
Entwicklung eines Qualitätssicherungssystems für das Metall-3D-Drucken

Christoph Ackerl, BSc^{a,b}, Rene Gangl^{a,b}, DI Dr. Johannes Gumpinger^b,
DI Wolfgang Wöber^a, DI Dr. Thomas Grünberger^c

^a Fachhochschule Wiener Neustadt für Wirtschaft und Technik GmbH, Johannes Gutenberg-Straße 2,
A-2700 Wiener Neustadt, AUSTRIA

^b FOTEC Forschungs- und Technologietransfer GmbH, Viktor Kaplan-Straße 2,
A-2700 Wiener Neustadt, AUSTRIA

^c plasmo Industrietechnik GmbH, Dresdner Straße 81-85, A-1200 Wien, AUSTRIA

KURZFASSUNG/ABSTRACT:

Der große Vorteil der generativen Fertigungsmethode Metall-3D-Drucken, auch bekannt als Selective Laser Melting (SLM), besteht in der großen gestalterischen Freiheit, die es ermöglicht Bauteile herzustellen, die mit konventionellen Werkzeugen nur schwer und verbunden mit sehr hohen Kosten oder gar nicht herstellbar sind. Leichtbaukonstruktionen, welche beispielsweise der Natur nachgeahmten bionischen Strukturen entsprechen, konturnahe Kühlkanäle oder aber auch Hinterschneidungen stellen für dieses Verfahren weitgehend keine Hindernisse dar. Die hohe Flexibilität des SLM eröffnet neue Möglichkeiten für diverse Branchen. Beginnend bei der Luft- und Raumfahrt, der Schmuck- und Automobilindustrie, bis hin zu medizinischen Anwendungen erstreckt sich das mögliche Anwendungsgebiet. Warum einige potentielle Anwender dem Verfahren noch mit Skepsis begegnen begründet sich zum Teil auch darin, dass es sich bei den SLM-Anlagen um rein gesteuerte Anlagen handelt, d.h. die Anlage kann auf eine negative Veränderung des Bauprozesses nicht reagieren oder den Anwender darauf hinweisen. Dieser Artikel stellt eine mögliche Variante eines photodiodenbasierten Qualitätssicherungssystems vor, welches das reflektierte Prozesslicht misst, auswertet, verortet und mögliche Bauteilfehler detektiert. Dem Anwender soll somit Aufschluss über die Bauteilqualität gegeben werden, auf die dann entsprechend reagiert werden kann.

1 EINLEITUNG

Das SLM-Verfahren bringt ein hohes Entwicklungspotential mit sich. Es wird erwartet, dass sich der Absatz für 3D Druck in den nächsten 10 Jahren auf € 6,8 Mrd. vervierfachen wird [1]. Dies beinhaltet die Anschaffungskosten der Anlagen, deren Service, sowie die dafür notwendigen Materialien. Um die technischen Möglichkeiten des Verfahrens zu evaluieren, eine Verifizierung der richtungsabhängigen mechanisch-technologischen Eigenschaften, sowie vorrangig die Entwicklung eines Prozessüberwachungssystems umzusetzen wurde das Projekt „Powder Additive Manufacturing“ (PAM) im Jänner 2011 von der FOTEC Forschungs- und Technologietransfer GmbH in Wiener Neustadt gestartet. Das Projekt weist eine Laufzeit von 5 Jahren auf und wird von der österreichischen Forschungs-Förderungsgesellschaft (FFG) gefördert. In diesem Projekt sollen weiters die Anwendbarkeit des Verfahrens für keramische Werkstoffe und die Anwendung im Bereich des Kunststoff-Spritzgusses analysiert werden.

