

**B. KARPUSCHEWSKI**, Prof. Dr.-Ing. habil., **H.-J. PIEPER**, Dr.-Ing.  
**O. KUSHNARENKO**, Dr.-Ing., Magdeburg, Deutschland

## **AUSWAHL GENERATIVER PROZESSKETTEN FÜR DIE HERSTELLUNG METALLISCHER ENDPRODUKTE**

У даній статті розглядаються питання аналітичної оцінки процесу селективного спікання і його технологічних ланцюжків у порівнянні із традиційними технологіями виробництва. Критеріями порівняння є якість, час обробки, завитрати, а також складність геометрії виробу. Існуючі методи планування й забезпечення якості повинні бути доповнені з урахуванням нових можливостей изготовления виробів, які відкривають генеративні методи. Застосування генеративних технологій для виготовлення металевих кінцевих продуктів економічно Обосно-Вано тільки для деталей зі складною геометрією й малим розміром.

В данной статье рассматриваются вопросы аналитической оценки процесса селективного спекания и его технологических цепочек в сравнении с традиционными технологиями производства. Критериями сравнения являются качество, время обработки, затраты, а также сложность геометрии изделия. Существующие методы планирования и обеспечения качества должны быть дополнены с учетом новых возможностей изготовления изделий, которые открывают генеративные методы. Применение генеративных технологий для изготовления металлических конечных продуктов экономично обосновано только для деталей со сложной геометрией и малого размера.

The application of generating processes for the creation of metal end-products can only be applied economically with small batch size and geometrically high-complex workpieces. This paper concerns the analytic evaluation of several additive methods and its process chains and compares these with traditional manufacturing technologies regarding the quality, processing time, expenses as well as the complexity of the product. The existing methods of process planning and the assurance of the quality are extended with a focus on the new manufacturing possibilities which can be realized by the application of additive processes.

### *Einleitung*

Für die Herstellung von metallischen Endprodukten wird in der heutigen Zeit eine Vielzahl von Verfahren auf dem Markt angeboten. Dabei stehen Rapid-Verfahren im Wettbewerb zu den konventionellen Verfahren. Generell spricht der Kostenfaktor, insbesondere bei großen Stückzahlen, für die konventionellen Verfahren. Betrachtet man allerdings die sehr hohe Flexibilität, die Freiheit bei der Bauteilgestaltung und die niedrigen Herstellungszeiten, wird das weit reichende Potenzial von generativen Verfahren in Bereichen wie Automobilbau, Weltraumtechnik und Medizin deutlich [1, 2]. Die erreichbaren

Oberflächenqualitäten sind nicht mit denen spanender Verfahren vergleichbar; anwenderspezifisch jedoch oft ausrechend [3].

In der Literatur werden lediglich 15 % aller Anwendungen [4] der generativen Verfahren als Rapid Manufacturing ausgewiesen. Darunter die Anwendungen für metallische (ein rein metallisches Pulver, ohne Kunststoffanteil) und nichtmetallische Endprodukte. Rapid Manufacturing hat folgende Merkmale:

- die Eigenschaften weisen alle Merkmale des Endproduktes auf
- das Material ist identisch mit dem Endprodukt und die Konstruktion entspricht der des Endproduktes.

Die generativen Verfahren zur Herstellung metallischer Endprodukte unterscheiden sich nach Energiequelle (Laser-, Elektronenstrahl) und nach Werkstoffzustand (Draht, Folie, Pulver). Die Verfahren, die Pulver als Ausgangswerkstoff verwenden, unterteilen sich ihrerseits auf Pulver-Düse und Pulverbettverfahren.

Ein Pulverbettverfahren ist z.B. das Selektive Laserschmelzen (Bild 1). An diesem Verfahren wird das Prinzip generativer Verfahren dargestellt. Praktisch alle generativen Verfahren benötigen als erstes ein geschlossenes dreidimensionales Volumenmodell. Als zweites muss das 3D-Modell in ein STL-Format umgesetzt werden. Als drittes wird das Volumenmodell im Bauraum der Anlage positioniert, und es werden, sofern erforderlich, Stützkonstruktionen generiert. Danach wird das Bauteilvolumen anlagenabhängig in Schichten von 5 bis 200  $\mu\text{m}$  zerlegt. Es können sich auch mehrere Bauteile in mehreren Schichten in der Anlage befinden. Die Prozessparameter werden festgelegt und zur Anlage weitergeleitet.

Nachfolgend wird auf eine Plattform eine Pulverschicht entsprechender Dicke aufgetragen. Danach wird unter Nutzung des Laserlichtes das metallische Pulver aufgeschmolzen und erstarrt; die Bauplattform wird abgesenkt; das Pulver wird ein weiteres Mal aufgetragen und der Prozess wiederholt sich. So wird ein Bauteil schichtweise generiert.

Nach dem Prozess wird das Bauteil aus dem Arbeitsraum entnommen, von Pulverresten befreit und gereinigt, vorhandene Stützkonstruktionen werden entfernt.

