

Markus Hirtler

## **Entwicklung einer hybriden Prozesskombination aus partiellem Schmieden und additiver Fertigung zur flexiblen Herstellung von Aluminiumbauteilen**

**Entwicklung einer hybriden Prozesskombination aus partiellem Schmieden und additiver Fertigung zur flexiblen Herstellung von Aluminiumbauteilen**

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektro- und Energiesysteme  
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

vorgelegt von  
Diplom-Ingenieur  
Markus Hirtler  
geboren am 13.09.1987 in Emmendingen

Vorsitzender: Prof. Dr. Florian Pyczak

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Bambach

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Benjamin Klusemann

Tag der mündlichen Prüfung: 13.12.2021



Berichte aus der Fertigungstechnik

**Markus Hirtler**

**Entwicklung einer hybriden Prozesskombination  
aus partiellem Schmieden und additiver Fertigung  
zur flexiblen Herstellung von Aluminiumbauteilen**

Shaker Verlag  
Düren 2022

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Zugl.: Cottbus-Senftenberg, BTU, Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2022

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8644-7

ISSN 0945-0769

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **I Vorwort**

Diese Arbeit wurde während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Konstruktion und Fertigung an der Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg erstellt.

Für die Zusammenarbeit bedanke ich mich bei den Mitarbeitern, Kollegen und Studierenden die mit ihren Arbeiten und damit verbundenen fachlichen Diskussionen und Anregungen sehr zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben. An dieser Stelle gilt mein besonderer Dank meinem Zimmerkollegen M.Eng. Benjamin Sydow für die unermüdlichen fachlichen Gespräche, Ratschläge und Anmerkungen.

Diese Gelegenheit möchte ich auch nutzen meinen großen Dank an M.Sc. Angelika Jedynak und M.Sc. Christian Schäfer für die Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit auszusprechen.

Auf der experimentellen Seite gilt mein herzlicher Dank an die Werkstatt des Lehrstuhls Konstruktion und Fertigung, die Werkstatt des Lehrstuhls Füge- und Schweißtechnik und an das Labor des Fachgebiets Metallkunde und Werkstofftechnik.

Für viele fruchtbare Gespräche und Anregungen danke ich besonders meinem Kollegen Dipl.-Ing. Tobias Ketterer.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern und meinem Bruder Franz-Josef Hirtler, welche mich während der gesamten Zeit wesentlich unterstützt haben.



## II Zusammenfassung

Effiziente Fertigungssysteme sind heutzutage wichtiger denn je, um die steigenden Klimaauflagen und gleichzeitig die damit verbundenen Anforderungen an die Ressourceneffizienz erfüllen zu können. Andererseits stellt eine hohe Ressourceneffizienz einen entscheidenden Wirtschaftlichkeitsfaktor dar. Dafür müssen neben optimierten Fertigungsverfahren auch Halbzeuge bzw. Produkte an die jeweils wirkende Belastung angepasst werden, um die mögliche Biegefestigkeit vollumfänglich auszunutzen. Zusätzlich werden auch vonseiten des globalisierten Marktes höhere Anforderungen an die Produktvielfalt gestellt. All dies führt dazu, dass immer mehr Produktvarianten hergestellt werden müssen. Klassische Fertigungsverfahren haben dabei den Nachteil, dass diese entweder mit einem hohen Ressourcenverbrauch verbunden sind oder die Produktvarianten nicht wirtschaftlich hergestellt werden können. Zwar können neue additive Fertigungsverfahren wie Selective Laser Melting (SLM), Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) oder Laserpulverauftragschweißen (LPA) durch ihre hohe Flexibilität dieses Problem teilweise beheben, aber insbesondere bei großvolumigen Bauteilen oder größeren Stückzahlen sind diese Verfahren mit langen Prozesszeiten verbunden und weisen damit eine geringe Produktivität auf.