Sämtliche Fertigungsverfahren, die Bauteile durch Auf- oder Aneinanderfügen von Volumenelementen, vorzugsweise schichtweise, herstellen, werden als generative Fertigungsverfahren definiert [2]. Grundlage für das SLM-Verfahren sind die 3D-CAD-Daten, die als Ausgangsbasis für die Generierung der einzelnen Schichten herangezogen werden. Mithilfe einer Beschichterklinge wird eine Schicht Metallpulver mit definierter Dicke auf der Bauplattform aufgebracht. Im Bauteilquerschnitt schmilzt der Laser das Pulver auf, welches sich beim darauffolgenden Abkühlen zu einem Volumenkörper verbindet. Nach dem Absenken der Bauplattform wird eine neue Schicht aufgezogen und so entsteht Schicht für Schicht das fertige Bauteil direkt aus den CAD-Daten. Daraus ergibt sich der Vorteil, dass der Produktentwicklungszyklus drastisch verkürzt wird. Das allgemeine Funktionsprinzip des SLM-Prozesses wird in Abbildung 1 dargestellt.

Restriktionen in der Konstruktion entfallen nahezu vollständig, wodurch die Geometriefreiheit zu den wohl größten Stärken des 3D-Druckens gehört [3].

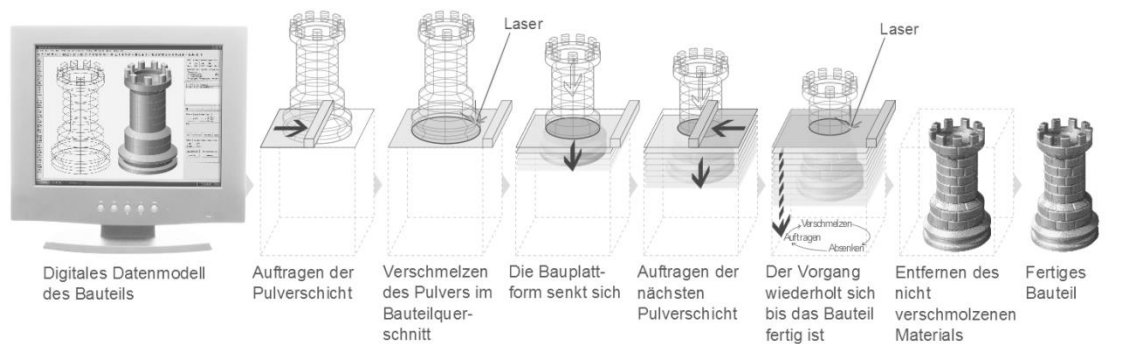


Abbildung 1. Allgemeines Funktionsprinzip des SLM-Prozesses [4].

2 PROBLEM- UND AUFGABENSTELLUNG

Bis zum jetzigen Zeitpunkt sind lediglich rein gesteuerte SLM-Anlagen erhältlich, demnach ist es der Anlage nicht möglich auf Veränderungen im Bauprozess zu reagieren bzw. diese festzustellen. Somit ist es ohne weitere Untersuchung der Bauteile nicht möglich eine Aussage über die Qualität des Bauprozesses zu treffen. Untersuchungen zeigen zwar, dass beim 3D-Drucken der Titanlegierung Ti-6Al-4V mit einer EOSINT M280-Anlage mechanische Eigenschaften erreicht werden, die die gestellten Anforderungen übertreffen [5], jedoch hat sich auch gezeigt, dass die Duktilität sowie die Festigkeitswerte bei vertikal hergestellten Proben etwas geringer waren, als jene bei horizontal gebauten Proben. Darauf folgende Untersuchungen der Bruchflächen der Zugproben [6] haben gezeigt, dass Bindefehler mit flächigen oder voluminösen Ausdehnungen im Bereich von 30 µm sichtbar sind.

Ziel ist es eine Prozessüberwachung zu entwickeln, die es ermöglicht Bindefehler und andere Bauteilimperfectionen wie z.B. Einschlüsse zu detektieren und dem Anwender so die Möglichkeit zu geben darauf zu reagieren. Der verfolgte Ansatz ist ein photodiodenbasiertes Messsystem, welches das Prozesslicht, das beim Aufschmelzvorgang des Pulvers entsteht, detektiert. Das Prozesslicht soll an zwei Positionen detektiert werden. Die Messposition ‚Prozesskammer‘ soll das Prozesslicht direkt im Bauraum einfangen und die Messposition ‚Kameraadapter‘ soll die rückreflektierte Strahlung über einen Strahlteiler aus dem Strahlengang auskoppeln und an das Messsystem übergeben. Mithilfe weiterer Maschinenparameter soll die Überwachung des Schweißprozesses realisiert werden.