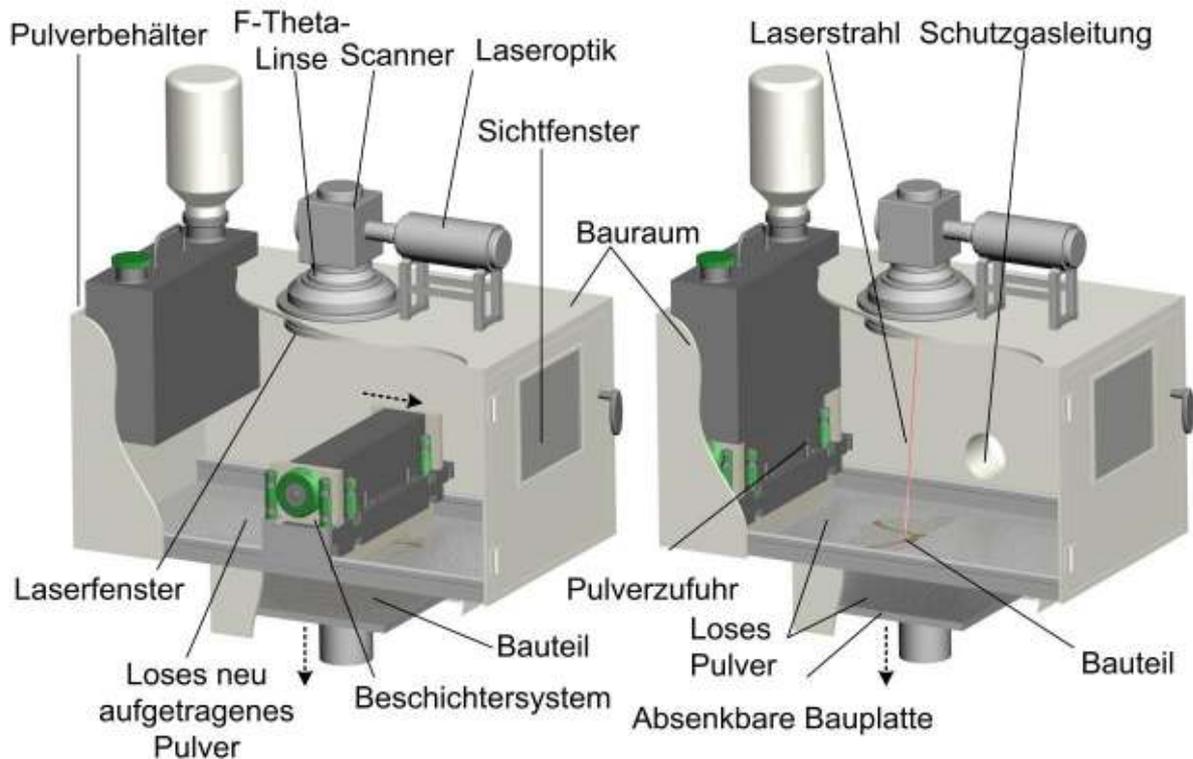


Bild 1 – Selektives Laserschmelzen

Es gibt bestimmte Hindernisse, warum generative Verfahren für die Herstellung metallischer Endprodukte nicht so oft angewendet werden:

- Investitionskosten sind zu hoch.
- Es fehlt eine strukturierte Darstellung spezifischer Informationen über die Rapid Manufacturing Verfahren.
- Es gibt noch keine umfassende Methodik zur Bestimmung von Qualitätsmängeln und deren Ursachen.
- bisher getroffene Vergleiche mit den konventionellen Verfahren sind unzureichend.
- Außerdem existiert für die generativen Verfahren noch keine Norm.

Die Entwicklung einer Methodik zum Prozesskettenvergleich und zur -auswahl soll zur vermehrten Anwendung generativer Verfahren beitragen, die Kosten zur Fertigungsvorbereitung senken und einen Überblick über die ganze generative Prozesskette von der Entwicklung eines Produktes bis zu seiner Herstellung geben.

In der Arbeit [5] hat sich der Ablauf der Entscheidungsfindung in drei Ebenen herauskristallisiert.

1. Ebene:

- Bestimmung der geometrischen und technologischen Bauteilkomplexität
  - Suche nach einem Werkstoff, der die gestellten Anforderungen erfüllt
- Ergebnis: Bauteil kann durch generative Verfahren hergestellt werden.

2. Ebene:

- Bewertung der Qualität der generativ hergestellten Bauteile
- Feststellung der Einflussgrößen
- Auswahl der angepassten Prozessparameter

Ergebnis: Bauteil wird nach angegebenen Kriterien hergestellt.

3. Ebene:

- Zusammenstellung der Prozessketten
- Vergleich der Ketten mit Hilfe der aufgestellten Kriterien

Ergebnis: Vorschlag für eine geeignete Prozesskette.

Für diese Entscheidungsmethodik sollen relevante Informationen und Bewertungsverfahren bereitgestellt werden.

