassung

Shafaqat Siddique, Jochen Tenkamp, Frank Walther

Anforderungen an ein Bemessungskonzept für zyklisch beanspruchte additiv gefertigte Bauteile **Seite 227-240**

Einleitung, Bemessungskonzepte, Einflüsse auf das Werkstoffverhalten, Konstante vs. variable Beanspruchungsamplituden, Werkstoffbasierte Lebensdauerabschätzung, Zusammenfassung

Rainer Wagener, Matthias Hell, Tobias Melz

**Schadensentwicklung und Schadenstoleranz
von SLM-gefertigten Strukturen** **Seite 241-270**

Einleitung, Werkstoff-/Bauteileigenschaften, Steifigkeit, Festigkeit / Duktilität, Risswiderstand bei monotoner Belastung, Hochlage, Tieflage, Duktil-spröder Übergangsbereich, Rissausbreitung bei zyklischer Belastung, da/dN- ΔK -Kurve und Einflussfaktoren in den verschiedenen Bereichen, Einfluss der Eigenspannungen, Schwingfestigkeit, Umlagerung von Eigenspannungen bei Schwingbelastung, Zusammenfassung

Uwe Zerbst, Kai Hilgenberg

**Gezielte Bauteilkonditionierung durch Festwalzen
und Hämmern** **Seite 271-280**

Einleitung, Individuell konditionierte Bauteile, Festwalzen, Hämmern, Prozesskombinationen, Druckeigenspannungen, Schlussfolgerungen und Ausblick

Stefan Zenk

**Zukunftsaspekte der additiven Fertigung für
Produktinnovation sowie Besonderheiten von
Schraubenverbindungen bei additiv gefertigten metallischen Bauteilen** **Seite 281-292**

Technologiebewertung für Produktinnovation, Hintergrund für Untersuchung der Besonderheiten bei Verschraubung, Montageversuche – Wiederhol- und Bruchmontage, Rauheits- und Konturmessung, Relaxationsversuche, Tastschnittmessungen, Schlussfolgerungen

Christoph Friedrich, Dino Guggolz, Jens Peth

Sachwortverzeichnis **Seite 293-297****DVM – Bauteil verstehen.** **Seite 299**

Rapid Prototyping im Maschinen- und Automobilbau – Ermüdungseigenschaften additiv gefertigter Bauteile

Sascha Wörner^{a)}, Udo Jung^{a)}, Heinrich Friederich^{a)},
Heinz Thomas Beier^{b)}, Michael Vormwald^{b)}

a) Fachbereich Maschinenbau, Mechatronik, Materialtechnologie,
Technische Hochschule Mittelhessen

b) Fachgebiet Werkstoffmechanik, Technische Universität Darmstadt

Zusammenfassung

Nach einem Überblick über den aktuellen Kenntnisstand zur additiven Fertigung erfolgt zunächst eine Werkstoffcharakterisierung sowie die Darstellung physikalischer und mechanischer Eigenschaften von Proben und Bauteilen aus einer ausscheidungshärtbaren Aluminiumlegierung (AlSi10Mg), additiv gefertigt durch Metall-Laserstrahlschmelzen (englisch: Selective Laser Melting, SLM). Anschließend wird insbesondere auf das Ermüdungsverhalten additiv hergestellter Bauteile sowie auf die Einsatzmöglichkeit von SLM zur Substitution der gießtechnischen und zerspanenden Fertigungsverfahren eingegangen.

An einem konkreten Anwendungsfall wird gezeigt, dass Funktionsprototypen bereits heute durch Rapid Prototyping (SLM) hergestellt werden können. Mittels Metall-Laserstrahlschmelzen gefertigte Bauteile haben vergleichbare Ermüdungseigenschaften wie Druckguss-Komponenten. Die Lebensdauer wurde nach dem Örtlichen Konzept numerisch simuliert und experimentell in verschiedenen Schwingfestigkeitsversuchen analysiert. Zusätzlich ist eine deutliche Zeitersparnis im Entwicklungs- und Fertigungsprozess möglich. Die Anforderung im Prototypenbau, gegenüber dem späteren Serienteil äquivalente Bauteileigenschaften zu erreichen, wird erfüllt. Eine sichere Bauteilauslegung im Entwicklungsprozess ist gegeben.

Im Vergleich der Lebensdauer von additiv gefertigten Bauteilen mit jener von Guss-Bauteilen kann eine hohe Übereinstimmung erzielt werden. Eine Substitution konventioneller Fertigungsverfahren ist somit möglich. Damit ist belegt, dass sich Funktionsprototypen auch additiv, durch Rapid Prototyping, herstellen lassen.

Stichwörter: Metall-Laserstrahlschmelzen, Rapid Prototyping, Werkstoffeigenschaften, Bauteileigenschaften, Schwingfestigkeit

1 Einleitung

Die Nutzung additiver Fertigungsverfahren, wie das Metall-Laserstrahlschmelzen (englisch: Selective Laser Melting, SLM), zur Herstellung von Bauteilen eröffnet Entwicklern eine einzigartige Gestaltungsfreiheit. Durch das schichtweise Aufbauen und lokale Aufschmelzen des Metallpulvers entsteht die Struktur, siehe Abbildung 1. Das Bauteil kann vollständig funktionsorientiert gestaltet werden. Auf eine fertigungsgerechte Konstruktion mit Berücksichtigung prozessbedingter Restriktionen wie z.B. bei Guss-Bauteilen, das Vermeiden von Hinterschnitten, Überhängen, Hohlräumen usw. kann verzichtet werden. Der Formenbau ist nicht mehr notwendig. Im Gegensatz zur zerspanenden Fertigung (subtraktiv) wird werkzeuglos, mit maximaler Materialeffizienz gefertigt. Ausschließlich Material für das tatsächliche Bauteilvolumen wird genutzt und somit entstehen (fast) keine Abfälle. Eine individuelle Fertigung mit variablen Losgrößen ist möglich. Jedes Bauteil kann auf Basis von Konstruktionsdaten (CAD) individuell angepasst werden. Dies macht SLM zu einem idealen Fertigungsprozess für die Industrie 4.0, siehe Schürmann [1]. Der Erfolg des „3D-Drucks“ zeigt sich auch auf dem Markt. Hier wird sich im Zeitraum von 2014 bis 2019 laut Wohlers Associates [2] mehr als eine Verdopplung des Umsatzes einstellen.

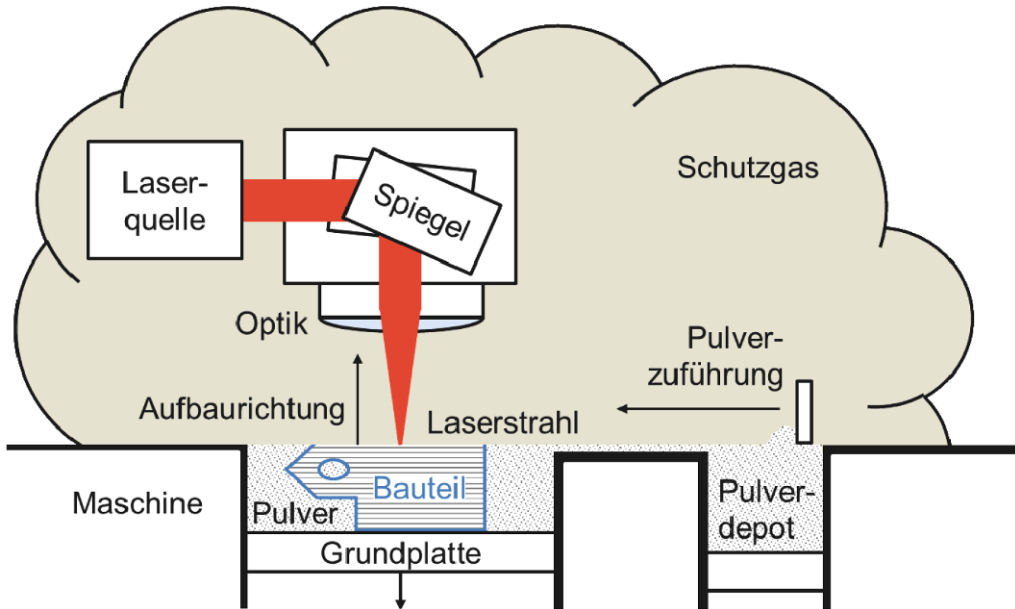


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Metall-Laserstrahlschmelzens (SLM)

Noch sind die Anlagenkosten sehr hoch und der Fertigungsprozess hat eine niedrige Aufbaugeschwindigkeit. Prozessgüte und Reproduzierbarkeit der additiven Fertigung sind im Allgemeinen noch nicht ausreichend gesichert. Eine anschließende oder im Prozess integrierte Qualitätsprüfung ist damit unerlässlich, um eine zuverlässige und reproduzierbare Bauteilqualität zu garantieren. Einsatz findet das Metall-Laserstrahlschmelzen deshalb vorwiegend in der Luft- und Raumfahrt. Dort ist der Leichtbau noch wichtiger und die spezifischen Entwicklungs- und Fertigungsausgaben höher als im Maschinen- und Automobilbau. Dadurch sind bereits Bauteile in der Serienanwendung, die nicht mehr durch Gießen und/oder Zerspanen, sondern im „3D-Druck“ hergestellt werden, siehe Sander et al. [3].

In der Luft- und Raumfahrt wird die additive Fertigung meist mit dem Ziel bester Werkstoffeigenschaften für Sonderlegierungen angewendet. Der Aufwand ist sehr hoch und dementsprechend kostentreibend. Im Maschinen- und Automobilbau sind die Produktionszahlen in der Regel sehr viel höher. Hier lohnt der Einsatz von additiven Verfahren zur Fertigung von Serienbauteilen *bislang* nur für einzelne Anwendungsfälle, siehe Spiegel et al. [4]. Jahrzehntelange Erfahrungen, vor allem in der Gießerei-, Umform- und Zerspanungstechnik, sorgen für sichere Prozessbeherrschung und ausgereifte Produkte in der Serienfertigung.

