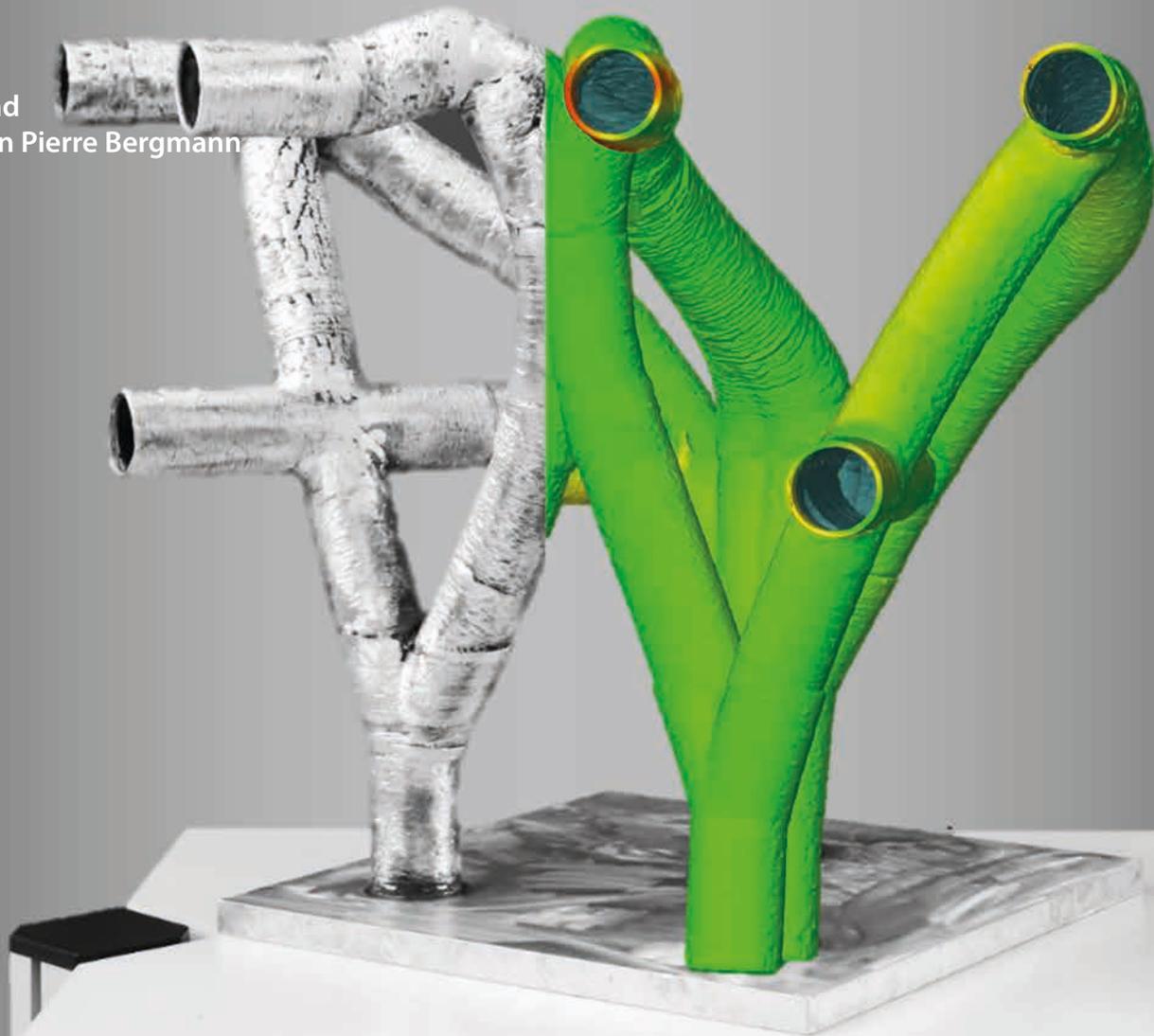


BBSR-
Online-Publikation
72/2024

Additiver Aluminiumleichtbau für das Bauwesen

von

Kiril Schmidt
Dr.-Ing. Jörg Hildebrand
Prof. Dr.-Ing. habil. Jean Pierre Bergmann



Additiver Aluminiumleichtbau für das Bauwesen

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-20.35

Projektlaufzeit: 05.2021 bis 04.2023

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Dr.-Ing. Michael Brüggemann, Brüggemann Kisseler Ingenieure
im Auftrag des BBSR, Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
zb@bbr.bund.de

Autoren

Technische Universität Ilmenau
Fakultät Maschinenbau, Fachgebiet Fertigungstechnik
Prof. Dr.-Ing. habil. Jean-Pierre Bergmann
jeanpierre.bergmann@tu-ilmenau.de

Kiril Schmidt, M. Sc.
kiril.schmidt@tu-ilmenau.de

Dr.-Ing. Jörg Hildebrand
joerg.hildebrand@tu-ilmenau.de

Redaktion

Technische Universität Ilmenau
Fakultät Maschinenbau, Fachgebiet Fertigungstechnik
Kiril Schmidt

Stand

Juni 2023

Gestaltung

Technische Universität Ilmenau
Fakultät Maschinenbau, Fachgebiet Fertigungstechnik
Kiril Schmidt