### 1 Geometrische und technologische Bauteilkomplexität

Die Einordnung der Bauteile bei den generativen Prozessen gewinnt immer mehr an Bedeutung [6]. Deshalb sind die Klassifizierung der Bauteilkomplexität und das Ermitteln der erreichbaren Qualität ein erster Schritt für die Integration der generativen Verfahren zur Herstellung von Endprodukten. Durch die Anwendung der von [7] vorgeschlagenen Formel (1) wurde festgestellt, dass bei einem Gk größer 5 generative Verfahren angewendet werden können (Bild 2).

$$Gk = W_{Hg} + \sum (W_{Ng_i} * n_i * a_i * f_G) \quad (1)$$

Gk – Komplexitätsgrad,  $W_{Hg}$  – Wichtungsfaktor des Hauptgeometrieelementes,  $W_{Ng}$  - Wichtungsfaktor des Nebengeometrieelementes  $i$ ,  $n_i$  – Anzahl des Hauptgeometrieelementes  $i$ ,  $a_i$  - Anordnung des Geometrieelementes zum Hauptgeometrieelement,  $f_G$  – Größenfaktor,  $i$  – Zählindex.

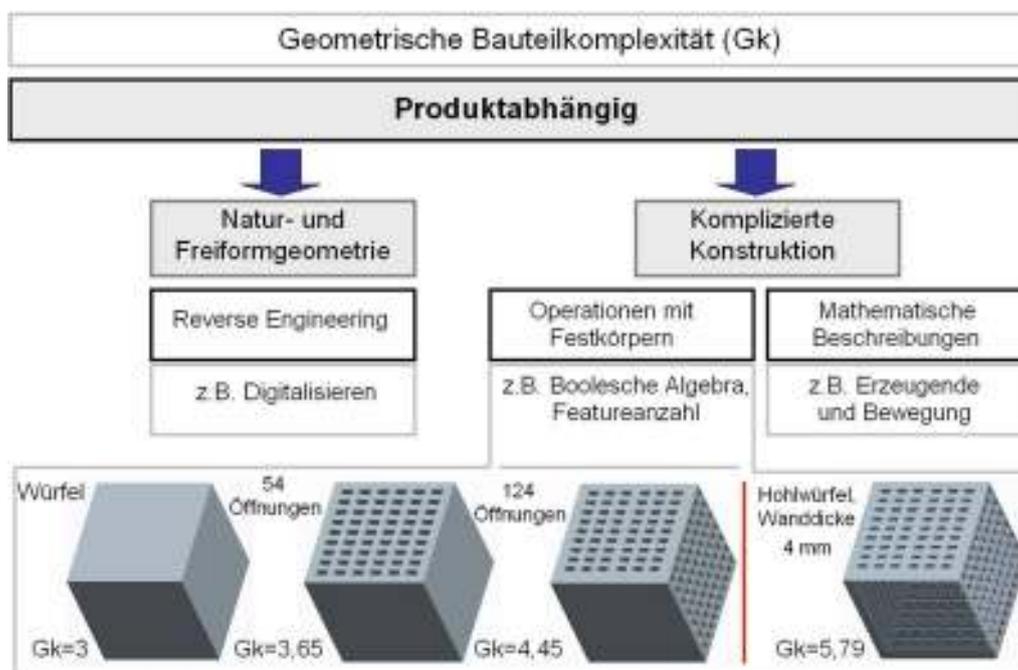


Bild 2 – Geometrische Bauteilkomplexität

*Technologische Bauteilkomplexität* bezieht sich auf die Anwendung konkreter Fertigungsverfahren und bestimmter Anlagen, als auch auf andere Parameter, wie z.B. die werkstoffspezifischen Eigenschaften eines Bauteils, Stückzahl, Fertigungszeit und -kosten. Für die Auswertung der technologischen Bauteilkomplexität spielen zum Beispiel die Größe des Bauteils und die Prozessbeschränkungen eine Rolle. So werden generative Verfahren oft durch die Bauraumgröße und die Mikrogeometrie als auch durch den Laserdurchmesser und die Schichtdicke beschränkt (Bild 3).

