

Den Elektronenstrahl für das selektive Sintern von metallischen Pulvern nutzen

Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh
Dipl.-Ing. Markus Kahnert

iwb Anwenderzentrum Augsburg
TU München
Beim Glaspalast 5
86153 Augsburg

Tel.: 0821/56883-33
Fax: 0821/56883-50
E-Mail: markus.kahnert@*iwb*.tum.de

Abstract

Die Elektronenstrahltechnologie bietet für die Nutzung im Bereich industrieller Fertigungsverfahren vielfältige Potentiale. Neben Schweißanwendungen können insbesondere bei generativen Fertigungsverfahren durch die schnelle Strahlableitung mittels elektromagnetischer Linsen im Vergleich zu Laserstrahl-basierten Anlagen bspw. die Ablenkgeschwindigkeiten deutlich gesteigert werden. In Verbindung mit einer höheren maximalen Energiedichte beim Elektronenstrahl ist eine wirtschaftliche und schnelle Verarbeitung einer großen Bandbreite an Werkstoffen möglich.

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Entwicklung des Verfahrens Elektronenstrahlsintern (EBS) im Rahmen des von der Bayerischen Forschungsförderung geförderten Projektes „*Verfahrensentwicklung zur schichtweisen Herstellung metallischer Bauteile mittels Elektronenstrahl*“. Hierfür wurde, um ein flexibles generativ arbeitendes Fertigungssystem aufzubauen, eine marktübliche Elektronenstrahl-Schweißanlage um Module zum Pulverauftrag erweitert. Es wird auf die Prozessentwicklung sowie auf die erforderlichen Veränderungen hinsichtlich der Anlagentechnik und -steuerung eingegangen.

Zudem werden Erkenntnisse und Erfahrungen bezüglich der Prozessparameter und durchgeführter Gefügeanalysen vorgestellt wie auch auftretende physikalische Effekte analysiert und bewertet.

Einleitung

Das Prinzip, Bauteile schichtweise aufzubauen, wurde bereits in unterschiedlichen Anlagentechnologien [1] umgesetzt und zur Marktreife gebracht. U. a. ist es heute industrieller Stand, komplexe Kunststoffbauteile als Modelle für die Produktentwicklung, in Nischenbereichen auch als Endprodukte, anzufertigen. Als Verfahren werden meist die Stereolithographie oder das Selektive Lasersintern verwendet. Im Bereich der generativen Herstellung metallischer Bauteile existieren verschiedene Verfahren, wie das Selektive Lasersintern [2] bzw. -schmelzen [3,4] oder das 3D-Printing [5] mit anschließender Infiltration. Hauptanwendungen sind heute das Rapid Prototyping (Erstellen von Funktionsmodellen), zunehmend auch das Rapid Tooling (Erstellen von Formeinsätzen für den Werkzeug- und Formenbau) und das Rapid Manufacturing (Erstellen von Bauteilen als Serienprodukte).

Grenzen bei der Herstellung metallischer Bauteile mittels generativer Verfahren

Durch den Trend, hochwertige metallische Bauteile direkt mittels generativer Fertigungsverfahren herzustellen, steigt deren Bedeutung. Ausschlaggebend ist dabei, Bauteile mit geforderten Eigenschaften bzgl. Dichte, Oberflächenrauheit, Festigkeit oder Härte prozesssicher zu fertigen. Dies gilt vor allem für Bauteile, die hohen Beanspruchungen ausgesetzt werden oder die bspw. die hohen Anforderungen aus dem Leichtbau erfüllen müssen.

Bislang dominiert bei der generativen Fertigung von Metallbauteilen der Einsatz von Laserstrahltechnologien zur lokalen Energieeinbringung in das Baufeld. Den Vorteilen, die generative Verfahren im allgemeinen besitzen, stehen insbesondere bei Verfahren mit Laserstrahltechnik Einschränkungen beispielsweise bzgl. der Verwendbarkeit unterschiedlicher metallischer Werkstoffe, der erreichbaren Baugeschwindigkeit sowie der Porosität der Bauteile gegenüber. Aufgrund der daraus resultierenden Restriktionen in der wirtschaftlichen Verarbeitung hochlegierter Metalle (Edelstähle) ist die direkte Herstellung von hochbelastbaren Bauteilen Einschränkungen unterworfen. Für einen umfangreicheren Einsatz von generativen Fertigungsverfahren zur Herstellung metallischer Bauteile sind diese Schwierigkeiten zu überwinden.