In der Maschinen- und Automobilindustrie kommt die additive Fertigung jedoch schon heute für die Entwicklung neuer Produkte in Frage, siehe Grienitz et al., Ohlsen et al. und Barckmann et al. [5, 6, 7]. Im Prototypenbau werden nur geringe Stückzahlen hergestellt. Hier wird traditionell auf subtraktive Fertigungsverfahren wie Fräsen und Drehen zurückgegriffen. Nicht selten folgt darauf eine weitere Prototypengeneration im Sandguss, sofern das Serienbauteil z. B. im Druckguss hergestellt wird. Dies stellt einen hohen Arbeitsaufwand dar. Gleichzeitig stellt sich die Frage, ob die mechanischen Eigenschaften der „aus dem Vollen“ zerspanten bzw. sandgegossenen Prototypen mit denen der späteren Serienbauteile vergleichbar sind. Diese Annahme ist Voraussetzung, um im Entwicklungsprozess die richtigen Rückschlüsse und Anpassungen aus den Prototypenversuchen abzuleiten.

Im Folgenden soll gezeigt werden, in wie weit sich die additive Fertigung in Form von SLM eignet, um Funktionsprototypen mit äquivalenten Eigenschaften zu den späteren Serienbauteilen herzustellen. Als Werkstoff wurde eine im Maschinen- und Automobilbau verbreitete ausscheidungshärtbare Aluminiumlegierung (AlSi10Mg) ausgewählt. Insbesondere die Ermüdungseigenschaften additiv gefertigter Bauteile sollen dargestellt werden. Ziel ist eine Substitution der Fertigungsverfahren Zerspanen und Sand- bzw. Druckguss durch Metall-Laserstrahlschmelzen, siehe Abbildung 2.

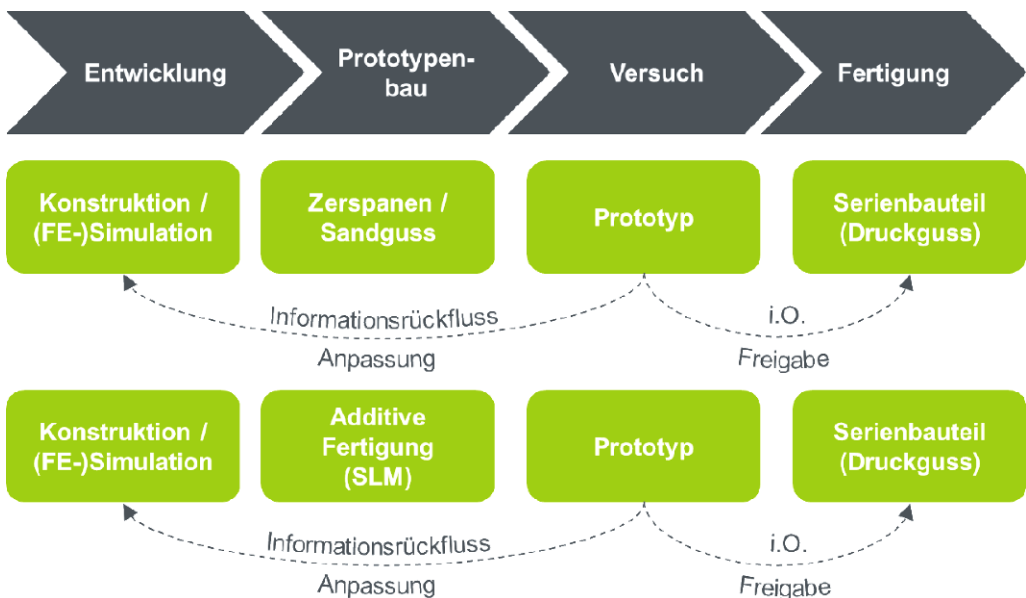


Abbildung 2: Einsatz verschiedener Fertigungsverfahren im Prototypenbau

2 Aktueller Kenntnisstand zur additiven Fertigung

In additiven Fertigungsprozessen spielen verschiedenste Parameter eine Rolle. Tabelle 1 soll in Anlehnung an Aboulkhair et al. [8] eine Übersicht geben.

Tabelle 1: Prozessparameter beim Metall-Laserstrahlschmelzen (SLM)

SLM-Prozessparameter				
Laser	Belichtung	Pulver	Temperatur	weitere
Laserleistung	Scangeschwindigkeit	Partikelgröße	Pulvertemperatur	Schutzgasatmosphäre
Laserstrahldurchmesser	Spurabstand	Partikelform	Pulverzuführtemperatur	Oxidationsprodukte
Pulsdauer	Belichtungsstrategie	Pulverbett-dichte	Temperaturschwankungen	Blaseffekt
Pulsfrequenz		Schichtdicke		Pulverkreislauf
		Material-eigenschaften		Verunreinigung
				Verzug

Der Einfluss der genannten Parameter auf die Werkstoffeigenschaften wird intensiv diskutiert. Dabei werden neben mikrostrukturellen Analysen insbesondere die maximal erreichbare relative Dichte und Festigkeitskennwerte untersucht. Folgend sollen wesentliche Erkenntnisse dargestellt werden. Dabei gilt es zu beachten, dass mögliche Wechselwirkungen und Korrelationen der Einzelparameter nur schwer überblickt werden können. Dies ist zum einen der Vielzahl an SLM-Prozessparametern geschuldet, des Weiteren variieren die Parameter zwischen den betrachteten Quellen zum Teil sehr stark. Hier sind noch viele Fragen offen. So haben zum Beispiel aktuell verfügbare Serien-Maschinen im Vergleich zu bekannten Literaturwerten eine deutlich höhere Laserleistung P_L . Dies gilt es zu berücksichtigen. Die Einführung der Größen Volumenrate VR und Volumenenergiedichte E_V , Vergleich VDI-Richtlinie 3405 Blatt 2 [9], vereinheitlicht die Parameter Laserleistung P_L , Scangeschwindigkeit v_S , Spurabstand h_S und Schichtdicke l_S zur einfacheren Vergleichbarkeit:

$$VR = v_S \cdot h_S \cdot l_S \quad (1)$$

$$E_V = P_L \div VR \quad (2)$$

Die Volumenrate VR ist ein Maß für die Menge an aufgeschmolzenem Pulver pro Zeit. Unter Berücksichtigung der Laserleistung P_L kann mit der Volumenenergiedichte E_V ein Vergleichswert bezüglich der eingebrachten Energie je Volumen berechnet werden. Beide Werte stehen in einem direkten Zusammenhang. Eine Erhöhung der Volumenrate VR hat eine Verringerung der Volumenenergiedichte E_V zur Folge und umgekehrt.

Basierend auf diesen Zusammenhängen und den aus aktuellen Anwendungen als maßgeblich erkannten Parametern wurde für eigene Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojekts „AddiFeE – Innovation additive Fertigung“ der Technischen Hochschule Mittelhessen* ein

Versuchsplan mit vier Parametersätzen (AddiFeE 1 – 4, siehe Abbildung 3) aufgestellt und umgesetzt, um systematisch den Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften Dichte, Härte, Zugfestigkeit, Dehngrenze, Bruchdehnung und Kerbschlagzähigkeit zu analysieren. Zusätzlich wurde das zyklische Materialverhalten untersucht und dabei zyklische Spannungs-Dehnungskurven sowie Wöhlerlinien aufgenommen. Die Fertigung der Proben und Bauteile erfolgte auf einer Maschine vom Typ Concept Laser M2 Cusing. Weitere Details sind bei Wörner et al. [10, 11] dokumentiert.

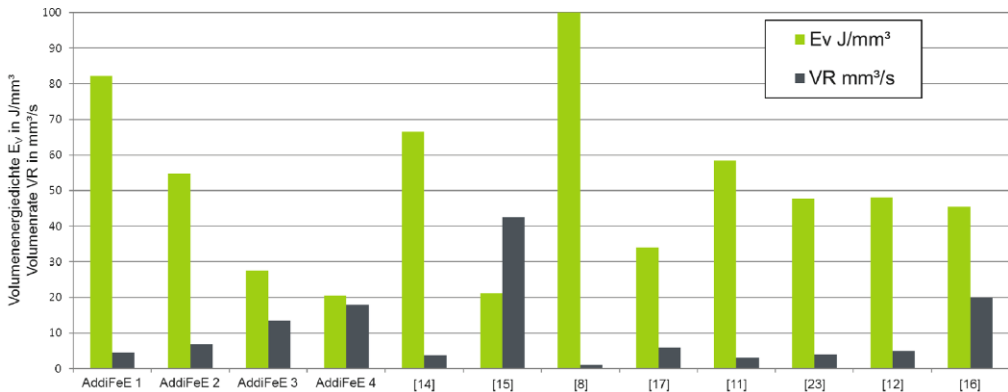


Abbildung 3: Volumenenergiegedichte und Volumenrate aktueller Untersuchungen

Die Volumenrate der im Projekt „AddiFeE“ untersuchten Parametersätze lag zwischen 4,5 mm^3/s und 18,0 mm^3/s , die Volumenenergiegedichte bei 20,6 J/mm^3 bis 82,2 J/mm^3 . Read et al. [12] haben passend dazu eine Volumenenergiegedichte von 60 J/mm^3 für AlSi10Mg empfohlen. Für AlSi12 empfehlen Olakanmi et al. [13] 67 J/mm^3 .

Bedingt durch den schichtweisen Aufbauprozess bei SLM ergeben sich anisotrope Werkstoffeigenschaften. Von Buchbinder und Meiners [14] wurde dies am Beispiel gängiger Aluminiumlegierungen eindeutig durch Versuche nachgewiesen. Brandl et al. [15] zeigten, dass sich durch Einsatz einer Basisplattenheizung auf 300° C und anschließender T6-Wärmebehandlung die Anisotropie umgehen lässt.