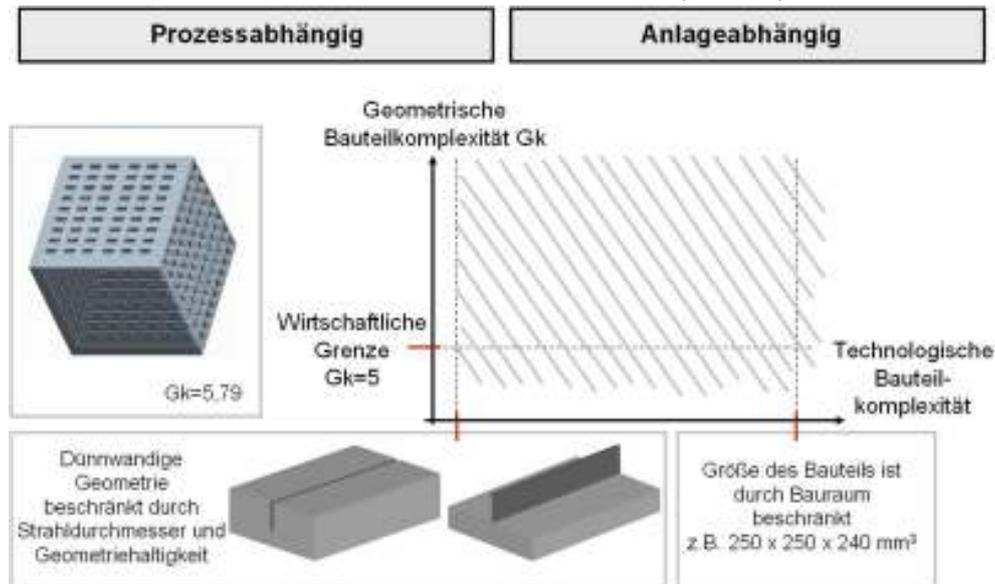


Bild 3 – Technologische Bauteilkomplexität

## 2 Werkstoffauswahl

In [5] wurde ein Informationssystem metallischer Werkstoffe entwickelt. Die Werkstoffe wurden in zwei Gruppen eingeteilt: genormte und Firmenspezifische Werkstoffe. Zu den genormten gehören z.B. Stähle (Edelstahl (X2CrNiMo17132 W.Nr. 1.4404), Warmarbeitsstahl (X3NiCoMoTi18-9-5 W.Nr. 1.2709) usw.), zu den Firmenspezifischen: stahlähnliche Pulver (wie z.B. StainlessSteel) und verschiedene Legierungen (Kobalt-Chrom-Molybdän-, Titan-, Aluminium basierte usw.). Das System beinhaltet wichtige Eigenschaften der angewendeten Werkstoffe, wie die chemische Zusammensetzung, die mechanischen Eigenschaften usw. und kann weiter ergänzt werden. So ein Informationssystem spielt eine große Rolle bei der Auswahl generativer Prozessketten.

## 3 Bewertung der Qualität von generativ hergestellten Bauteilen

Auftretende Qualitätsmängel im Fertigungsprozess sind zunächst zu erfassen und zu systematisieren. Bei SLS/SLM sind folgende Qualitätsmängel bekannt:

- Geometrieabweichungen,
- „Treppen“- Effekt,
- hohe Rauheit,
- nicht geschlossene Poren im Bauteilvolumen,
- nicht geschmolzene Pulver auf der Oberfläche und in den entstandenen Poren.

Diese Mängel sind in Bild 4 zu sehen.

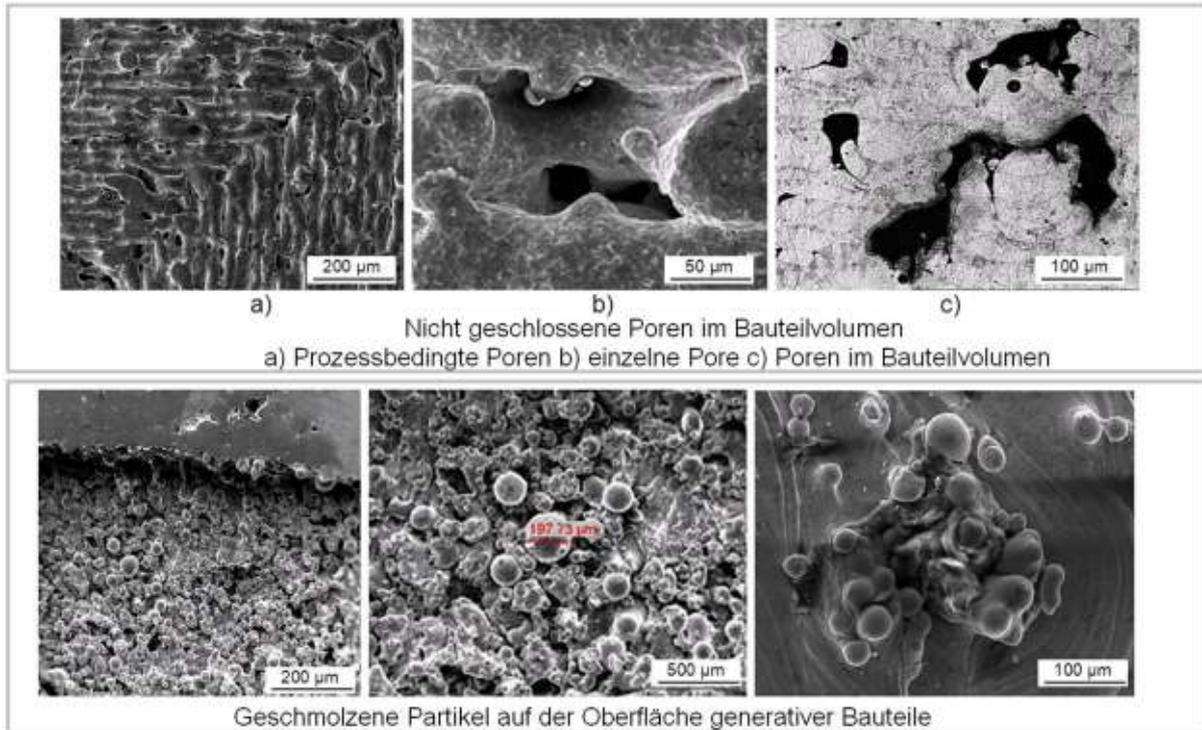


Bild 4 – Mögliche Qualitätsfehler bei SLS/SLM-Bauteilen

In der Literatur wird darauf hingewiesen, dass die Bauteilqualität oft von der Belichtungsstrategie abhängig ist. In den letzten Jahren werden die Methodiken [8] dargestellt, wie dargestellte Qualitätsmängel reduziert werden können. Weiterhin wird auch unsere eigene Vorgehensweise dargestellt (Punkt 4).