3 MATERIAL UND METHODEN

Sämtliche Arbeiten werden an einer Lasersinteranlage vom Typ EOSINT M280 der Firma EOS durchgeführt. Diese verfügt über einen 200 W Ytterbium-Faserlaser mit 1070 nm Wellenlänge und einer maximalen Bauteilgröße von 250x250x325 mm³ [3].

Die Implementierung des photodiodenbasierten Messsystems erfolgt zum einen direkt in der Prozesskammer, indem mithilfe einer 4-fach-Faser die Bauplattform möglichst homogen erfasst wird (Abbildung 2 links) und zum anderen mithilfe eines Lichtwellenleiters im Kameraadapter, der das rückreflektierte Licht direkt im Strahlengang detektiert (Abbildung 2 rechts). Die optischen Signale jeder Messposition werden über je einen optischen Kanal in das Messsystem (Abbildung 2 mittig) übergeben. Dies besteht aus dem PLASMO Fast Process Observer, der das optische Signal in ein elektrisches Signal umwandelt und aus einem NI cDAQ Datenerfassungssystem, welches die Photodiodensignale, sowie die relevanten Maschinenparameter über Hochgeschwindigkeitsmodule einliest und mithilfe einer selbstentwickelten Aufzeichnungssoftware je Schicht ein Messdatenfile erstellt. Dieses Messdatenfile dient als Grundlage für die späteren Auswertungen.

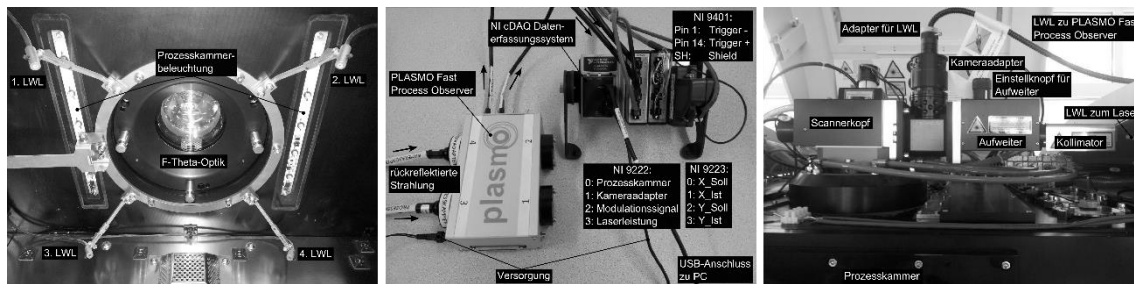


Abbildung 2. Messposition – Prozesskammer (links), Photodiodenbasiertes Messsystem mit Data-Acquisition (mittig), Messposition – Kameraadapter (rechts) [eigene Darstellung].

4 PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG

Die Verarbeitung der aufgenommenen Messdaten erfolgt mit eigens entwickelten Algorithmen. Zunächst werden in einem Preprocessing-Schritt die Messdaten geeignet für die eigentliche Auswertung vorbereitet, indem nicht relevante Daten gelöscht werden, sowie einige Filter angewendet werden. Danach werden die Messdaten der Photodiodensignale mit den zugehörigen Positionsdaten verknüpft und visualisiert (Abbildung 3 rechts).