Bildnachweis

Titelbild: Kiril Schmidt

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Schmidt, Kiril; Hildebrand, Jörg; Bergmann, Jean Pierre, 2024: Additiver Aluminiumleichtbau für das Bauwesen. BBSR-Online-Publikation 72/2024, Bonn.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	7
Abstract	8
Einleitung und Motivation	9
Problemstellung	10
Zielstellung	11
Projektaufbau	12
Methodischer Ansatz	12
Projektteam und Organisation, Kooperationspartner	12
Arbeitspakete und Meilensteine	12
Ziel- und Abbruchkriterien	14
Anwendungsgebiete Aluminiumbauteile	15
Traversenvarianten	15
Anforderungsprofil und Gestaltung	15
Numerische Simulation des Dreigurtträger Knotens	17
Material- und Prozessauswahl	18
Werkstoffe	18
Relevante Aluminiumlegierungen im Bauwesen	18
Grundwerkstoff	19
Schweißzusatzwerkstoff	19
Schweißverfahren	20
Metallschutzgasschweißen	20
arArc-Prozess	20
Schweißen von Aluminium mittels arArc	22
Charakterisierung der Zusatzwerkstoffe	24
Allgemeines Vorgehen	24
Versuchsaufbau	24
Methoden der Prozessbewertung	25
Schweißspannung und Schweißstrom	25
Metallografische Analyse	26
Hochgeschwindigkeitskinematographie	26
Bahnplanung und Bauteilslicing	26
Schichthöhenmessung	26
Messung der Zwischenlagentemperatur T_{zw}	27
Vermessung der Endkontur	27
Quasi-statische Zugversuche	28
Härtemessung	28
Versuchsstrategie	29
Versuchsreihe 1	29
Versuchsreihe 2	30
Versuchsreihe 3	30
Untersuchungen zu EN AW 5183	31

Versuchsparameter und Durchführung	31
Auswertung	32
Wandstrukturen	37
Zylindrische Strukturen	40
Untersuchungen zu EN AW 6063	40
Versuchsparameter und Durchführung	41
Auswertung	41
Wandstrukturen	44
Zylindrische Strukturen	48
Vergleich der EN AW 5183 und EN AW 6063	49
Endkontur	50
Abkühlverhalten und Prozesszeiten	50
Mechanisch - technologische Eigenschaften	52
Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Versuchsreihen	53
Simulationsmodelle	55
Werkzeuge zur numerischen Simulation	55
Ansys Workbench	55
Simufact Welding	55
Geometriemodell	55
Mechanische Untersuchung	56
Modellierung Referenzzustand	57
Ableiten der Beanspruchungen auf Dreigurträger Knoten	57
Fazit	58
Optimierung unter Aspekten der Bionik	58
Topologieoptimierung	58
Formoptimierung	59
Fazit	63
Herstellung additive gefertigter Traversenelemente mittels Lichtbogentechnik	65
Prozessparameter und Slicing	65
Thermische Untersuchung	66
Materialmodelle	66
Auswertung	67
Bewertung	69
Demonstrator	71
Aufbau	71
Validierung und Optimierung	71
Auswertung und Bewertung	72
Bewertung der Wirtschaftlichkeit	73
Ökobilanzierung	75
Planungsgrundlagen	77
Entwicklung und Spezifikation weiterer Anwendungsfelder	79
Parameteranalyse	79
Untersuchung zur Variation des Materials	79
Weitere Anwendungsmöglichkeiten	80
Zusammenfassung und Ausblick	81
Ergebnispräsentationen	82
Abschluss- und Projektarbeiten	82

Mitwirkende	84
Kurzbiographien	85
Literaturverzeichnis	86
Abbildungsverzeichnis	89
Tabellenverzeichnis	92
Anlagen	93

Kurzfassung

Die Erzeugung moderner Bauwerke erfordert aufgrund der komplexer werdenden und kreativeren Baustruktur, eine erhöhte Formfreiheit und Flexibilität. Im Hinblick auf die Ressourcenknappheit besteht gleichzeitig der Wunsch, Konstruktionen materialsparend und kostengünstig herzustellen. Der konstruktive Leichtbau bietet an dieser Stelle eine beanspruchungsoptimierte, bautechnische Lösung in Anlehnung an die Natur (Bionik) an. Um das Potential der Leichtbautechnologie größtmöglich auszunutzen und individuelle Aluminiumkonstruktionen mit erhöhten Freiheitsgraden erzeugen zu können, ist die Einbindung additiver Fertigungsverfahren erforderlich. Das Directed Energy Deposition Arc (DED-Arc) ist ein additiver, drahtbasierter Lichtbogen-schweißprozess und zeichnet sich durch die Fertigung großvolumiger, tragender Strukturen mit Aufbauraten ≥ 1 kg/h (Aluminiumlegierungen) aus.