Für die zweite Etappe ist es wichtig, Informationen über die Qualität generativ hergestellter Bauteile zusammen zu fassen. Dafür müssen die Probekörpergeometrien festgelegt werden. In den Arbeiten [9, 10, 11, 12] wurden Probekörper für generative Fertigungsverfahren dargestellt, um die erzielte Geometrie und Oberflächenabweichungen zu analysieren. Diese Probekörper bestanden aus einfachen geometrischen Elementen und dienten der Analyse der Möglichkeiten konkreter Anlagen. Diese Probekörper sind nicht geeignet um den Einfluss der Prozessparameter auf die angegebenen Eigenschaften zu untersuchen. Bei der Auswahl der Probekörper für die

Variation der Prozessparameter wird empfohlen, eine einfache reproduzierbare Geometrie auszuwählen.

Zur Untersuchung der *Geometriehaltigkeit* [5] wurden zwei Referenzgeometrien hergestellt. Jeweils eine konvexe und eine konkave Geometrie. In Bild 5 ist nur die konvexe Geometrie dargestellt. Diese Probekörper wurden auf dem Anlagensystem F&S RealizersSLM aus Stahl 1.4404 hergestellt.

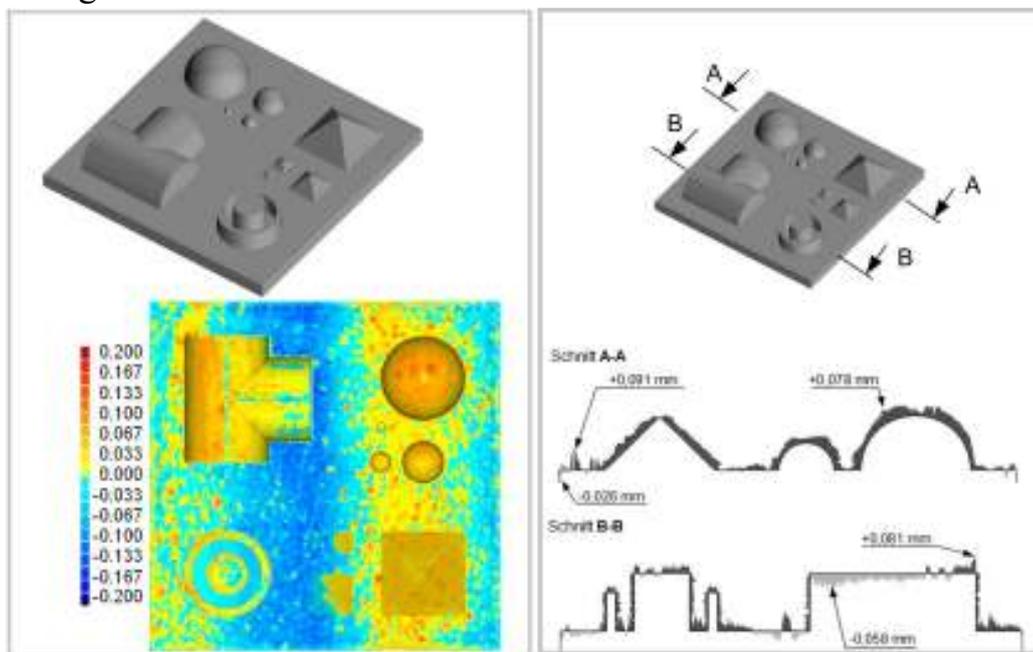


Bild 5 – Analyse der Geometriehaltigkeit

Bei der Analyse der Geometriehaltigkeit der konvexen und konkaven Geometrie wurde festgestellt, dass entsprechend 60 % bzw. 70% der Bauteiloberfläche innerhalb eines gewählten Toleranzbereiches liegen und die maximale Geometrieabweichung  $\pm 200 \mu\text{m}$  beträgt. Diese Abweichungen sind durch viele Faktoren bestimmt. Die Ursachen können sowohl in einer ungleichmäßigen Pulverbeschichtung als auch in einer thermisch resultierenden Zug- und Druckspannung im Bauteil liegen. Solche thermischen Spannungen könnten durch eine Bauteiltemperierung im Bauprozess vermieden werden. Weitere Gründe können auch in der verwendeten Pulverkorngroße und den realisierten Schmelzbahngrößen liegen. Außerdem ist die Oberfläche des Bauteils sehr rau, und dies beeinflusst die Messergebnisse. Die Messergebnisse weisen daraufhin, dass generativ hergestellte Bauteile auf jedem Fall nachbearbeitet werden müssen.

#### *4 Vorgehensweise zur Verbesserung der Bauteilqualität*

Diese oben erwähnten Qualitätsmängel können von verschiedenen Einflüssen abhängig sein. Unter anderem sind sie Prozessbedingt

(Belichtungsstrategie, Laserleistung Belichtungsgeschwindigkeit). Zur Verbesserung der Qualität (Oberflächenrauheit und Dichte) wurde die folgende Vorgehensweise für die Anlage F&S Realizers<sup>SLM</sup> angeboten. Diese Vorgehensweise besteht aus 3 Versuchsreihen. Das Ausgangsbauteil hat eine Oberflächenrauheit Ra 16 µm und eine Dichte von 96 %. Die Versuche wurden für den Werkstoff Stahl 1.4404 durchgeführt.