Potentiale des Elektronenstrahls

Im Bereich der generativen Fertigungsverfahren wurde, um die Nachteile der Laserstrahl-basierten Verfahren auszugleichen, die Idee der Nutzung des Elektronenstrahls als alternative Energiequelle verfolgt. Vor allem soll dadurch die Prozessgeschwindigkeit erhöht werden. Der grundsätzliche Ablauf dieses Verfahrens ist vergleichbar mit Laserstrahl-basierten Anlagen. In Abbildung 1 ist zu sehen, dass sich der Prozess (Schichtauftrag – Belichten – Plattform absenken), bis auf die Energiequelle, nicht wesentlich von den weiteren aufschmelzenden Rapid-Technologien unterscheidet. Erste Veröffentlichungen, die diesen mit der alternativen Strahlquelle zum schichtweisen Aufbau beschreiben, wurden 1992 publiziert [6]. Daraus ging im Jahr 1997 die Firma ARCAM

hervor, welche gegenwärtig die Elektronenstrahl-basierte Anlage EBM S12 zum EB-Schmelzen kommerziell vertreibt [8]. Im Vergleich hierzu wird am *iwb* im Rahmen des von der Bayerischen Forschungsstiftung geförderten Projektes „*Verfahrensentwicklung zur schichtweisen Herstellung metallischer Bauteile mittels Elektronenstrahl*“ gegenwärtig eine marktübliche Elektronenstrahl-Universalkammeranlage der Firma pro-beam für die generative Fertigung modifiziert.

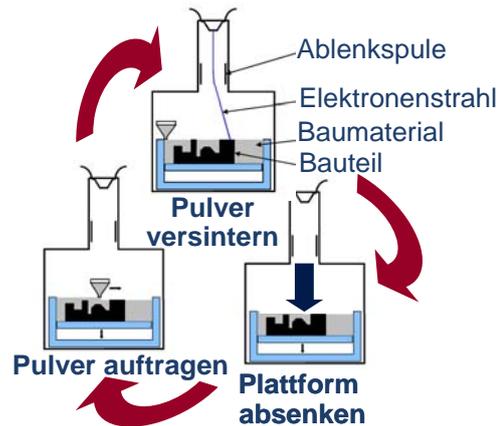


Abbildung 1: Prozessablauf des Elektronenstrahlsinterns (EBS)

Nach v. Dobeneck [7] sind es im Wesentlichen drei physikalisch bestimmte Kriterien, die den Elektronenstrahl vom Laserstrahl unterscheiden. Der Elektronenstrahl hat eine bessere Fokussierbarkeit gegenüber der elektromagnetischen Welle des Laserlichts, besitzt einen guten Wirkungsgrad bei der Strahlerzeugung und bei der Energieeinkopplung in das Werkstück bei praktisch unbegrenzt hoher Leistung und ist hinsichtlich der Fokusslage und Leistung fast trägheitslos ansteuerbar. Daraus ergeben sich hohe Potentiale des Elektronenstrahls zur Reduktion der Belichtungszeiten und damit der Bauzeiten bei aufschmelzenden Rapid-Technologien. Hier sind u. a. eine quasiparallele Belichtung oder frei konfigurierbare Strahlformen zu nennen. Auch können durch die schnelle Ablenkung hohe Temperaturunterschiede und damit Eigenspannungen innerhalb der Schicht vermieden werden. Des Weiteren wird durch das physikalische Prinzip des Elektronenstrahls auch die Bearbeitung von sehr hochschmelzenden oder schwer bearbeitbaren Werkstoffen wie beispielsweise Werkzeugstählen, Aluminium oder Titan ermöglicht. Der

Elektronenstrahl kann hier effektiv eingesetzt werden, da keine optische Reflexion an der Baufeldoberfläche stattfindet.

Zielsetzung

Die Zielsetzung bei der Entwicklung des Verfahrens und der Modifikation der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage besteht darin, bestehende Grenzen der schichtweisen Herstellung von metallischen Prototypen zu reduzieren. Dabei wird als Energiequelle zur Verfestigung innerhalb eines Schichtquerschnitts und zwischen den Schichten der Elektronenstrahl eingesetzt. Es sollen metallische Bauteile für Anwendungen mit hohen Anforderungen an die Bauteilfestigkeit, wie z. B. Formeinsätze für das Spritz- oder Druckgießen, hergestellt werden können. Auch wird angestrebt, Pulverlegierungen als Grundwerkstoff einzusetzen, die vergleichbar oder identisch zu den Standardwerkstoffen von Serienprodukten sind. Insgesamt soll das Verfahren die schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger, komplexer, metallischer Produkte ermöglichen.

Anlagentechnik

Aufbau der verwendeten Elektronenstrahl-Universalkammeranlage

Die von der pro-beam Anlagen GmbH gefertigte Elektronenstrahl-Universalkammeranlage wurde im August 2004 am iwB Anwenderzentrum Augsburg installiert. In Abbildung 2 ist der Aufbau der Anlage dargestellt.