Die Eigenschaften des Lasers lassen sich über die erzeugte Leistung, den Strahldurchmesser auf dem Pulverbett und die Taktung der Pulsdauer und -frequenz beschreiben. Allerdings können sowohl mit einer Laserleistung von 100 Watt, wie von Aboulkhair et al. [8] gezeigt, bis hin zu 900 Watt, nach Buchbinder et al. [16], Strukturen mit einer relativen Dichte nahe 100 % erzeugt werden. Weingarten et al. [17] zeigten Wege zur Reduzierung der durch Gaseinschlüsse bedingten Porosität auf und unterschieden damit von jener Porosität verursacht durch unaufgeschmolzenes Pulver. Gas-Poren unterscheiden sich von unaufgeschmolzenem Pulver durch ihre kreis- bzw. kugelförmigen gegenüber einer spratzigen Morphologie. Dies deckt sich mit eigenen Untersuchungen. Abbildung 4 zeigt die Porenform, -größe und -verteilung der Parametersätze AddiFeE 1 – 4 an jeweils einem gedruckten Würfel mit der Kantenlänge zehn Millimeter. Die Darstellung gibt einen Überblick über die Porengröße und -verteilung anhand des jeweils ungünstigsten berechneten Porositätswertes je Parametersatz. Die gemessene bzw. berechnete relative Dichte ρ_{rel} liegt bei den Parametersätzen AddiFeE 1 – 3 zwischen 99,4 % und 99,7 %, auf einem nahezu gleich hohen Niveau. Lediglich Parametersatz AddiFeE 4 fällt um fünf Prozent ab, was sich bereits optisch deutlich in der Porengröße und -verteilung zeigt.

Weingarten et al. [17] konnten die Porosität durch Pulvertrocknung reduzieren. Für unterschiedlichen Pulverchargen wurde von Kempen et al. [18] eine Streuung der relativen Dichte von 1 – 2 % bei ansonsten gleichen Maschinenparametern beobachtet. Dies lässt sich auf Partikelgröße und -form sowie mögliche Verunreinigungen und Passivierungszustände des Pulvers zurückführen. Olakanmi et al. [13] belegten eine sinkende Dichte um 15 % bei steigender Schichtdicke des Pulverbettes von 0,25 mm bis 1 mm.

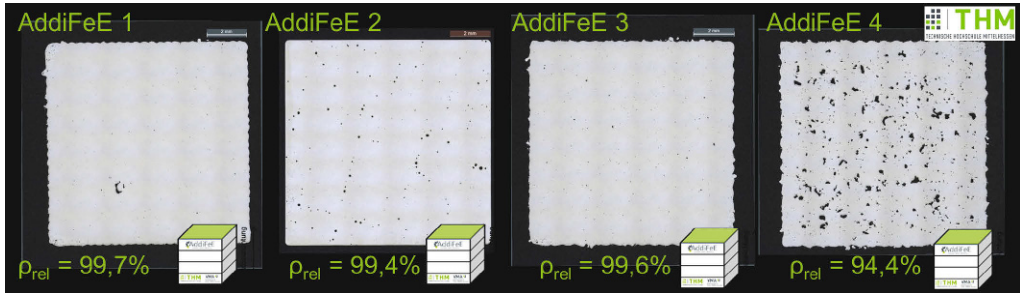


Abbildung 4: Porenform, -größe und -verteilung sowie relative Dichte der Parametersätze AddiFeE 1 – 4 quer zur Aufbauichtung

Am Karlsruher Institut für Technologie [19] wurde ein Blaseffekt beobachtet. Bei zu geringer Scangeschwindigkeit führt die schnell steigende Gastemperatur und damit verbundene Gasexpansion im und um den Belichtungspunkt zum Wegblasen von nicht aufgeschmolzenem Pulver. Auswirkungen auf die Oberflächeneigenschaften und Geometrie wurden von Buchbinder et al. [20] untersucht. Es zeigte sich, dass durch Vorwärmen der Grundplatte Bauteile ohne Verzug und spannungsbedingte Risse hergestellt werden können.

Weitere Einzeleffekte im Prozess, die mutmaßlich Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften haben, konnten in der Anwendung beobachtet werden. Zu nennen sind hier die Art und Menge der Schutzgasatmosphäre, wie von Wang et al. [21] gezeigt. Zudem nimmt die Strömungsrichtung Einfluss auf die Verteilung von sogenanntem Schmauch (Verbrennungsprodukt), der beim Aufschmelzen entsteht und dann auf noch unbelichtetes Pulver rieselt. Dies wurde durch Anwar et al. [22] belegt. Eventuelle Verunreinigungen von Maschine und Pulver sowie das Durchmischen des Ausgangspulvers mit ungenutztem Pulver aus vorherigen Druckprozessen im Pulverkreislauf sorgen für Ungewissheit bezüglich der Pulverqualität.

Die Art der Belichtung lässt sich über die Scangeschwindigkeit, den Abstand zwischen zwei Schmelzspurbahnen und die Reihenfolge bzw. Orientierung dieser variieren. Ein Prozessfenster für geeignete Scangeschwindigkeiten zur Erzeugung von kontinuierlich auftragenden Schmelzbahnen wurde von Kempen et al. [18] mit 700 – 1400 mm/s bei 200 Watt Laserleistung aufgezeigt. Olakanmi et al. [13] zeigten den Zusammenhang zwischen steigendem Spurbabstand und dadurch fallender Dichte auf. Mit unterschiedlichen Belichtungsstrategien, ob parallel, entgegenlaufend, kreuzend, feldweise oder feldweise bei gleichzeitiger Drehung der nachfolgenden Schicht um 90° lässt sich nach Erkenntnissen von Thijs et al. [23] die Anisotropie reduzieren. Aboulkhair et al. [8] untersuchte die Auswirkung der Belichtung in Kombination mit verschiedenen Scangeschwindigkeiten auf die relative Dichte und empfiehlt eine doppelte Belichtungsstrategie, mit einem ersten Belichtungsvorgang bei halber Laserleistung und einer anschließenden zweiten Belichtung mit voller Leistung. Unterschiedliche Parameter-einstellungen für Boden, Flanke, Deckel und Kern des Bauteils wurden von Manfredi et al. [24] verfolgt und erfolgreich gezeigt, dass sich damit ebenfalls relative Dichten von über 99 % realisieren lassen. Weitere Details zur Belichtungsstrategie lassen sich in Abbildung 5 erken-

nen. Die stochastische Ansteuerung feldweiser Rechteck-Segmente (die sogenannte Schachbrett- bzw. Island-Strategie) [25], wird in (A) deutlich im Werkstoff sichtbar, nachdem der Schliff quer zur Aufbauichtung mit 15%-iger Natronlauge geätzt wurde. Vor dem Ätzen (B) war dies noch nicht zu erkennen. Überlagert man beide Darstellungen (C) so zeigt sich, dass Poren vorwiegend entlang der Segmentränder angeordnet sind. Das Wiederaufschmelzen des Werkstoffs bzw. die Mehrfachbelichtung an den Segmenträndern und Schmelzbadgrenzen scheint die Porenbildung zu verstärken, siehe auch Tang et al. [26]. Die einzelnen Aufbauschichten können aus Abbildung 5 (D) identifiziert werden. Hierbei wurde längs zur Aufbauichtung präpariert.

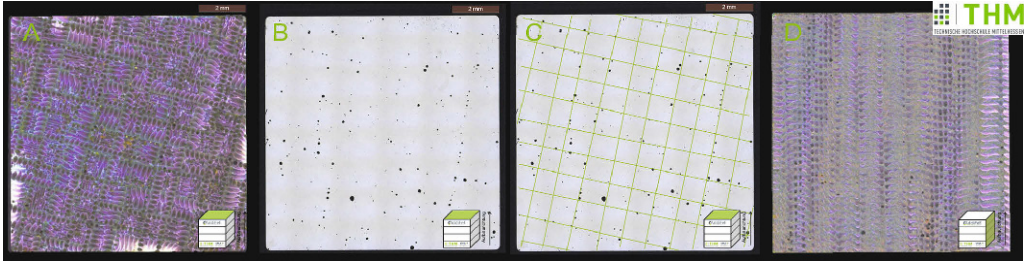


Abbildung 5: Feldweise Belichtungsstrategie in Schlickebenen quer zur Aufbauichtung (A), (B), (C); Schichtaufbau längs zur Aufbauichtung (D), alle für Parametersatz AddiFe 2

Ein Absinken der quasi-statischen Festigkeitskennwerte und Ansteigen der Zähigkeit bei Nutzung der zusätzlichen Option einer beheizten Grundplatte zur Erwärmung des Metallpulvers und der darin entstehenden Struktur wurde von Siddique et al. [27] beobachtet. Zusätzlich zeigte sich, dass die Vorheizung zu einer deutlichen Reduzierung der Schwingfestigkeitsstreuung führt, ein Spannungsarmglühen aber nur geringfügige Auswirkungen auf diese Werkstoffeigenschaften hat. Read et al. [12] führten Untersuchungen zum Kriechverhalten durch und stellten fest, dass die Aufbauichtung nur geringe Auswirkungen darauf hat.

3 Werkstoffcharakterisierung

Zunächst wurde im Projekt „AddiFeE“ das Ausgangsmaterial, Pulver der Legierung AlSi10Mg, analysiert. Dazu wurde eine kleine Menge Pulver per Laserbeugungs-Partikelgrößenanalyse untersucht und eine Kugelform der Partikel angenommen.