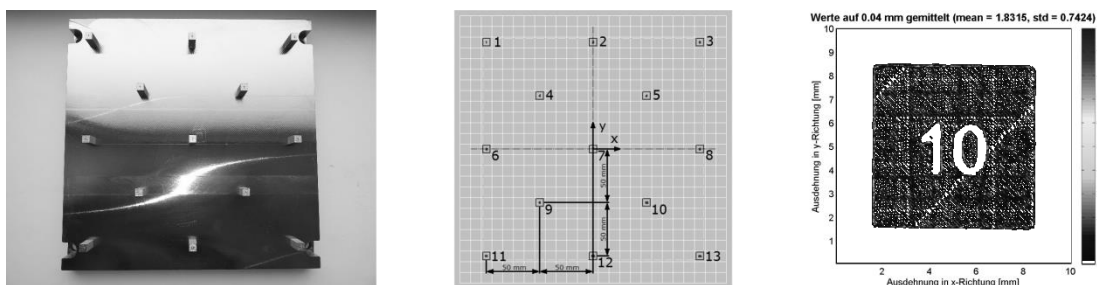


Abbildung 3. Fertig aufgebaute Baujob mit Testgeometrien ‚Demowürfel_V03‘ (links), CAD-Daten des Baujobs (mittig), Verortung der aufgezeichneten Prozessdaten von Probe 10 (rechts) [eigene Darstellung].

Dadurch ist es möglich den genauen Pfad des Laserstrahls nachzuvollziehen. Um eine Korrelationsuntersuchung zwischen Messdaten und den resultierenden Bauteileigenschaften durchführen zu können, wird eine Testgeometrie erstellt. Diese Geometrie (7x7 mm²) wird an verschiedenen Positionen auf der Bauplattform gebaut (Abbildung 3 links und mittig) um etwaige Positionabhängigkeiten detektieren zu können.

Zusätzlich wird eine Parametervariation durchgeführt um gezielt Fehler zu produzieren. Nach Rücksprache mit dem Maschinenhersteller wird der Prozessparameter ‚Laserleistung‘ als zu variierende Größe festgelegt. In zwei Schritten wird die Laserleistung vom Defaultwert um jeweils 5 % reduziert.

Um den Einfluss der verringerten Laserleistung auf das Bauteil zu identifizieren werden die Proben mittels CT-Scan untersucht. Im oberen Drittel des Bauteils (Laserleistung -10 %) wird eine markante Bauteilimperfection gefunden. Eine Untersuchung der in diesem Bereich befindlichen Messwerte ergibt, dass sich die Bauteilimperfection bei der Messposition ‚Prozesskammer‘ in einem Signaleinbruch bemerkbar macht (Abbildung 4). Dies kann in den umliegenden Schweißspuren und Schichten bestätigt werden.

Für die Messposition ‚Kameraadapter‘ wird analog vorgegangen. Das führt zur Erkenntnis, dass sich bei der Messposition ‚Kameraadapter‘ die Bauteilimperfection nicht durch einen Signaleinbruch, sondern durch eine Signalberuhigung bemerkbar macht.

Ziel ist es eine automatisierte Auswertesoftware zu entwickeln, die mit möglichst geringer Pseudofehlerrate einen Bauteilfehler automatisch erkennt und diesen dem Maschinenanwender mitteilt, damit dieser entscheiden kann wie darauf reagiert werden soll.