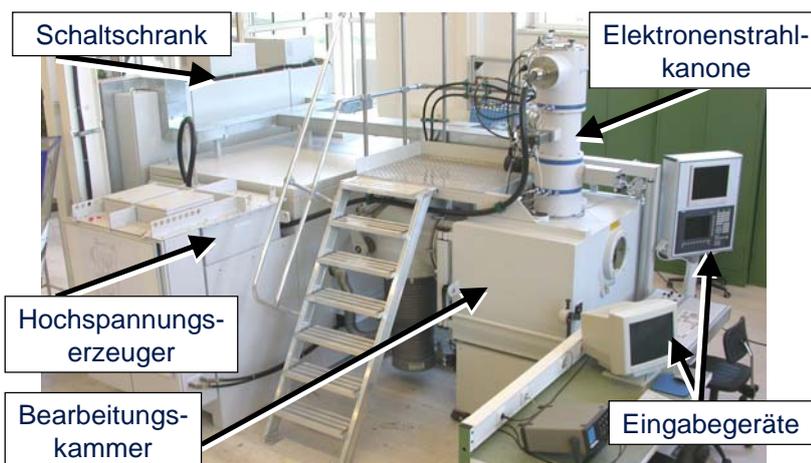


Abbildung 2: Aufbau der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage

In der Elektronenstrahlkanone wird der Elektronenstrahl erzeugt sowie durch elektro-

magnetische Linsen fokussiert und abgelenkt. Die hierfür notwendige Beschleunigungsspannung wird im Hochspannungserzeuger gebildet. Die Einstellung der Strahlparameter, wie beispielsweise Fokus, Fokusslage, Strahlablenkung, Strahlstrom oder Beschleunigungsspannung wird durch die in der Anlage integrierte CNC- und SPS-Steuerung im Zusammenspiel mit der so genannten „MiniMod“-Steuerung realisiert. Diese steuert die elektromagnetischen Linsen mit einer Frequenz bis zu 50 MHz an, so dass hohe Ablenkgeschwindigkeiten des Elektronenstrahls erreicht werden können. Im Folgenden ist eine Auswahl von technischen Daten der am iwB verwendeten Elektronenstrahl-Universalkammeranlage zu sehen:

- Vakuum (Grad der Evakuierung): ca. $1 \cdot 10^{-4}$ mbar
- Max. Strahlleistung: 10 kW
- Max. Beschleunigungsspannung: 60 - 100 kV
- Max. Strahlstrom: 100 mA
- Positioniergeschwindigkeit: 2 ns (Punkt zu Punkt)
- Ablensysteme: elektromagnetische Linsen
- Volumen der Arbeitskammer: 600 l

Integration prozessspezifischer Komponenten

An der ursprünglich als Elektronenstrahl-Universalkammeranlage ausgelegten Schweißanlage, wurden diverse Änderungsarbeiten durchgeführt. Durch diese wurde es ermöglicht, die EB-Anlage für die schichtweise Herstellung metallischer Bauteile einzusetzen. Vorteilhaft ist in diesem Zusammenhang, dass der Aufbau der Vakuumbühne und die Kommunikationsstruktur eine Modularisierung zulassen. Der im Aufbau der Anlage ursprünglich vorhandene Koordinatentisch zum Positionieren der Schweißwerkstücke wurde durch ein angepasstes Modul Pulverauftragssystem ersetzt.

Dieses Pulverauftragssystem konnte in den Aufbau der Vakuumbühne eingepasst und in die Anlagensteuerung integriert werden (siehe Abbildung 3). Im Weiteren gelang es

durch umfangreiche Arbeiten, eine dynamische und benutzerangepasste Strahlableitung umzusetzen. Mit den in der Grundkonfiguration hinterlegten Ablenkfiguren in der so genannten MiniMod-Steuerkarte können zwar einfache, für das Schweißen angepasste, Strahlfiguren und Intensitätsverteilungen realisiert werden. Diese reichen aber für den flexiblen Aufbau komplexer Bauteile nicht aus. Daher musste zusätzlich in die vorhandene Kommunikationsstruktur ein Rechner mit der verwendeten Software Rapix-3D eingebunden werden. Diese Software dient zur Datenaufbereitung und Ansteuerung von RP-Systemen [8]. Hierdurch können aus der virtuellen Geometrie Schichtdaten erzeugt und diese als Vektoren an die MiniMod-Steuerung übertragen werden.