Dahingegen können hybride Fertigungsverfahren bestehend aus einer Kombination aus einem werkzeuggebundenen Prozess (z. B. Schmieden) und einem werkzeuglosen Verfahren (z. B. Auftragschweißen) eine effiziente Lösung darstellen. Insbesondere das partielle Schmieden mit seiner ebenfalls hohen Flexibilität und den überschaubaren Werkzeugkosten sind dafür prädestiniert, um ein Halbzeug zu erstellen, das anschließend durch die additive Fertigung in die jeweilige Endform überführt wird. Die Herausforderungen sind dabei, die Wechselwirkungen der beiden Fertigungsverfahren zu untersuchen und die Teilprozesse bereits beim Bauteildesign aufeinander abzustimmen. Dies wurde in dieser Untersuchung exemplarisch an dem partiellen Schmieden eines Landebeiträgers mit drei Taschen aus Aluminium und eines Haltehakens durchgeführt. Die geschmiedete Vorform wurde durch Auftragschweißen additiv erweitert, wobei der Biege widerstand erhöht wird. Anhand dieser beiden Beispiele wurden anschließend Richtlinien und Strategien für das Hybridverfahren abgeleitet. Um die Teilprozesse aufeinander abstimmen zu können, wurden Untersuchungen am additiven Auftragen von

ER 4047 mittels WAAM und EN AC-44200 für LPA auf einem geschmiedeten EN AW-6082-Grundkörper durchgeführt. Dazu wurden zum Vergleich Untersuchungen zum Auftragschweißen von EN AW-6016 und Al4,5MgMn ergänzt.

Ziel war es, die negativen Auswirkungen der Wärmeeinbringung durch unterschiedliche Pausenzeiten zu vermeiden und deren Effekte auf die Mikrostruktur sowie die daraus resultierende Härte und Festigkeit aufzuzeigen. Des Weiteren wurde die Prozessreihenfolge untersucht, mit der eine optimale Festigkeit für die genannten Legierungen mit den additiven Fertigungsverfahren erreicht werden kann. So sollte für EN AC-44200 mit dem LPA-Verfahren vor dem Auftragen eine Wärmebehandlung erfolgen und eine Pausenzeit von 5 bis 20 s zwischen den Schichten verwendet werden. Beim WAAM-Verfahren sollte für ER 4047 dagegen die Wärmebehandlung nach dem Auftragen durchgeführt werden, damit eine hohe Härte im Grundwerkstoff wiederhergestellt werden kann.

Für EN AW-6016 zeigte sich beim WAAM-Verfahren, dass die Wärmebehandlung vor und nach dem Auftragen durchgeführt werden sollte. Damit konnte für EN AW-6016 eine gleichmäßige Härteverteilung im Grundwerkstoff und im additiv aufgetragenen Werkstoff erreicht werden, wobei die höchste Festigkeit mit 305 MPa nach einem Warmauslagern von 4 h bei 180 °C ermittelt wurde. Diese Erkenntnisse wurden dann auf das partielle Schmieden des Demonstrators mit drei Taschen übertragen. An diesem wurde durch eine FEM-Simulation die Steifigkeit mit dem additiven Werkstoffauftrag um 64 % verbessert. Darüber hinaus wurde für jede Prozesskombination ein Optimum zwischen Schmieden und additivem Auftrag ermittelt. So sollte aufgrund der geringen Auftragsrate des LPA-Verfahrens das geschmiedete Halbzeug mit 45 mm eine größere Rippenhöhe aufweisen, damit nach der Endbearbeitung eine Geometrie mit 60 mm in einer akzeptablen Prozesszeit erreicht wird. Dahingehend genügt für das WAAM-Verfahren eine Höhe von 25 mm, die mit geringen Presskräften erzeugt werden kann. Ebenso konnte gezeigt werden, dass durch dieses Hybridverfahren der Werkstoffeinsatz mit bis zu 53,2 % gegenüber der reinen Zerspanung gesenkt werden kann. Die Prozesszeit liegt mit 4,4 bzw. 2,4 h deutlich unter der eines rein additiven Prozesses, was auf

eine konkurrenzfähige Wirtschaftlichkeit hindeutet. Als ein zweites Anwendungsbeispiel wurde an einem Haltehaken die Machbarkeit von komplexen Hybridbauteilen nachgewiesen.