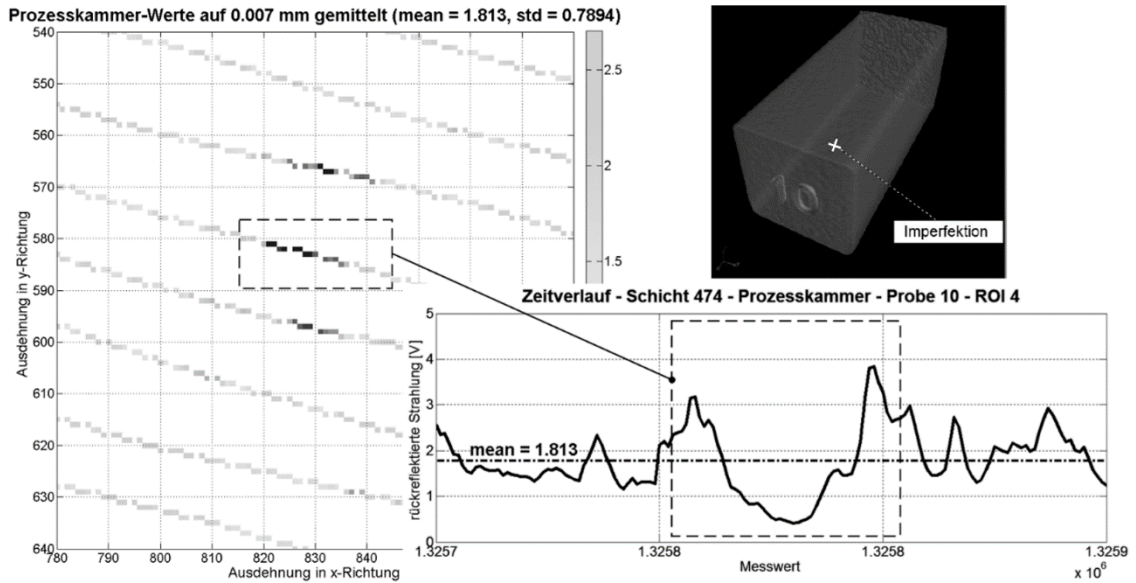


Abbildung 4. Verortung der im Prozesslicht detektierten Imperfektion und Zeitverlauf des Prozesslichts an der Messposition ‚Prozesskammer‘ sowie Position der Imperfektion im Bauteil [eigene Darstellung].

5 ERGEBNISSE

Es hat sich gezeigt, dass die Pseudofehlerrate am besten reduziert wird, indem die detektierten Fehler beider Messpositionssignale logisch verknüpft werden.

Im Konkreten geschieht dies, indem je Messposition und je Schicht eine Fehlerliste erstellt wird, in die an die Messwertindizes eines Fehlers eine logische 1 eingetragen wird. Anschließend werden beide Listen verglichen und logisch UND verknüpft. Im nächsten Schritt wird die soeben erstellte Liste mit den Scannerpositionsdaten verknüpft und eine Matrix mit den verorteten Fehlersignalen erstellt.

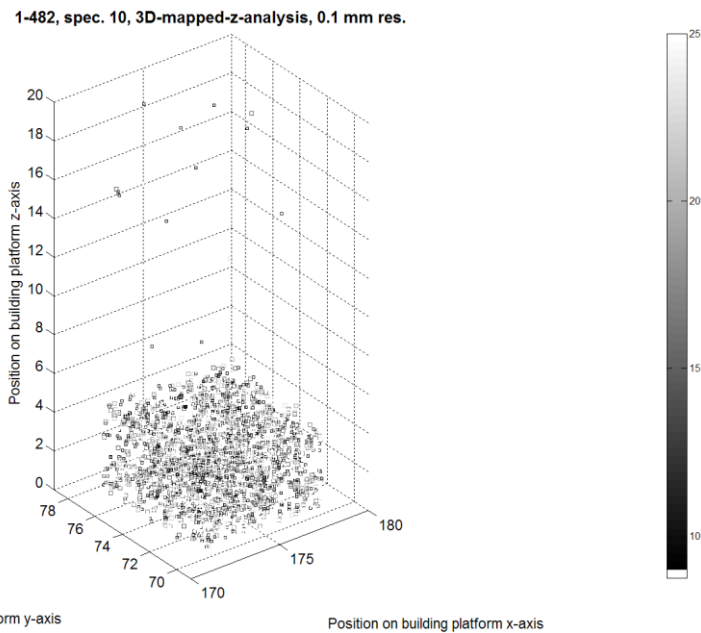


Abbildung 5. 3D-Mapping der detektierten Fehler einer Testgeometrie [eigene Darstellung].

Nachdem alle Matrizen erstellt sind, werden die umgebenden Schichten untersucht, um auf die vertikale Ausdehnung eines Fehlers schließen zu können. Ist die gesamte Ausdehnung des Fehlers für die Bauteilqualität relevant, so wird ein Fehler mit der Ausdehnung als Farbcodierung an der jeweiligen Position dargestellt. Werden die einzelnen Schichten übereinander gelegt, ist es möglich eine 3D-Darstellung der Fehler zu erstellen (Abbildung 5), was bei einer Offline-Auswertung die Fehlersuche deutlich vereinfacht.