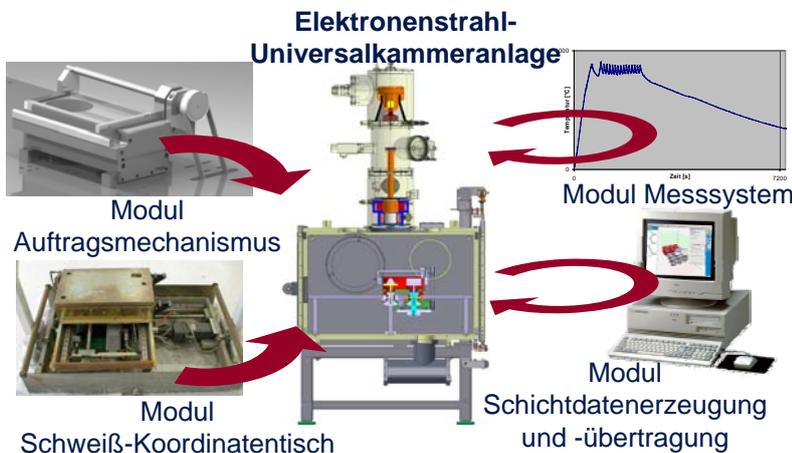


Abbildung 3: Module der Elektronenstrahl-Universalkammeranlage

Im Vergleich hierzu gelang es das Pulverauftragungssystem aufwandsarm in die Anlage einzufügen. Da die selben Motoren, wie im ursprünglich vorhandenen Schweiß-Koordinatentisch, verwendet wurden, war es lediglich notwendig die entsprechenden Parameter in der CNC-Steuerung anzupassen. Für die Prozessüberwachung konnten zusätzlich Messsysteme, beispielsweise zur Ermittlung verschiedener Temperaturen, im und am Baufeld integriert werden.

Prozessentwicklung und Ergebnisse

Allgemein

Im Vergleich der unterschiedlichen Prinzipien zur generativen Bauteilherstellung kann das Elektronenstrahlsintern der Verfahrensgruppe der Sinter-Verfahren zugeordnet werden.

Die Gruppe wird durch das lokale Sintern von Pulverwerkstoffen definiert [1].

Unterschiede zu diesen ergeben sich für EBS-Anlagen vor allem aus verfahrensspezifischen Anforderungen zur Verwendung des Elektronenstrahls. Hierzu wird in den folgenden Abschnitten zunächst der grundsätzliche Prozessablauf erläutert, auftretende physikalische Effekte beschrieben sowie Gefügeuntersuchungen an Versuchtsträgern vorgestellt.

Instationäre physikalische Effekte

Augrund der Charakteristika des Elektronenstrahls als ein fokussierter Strahl beschleunigter elektrischer Ladungsträger und der Prozessführung im Vakuum treten spezifische physikalische Effekte auf. Diese unterscheiden sich sehr stark von den bei Laserstrahl-basierten generativen Anlagen zu beobachtenden Phänomenen. Vor der Gestaltung eines prozesssicheren Verfahrens müssen diese beherrscht werden.

Der auffälligste Effekt ist das unkontrollierte Verspritzen des Metallpulvers unter Einwirkung des Elektronenstrahls. Dies ist in Abbildung 4 zu sehen.

Nach Sigl [9] ist es möglich die elektrostatische Aufladung der Pulverkörner als Hauptursache anzusehen.

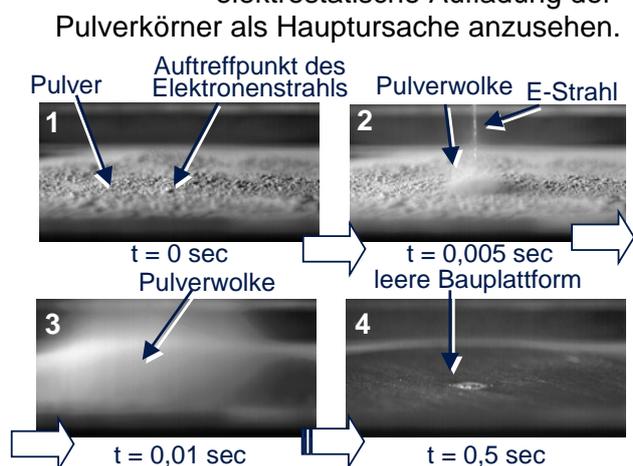


Abbildung 4: Verblasen des Pulvers unter Einfluss des Elektronenstrahls

Dieser Effekt tritt auf, wenn die Pulverkörner durch die Ladungsträger des Elektronenstrahls elektrisch aufgeladen werden, da die Elektronen aufgrund der begrenzten Leitfähigkeit des Pulvers nicht, bzw. nur sehr

schlecht abfließen können. Da sich deshalb die elektrische Ladung im Bereich der Fokusfläche verteilt, sind dort alle Partikel elektrisch gleich, d. h. negativ geladen und stoßen sich somit gegenseitig ab.