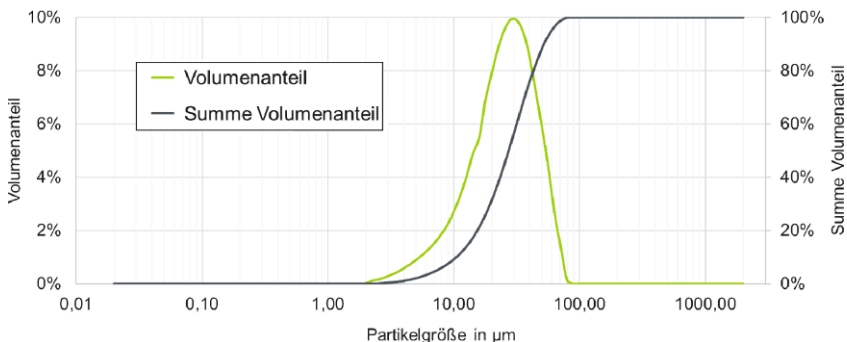


Abbildung 6: Partikelgrößenverteilung des Ausgangspulvers AlSi10Mg

Die gemittelte Partikelgröße des Ausgangspulvers beträgt im Durchmesser 19,8 μm , die mittlere Körnung beträgt im Durchmesser 29,7 μm . Die Partikelgrößenverteilung kann aus Abbildung 6 entnommen werden. Die chemische Zusammensetzung des per Metall-Laserstrahlschmelzen gefertigten Werkstoffs AlSi10Mg entspricht den Vorgaben der Norm (DIN EN 1706). Dies wurde mittels optischem Emissionsspektrometer bestätigt, Tabelle 2.

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung

Legierungsbezeichnung	Konzentration in % Massenanteil												
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Andere	Al
SLM AddiFeE 2 AlSi10Mg	10,46	0,15	0,11	0,003	0,36	0,004	0,002	0,001	0,004	0,01	0,005	0,021	88,87
Druckguss DIN EN 1706 AlSi10Mg	9,0 - 11,0	0,55	0,1	0,45	0,20 - 0,45	-	0,05	0,1	0,05	0,05	0,15	0,15	Rest

Abbildung 7 soll das Gefüge näher charakterisieren. (A) zeigt die Aluminium-Legierung AlSi10Mg unter Verwendung des Fertigungsparametersatzes AddiFeE 2, ohne eine Nachbehandlung des SLM-Prozesses. Die Schiffe (A), (B) und (C) wurden quer zur SLM-Aufbauichtung der Proben angefertigt und wie auch (D) zur Entwicklung des Gefüges mit 15%-iger Natronlauge geätzt. Deutlich zu erkennen sind in (A) die Schmelzbäder, die bei der punktuellen Belichtung des Pulvers durch den Laser entstehen und eine makroskopisch, charakteristische Struktur unbehandelter SLM-Werkstoffe bilden, wie auch von Rosenthal et al. [28] aufgezeigt, denn die Schmelzbadgrenzen zeichnen sich aufgrund der hell erscheinenden siliziumreichen Phasen, nachgewiesen durch Yan et al. [29], im Gefüge ab. Der lösungsgeglühte SLM-Zustand (B) zeigt eine homogene Verteilung des Eutektikums und der intermetallischen Phasen im Gefüge. Nach einer T6-Wärmebehandlung lassen sich in (C) die Korngrenzen und die korngrenznahe Verteilung dieser Phasen erkennen. Im Gegensatz dazu ist das Gefüge von D-AlSi11Cu2(Fe)-T5 des Aluminium-Druckguss-Bauteils vergleichsweise grobkörnig und eine Konzentration des Eutektikums und der intermetallischen Phasen in den korngrenznahen Bereichen wird deutlich, siehe (D).

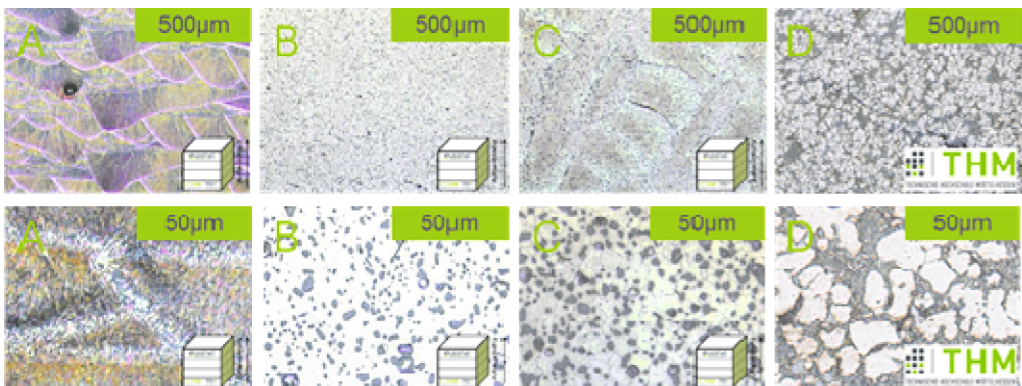


Abbildung 7: Gefügeaufnahmen für SLM (A); SLM-lösungsgeglüht (B); SLM-T6 (C); Druckguss-T5 (D)

Um schnell und kostengünstig eine Prognose bezüglich der Werkstoffeigenschaften treffen zu können, wurde zunächst die Dichte (nach DIN EN ISO 3369) und die Härte (nach DIN EN 6507) gemessen. So konnte ein erster Vergleich der Werkstoffkennwerte mithilfe kleiner Würfelproben und geringem Versuchsaufwand erstellt werden. Für die Dichtebestimmung wurden jeweils zehn Einzelproben, für die Härtebestimmung jeweils 24 Einzelmessungen je Parametersatz genutzt.

In Abbildung 8 sind die Dichte ρ und Härte HV1 für die Fertigungsparametersätze AddiFeE 1 – 4 veranschaulicht. Wie schon in der optischen Analyse der relativen Dichte ρ_{rel} erkannt, fällt auch die Massendichte ρ von Parametersatz AddiFeE 4 gegenüber den andern ab. Beide Messverfahren führen zu qualitativ übereinstimmenden Messergebnissen. Gegenüber der Dichte eines Werkstoffwürfels entnommen aus dem Gussbauteil liegt die Dichte für die Parametersätze AddiFeE 1 – 3 sogar auf einem höheren Niveau.

Die Härtewerte liegen im Rahmen der Messgenauigkeit auf einem vergleichbaren Niveau. Die Härte eines Werkstoffwürfels entnommen aus dem Gussbauteil liegt ebenfalls in diesem Streubereich.

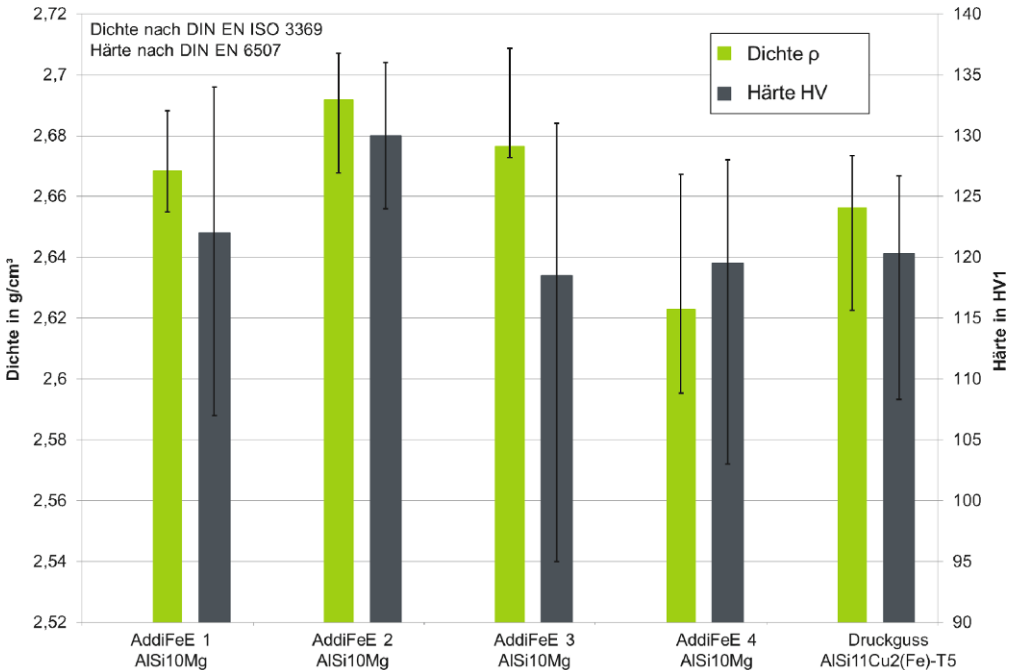


Abbildung 8: Dichte ρ und Härte HV1 für die Fertigungsparametersätze AddiFeE 1 – 4 sowie der Druckgusslegung D-AlSi11Cu2(Fe)-T5

4 Mechanische Eigenschaften

Zunächst soll die im Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy (DIN EN 148) bei Raumtemperatur verbrauchte Schlagenergie KV_2 von additiv gefertigtem Werkstoff analysiert werden, siehe Abbildung 9. Erneut zeigen sich für Fertigungsparametersatz AddiFeE 4 die niedrigsten Werte, wobei anzumerken ist, dass mit einer Gesamtbandbreite zwischen zwei und sechs Joule die

Schlagenergie bei allen Fertigungsparametern auf nur geringem Niveau gegenüber anderen Konstruktionswerkstoffen liegt. Zur Durchführung der Versuche wurden für jeden Parametersatz jeweils drei Charpyproben längs und drei Charpyproben quer zur Aufbaurichtung gedruckt. Erneut zeigt sich anisotropes Werkstoffverhalten. Die verbrauchte Kerbschlagenergie stehend gedruckter Proben ist stets geringer. Die Ergebnisse decken sich mit denen von Kempfen et al. [30] und Fulcher [31].