Das Forschungsvorhaben befasst sich mit der additiven Herstellung von topologieoptimierten Verbindungselementen aus den Aluminiumlegierungen EN AW 5183 und EN AW 6063 mittels DED-Arc, deren reproduzierbaren, geometrischen und mechanisch-technologischen Eigenschaften. Neben der Analyse der eingebrachten Streckenenergie durch die Prozessleistung, erfolgt eine in situ Temperaturmessung mittels Thermo-elemente vom Typ C. Anhand von 3D-Scans, metallografischen Untersuchungen, Härtemessungen und Zugversuchen werden die resultierenden Bauteileigenschaften analysiert und bewertet. Die Ergebnisse werden anschließend in eine verfahrensspezifische Lösung zur Herstellung eines Bauteils aus dem konstruktiven Aluminiumbau überführt. Für die Evaluation, der durch die additive Fertigung erreichten mechanisch-technologischen Eigenschaften, werden die zulässigen Werte aus dem, im Bauwesen anerkanntem, Eurocode 9 herangezogen. Darüber hinaus wird die Topologieoptimierung als Methode zur Erzeugung einer materialsparenden, festigkeits- und steifigkeitsangepassten Struktur genutzt. Hierbei gilt es einen AluTruss - Knoten zu optimieren und das Leichtbaupotential numerisch zu demonstrieren. Abschließend soll, basierend auf den Randbedingungen des DED-Arc, die Herstellbarkeit des topologieoptimierten AluTruss - Knotens mittels 5-Achsbearbeitung und einer entsprechenden Bahnplanung dargestellt werden.

Es konnte gezeigt werden, dass mit der EN AW 5183 Aluminiumlegierung, unabhängig von der Temperaturführung, isotrope mechanisch - technologische Eigenschaften oberhalb der im Eurocode 9 zulässigen Werte erzeugt werden können. Dabei konnten dünnwandige Strukturen mit einer Auftragsrate von ca. 1,2 kg/h erzeugt werden. Mit der EN AW 6063 sind ebenfalls isotrope Eigenschaften möglich, welche allerdings abhängig von der Zwischenlagentemperatur nahe den zulässigen Grenzwerten liegen. Für die numerische Simulation wurde ein Lastfall für ein AluTruss - Traversensystem angesetzt und dessen Knoten topologieoptimiert. Die topologieoptimierte Knotenstruktur zeigt, im Vergleich zum käuflich erwerblichem AluTruss - Knoten eine Massereduktion von ca. 38,8 %. Dabei ist gleichzeitig eine Erhöhung der Steifigkeit nachgewiesen worden, sodass die Verformung des Knotens um ca. 86,8 % reduziert werden konnte. Im Umkehrschluss kann daraus geschlossen werden, dass das Gesamtsystem um eine 143 % höhere, zulässige Last beansprucht werden könnte. Die gewonnenen Erkenntnisse des Vorhabens fließen abschließend in die additive Herstellung eines Demonstrators ein.

Schlagworteadditive Fertigung, DED-Arc, Aluminiumlegierung, Topologieoptimierung

Abstract

The manufacturing of modern structures requires increased freedom of design and flexibility due to more complex and creative building structures. With regard to the scarcity of resources, there is also a desire to produce materials-saving and cost-effective products. At this point, lightweight construction offers a stress-optimized, structural engineering solution based on nature (bionics). In order to fully exploit the potential of lightweight construction technology and to be able to create individual aluminum structures with increased degrees of freedom, the integration of additive manufacturing processes is essential. The Directed Energy Deposition Arc (DED-Arc) is an additive, wire-based arc welding process and is characterized by the production of large-volume, load-bearing structures with build-up rates ≥ 1 kg/h (aluminum alloys).

The research project deals with the additive manufacturing of topology-optimized fasteners from the aluminum alloys EN AW 5183 and EN AW 6063 by using DED-Arc, their reproducible, geometrical and mechanical-technological properties. In addition to the analysis of the energy input per unit length by means of the process power, an in situ temperature measurement is carried out by using type C thermocouples. The resulting properties of the components are analyzed and evaluated by means of 3D scans, metallographic examinations, hardness measurements and tensile tests. The results will then be transferred into a process-specific solution for the production of a component made of structural aluminum. For the evaluation of the mechanical-technological properties achieved by additive manufacturing, the permissible values from Eurocode 9, which is widely accepted in the construction industry, are used. In addition, topology optimization is used as a method for generating a material-saving, strength- and stiffness-adapted structure. The aim is to optimize an AluTruss corner and to demonstrate the lightweight potential numerically. Finally, based on the boundary conditions of the DED-Arc, the manufacturability of the topology-optimized aluminum truss corner is to be demonstrated by means of 5-axis machining and corresponding path planning.

It was shown that isotropic mechanical-technological properties above the permissible values in Eurocode 9 can be produced with the EN AW 5183 aluminum alloy, irrespective of the temperature control. Thin-walled structures with an deposition rate of approx. 1.2 kg/h were produced. With EN AW 6063, isotropic properties are also possible, which, however, are close to the permissible limits depending on the interpass temperature. For the numerical simulation, a load case for an AluTruss truss system was applied and its corners topology optimized. The topology-optimized corner structure shows a mass reduction of approx. 38.8 % compared to the commercially available AluTruss corner. At the same time, an increase in stiffness has been demonstrated, so that the deformation of the corner could be reduced by approx. 86.8%. In reverse, it can be concluded that the overall system could be used to carry a 143% higher permissible load. The findings of the project were then used in the additive manufacturing of a prototype.

key words: additive manufacturing, DED-Arc, aluminium alloy, topology optimization