### **III Abstract (English)**

Nowadays efficient manufacturing systems are very important due to increasing climate requirements and the associated resource efficiency requirements, which represents a decisive economic factor. To optimize production processes, semi-finished products and products must also be adapted to the respective load to fully utilize the possible flexural strength and the globalized market is making greater demands on product diversity. All these factors mean that an increasing product variants must be manufactured.

Conventional manufacturing processes reveal the disadvantages which they are either associated with high resource consumption or the product variants cannot be manufactured economically. Although new additive manufacturing processes such as selective laser melting (SLM), wire arc additive manufacturing (WAAM) or laser powder cladding (LPA) can partially solve this problem due to their high flexibility, these manufacturing processes result in long processing times and low productivity, especially for large-volume components and mass production. In contrast to that, a combination of a conventional and new manufacturing processes can resolve the limits of new manufacturing processes. For instance, partial forging and layer-wise deposition to create semi-finished products. The challenges here are to investigate the interactions between the two manufacturing processes and to coordinate the sub-processes as early as possible in the design stage.

In this work, the approach is realized is by the partial forging of a landing leg carrier with three pockets made of aluminum and a retaining hook. The forged part is then added more material by an arc welding process. Based on these two examples, guidelines and strategies for the hybrid process are developed. To coordinate the sub processes, investigations are carried out on the additive deposition of ER 4047 using WAAM and EN AC-44200 for LPA on a forged EN AW-6082 base body. For comparison, investigations on the deposition welding of EN AW-6016 and Al4.5MgMn are added. The aim of this work is to avoid the negative effects of heat input through the microstructure, and mechanical properties. In particular, the optimal strength can be achieved for the mentioned alloys with the additive manufacturing processes. For EN AC-44200 with the LPA process, heat treatment should be performed before deposition and the pause time of 5 to 20 seconds between layers should be used. For the

WAAM process, heat treatment should be carried out after deposition for ER 4047, so that a high hardness is restored in the base material.

For EN AW-6016, the WAAM process shows that heat treatment should be carried out before and after application. This leads to a uniform hardness distribution in the base material and in the additively applied material for EN AW-6016, with the highest strength of 305 MPa determined after artificial aging of 4 hrs. at 180 °C. The results are then transferred to the partial forging of the demonstrator with three pockets. With this part, the FEM simulation can improve the stiffness by 64 % with the additive material application. In addition, an optimum between forging and additive deposition was determined for each process combination. For example, due to the low application rate of the LPA process, the forged semi-finished product should have a greater rib height of 45 mm so that a geometry of 60 mm is achieved in an acceptable process time after finishing. A height of 25 mm is sufficient for the WAAM process, which can be produced with low press forces. It is notable that this hybrid process could reduce material usage by up to 53.2 % compared with purely machining. The process time of 4.4 and 2.4 hrs., respectively, is significantly lower than that of a purely additive process, indicating competitive cost-effectiveness. As a second application example, the feasibility of complex hybrid components is demonstrated on a retaining hook.

## IV Inhaltsverzeichnis

I	Vorwort.....	I
II	Zusammenfassung .....	III
III	Abstract (English).....	VII
IV	Inhaltsverzeichnis .....	IX
V	Abbildungsverzeichnis .....	XIII
VI	Tabellenverzeichnis .....	XXIII
VII	Zeichen und Abkürzungen.....	XXV
VIII	Formelzeichenverzeichnis .....	XXIX
1	Einleitung.....	1
2	Stand der Forschung .....	9
2.1	Grundlagen der Umformung.....	9
2.1.1	Schmieden.....	11
2.1.2	Partielles Schmieden.....	14
2.1.3	Schmieden von Aluminiumlegierungen .....	21
2.1.4	Ver- und Entfestigungsmechanismen bei Aluminiumlegierungen .....	23
2.1.5	Untersuchte Schmiedelegerung .....	27
2.1.6	Grenzen des Schmiedens .....	32
2.2	Additive Fertigung.....	34
2.2.1	Auftragschweißen .....	36
2.2.2	Laserpulverauftragschweißen (LPA).....	38
2.2.3	Lichtbogenauftragschweißen (WAAM) .....	46
2.2.4	Schweißimperfektionen von Aluminiumlegierungen .....	54
2.2.5	Grenzen des Auftragschweißens.....	59
2.3	Hybride Fertigungsverfahren mit additiver Fertigung.....	62