Bei der 1. Versuchsreihe wurde die Laserleistung variiert und die Belichtungsgeschwindigkeit blieb konstant. Es wurde das Verhältnis der Laserleistung zur Belichtungsgeschwindigkeit ermittelt, die so genannte Streckenenergie. Aus allen Probekörpern der ersten Versuchsreihe wurde der Körper Nummer 12 ausgewählt, da bei diesem die Rauheit minimal und die Geschwindigkeit relativ hoch war. Die Prozessparameter wurden für die zweite Versuchsreihe übernommen (Bild 6).

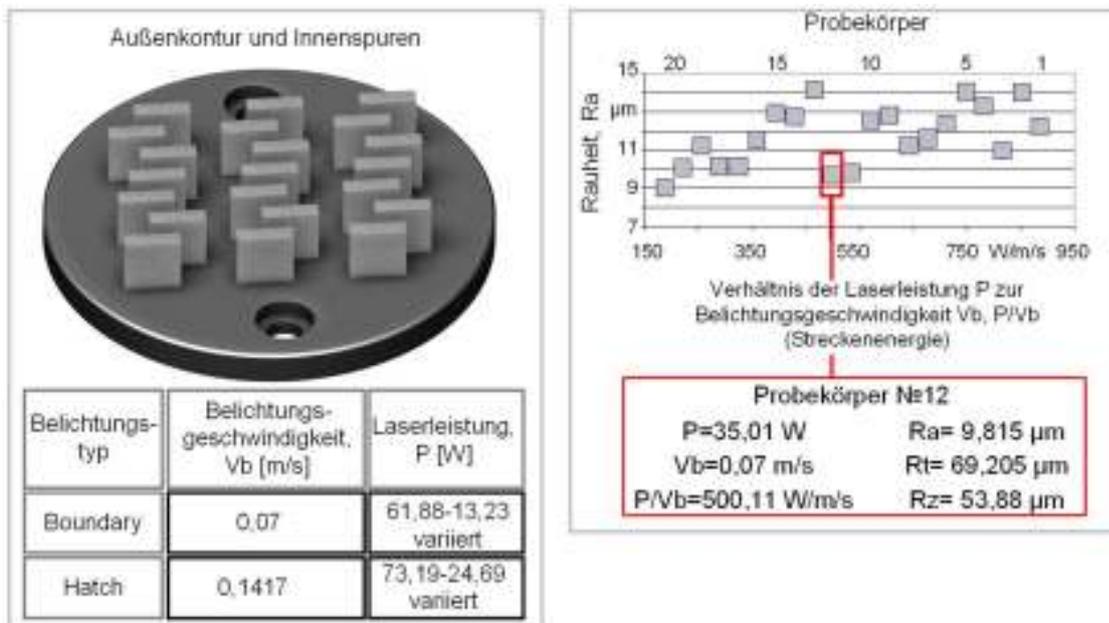


Bild 6 – Ergebnisse der ersten Versuchsreihe

In der zweiten Versuchsreihe wurde die Streckenenergie konstant gehalten und die Belichtungsgeschwindigkeit variiert. Die Parameter des Probekörpers Nr. 6 wurden übernommen, weil bei diesem weniger Laserleistung im Verhältnis zu einer guten Oberflächenrauheit gebraucht wurde.

Da die Oberflächenrauheit von den Parametern der Außenkontur abhängig ist, wurde entschieden, in der 3. Versuchsreihe 7 Probekörper herzustellen, die ausschließlich aus Außenkonturen bestehen. Für ein aussagekräftiges Ergebnis wurden alle vier Seiten der Probekörper untersucht. Die günstigsten Prozessparameter wurden ausgesucht. Probekörper Nr. 4 hatte eine relativ niedrige Rauheit bei weniger Laserleistung.

Durch diese drei Reihen wurden die Prozessparameter mit der geringsten Oberflächenrauheit und den kürzesten Prozesszeiten bestimmt, die für den Werkstoffes 1.4404 gelten. Trotz einer verringerten Bauteilrauheit (von 16  $\mu\text{m}$  auf 7  $\mu\text{m}$ ) und einer erhöhten Dichte von 98,6 % ist die Nachbearbeitung bei der Herstellung metallischer Endprodukte unvermeidbar.

Durch diese Vorgehensweise wurde gezeigt, dass Verbesserungspotenzial existiert. Außerdem senkt die Reduzierung der Rauheit die Nachbearbeitungskosten.

#### *5 Generative Prozessketten*

Dieser Teil gehört zur 3. Etappe der Entscheidungsmethodik. Prinzipiell werden die gleichen Verfahren zur Verbesserung generativ hergestellter Bauteile, wie bei den konventionellen Teilen angewendet. Wichtig ist die direkte einstufige und mehrstufige Prozesskette zu unterscheiden. Bei der direkten einstufigen Prozesskette geht es um das Trennen des Bauteils von der Bauplattform, das Entfernen von Stützkonstruktionen (falls vorhanden) und die Reinigung. Um die Rauheiten zu verkleinern und anhaftende Pulverreste zu entfernen, wird am häufigsten das Mikrostrahlen benutzt. Erfahrungsgemäß ist es möglich, mittels Mikrostrahlen die Oberflächenrauheit um 50-80 % zu senken. Dabei ist anzumerken, dass bei den angewendeten Technologien Rauheiten bis zu  $R_a = 30 \mu\text{m}$  in Abhängigkeit vom Anlagentyp, Werkstoff und der gewählten Strategie auftreten können. Dies bedeutet, dass für die meisten Anwendungen generativ hergestellte Bauteile in einer mehrstufigen Prozesskette bearbeitet werden müssen, es sind also weitere Prozesse nötig, um die Qualitätsmängel der generativen Bauteile zu beseitigen.