Einleitung und Motivation

In diesem Vorhaben wird eine Technologie für die additive Fertigung von leichten und steifigkeitsangepassten, dreidimensionalen Verbindungselementen für Aluminiumprofile und Fassadenkopplungselementen, basierend auf der Lichtbogentechnik adressiert. Die additive Fertigung mittels des Metallschutzgas - Schweißprozesses bietet grundsätzlich die Möglichkeit einer schnelleren und kostengünstigeren Fertigung, im Vergleich zum Laserauftragschweißen oder Laserstrahlschmelzen im Pulverbett. Zum Einsatz von Metallschutzgasschweißverfahren im Bereich der additiven Fertigung im Bauwesen liegen keine grundsätzlichen Erkenntnisse vor, welche das Prozessverhalten und die erzielbaren mechanisch-technologischen Eigenschaften, die Endkonturnähe unter Verwendung von Massivdraht zur Herstellung dreidimensionaler Verbindungselemente und Fassadenkopplungselemente aus Aluminiumlegierungen, betrachten. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollen dazu Grundlagenuntersuchungen bezüglich unterschiedlicher Aluminiumlegierungen, hinsichtlich der Relation der Prozessparameter, z. B. Streckenenergie, Schweißfolge, mit den resultierenden mechanisch-technologischen Eigenschaften experimentell untersucht werden. Die Möglichkeit der robotergesteuerten Fertigung ermöglicht eine hohe geometrische Präzision, Formenvielfalt und durch Anwendung der Topologieoptimierung eine effiziente Materialausnutzung und eine Erhöhung der Steifigkeit. Die Knotenpunkte werden sowohl numerisch als auch experimentell untersucht, wobei aufgrund des räumlichen Aufbaus und Verformungsverhaltens ein zerstörungsfreies, optisches Messverfahren zum Einsatz kommt.

Tragstrukturen aus Aluminium nehmen in der Realisierung einer ikonischen Architektur eine zentrale Rolle ein. Fassadenkonstruktionen und Profilelemente aus Aluminium finden häufig Anwendung im Bau von Freiformfassaden. Diese benötigen, flexibel herstellbare Verbindungselemente für Aluminiumprofile und Fassadenkopplungselemente. Dabei können mit Hilfe einer Topologieoptimierung in Anlehnung an die Natur (Bionik) materialsparende, festigkeits- und steifigkeitsangepasste Verbindungselemente und Fassadenkopplungselemente hergestellt werden, um die einwirkenden Lasten besser aufnehmen und auf die Unterkonstruktion ableiten zu können. Die Motivation leichter Verbindungselemente geht in der Regel mit dem Wunsch einer hohen Steifigkeit einher, um große Verformungen der Gesamtstruktur zu verhindern. Die dafür benötigte Herstellungstechnologie muss es ermöglichen auch großvolumige Strukturen (> 500 x 500 x 500 mm) herstellen zu können. Im Weiteren sollte dafür eine günstige Anlagentechnik zur Verfügung stehen. In diesem Forschungsvorhaben soll eine lichtbogenbasierte Fertigungstechnologie für die Herstellung topologieoptimierter Verbindungselemente entwickelt werden. Es werden Lösungen zur Übertragung auf den Maßstab des Bauwesens gesucht, um den 3D-Druck mittels drahtbasierter, additiver Lichtbogentechnik für die Anforderungen des Bauwesens zu entwickeln. Es werden unterschiedliche Aluminiumlegierungen hinsichtlich ihrer mechanisch-technologischen Eigenschaften, ihrer Verarbeitbarkeit und der Eignung für die additive Fertigung im Bauwesen untersucht. Die Integration zusätzlicher Funktionen in zukünftige Konstruktionen wird ohne höhere Konstruktionsgewichten bzw. Transportabmessungen möglich.

Problemstellung

Bislang wird die additive Herstellung komplexer 3D-Strukturen aus metallischen Werkstoffen vordergründig mit laserbasierten Formgebungsverfahren, beispielsweise Laserstrahlschmelzen im Pulverbett oder Laserauftragsschweißen, für kleinvolumige und hochkomplexe Bauteilgeometrien eingesetzt. Das Laserstrahlschmelzen im Pulverbett hat aufgrund der erzielbaren Qualitäten nahe des Serienwerkstoffs in der Industrie eine große Bedeutung für den Prototypen- und Werkzeugbau, welches sich jedoch derzeit auf die Herstellung von kleineren Baugruppen mit typischen Bauräumen im Bereich von 280 x 280 x 300 mm und geringen Auftragsraten $\leq 0,5$ kg/h beschränkt [ABE14],[GIE13],[MUD07]. Großvolumige Bauteile größer 500 x 500 x 500 mm sind nur bedingt realisierbar. Weiter ist die Handhabung der pulverförmigen Zusatzwerkstoffe und dessen Entsorgung vergleichsweise aufwändig und mit enormen Sicherheitsvorkehrungen verbunden.

Das drahtbasierte Directed Energy Deposition – Arc (DED-Arc), auch bekannt als Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), zeichnet sich durch eine hohe Auftragsrate, eine hohe Materialeffizienz und verhältnismäßig geringe Kosten aus. Zudem bietet DED-Arc die Möglichkeit, komplexe Geometrien zu erzeugen, welche die Herstellung neuartiger, leichter Strukturen aus einer Legierung mit einer geringen Dichte zulässt. Daher ist Aluminium vielseitig einsetzbar. Die Anwendung ist besonders für die Herstellung großer Leichtbauteile relevant [BAI17]. Untersuchungen der Universität Cranfield haben gezeigt, dass das WAAM-Verfahren für die Herstellung von großen Aluminiumteilen sehr gut geeignet ist. Insbesondere Aluminiumlegierungen mit einer hohen Festigkeit haben in der Luft- und Raumfahrt sowie im Verkehrswesen eine große Bedeutung [STA96].