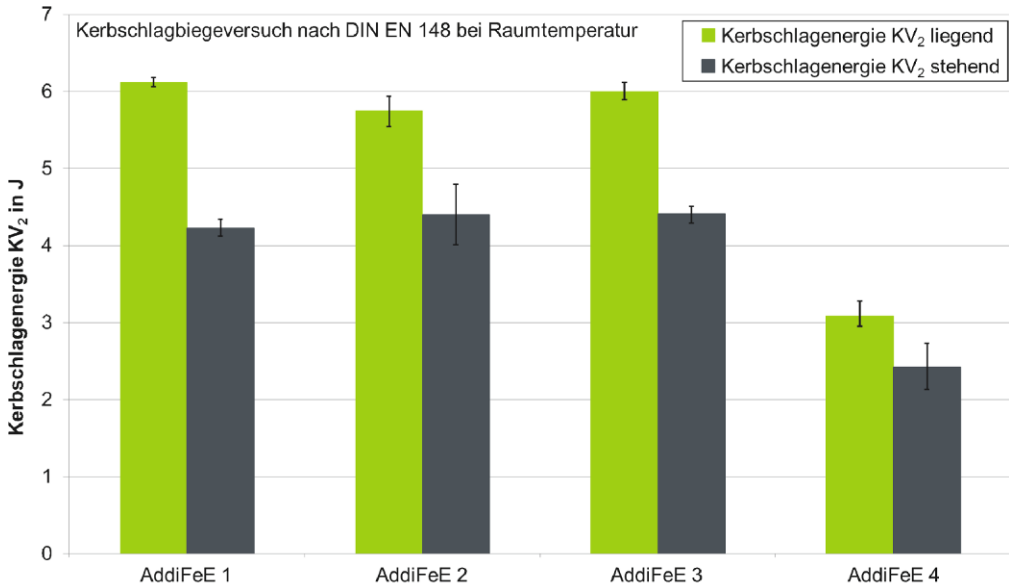


Abbildung 9: Kerbschlagenergie KV₂ liegend und stehend aufgebauter Proben der Fertigungsparametersätze AddiFeE 1 – 4

In Abbildung 10 werden die quasistatischen Materialkennwerte für Fertigungsparametersatz AddiFeE 2 sowie der Druckgusslegierung mit Werten der VDI Richtlinie 3405 Blatt 2.1 und der Norm DIN EN 1706 [32, 33] verglichen. Zugversuche (nach DIN EN ISO 6892-1 – A224) wurden mit jeweils sieben stehend (Polarwinkel von 0°) aufgebauten Proben A 5 x 25 nach DIN 50125 je Parametersatz durchgeführt. Aufgrund der Anisotropie des Werkstoffs haben stehend gedruckte Proben eine tendenziell niedrigere Festigkeit, womit die ermittelten Kennwerte als konservativ anzusehen sind. Für den Einsatz in der Konstruktion wird empfohlen sich an diesen Werten zu orientieren. Es zeigt sich, dass mit Fertigungsparametersatz AddiFeE 2 Anschluss an die VDI-Richtlinie gefunden wurde. Die Dehngrenze $R_{p0.2}$ der aus dem Druckgussbauteil entnommenen Proben, liegt nur geringfügig niedriger. Deshalb wurde der Parametersatz AddiFeE 2 zur Substitution der Druckguss-Legierung gewählt. Zugfestigkeit R_m und Bruchdehnung A_5 von Druckguss liegen auf dem Niveau der Normangaben, werden aber von den SLM-Kennwerten deutlich übertroffen! Die zu erwartende Auswirkung einer T6-Wärmebehandlung auf Zugfestigkeit, Dehngrenze und Bruchdehnung zeigt die VDI-Richtlinie 3405 Blatt 2.1 [32]. Da die T6-Wärmebehandlung die Zugfestigkeit verringert – bei gleichbleibender Dehngrenze – und Bruchdehnung und Streuung bereits gute Werte aufweisen, wurde in Anbetracht des zu substituierenden Werkstoffs D-AlSi11Cu2(Fe)-T5 auf eine Wärmebehandlung der SLM-Bauteile gefertigt mit Parametersatz AddiFeE 2 vorerst verzichtet. Dadurch werden die Eigenschaftsänderungen in Folge einer Wärmebehandlung ausgeklammert und ausschließlich Eigenschaften resultierend aus dem SLM-Prozess analysiert. Gleichzeitig wer-

den dadurch Fertigungszeit und -kosten minimiert. Die Bauteile lassen sich somit sofort nach dem 3D-Druck einsetzen bzw. weiterverarbeiten.

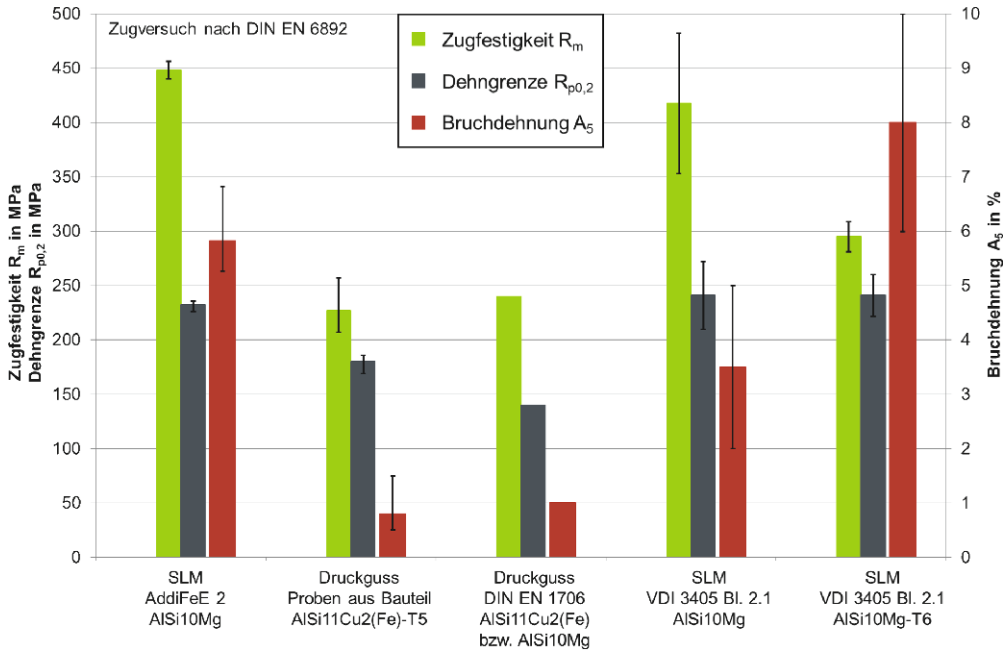


Abbildung 10: Quasistatische Materialkennwerte von AlSi10Mg und AlSi11Cu2(Fe)

5 Örtliches Konzept

Mit dem Konzept der örtlich elastisch-plastischen Beanspruchungen, kurz Örtliches Konzept genannt, können für schwingbeanspruchte Bauteile Anrisslebensdauern berechnet werden. Dabei werden für die hochbeanspruchten Stellen des Bauteils die elastisch-plastischen Spannungs-Dehnungs-Pfade ermittelt und anschließend auf Versagen bewertet. Hierzu sind der Übertragungsfaktor c zwischen Laststöße L und der örtlichen elastischen Spannung σ_e bezüglich des Anrissortes, die stabilisierte zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve sowie die zugehörige Dehnungs-Wöhlerlinie des eingesetzten Werkstoffs und die entsprechende Last-Zeit-Reihe oder ggf. das Einstufenkollektiv erforderlich. Der Übertragungsfaktor c kann aus Handbüchern, elastischen Finite-Elemente-Rechnungen oder experimentell bestimmt werden. Die zyklischen Werkstoffdaten werden experimentell über einachsige dehnungsgeregelte Dauerschwingversuche ermittelt. Last-Zeit-Reihen werden über Sensoren am Bauteil oder per Mehrkörpersimulation (MKS) erfasst. Um Größen- und Fertigungseinflüsse zu erfassen sind zum Beispiel Spannungsgradient, Oberflächenrauigkeit, Randschichthärte oder Eigenspannung in das Konzept zu integrieren. Die Beanspruchungs- und Schädigungsrechnung führt zur Anrisslebensdauer. Die hierbei gängige Definition des sogenannten technischen Anrisses, in Form eines Oberflächenrisses, beträgt einen Millimeter. Für konstante Amplituden können Anrisswöhlerlinien berechnet werden. Abbildung 11 fasst das Örtliche Konzept zusammen.

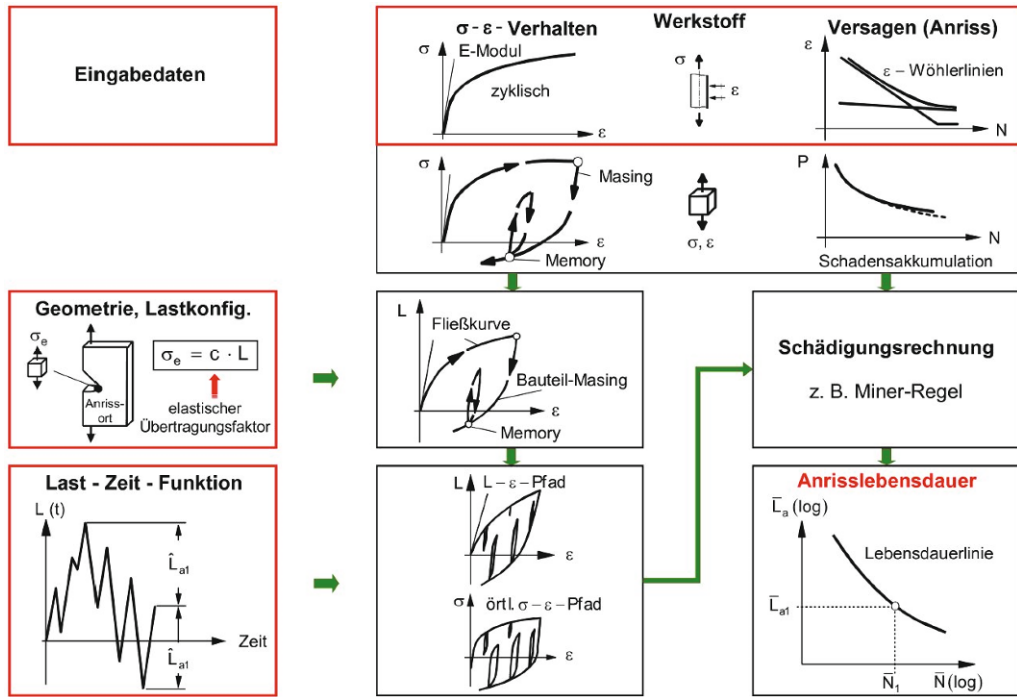


Abbildung 11: Örtliches Konzept

Das Örtliche Konzept ist für Konstruktionen mit hoher Formenvielfalt nahezu die einzige Möglichkeit einen Betriebsfestigkeitsnachweis zu führen. Es ist in konventionellen Softwarelösungen umgesetzt und kann hier in Verbindung mit Finite-Elemente-Programmen angewendet werden. Diese wiederum können direkt zur FE-Simulation der CAD-Daten von SLM-Bauteilen genutzt werden, sowie mittels Optimierungsalgorithmen die virtuelle Prozesskette der additiven Fertigungsverfahren vervollständigen.