Im Bereich der untersten 3 mm Bauhöhe werden sehr viele Fehler detektiert. Das begründet sich dadurch, dass in diesem die Stützstruktur (Support) für das eigentliche Bauteil gebaut wird und der Auswertalgorithmus nicht für den Support, sondern für das Bauteil optimiert ist. Die rechte Farbskala gibt Auskunft über die Fehlergröße, wobei ein Wert von 10 Messpunkten in diesem Fall einer Ausdehnung von 25.8 µm entspricht.

Eine Untersuchung hinsichtlich der Abhängigkeit der Bauteilqualität von der Position auf der Bauplattform zeigt, dass die Testgeometrien 1, 2, 3, 8, 11, 12 und 13 eine höhere Fehleranzahl aufweisen, als Bauteile in der Mitte der Bauplattform. Gespräche mit dem Hersteller sollen erklären, wie dem entgegengewirkt werden kann.

Es wird ein Versuch durchgeführt, der zeigen soll, ob eine Verunreinigung des zu belichtenden Pulvers mit Kondensat einen Einfluss auf die Bauteilqualität hat. Um ein vergleichbares Ergebnis zu erhalten werden zwei idente Zugproben gebaut. Bei einer definierten Höhe wird bei einer Zugprobe eine Kondensateinbringung in das unbelichtete Metallpulver des Querschnitts vorgenommen. Erste Untersuchungen des CT-Scans zeigen keine Auffälligkeiten im Bereich der bewussten Kondensateinbringung. Endgültige Aussagen über den Einfluss von Kondensat auf die Bauteilqualität können jedoch erst nach dem Zugversuch und nach Anfertigung eines Schlibbildes gegeben werden.

Die beschriebenen Testgeometrien wurden aus dem Werkstoff Ti64Al4V gebaut. Erste Versuche mit den Werkstoffen MS1 und AlSi10Mg liefern vielversprechende Ergebnisse.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die entwickelten Auswertalgorithmen erlauben es Fehler, die während des Bauprozesses entstehen zu detektieren und der jeweiligen Position zuzuordnen. Durch Bestimmung der Anzahl der Messpunkte bei denen der Auswertalgorithmus anschlägt ist es möglich die ungefähre Ausdehnung der Bauteilimperfection festzustellen. Mithilfe einer 3D-Mapping Software ist es möglich diese Ausdehnungsinformation grafisch darzustellen und so die genaue Position des Fehlers zu bestimmen. Durch eine Fehlerverteilung ist es möglich eine optimale Position für sensible Bauteile auf der Bauplattform zu finden.

Die bestehenden Auswertalgorithmen sollen hinsichtlich Rechenzeit und Pseudofehlerrate weiter optimiert werden. Versuche mit optischen Filtern sollen zeigen, ob es einen Wellenlängenbereich gibt, in dem Bauteilimperfectionen deutlicher hervortreten. Dazu ist es erforderlich das Messsystem zu verändern, um ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis zu erhalten. Die Auswertalgorithmen sollen an mehreren Materialien getestet werden und weitere Maschinenparameter verändert werden, um andere Fehler zu produzieren und somit die Erzeugung eines Fehlerkataloges voranzutreiben.

LITERATURVERWEISE

- [1] N.N. (2013): Additive manufacturing. A game changer for the manufacturing industry? Roland Berger Strategy Consultants, Munich.
- [2] Gebhardt, A. (2007): Generative Fertigungsverfahren, Hanser Verlag, München.
- [3] EOS GmbH – Electro Optical Systems (2012): EOS Systemdatenblatt M 280.
- [4] EOS GmbH – Electro Optical Systems (2012): Pressmaterial – Bilder und Anwendungen.
- [5] DIN ISO 5832-3 (2000): Implants for surgery – metallic materials - part 3: Wrought titanium 6 - aluminium 4 - vanadium alloy.
- [6] Gumpinger, J. (2013): Austenitic steels and titanium alloys for implants manufactured by the selective laser melting process. Dissertation, TU Wien.