Nachteilig jedoch ist der, durch den Lichtbogen, wiederkehrende, hohe Wärmeeintrag bei der additiven Fertigung. Insbesondere bei der Herstellung von Aluminiumstrukturen gilt dieser als große Herausforderung. Das DED-Arc von Aluminiumlegierungen ist dabei besonders durch Defekte wie Porosität und Erstarrungsrisse gekennzeichnet [GU14], [WIL15]. Die Porosität stellt allerdings das Hauptproblem dar und kann die mechanischen Eigenschaften von Aluminiumstrukturen, wie die Bauteilfestigkeit, stark einschränken [CON15], [GU16]. Im Gegensatz zum Einlagenschweißen wird bei der additiven Fertigung das abgeschiedene Metall in mehreren Schichten aufeinander aufgebaut. Der Wärmeeintrag einer späteren Schicht wirkt für das zuvor abgeschiedene Material wie eine Niedertemperatur-Wärmebehandlung, wodurch besonders bei aushärtbaren Aluminiumlegierungen das Porenwachstum beeinflusst wird [GU16].

Die Porosität, die Ausbildung der Mikrostruktur, die mechanischen Eigenschaften sowie die Endkontur hängen bei der additiven Fertigung von Aluminiumwerkstoffen maßgeblich von der Wahl des Lichtbogenschweißverfahrens, den Prozessparametern, wie z. B. der Schweißgeschwindigkeit, und dem sich daraus ergebenden Wärmeeintrag ab [GU14], [CON15], [CON17], [FAN18], [ZHA18]. Die Porosität wird zudem von anderen Faktoren wie der Drahtqualität und Legierungszusammensetzung [GU14], [RYA18] sowie der Zwischenlagentemperatur beeinträchtigt [GEN16] und ist abhängig von der sich ausbildenden Mikrostruktur [CON15], [CON16].

Zielstellung

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, additiv gefertigte und numerisch optimierte Verbindungselemente und Fassadenkopplungen mit reproduzierbaren geometrischen mechanisch-technologischen Eigenschaften herzustellen. Dem verfolgten Ansatz liegt zu Grunde, dass durch eine angepasste Temperaturführung des Schweißprozesses, Unregelmäßigkeiten (z.B. Poren) entgegengewirkt werden kann und damit die Schweißraupenqualität verbessert werden kann. Darüber hinaus, gilt es massive Profilknoten mit Hilfe der Topologieoptimierung derart zu modifizieren, dass durch eine gezielte Umverteilung des Volumens, die Lasten von Aluminiumprofilkonstruktionen und Aluminiumfassaden verbessert aufgenommen werden können. Gelingt es, numerisch simulierte, topologieoptimierte Strukturen für die additive Fertigung reproduzierbar herzustellen, liegt die Grundlage vor, überdimensionierte Strukturen im Bauwesen durch eine gezielte Leichtbauweise zu kompensieren und einen Beitrag sowohl zum Reifegrad des Directed Energy Deposition-Arc Verfahrens, als auch zur Ressourcenschonung beizutragen.

Projektaufbau

Methodischer Ansatz

Die Untersuchungen erfolgen sowohl an numerischen, als auch an realen Modellen. Anhand der experimentellen Betrachtung werden Empfehlungen bezüglich der Materialspezifikationen, des Lichtbogenprozesses und der grundlegenden Parameter für die drahtbasierte additive Fertigung von Fassadenkopplungs- und Aluminiumverbindungselementen mittels Lichtbogentechnologie entwickelt. Die Empfehlungen werden im Rahmen der Planung und Auslegung genutzt und iterativ geprüft und verbessert. Die experimentellen Untersuchungen werden durch die Aufzeichnung der Strom-Spannungswerte, des Temperaturverlaufes und mittels Hochgeschwindigkeitskinematografie ausgewertet. Begleitend zu den experimentellen Untersuchungen unterschiedlicher Aluminiumlegierungen werden numerische, parametrische Modelle verwendet, um eine bestmögliche Gestaltung der Verbindungselemente zu erhalten und deren Belastbarkeit bestimmen zu können. Die Verifikation und Validierung der numerisch ermittelten Ergebnisse erfolgt über begleitende experimentelle Belastungstests an räumlichen Strukturen.

Projektteam und Organisation, Kooperationspartner

Das Forschungsvorhaben hat eine Laufzeit von 24 Monaten und wurde von folgender Forschungsstelle bearbeitet:

Forschungsstelle (IFt):

- Technische Universität Ilmenau,
Fakultät für Maschinenbau,
Fachgebiet Fertigungstechnik,
Fachgebietsleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Jean Pierre Bergmann,
Gustav-Kirchhoff-Platz 2, 98693 Ilmenau

Das Projekt wurde wissenschaftlich bearbeitet von:

- M.Sc. Kiril Schmidt (IFt),
- Dr.-Ing. Jörg Hildebrand (IFt),
- Prof. Dr.-Ing. habil. Jean-Pierre Bergmann (IFt)

Das Projekt wurde von folgenden Projektpartnern finanziell unterstützt:

- EWM GmbH
- Messer SE & Co. KGaA
- RSB Rudolstädter Systembau GmbH
- Westfälische Drahtindustrie GmbH

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) gefördert.