Neben einer verbesserten Erdung kann durch das Aufheizen des Pulvers bis hin zu Temperaturen um ca. 1000 °C eine steigende elektrische Leitfähigkeit bestimmt werden. Durch die Ausbildung erster Sinterhalse wird eine leitende Verbindung zwischen einzelnen Pulverkörnern hergestellt und der Wert des elektrischen Widerstandes nähert sich dem von Vollmaterial an. Das Vorheizen

kann hierbei entweder indirekt über Heizelemente im Bauraum bzw. direkt über einen stark aufgeweiteten Elektronenstrahl geschehen. Bei einem aufgeweiteten Elektronenstrahl darf die Strahlintensität lediglich langsam (ca. 1 mA/min bei 1.2343-Pulver 32-60 µm-Körnung, bzw. ca. 6,5 mA/min bei bereits vorgewärmten Pulver)

gesteigert werden, so dass nur der Betrag an Ladungsträgern aufgebracht wird, welcher auch wieder abfließen kann.

Grundsätzlicher Prozessablauf des Elektronenstrahlsinterns (EBS)

Wegen der Nutzung einer Elektronenstrahlkanone als Energiequelle muss zur Vermeidung der zuvor beschriebenen instationären physikalischen Effekte, der zusätzliche Prozessschritt „Vorheizen der Pulverschicht“ eingefügt werden. Daher unterscheidet sich der in Abbildung 5 dargestellte Prozessablauf zum lokalen Aufschmelzen einer Schicht in diesem Punkt entscheidend von dem der Laserstrahl-basierten Anlagen und gliedert sich in die folgenden drei Prozessschritte:

- Pulverauftrag
- Vorheizen der Pulverschicht
- Belichten

Der Pulverauftrag erfolgt durch das in die Vakuumkammer integrierte Modul Pulverauftragssystem. Das anschließende Vorheizen wird mittels eines aufgeweiteten und defokussierten Elektronenstrahles zur gleichmä-

ßigen Energieeinbringung über dem Baufeld durchgeführt. Das Vorheizen des Pulvers wird durchgeführt bis das Pulver nahe der Schmelztemperatur ist. Erst ab diesem Zeitpunkt kann mit der Belichtung begonnen werden. Das direkte Aufheizen mit dem Elektronenstrahl erfolgt einerseits, da elektrische Heizelemente in der Grundplatte zusätzliche konstruktive und steuerungstechnische Aufwände zu deren Integration bedeuten würden und andererseits da bei fortschreitender Bauhöhe das gesamte Bauteil bis hin zur Oberfläche geheizt werden müsste.

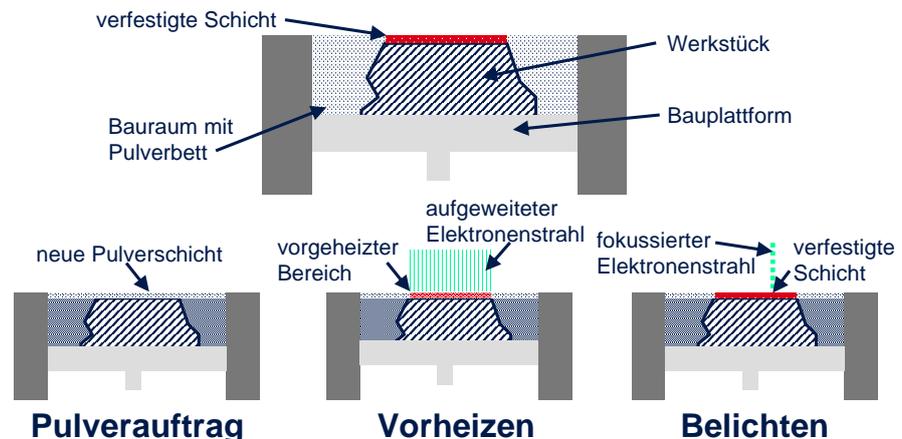


Abbildung 5: Ablaufskizze (Pulverauftrag - Vorheizen - Belichten)

Die selektive Belichtung der aufzuschmelzenden Bauteilbereiche erfolgt anschließend durch den Elektronenstrahl mit den vom Steuerungsrechner ermittelten Ablenkwegen. Aufgrund der Verwendung elektromagnetischer Linsen kann eine, im Vergleich zu Laserscanner-Systemen deutlich höhere Ablenkgeschwindigkeit erreicht werden. Dadurch ist es möglich neuartige Ablenkmuster und Aufschmelzstrategien zu realisieren.

Einflussparameter

Aus der Entwicklung des Selektiven-Laser-Sinterns ist bekannt, dass eine Vielzahl an Einflussfaktoren die Qualität der erstellten Bauteile bestimmt [2]. Beim Elektronenstrahlsintern gelang es ebenfalls maßgebliche Einflussfaktoren zu analysieren und bzgl. ihrer Wirkung auf das EBS zu bewerten [11].