Durch die Durchführung selbständiger Versuche, Simulationen und durch die Informationsbereitstellung [5] wurde festgestellt, dass sich die Fräsbearbeitung am besten als Post-Prozess zur Verbesserung der Bauteilqualität eignet. Abtragende Verfahren können aus Zeit- und Kostengründen, da hier nur eine Elektrode für die Endbearbeitung zum Einsatz kommen soll, neben dem Fräsen, als Postprozess angewendet werden. Durch weitere Versuche wurde nachgewiesen, dass das Laserstrahlabtragen nur beschränkt für die Nachbearbeitung angewendet werden kann. Das Schleifen kann nur für die Bearbeitung der Planflächen effektiv genutzt werden (Bild 7).

Diese Ergebnisse wurden durch die Halbmatrix Analyse mit der Berücksichtigung der ausgewählten Kriterien bestätigt.

#### *6 Wirtschaftlichkeit generativer Verfahren*

In [5] wurde die Berechnung der Fertigungseinzelkosten für einen der oben erwähnten Probekörper durchgeführt. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass konventionelle Verfahren für die Herstellung dieses konkreten Probekörpers deutlich vorteilhafter sind. So sind z.B. die Fertigungseinzelkosten für generative Verfahren zweimal so hoch wie bei konventionellen Verfahren.

Anderes ist dies für Teile mit dem Geometriekomplexitätsgrad größer Fünf. Hier sind die Kosten niedriger als bei konventionellen Verfahren (Bild 8).

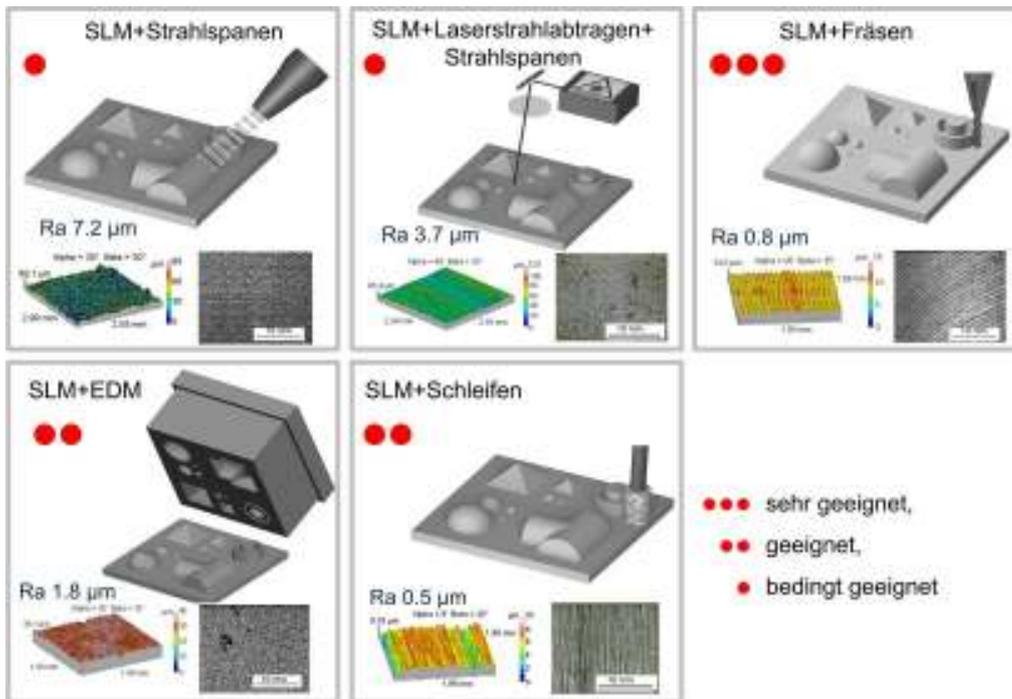


Bild 7 – Postprozesse für die generativ hergestellten metallischen Bauteile

Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass mit dem momentanen Stand der Entwicklung, die generativen Verfahren nur dort zur Anwendung geeignet sind, wo konventionelle Verfahren nicht genutzt werden können.