Arbeitspakete und Meilensteine

Die Arbeitspakete gliedern sich wie folgt:

Arbeitspaket / Quartal	AP	MM	May 21	Jun 21	Jul 21	Aug 21	Sep 21	Oct 21	Nov 21	Dec 21	Jan 22	Feb 22	Mar 22	Apr 22	May 22	Jun 22	Jul 22	Aug 22	Sep 22	Oct 22	Nov 22	Dec 22	Jan 23	Feb 23	Mar 23	Apr 23
Projektmanagement	AP 0	2																								
Anforderungen an Aluminiumbauteile im Bauwesen	AP 1	2																								
Werkstoffauswahl	AP 2	4																								
numerische Simulation und bionische Optimierung	AP 3	3																								
Herstellung der additiv gefertigten Verbindungs- und Fassadenkopplungselemente mittels Lichtbogentechnik	AP 4	3																								
Experimentelle Analysen	AP 5	4																								
Herstellung von Demonstratoren	AP 6	3																								
Entwicklung und Spezifikation weiterer Anwendungsfelder	AP 7	2																								
Gesamtsumme MM		24																								

Abbildung 1: Übersicht der im Forschungsvorhaben definierten Arbeitspakete

Die Interdisziplinäre Ausrichtung des Forschungsvorhabens basiert auf einer engen Vernetzung zwischen den prozesstechnischen, werkstofftechnischen und numerischen Untersuchungen. Dabei erfolgen die Untersuchungen an Werkstoffen, welche sowohl in der Schweißtechnik als Zusatzmaterial vorhanden und im Bauwesen, durch den Eurocode 9, zulässig sind. Zu Beginn gilt es, die Anforderungen des Bauwesens auf Aluminiumkonstruktionen auszuarbeiten und auf die Randbedingungen der additiven Fertigung mittels Lichtbogentechnologie abzuleiten. Dabei soll ebenfalls ein konkretes Bauteil ausgesucht werden und dessen Beanspruchung und Gestaltung deklariert werden. Die Erstellung eines Anforderungsprofils und eine Analyse der Wirtschaftlichkeit schließt das Arbeitspaket (AP 1) ab. Im zweiten Arbeitspaket (AP 2) werden konkret Aluminiumlegierungen ausgewählt und in Abhängigkeit des Schweißverfahrens an vereinfachten Wandstrukturen systematisch charakterisiert. Anhand von zerstörungsfreien und zerstörenden Analysen werden die resultierenden mechanisch - technologischen Eigenschaften bewertet. Dabei steht die Korrelation zwischen Prozesseinstellungen und resultierenden Bauteileigenschaften im Fokus, sodass für die folgenden Arbeitspakete reproduzierbare Strukturen erzeugt werden können. Parallel dazu wird im dritten Arbeitspaket (AP 3) das ausgewählte Bauteil, unter Einbezug des erstellten Anforderungsprofils, einer Topologieoptimierung unterzogen. Hierzu wird zunächst ein Materialmodell erstellt und mehreren, iterativen Prozessen die Material- und Steifigkeitsoptimierung numerisch berechnet. Am Ende dieses Arbeitspaketes liegt ein fertiges Geometriemodell vor, welches definierte Ziele (Massenreduktion / erhöhte Steifigkeit) nachweist und additiv gefertigt werden kann. Erste Strukturen des topologieoptimierten Geometriemodells sollen im folgenden Arbeitspaket (AP 4) erprobt werden. Hierbei erfolgt die Untersuchung der Anbindungseigenschaften von Bahnkreuzungspunkten sowie der maximal erreichbaren Überhangwinkel, sodass Prozessparameter hinsichtlich der Machbarkeit angepasst werden. Die erzeugten Strukturen sollen daraufhin im fünften Arbeitspaket (AP 5) ebenfalls zerstörungsfrei und zerstörend untersucht werden, sodass Handlungsempfehlungen für die additive Herstellung von Aluminiumbauteilen abgeleitet werden können. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Herstellung eines finalen Demonstrators (AP 6). Abschließend findet eine Gegenüberstellung der in (AP 1) definierten Kriterien und der erzeugten Eigenschaften des Demonstrators statt. Weitere Spezifikationen und die Übertragung auf weitere Anwendungsfelder gilt es, in Arbeitspaket 7 (AP 7) zu definieren. Übergeordnet über den gesamten Projektzeitraum, gilt es das Projekt zu koordinieren und experimentelle und numerische Umsetzungen zu planen und Erkenntnisse in Form von Transfermaßnahmen wie Workshops, Berichten, Lehre zu präsentieren (AP 0).