Bei diesem Prozess sind aufgrund der Charakteristik eines geladenen Teilchenstrahls und des Prozessablaufes unter Vakuum noch zusätzliche Randbedingungen zu be-

achten. Aus Untersuchungen gelang es, die folgenden Parameter als für das Prozessergebnis relevant zu identifizieren:

- Strahlleistung
- Fokuslage
- Belichtungsdauer
- Strahlvorschubgeschwindigkeit
- Grad der Vorheizung
- Materialsystem (Werkstoff und Kornform)

Durch die Erstellung von 2- und 3-dimensionalen Versuchsbauteilen konnten grundlegende Zusammenhänge identifiziert werden. In Abbildung 6 ist hierzu ein Diagramm mit dem Sinterergebnis bei Werkzeugstahl 1.2343 in Abhängigkeit von der eingebrachten Leistung und Belichtungsfrequenz dargestellt. Als Belichtungsfigur wurde hierfür die Ablenkung in Form einer archimedischen Spirale gewählt. Eine geringe Belichtungsfrequenz entspricht hierbei einer geringen Vorschubgeschwindigkeit.

die Leistung in einem deutlich größeren Bereich variierbar.

Gefügeuntersuchungen

Für eine Bewertung der aufgebauten dreidimensionalen Versuchsträger aus dem Werkstoff 1.2343 wurden Gefügeuntersuchungen und Härtemessungen durchgeführt. Bei den Gefügeuntersuchungen an dem Versuchsträger konnte ein kontinuierlicher Schichtaufbau nachgewiesen werden, welcher durch eine alternierend helle und dunkle Zeilenstruktur gekennzeichnet ist. Die dunklen Bereiche ergeben sich durch das zweimalige Aufschmelzen des Ausgangsmaterials, d. h. in diesen Bereichen werden die aufeinander folgenden Werkstoffschichten miteinander verbunden. Die hellen Schichten sind Bereiche, in denen der Werkstoff nur einmal durch den Elektronenstrahl aufgeschmolzen wurde. Rechts unten ist eine Aufnahme der Randzone der untersuchten Probe zu sehen. Hier sind deutlich senkrech-

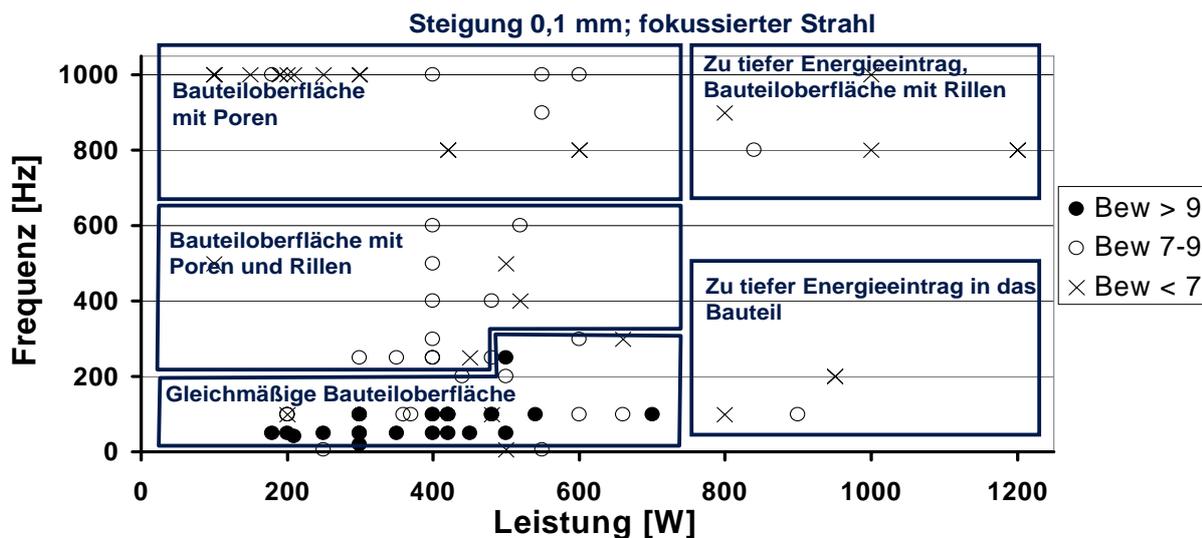


Abbildung 6: Parametereinfluss bei der Belichtung einer archimedischen Spirale

Die qualitative Bewertung der gezeigten Versuche erfolgte anhand gewichteter Kriterien (gutes Ergebnis = 10 – schlechtes Ergebnis = 0) wie Porosität, Ebenheit der Bauteiloberfläche, Delamination oder Rillen in der Oberfläche. Hierbei ist zu erkennen, dass Ergebnisse mit einer guten Bauteiloberfläche und verbundenen Schichten vor allem in Bereichen mit einer geringen Belichtungsfrequenz, d. h. einer geringen Vorschubgeschwindigkeit erzeugbar sind. Hingegen ist

te, quer zur Baurichtung verlaufende Wärmerisse zu sehen. Eine mögliche Ursache dieser Risse sind die unterschiedlichen Abkühlraten im Kernbereich bzw. in der Randzone des Probenkörpers. Durch einen angepassten Wärmehaushalt, wie eine gezielte und geregelte Temperaturabsenkung, könnten diese Wärmerisse vermieden werden. Hierzu werden in Abbildung 7 Gefügaufnahmen aus verschiedenen Bereichen des Probenkörpers gezeigt. Die Pfeile geben hierbei die Zuordnungen zu den jeweiligen Entnahmebereichen an.