Fiedler und Vormwald berichten in [34, 35] über den Stand einer Initiative bei der Formulierung einer regelwerksähnlichen Empfehlung zur Anwendung des Örtlichen Konzepts.

6 Ermüdungseigenschaften additiv gefertigter Bauteile

Mit Ergebnissen aus Schwingfestigkeitsversuchen lässt sich, für AlSi10Mg, 3D-gedruckt, das zyklische Verformungsverhalten des Werkstoffs beschreiben. Hierbei konnte eine zyklische Verfestigung festgestellt werden. Eine zyklische Verfestigung weist das SLM-Aluminium ebenso auf, wie geglähte oder ausgehärtete Gusslegierungen, siehe Ostermann [36]. Die aufgenommenen Dehnungs-Wöhlerlinien bzw. zyklisch stabilisierten Spannungs-Dehnungs-Kurven dienen als Eingabewerte in der anschließend durchgeführten Lebensdauersimulation nach dem Örtlichen Konzept [34, 35], siehe Tabelle 3. Angegeben sind Kennwerte, ermittelt an Proben mit mechanisch bearbeiteter Oberfläche, für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 50%. Für den SLM-Werkstoff AlSi10Mg wurden die Versuche nach ASTM E606 mit 30 Proben durchgeführt und die zyklischen Werkstoffdaten sind im Fachgebiet Werkstoffmechanik

[37] veröffentlicht. Für die Werkstoffgruppe Aluminiumguss ist nur eine sehr kleine Basis an zyklischen Werkstoffkennwerten verfügbar, Vergleich Wächter [38]. Die Kennwerte für D-AlSi11Cu2(Fe) wurden über das Uniform-Material-Law [39] berechnet.

Tabelle 3: Zyklische Werkstoffkennwerte für die Gleichungen nach

Ramberg-Osgood [40]:
$$\epsilon_a = \sigma_a \cdot E^{-1} + (\sigma_a \cdot K^{\prime-1})^{1/n'} \quad (3)$$

Manson-Coffin-Morrow [40, 41, 42, 43]:
$$\epsilon_A = \sigma'_f \cdot E^{-1} \cdot (2 \cdot N)^b + \epsilon'_f \cdot (2 \cdot N)^c \quad (4)$$

Werkstoff	SLM AlSi10Mg	D-AlSi11Cu2(Fe)-T5
K' – Verfestigungskoeffizient	705,947	366,275
n' – zykl. Verfestigungsexponent	0,117	0,11
σ'_f - Schwingfestigkeitskoeffizient	651,200	379,925
ϵ'_f – zykl. Duktilitätskoeffizient	0,502	0,35
b - Schwingfestigkeitsexponent	-0,107	-0,095
c – zyklischer Duktilitätsexponent	-0,913	-0,69

Die numerische Simulation der Bauteillebensdauer basiert auf nichtlinearen Finite-Elemente-Analysen mit Kontakt. Es ist anzumerken, dass für die rechnerischen und experimentellen Untersuchungen die äußeren Lasten gegenüber den tatsächlichen Betriebslasten deutlich erhöht und die Flanschdicke der Seriengeometrie auf weniger als 50% reduziert wurde. Nur so ließ sich ein Anriss im Zeitfestigkeitsbereich erzielen. Im Kundeneinsatz ist die Lebensdauer des Original-Serienbauteils klar als unkritisch einzustufen. Das Aluminium-Bauteil ist entlang seines Umfangs gelagert und exzentrisch belastet. Daraus resultiert eine Biegebeanspruchung der Struktur. Am Übergangsradius einer Versteifungsrippe zum umlaufenden Flansch ergibt sich, aufgrund des gesenkten Widerstandsmoments, ein Steifigkeitssprung. Die linear-elastische Dehnungsverteilung dieser hochbeanspruchten Stelle ist in Abbildung 12 dargestellt.

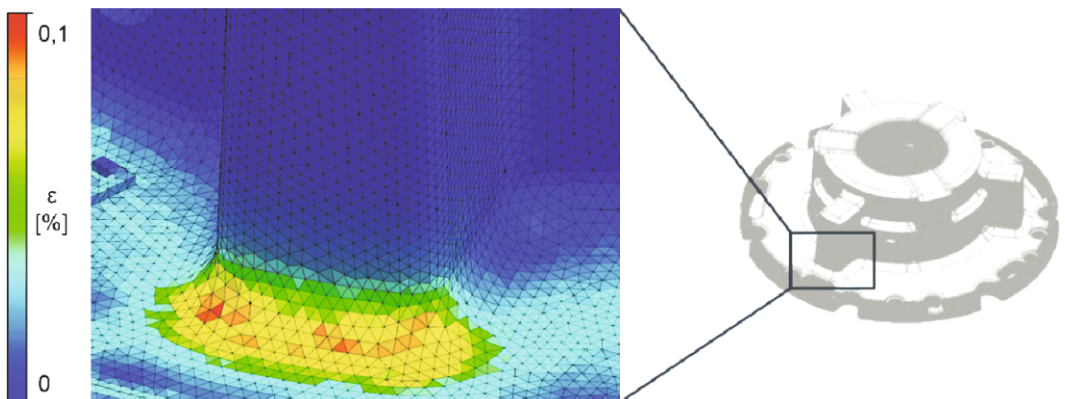


Abbildung 12: Berechnete Dehnung im hochbeanspruchten Bereich des Bauteils

In die Lebensdauersimulation fließt nun die im Rahmen des Projekts „AddiFE“ aufgenommene Dehnungs-Wöhlerlinie und die zyklisch stabilisierte Spannungs-Dehnungs-Kurve ein. Das Belastungskollektiv ist zunächst einstufig im Druckschwellbereich. Der Einfluss der dabei anliegenden Mittelspannung wird nach Morrow [44] korrigiert.

Die numerische Simulation liefert für das Druckguss-Bauteil eine Lebensdauer von ca. 230.000 Schwingspielen dagegen für das SLM-Bauteil 1.590.000 Schwingspiele bis zum technischen Anriss (1 mm). Dies soll nun in Schwingversuchen an beiden Bauteiltypen verifiziert werden.

Nach dem 3D-Druck müssen die Bauteile an Funktionsflächen mechanisch bearbeitet werden. Diese Nachbearbeitung erfolgt in gleicher Weise bei den gegossenen Serienbauteilen, um die geforderten Maße, Toleranzen sowie Oberflächenanforderungen und damit die Funktion erfüllen zu können. Soweit zeigten die SLM-Bauteile keinen erkennbaren Unterschied zu den Guss-Bauteilen auf. Die Herstellzeit eines SLM-Prototypen, gemessen im Zeitraum vom fertigen CAD-Entwurf bis zum einsatzbereiten Funktionsprototyp, ist allerdings zehnfach kürzer. Der Aufbau des Prüfstands für die Schwingfestigkeitsversuche konnte aus der Serienbaugruppe übernommen werden. Damit konnte die Prüfkonfiguration gleichwertig gegenüber dem Betriebszustand umgesetzt werden. Sowohl die Guss- als auch SLM-Bauteile konnten unter den gleichen Randbedingungen wie in der Simulation geprüft werden.

Bei beiden Bauteiltypen bestätigte sich die zuvor berechnete hochbeanspruchte Stelle als Ausgangsort des Risses. Abbildung 13 zeigt jeweils links die Biegezugseite mit dem Riss zu einem Status, bei dem er wie jeweils in der Mitte zu sehen, bereits durch den Flansch auf die Biegedruckseite gewachsen ist (Durchriss). Die optische Rissdetektion erwies sich bei der raueren SLM-Oberfläche grundsätzlich als schwierig.

Abbildung 13 zeigt rechts die Bruchflächen beider Risse. Im Gegensatz zu einem Anrissort bei Guss, oben links zu erkennen, haben sich beim SLM-Bauteil mehrere Anrisse entlang der Versteifungsrippe gebildet. Die SLM-Bruchfläche erscheint deutlich glatter als die samtige Guss-Bruchfläche.