Die Meilensteine dieses Forschungsvorhabens wurden wie folgt deklariert:

- Die Anforderungen an die Bauteile wurden festgelegt und bewertet (nach 3 Monaten)
- Eine erste Geometrie- und Materialauswahl wurde getroffen und in einem Workshop abgestimmt (nach 10 Monaten)

- Die experimentellen Untersuchungen sind abgeschlossen, der Demonstrator wurde umgesetzt und beprobt (nach 21 Monaten)

Ziel- und Abbruchkriterien

Definition und Spezifizierung der notwendigen Bauteileigenschaften (AP 2)

- Mechanische Eigenschaften der verfügbaren Aluminiumschweißdrähte sind größer oder gleich der notwendigen Bauteileigenschaften

Herstellbare Aluminiumknoten durch Topologieoptimierung (AP 3)

- Mittels DED-Arc herstellbare Geometrien können mittels Topologieoptimierung erzeugt werden und führen zu einer Massereduktion oder zu einer Steifigkeitserhöhung

Demonstratorbauteil (AP 4 und AP 5)

- Die Herstellbarkeit eines großvolumigen Bauteils (Trussverbindungselement) unter Verwendung eines Parametersatzes, welches zu den notwendigen mechanisch-technologischen Eigenschaften führt, kann ohne Prozessabbruch gewährleistet werden

Erfolgsindikatoren

- Mechanisch – technologische Eigenschaften sind gleich oder besser als bei konventionell eingesetzten Legierungen
- Das Verbindungselement ist additiv herstellbar
- Bei gleicher Steifigkeit ist eine Massereduktion von 10 % bis 20 % möglich
- Bei gleichbleibender Masse ist eine Erhöhung der Steifigkeit um 10 % bis 20 % möglich
- Lebenszyklusanalyse zeigt eine 10%ige Einsparung von CO₂ in der Ökobilanz für Verbindungselemente aus Aluminium für die Einzelteil- und Kleinstserienfertigung

Anwendungsgebiete Aluminiumbauteile

Traversenvarianten

Als Traverse wird ein Fachwerkrahmen verstanden, welches aus Holz, Stahl oder Aluminium besteht. Diese gehören zu den Fachwerkträgern und werden heutzutage vorwiegend als modulare Bauelemente zur Herstellung temporärer Tragkonstruktionen für licht- und tontechnische Geräte in der Veranstaltungstechnik verstanden [PRO18]. Die Beschreibung von Fachwerkträgern erfordert einige Fachbegriffe, diese sind in Abbildung 2 zu sehen. Die Stäbe im oberen Fachwerkträger teil werden als „Obergurt“ bezeichnet und werden meistens auf Druck belastet. Dahingegen befindet sich der „Untergurt“ im unteren, meist auf Zug belasteten, Teil des Fachwerkträgers. „Fachwerkstreben“ entsprechen diagonal im Fachwerkträger angeordneten Stäben. Die Verbindungspunkte zwischen den einzelnen Streben werden als „Knoten“ bezeichnet. Die Einleitung der Kräfte in die Knotenpunkte ist eine Grundvoraussetzung um die Streben nur auf Druck oder Zug zu belasten. Traversen werden folgenden geometrischen Querschnitten zugeordnet: Zweigurtträger, Dreigurtträger oder Viergurtträger. Typische Bauformen der Gurte besitzen einen quadratischen oder rechteckigen Querschnitt. Faltbare Traversen in diversen Arten sind weniger verbreitet [Bak07].

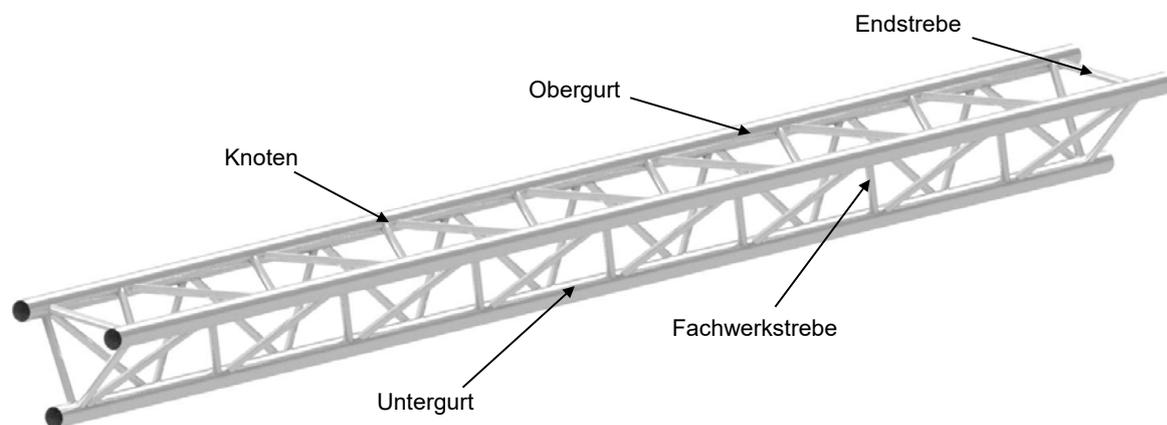


Abbildung 2: Begriffsdefinition anhand einer Dreigurtträger Traverse

Anforderungsprofil und Gestaltung

Abbildung 3 a). Um sowohl das Potential der additiven Fertigung, der Topologieoptimierung als auch der effizienten Werkstoffausnutzung darzulegen, soll ein derartiger Dreigurtträger Knoten mit einem Öffnungswinkel 60° , vergleiche Abbildung 3 b), untersucht und additiv hergestellt werden.