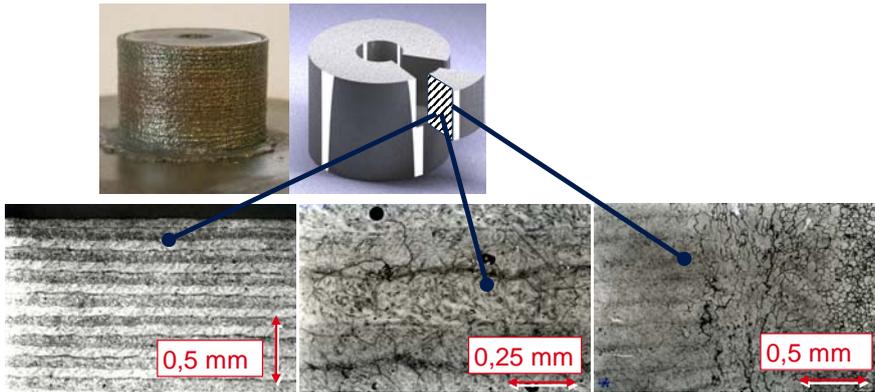


Abbildung 7: Schlifffbilder des Bauteilquerschnitts

Die in diesem Bereich durchgeführten Makrohärteprüfungen ergaben einen Wert von 55 HRC. Da für den verwendeten Werkzeugstahl 1.2343 Luft als Abschreckmittel für die Gefügeumwandlung aus dem glühenden Zustand verwendet werden kann, kann davon ausgegangen werden, dass ähnliche Gefügeumwandlungen durch die Abkühlung unter Vakuumbedingungen erfolgen können. Die Gefügebestandteile sind primär Martensit und Zwischenstufengefüge. Zudem konnte am Versuchsträger gezeigt werden, dass ein nahezu porenfreies Gefüge möglich ist, wodurch die Herstellung von druckbeaufschlagten Kühlkanälen möglich ist [12].

Potentiale für die industrielle Nutzung

Die Verwendung des Elektronenstrahls als Energiequelle für die Verfestigung metallischer Pulver ermöglicht die Nutzung der Vorteile eines Teilchenstrahles in schichtweise arbeitenden Anlagen. Beispielhafte Anwendungen ergeben sich nach Lutzmann [12] vor allem in den Bereichen:

- Einzel- und Prototypenfertigung
- Medizintechnik
- Werkzeugbau

Im Bereich der Einzel- und Prototypenfertigung dominiert hier nicht die Nutzung als Modell, es werden anstatt dessen die Bauteile vor allem auch als Funktionsbauteile eingesetzt. Anwendungen, die ein hohes Potential für die Verwendung mittels Elektronenstrahl gefertigte Bauteile bieten, sind vor allem solche mit geringen Stückzahlen und hohen Werkstoffanforderungen.

In der Medizintechnik hingegen überwiegt die Herstellung patientenindividuell angepasster Implantate [13] mit der Stückzahl 1.

Hierfür ist neben der Verarbeitbarkeit hochreflexibler Werkstoffe auch die Eignung, Titan prozesssicher aufzuschmelzen als Grund zu nennen.

Für das Rapid Tooling im Rahmen des Werkzeugbaus ist die Möglichkeit mit Serienwerkstoffen und hochlegierten Stählen, wie Werkzeug- und Edelstahl-

len, hohe Bauraten zu erzielen besonders hervorzuheben. Die geometrischen Freiheiten ermöglichen außerdem die Herstellung komplexer Geometrien wie die Herstellung konturnaher Kühlkanäle. Aus diesen Eigenschaften lassen sich hohe Potentiale für einen Einsatz als Fertigungsverfahren im Werkzeug- und Formenbau ableiten.

Zusammenfassung und Ausblick

Restriktionen und Einschränkungen, wie beispielsweise geringe Baugeschwindigkeiten, die beschränkte Verwendbarkeit metallischer Pulver aus Standardwerkstoffen bzw. nur begrenzt erreichbare Bauteilfestigkeiten verhindern bis jetzt eine größere Akzeptanz und damit auch die Verbreitung schichtweise arbeitender Verfahren zur Herstellung metallischer Bauteile. Um diese Restriktionen zu überwinden, bietet die Elektronenstrahltechnologie ein hohes Potential. Aufgrund des Anlagenaufbaus können Vorteile wie hohe Strahlablengeschwindigkeiten aufgrund einer masselosen Strahlableitung mittels elektromagnetischer Linsen oder das Arbeiten unter Vakuum zur Vermeidung von unerwünschten Reaktionen mit der Umgebungsluft genutzt werden. Insbesondere erlauben die physikalischen Wirkprinzipien des Elektronenstrahls eine effiziente Energieeinbringung in den Werkstoff und ermöglichen dadurch bei schichtweise arbeitenden Verfahren die Verwendung von Pulverwerkstoffen aus metallischen Standardlegierungen sowie hohe Bauraten.