2.4	Zusammenfassung des Stands der Forschung .....	66
3	Zielstellung .....	69
4	Versuchsdurchführung .....	73
4.1	Bauteilgeometrie und Werkstoffe.....	74
4.2	Schmiedeprozess .....	77
4.3	Additive Fertigungsprozesse .....	80
4.3.1	Laserpulverauftragschweißen .....	80
4.3.2	Lichtbogenauftragschweißen .....	84
4.4	Mechanisch-technologische Prüfverfahren .....	87
4.4.1	Metallografie.....	89
4.4.2	Porosität .....	90
4.4.3	Härtmessung.....	90
4.4.4	Zugfestigkeit .....	91
4.5	Aufbau der Schmiedesimulation .....	93
4.6	Versuchsdurchführung des partiellen Schmiedens.....	95
4.7	Additive Ergänzung der Vorform.....	96
4.8	Darstellung der Steifigkeitssimulation .....	98
4.9	Bewertung der Prozesskombination .....	99
5	Ergebnisse Prozesskombination .....	101
5.1	Prozesskombination Schmieden + LPA EN AC-44200.....	104
5.1.1	Porosität .....	106
5.1.2	Metallografie.....	108
5.1.3	Härtmessung.....	111
5.1.4	Festigkeit.....	115
5.1.5	Wärmebehandlungen .....	117

5.1.6	Fazit Prozesskombination Schmieden + LPA EN AC-44200 .....	118
5.2	Prozesskombination Schmieden + WAAM ER 4047 .....	118
5.2.1	Porosität .....	120
5.2.2	Metallografie .....	121
5.2.3	Härtemessung .....	123
5.2.4	Festigkeit .....	126
5.2.5	Wärmebehandlungen .....	127
5.2.6	Fazit Prozesskombination Schmieden + WAAM ER 4047 .....	129
5.3	Prozesskombination Schmieden + WAAM EN AW-6016 .....	130
5.3.1	Porosität .....	131
5.3.2	Metallografie .....	132
5.3.3	Härtemessung .....	133
5.3.4	Festigkeit .....	135
5.3.5	Wärmebehandlungen .....	136
5.3.6	Fazit Prozesskombination Schmieden + WAAM EN AW-6016 .....	137
5.4	Ergebnisse der Untersuchungen ER 5087 .....	138
6	Ergebnisse Demonstrationsprozesskette .....	141
6.1	Einflussfaktoren für das partielle Schmieden .....	141
6.2	Ergebnisse partielle Schmiedesimulation .....	142
6.3	Auslegung der Werkzeuge .....	148
6.4	Partielles Schmieden des Grundkörpers .....	149
6.5	AM-Auftrag auf den Grundkörper .....	153
6.6	Steifigkeitssimulation .....	156
7	Auswertung .....	159
7.1	Darstellung der Verbesserung .....	159

## Inhaltsverzeichnis

---

7.1.1	Ressourceneffizienz .....	159
7.1.2	Energieeffizienz .....	161
7.1.3	Wirtschaftlichkeit.....	165
7.2	Ableitung von Richtlinien/Strategien .....	166
7.2.1	Partielles Schmieden.....	167
7.2.2	Additive Fertigung LPA-Verfahren.....	168
7.2.3	Additive Fertigung WAAM-Verfahren .....	169
7.3	Diskussion der Ergebnisse.....	170
8	Zusammenfassung .....	179
9	Dissertationsbezogene Veröffentlichungen.....	181
10	Literaturverzeichnis .....	183