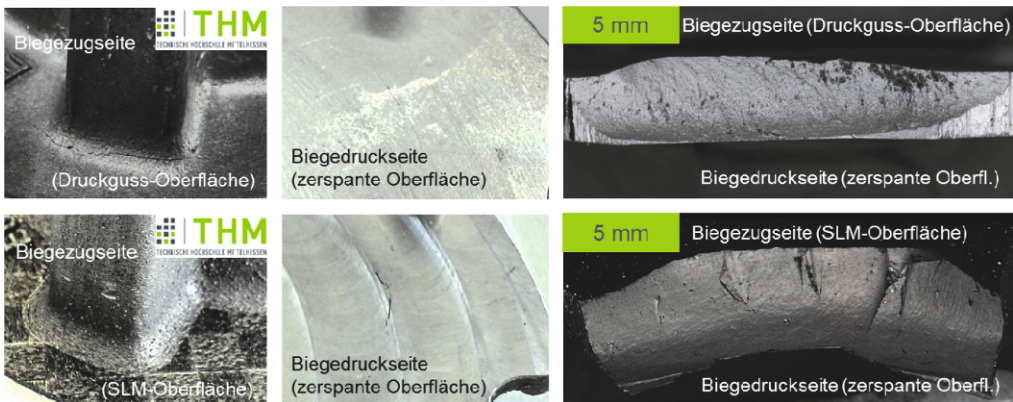


Abbildung 13: Risse und Bruchflächen von Druckguss-Bauteil (oben), SLM-Bauteil (unten)

Eine Präparation senkrecht zur jeweiligen Bruchfläche der Bauteile zeigt eine gleiche Lage und Orientierung der Bruchflächen, Abbildung 14. Der Riss neigt sich während des Wachstums (entsprechend der eingetragenen Pfeilrichtung) immer flacher bis zum Durchriss auf der Biegedruckseite. Der Verlauf der Bruchflächen kann, entsprechend der Balkentheorie, vereinfacht als jeweils normal zur Hauptspannungstrajektorie im ungerissenen Zustand beschrieben werden. Anhand des Druckguss-Bauteils (links), wo ein weiterer Riss zu sehen ist, zeigt sich nochmals der Ort der Rissinitiierung auf der Biegezugseite. Beim Druckguss-Bauteil fallen größere Lunker auf. Die daraus resultierende Porosität ist allerdings von der hochbeanspruchten Biegezugseite ausreichend entfernt, wodurch kein Einfluss auf das

Bauteilversagen zu erwarten ist. Beim SLM-Bauteil erweist sich die Porosität relativ homogen verteilt und insgesamt geringer als beim Druckguss-Bauteil.

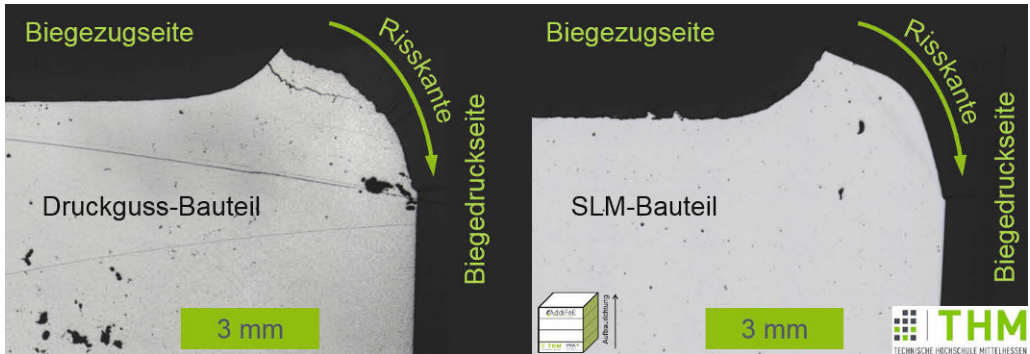


Abbildung 14: Hochbeanspruchter Bauteilbereich senkrecht zu Bruchfläche präpariert

Der im Schliff präparierte Bereich des Rissausgangs, Abbildung 15 geätzt mit 15%-iger Natronlauge, lässt einen überwiegend interkristallinen Rissverlauf erkennen (A). Im Gegensatz dazu erscheint die Bruchkante des SLM-Bauteils vergleichsweise glatt (B). Dies ist mit dem sehr feinkörnigen SLM-Gefüge zu begründen. Die Beobachtung deckt sich mit der zuvor detektierten Bruchflächenoptik beider Bauteile. Zusätzlich soll die SLM-Bruchkante mit einer jeweils längs zur Aufbauachse präparierten SLM-Zugprobe (C) und einer SLM-Charpyprobe (D) verglichen werden. Bei der Zugprobe ist der Bruchverlauf entlang der Schmelzbadgrenzen sehr deutlich zu erkennen. Bei den Charpyproben haben die Schmelzbadgrenzen auch noch einen erkennbaren Einfluss auf den Bruchverlauf. Beim Schwingbruch des SLM-Bauteils ist dies allerdings nicht mehr der Fall. Der Riss wächst hier unabhängig von den Schmelzbadgrenzen durch den Werkstoff.

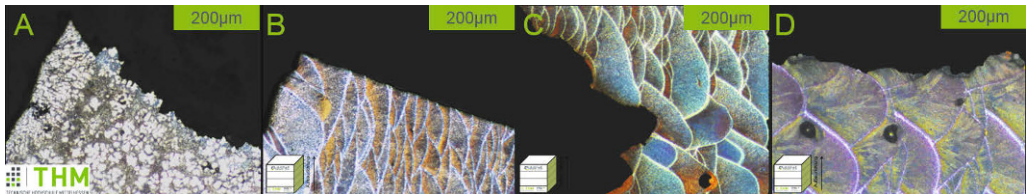


Abbildung 15: Gefügeaufnahmen mit Ermüdungsriss für Druckguss-Bauteil (A) und SLM-Bauteil (B); Gewaltbruch für SLM-Zugprobe (C) und SLM-Charpyprobe (D)

Die Ergebnisse aller im Projekt „AddiFeE“ durchgeführten Schwingversuche für Druckguss-Bauteile und SLM-Bauteile gefertigt mit Parametersatz AddiFeE 2 sowie die berechneten Schwingspielzahlen bis zum technischen Anriss sind in Abbildung 16 zusammengefasst. Im Versuch zeigt sich eine hohe Übereinstimmung der Lebensdauer von Guss- und SLM-Bauteilen. Im Gegensatz zu Aboulkhair et al. [45] wird gezeigt, dass auf eine anschließende Wärmebehandlung der SLM-Bauteile verzichtet werden kann. Die Simulation für das Guss-Bauteil ist konservativ, wohingegen die simulierte Lebensdauer der SLM-Bauteile nicht erreicht wird; die im Versuch festgestellte Lebensdauer liegt bei einem Drittel bis der Hälfte.

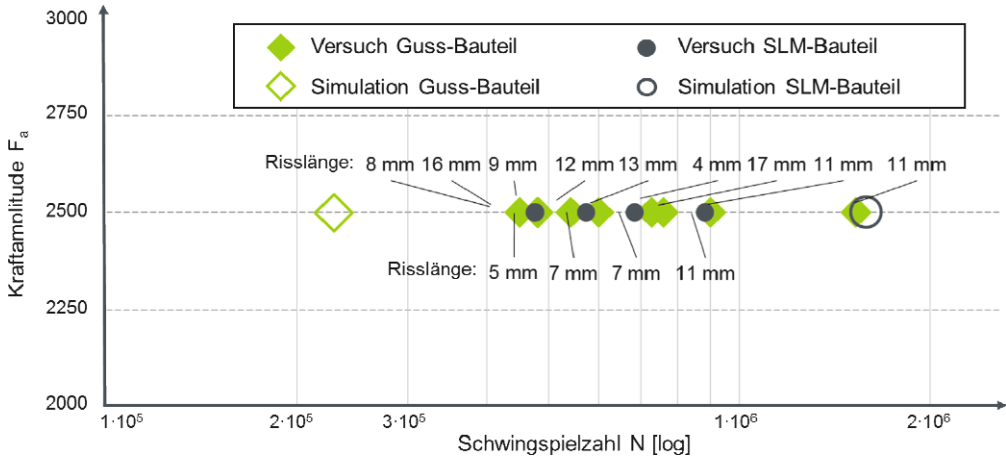


Abbildung 16: Versuchs- und Simulationsergebnisse zur Bauteillebensdauer

Eine Prognose der Ermüdungseigenschaften ist somit bedingt möglich. Der Ort des Anrisses kann prognostiziert werden und ist stets im Versuch bestätigt worden. Die Simulation prognostiziert eine längere Lebensdauer der SLM-Bauteile. Dies liegt unter anderem an der stark von der Oberfläche bzw. Werkstofffehlern abhängigen Streuung der Schwingfestigkeit. Da zunächst bewusst ohne Konturparameter für die SLM-Oberfläche gearbeitet wurde, ist hier eine vermeintliche Fehlerquelle zu sehen. Die gemittelte Rauheit R_z liegt bei den Gussoberflächen bei ca. 12 μm und bei der SLM-Oberfläche bei ca. 58 μm . Ein validierter Parameter für den Oberflächeneinfluss additiv gefertigter Bauteile ist nicht bekannt. Zur Steigerung der Schwingfestigkeit bzw. Minimierung der Streuung wird eine möglichst glatte Oberfläche bzw. porenfreie Randschicht empfohlen. Gleiches wurde für AlSi12 von Siddique et al. [46] berichtet. Dies erleichtert gleichzeitig die Rissdetektion, die in Radien und Kerben von SLM-Bauteilen nur bedingt möglich ist.

7 Fazit

Bauteilsschwingversuche zeigen, dass mit dem gewählten Fertigungsparametersatz AddiFeE 2 für SLM-Bauteile annähernd identische Lebensdauern wie für Druckguss-Bauteile erreicht werden. Eine Aushärtung der Bauteile aus AlSi10Mg im Anschluss an den SLM-Prozess ist nicht erforderlich, das Festigkeitsniveau von wärmebehandeltem D-AlSi11Cu2(Fe)-T5 ist bereits erreicht. Damit kann die additive Fertigung in Form von Rapid Prototyping in Hinblick auf die Bauteil-Schwingfestigkeit zur Substitution von zerspanender Fertigung und Sand- bzw. Druckguss für Funktions-Prototypen eingesetzt werden. Gleichzeitig kann die Herstellzeit der Prototypen von mehreren Wochen auf wenige Tage verkürzt und damit eine Beschleunigung der Entwicklungszeit erzielt werden.