Im Rahmen der vorgestellten Arbeiten wurde eine für das Schweißen konzipierte Elektronenstrahl-Universalkammeranlage für das schichtweise Fertigen von metallischen Bauteilen modifiziert. Durch Umbauten und Anpassungen war es möglich, metallische Werkstoffpulver schichtweise aufzubringen

und selektiv zu versintern. Neben der Integration eines Pulverauftragssystems konnte die Anbindung einer Software zur CAD-Daten-Verarbeitung und Schichtdatenaufbereitung erfolgreich durchgeführt werden. Aufgrund dieser Arbeiten konnten verschiedene Versuchskörper hergestellt und daran verschiedene Werkstoffuntersuchungen durchgeführt werden. Es konnte nachgewiesen werden, dass das verwendete Werkstoffpulver praktisch ohne Poren im Werkstoffgefüge versintert wurde.

Für das Ziel, metallische Bauteile prozesssicher herzustellen, gelang es umfangreiche Erkenntnisse zu erlangen und eine marktübliche Elektronenstrahl-Universalkammeranlage den Anforderungen entsprechend zu modifizieren. Weitere Forschungsarbeiten sind insbesondere für die Qualifikation von Werkstoffen und das gezielte Erzeugen von definierten Werkstoffeigenschaften notwendig.

Literatur

- [1] Zäh, M. F. (Hrsg.); Sigl, M.; Seefried, M.; Hagemann, F.; Kahnert, M.; Müller, A.; Meindl, M.: Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien. München: Carl Hanser 2006.
- [2] Coremans, A. L. P.: Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozessmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinteter Metallkörper. Bamberg: Meisenbach 1999.
- [3] Over, C.: Laserschmelzen – Ein generatives Fertigungsverfahren für die Serienproduktion. In: Zäh, M. F.; Reinhart, G. (Hrsg.): Seminar Rapid Manufacturing, Augsburg. München: Herbert Utz 2003, S. 4-1–4-7. (*iwb* Seminarberichte 66).
- [4] Edelmann, O.: Herstellung von metallischen Prototypen mittels LaserCUSING®. In: Zäh, M. F.; Reinhart, G. (Hrsg.): Seminar Rapid Manufacturing, Augsburg. München: Herbert Utz 2005, S. 8-1–8-22. (*iwb* Seminarberichte 80).
- [5] pro-metal: <<http://www.prometal-rt.com/dmp.html>> (28.8.2006)
- [6] Smith, A. C. Jr.; Fawley, W. M.; Nolting, E. E.: An Overview of High Energy Electron Beam Science. In: AWS Conference on High Energy Electron Beam Welding and Materials Processing (Proceedings), Cambridge. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology 1992, S. 1-43
- [7] Arcam AB: <www.arcam.com/company/company_history.asp> (28.8.2006)
- [8] v. Dobeneck, D.; Löwer T.; Menhard C.: Entwicklungspotentiale der thermischen Materialbearbeitung mit Elektronenstrahlen im Vergleich zu Laserstrahlen. Strahltechnik, 4. Laser – Anwendungsforum, Bremen, 12.-13.Sep. 2002, S.35-44
- [9] Welisch A.: Prototyping mit Komfort. In: F&M 110(6):45-47. Carl Hanser Verlag, München, 2002.
- [10] Sigl, M.; Lutzmann, S.; Zäh, M. F.: Transient Physical Effects in Electron Beam Sintering. In: Proc. of SFF Symposium, Austin (2006), Texas, USA
- [11] Meindl, M.: Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing. München: Dissertation Technische Universität München 2004.
- [12] Lutzmann, S.; Kahnert, M.; Sigl, M.: Elektronenstrahlsintern als Zukunftstechnologie im Rapid Tooling. In: Zäh, M. F.; Reinhart, G. (Hrsg.): Seminar Rapid Manufacturing, Augsburg, München: Herbert Utz 2006, S. 7-1 - 7-26. (*iwb* Seminarberichte 81).
- [13] Harrysson, O.; Cormier, D.; Marcellin-Littlez, D.: Direct fabrication of metal orthopedic implants using electron beam melting technology In: Bourell, D. L. et al. (Hrsg.): Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings, Austin, TX. 2003, S. 439-446.