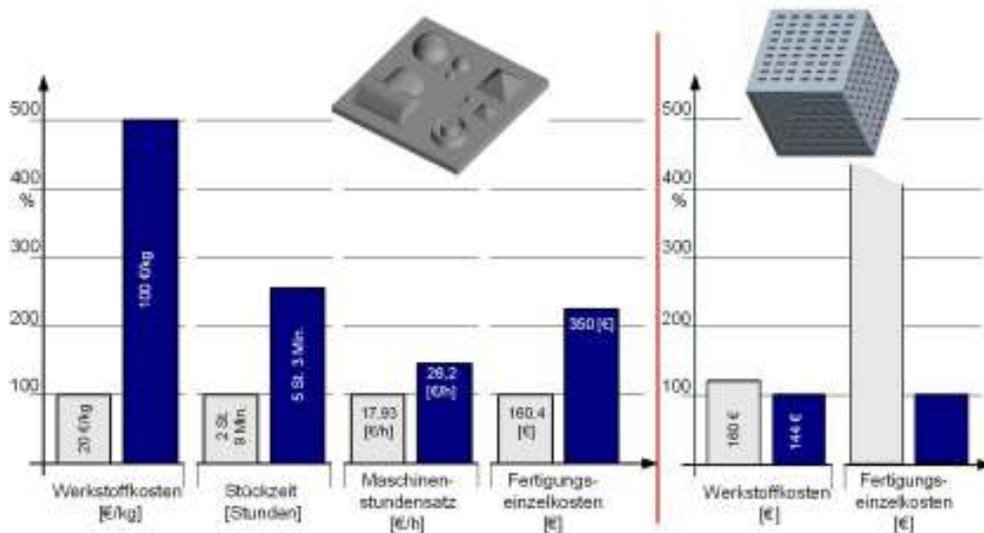


Bild 8 – Wirtschaftlichkeit generativer Verfahren

### Zusammenfassung

Generative Verfahren werden für die Bauteile dann angewendet, wenn die Herstellung durch die konventionellen Verfahren nicht wirtschaftlich

durchzuführen ist, also, wo die Bauteilkomplexität hoch und die Stückzahl niedrig ist. Eine breite Anwendung der generativen Verfahren zur Herstellung metallischer Endprodukte hängt wesentlich davon ab, ob es gelingt, die Eigenschaften der generativen Produkte zu verbessern, die Werkstoffpalette zu erweitern und neue Anwendungsbereiche zu erschließen. Außerdem soll die Schaffung einer Struktur zur Fertigungsvorbereitung und -steuerung in Bezug auf die Anwendung generativer Verfahren, eine erfolgreiche Herstellung metallischer Endprodukte unterstützen. Die Potenziale zur Verbesserung der Bauteilqualität sowohl im Prozess selbst, als auch durch die Auswahl der Geometrie angepasster Prozessketten existieren und sind noch nicht ausgeschöpft. Die Informationsbereitstellung, auch durch die Entwicklung solcher im Artikel beschriebenen Entscheidungsmethodiken, trägt zur Anwendung der generativen Verfahren bei.

**Literatur:** 1. Eisen, M., Witt, G.: Selective Laser Melting -Bauteile aus Materialien nach Kundenwunsch. In: RTEjournal - Forum für Rapid Technologie, 4. Ausgabe, 4(2007), Mai 2007, URL: <http://www.rtejournal.de/> 2. Klare, M., Lindner, F.: Rapid Manufacturing in der Medizintechnik – Neue Verfahrens- und Materialkonzepte. In: RTEjournal - Forum für Rapid Technologie, 4. Ausgabe, 4(2007), Mai 2007, URL: <http://www.rtejournal.de/> 3. Aumund-Koop, C.; Petrozold.; Uckermann, I.: Rapid Manufacturing – am Markt umgesetzte Verfahren und Prozessketten, in: Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis, Kollaska H. (Hrsg.) Bd.24, 2008, 181-196 4. Wohlers, T.: The Future of Rapid and Custom Manufacturing, Rapid & Mass Customization 2008, 's-Hertogenbosch, Netherlands 5. Kushnarenko, O.: Entscheidungsmethodik zur Anwendung generativer Verfahren für die Herstellung metallischen Endprodukte. Magdeburg, Univ., Diss., Shaker Verlag, 2009 6. Gebhard, A.: [Generative Fertigungsverfahren : Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Rapid Manufacturing](#). 3. Aufl. [München: Hanser, 2007](#) 7. Schoop, C.: Erarbeitung eines Kataloges zur Klassifizierung von LOM-Bauteilen. Magdeburg, Dipl.-Arb., 1997 8. Zaeh, M. F.; Kahnert, M.: The effect of scanning strategies on electron beam sintering. In Production Engineering. Volume 3, Number 3/September 2009, pp. 217-224 9. Castillo, L.: Study about the rapid manufacturing of complex parts of stainless steel and titanium. TNO report with the collaboration of AIMME. TNO 2005. 31 p. 10. Kruth, J.-P., Vandenbroucke, B., Van Vaerenbergh, J., Mercelis, P.: Benchmarking of different SLS/SLM processes as Rapid Manufacturing Techniques. Division PMA, Department of Mechanical Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium Int. Conf. Polymers & Moulds Innovations (PMI), Gent, Belgium, April 20-23, 2005 11. Skrynecki, N.: Optimierung der Strahlschmelztechnologie für die Anwendung im Werkzeug- und Formenbau am Beispiel des Anlagenkonzepts „MCP-Realizer II SLM“. Dipl.-Arb., 2006 Universität Duisburg-Essen 12. Yasa, C.; Craeghs, T.; Badrossymay, M.; Kruth, P.-J.: Rapid Manufacturing Research an the Catholic University of Leuven, US-Turkey Workshop on Rapid Technologies, September 24, 2009, pp. 63-73.