Danksagung

Die Autoren danken an dieser Stelle dem projektbegleitenden Arbeitskreis für die fachliche Unterstützung: Herr Matthias Henkel und Herr Dennis Barke, FKM Sintertechnik, Biedenkopf; Herr Thomas Brandt und Herr Manuel Wagner, Sanden International (Europe), Bad Nauheim; Herr Christoph Henkel, Henkel Modellbau, Breidenstein. Ein besonderer Dank geht an die Kollegen des Fachgebiets Werkstoffprüftechnik WPT, Herr Prof. Dr. habil. Frank Walther und Herr Shafaqat Siddique, TU Dortmund. Des Weiteren ein herzlicher Dank für die tatkräftige Unterstützung an Herrn Kim Kevin Winkler und Herrn Sascha Roth, Technische Hochschule Mittelhessen, Friedberg.

* Das Forschungsprojekt "AddiFeE – Innovation additive Fertigung – Metalllaserstrahlgeschmolzene Bauteile für den Maschinen- und Automobilbau" wurde am Fachbereich Maschinenbau, Mechatronik und Materialtechnologie sowie am Kompetenzzentrum für Automotive, Mobilität und Materialforschung (AutoM) der Technische Hochschule Mittelhessen mit finanzieller Förderung des Landes Hessen (HessenAgentur) durchgeführt. Dieses Projekt (HA-Projekt-Nr.: 464/15-06) wurde im Rahmen von Hessen Modellprojekte aus Mitteln der LOEWE – Landes-Offensive zur Entwicklung Wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz, Förderlinie 3: KMU-Verbundvorhaben gefördert.

Literatur

- [1] Schürmann, S.: 3-D-Druck in der gesamten Prozesskette., VDI nachrichten Nr. 17/18 (2015)
- [2] Wohlers Associates: Wohlers Report 2015: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report (2015)
- [3] Sander, P.; Emmelmann, C.; Herzog, F.: Nominierung Deutscher Zukunftspreis 2015: 3-D-Druck im zivilen Flugzeugbau - eine Fertigungsrevolution hebt ab (2015)
- [4] Spiegel, A.; Hillebrecht, M.; Emmelmann, C.; Beckmann, F.: Wege zum wirtschaftlichen Einsatz der laseradditiven Fertigung, lightweightdesign 5/2015 (2015)
- [5] Grienitz, V.; Tröster, T.; Meiners, S.: Technikevaluation für die generative Fertigung eines Serien-Radträgers, ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 09/16 (2016)
- [6] Ohlsen, J.; Herzog, F.; Raso, S.; Emmelmann, C.: Funktionsintegrierte, bionisch optimierte Fahrzeugleichbaustruktur in flexibler Fertigung, ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 10/15 (2015)
- [7] Barckmann, J.; Herchet, H.; Pollner, M.: EDAG LIGHT COCOON, EDAG INSIGHTS 1/15 (2015)
- [8] Aboulkhair, N. T.; Everitt, N. M.; Ashcroft I.; Tuck C.: Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting Additive Manufacturing 1-4, S. 77-86 (2014)
- [9] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Handbuch Produktionstechnik und Fertigungsverfahren, Band 2: Fertigungsverfahren: VDI Richtlinie 3405 Blatt 2 (2013)

- [10] Wörner, S.; Friederich, H.; Jung, U.: Additive Manufacturing durch Metall-Laserstrahlschmelzen – Einfluss der Fertigung auf die Werkstoffeigenschaften von Al-Si10Mg; Berichtsband des 37. Werkstoffmechanikseminars. S. 161-172. Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik (2016)
- [11] Wörner, S.; Friederich, H.; Jung, U.: Additiv gefertigte Bauteile für den Maschinen- und Automobilbau; DVM-Bericht 401, S. 1-10, Deutscher Verband für Materialforschung und –prüfung e.V. (2016)
- [12] Read, N.; Wang, W.; Essa, K.; Attallah, M. M.: Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development *Materials & Design* 65, S. 417-424 (2015)
- [13] Olakanmi, E. O.; Cochrane, R. F.; Dalgarno, K. W.: Densification mechanism and microstructural evolution in selective laser sintering of Al–12Si; *Journal of Materials Processing Technology* 211 (1), S. 113-121, (2011)
- [14] Buchbinder, D.; Meiners, W.: Generative Fertigung von Aluminiumbauteilen für die Serienproduktion; Abschlussbericht AluGenerativ, Fkz.: 01RIO639A-D BMBF (2010)
- [15] Brandl, E.; Heckenberger, U.; Holzinger, V.; Buchbinder, D.: Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior; *Materials & Design* 34, S. 159-169 (2012)
- [16] Buchbinder, D.; Schleifenbaum, H.; Heidrich, S.; Meiners, W.; Bültmann, J.: High Power Selective Laser Melting (HP SLM) of Aluminum Parts; *Physics Procedia* 12, S. 271-278 (2011)
- [17] Weingarten, C.; Buchbinder, D.; Pirch, N.; Meiners, W.; Wissenbach, K.; Poprawe, R.; Formation and reduction of hydrogen porosity during selective laser melting of AlSi10Mg; *Journal of Materials Processing Technology* 221 (2015)
- [18] Kempen, K.; Thijs, L.; Yasa, E.; Badrossamay, M.; Verheecke, W.; Kruth, J. P.: Process optimization and microstructural analysis for selective laser melting of AlSi10Mg, *Solid Freeform Fabrication Symposium*. Vol. 22 (2011)
- [19] Karlsruher Institut für Technologie - IMVT: SLM-Schmelzvorgang <http://www.imvt.kit.edu/746.php> (abgerufen am 22.04.2014)
- [20] Buchbinder, D.; Schilling, G.; Meiners, W.; Pirch, N.; Wissenbach, K.: Untersuchung zur Reduzierung des Verzugs durch Vorwärmung bei der Herstellung von Aluminiumbauteilen mittels SLM ; *RTEjournal* (2011)
- [21] Wang, X. J.; Zhang, L. C.; Fang, M. H.; Sercombe, T. B.: The effect of atmosphere on the structure and properties of a selective laser melted Al–12Si alloy; *Materials Science and Engineering* (2014)
- [22] Anwar, A. B.; Pham, Q.: Selective laser melting of AlSi10Mg. Effects of scan direction, part placement and inert gas flow velocity on tensile strength; *Journal of Materials Processing Technology* 240 (2017)
- [23] Thijs, L.; Kempen, K.; Kruth, J.-P.; van Humbeeck, J.: Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed; *Acta Materialia* 61 (5), S. 1809-1819 (2013)

- [24] Manfredi, D.; Calignano, F.; Krishnan, M.; Canali, R.; Ambrosio, E.; Atzeni, E.: From Powders to Dense Metal Parts: Characterization of a Commercial AlSiMg Alloy Processed through Direct Metal Laser Sintering ; *Materials* 6 (3), S. 856-869 (2013)
- [25] Concept Laser GmbH: Automotive – Schnell! Direktteile im Fahrzeugbau (2016)
- [26] Tang, M.; Pistorius, P. C.: Oxides, porosity and fatigue performance of AlSi10Mg parts produced by selective laser melting, *International Journal of Fatigue* 94, S. 192-201 (2017)
- [27] Siddique, S.; Imran, M.; Wycisk, E.; Emmelmann, C.; Walther, F: Influence of process-induced microstructure and imperfections on mechanical properties of AlSi12 processed by selective laser melting; *Journal of Materials Testing Processing Technology* 221, S. 205-213 (2015)
- [28] Rosenthal, I.; Stern, A.; Frage, N.: Microstructure and Mechanical Properties of AlSi10Mg Parts Produced by the Laser Beam Additive Manufacturing (AM) Technology, *Metallogr. Microstruct. Anal. (Metallography, Microstructure, and Analysis)* 3 (2014)
- [29] Yan, C.; Hao, L.; Hussein, A.; Young, P.; Huang, J.; Zhu, W.: Microstructure and mechanical properties of aluminium alloy. *Materials Science and Engineering: A* 628. S. 238-246 (2015)
- [30] Kempen, K.; Thijs, L.; van Humbeeck, J.; Kruth, J.-P.: Mechanical Properties of AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting, *Physics Procedia* 39, S. 439-446 (2012)
- [31] Fulcher, B.: Comparison of AlSi10Mg and Al 6061 processed through DMLS (2015)
- [32] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Handbuch Produktionstechnik und Fertigungsverfahren, Band 2: Fertigungsverfahren: VDI Richtlinie 3405 Blatt 2.1 (2014)
- [33] Deutsche Norm: Aluminium und Aluminiumlegierungen – Gussstücke – Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften. DIN EN 1706: Deutsches Institut für Normung (2013)
- [34] Fiedler, M.; Vormwald, M.: Considering fatigue load sequence effects by applying the Local Strain Approach and a fracture mechanics based damage parameter. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 83 pp. 31-41. (2016)
- [35] Fiedler, M.; Vormwald, M.: Berechnung von Anrisslebensdauern auf Basis des Örtlichen Konzepts. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 47 (10) pp. 887-896. (2016)
- [36] Ostermann, F.: *Anwendungstechnologie Aluminium*, Kapitel 6.2.2 Schwingfestigkeit von Proben und Bauteilen, Springer Verlag (2014)
- [37] Boller, C.; Seeger, T.; Vormwald, M.: *Materials Database for Cyclic Loading*. Fachgebiet Werkstoffmechanik, TU Darmstadt (2008)
- [38] Wächter, M.: Zur Ermittlung von zyklischen Werkstoffkennwerten und Schädigungsparameterwöhlerlinien, Dissertation, TU Clausthal (2016)
- [39] Bäumel, A. jr.; Seeger, T.: *Materials data for cyclic loading*, Supplement 1. Elsevier, Amsterdam (1990)