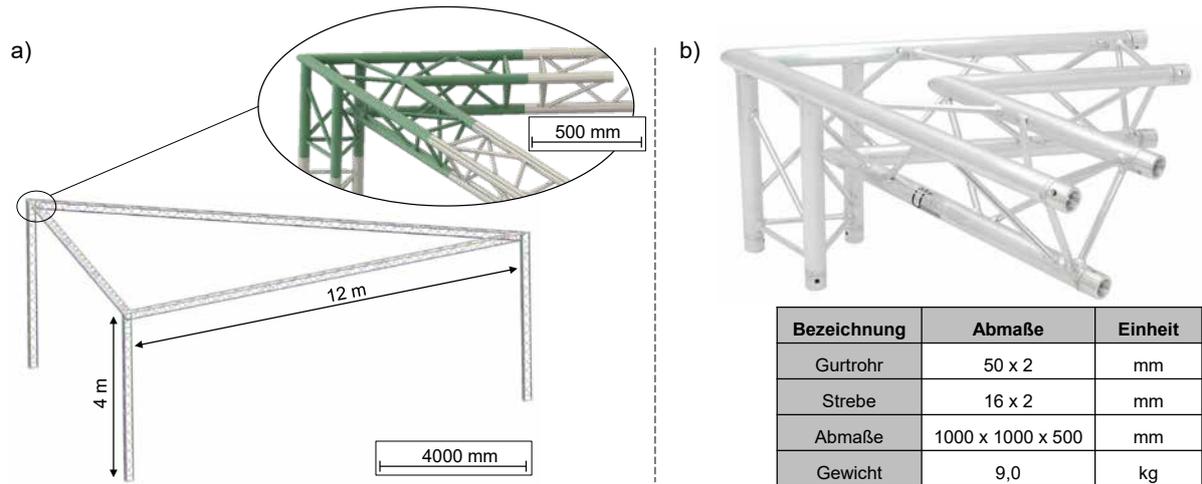


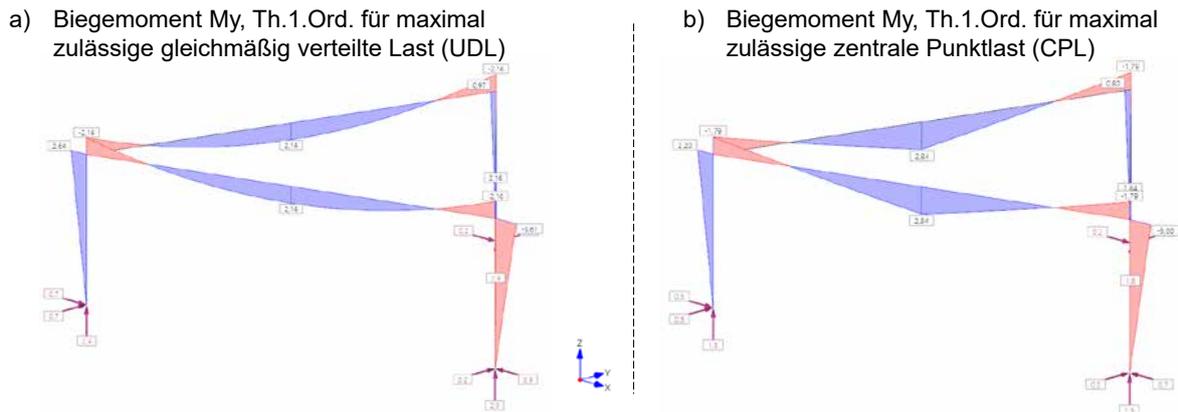
Abbildung 3: a) Festgelegtes Traversensystem mit Detailansicht des zu optimierenden Dreigurtträger Knotens (grün), b) Auf dem Markt erhältlicher Dreigurtträger Knoten mit Öffnungswinkel 60° und entsprechenden Maßen nach [MPK21]

Für eine Topologieoptimierung des Dreigurtträger Knotens muss das Traversensystem einem Lastfall unterliegen. Das Anforderungsprofil hierzu ergibt sich aus den mechanischen Ansprüchen an das Traversensystem. Dafür muss ein Standsicherheitsnachweis erbracht werden, wobei die Einwirkungen auf das Traversensystem kleiner sein müssen als die Beanspruchbarkeit der Dreigurtträger. Zur Abbildung eines Lastfalles wurden maximal zulässige Randbedingungen gewählt, welche den zulässigen Werten aus der Norm DIN EN 1991-1-1: Eurocode 9 entsprechen, siehe Tabelle 1. Betrachtet wurden zum einen gleichmäßig verteilte Lasten (UDL), zum anderen eine zentrale Einzelpunktlast (CPL), da hier die Beanspruchung des Systems am höchsten angenommen wird. Zusätzlich zu den Lasten kommt die, durch die Schwerkraft bedingte, Eigenlast hinzu. Daraus ergaben sich folgende Lastannahmen für das festgelegte Traversensystem, siehe Tabelle 2.

Span*	UDL		CPL		1/3 Point Load		1/4 Point Load		1/5 Point Load	
	kg/m	mm**	kg	mm	kg (2x)	mm	kg (3x)	mm	kg (4x)	mm
3	444	7	667	6	500	8	333	7	278	8
5	157	21	393	17	295	21	197	20	164	21
8	59	53	236	43	177	54	118	51	98	53
10	36	83	182	68	136	85	91	80	76	84
11	29	01	161	83	121	103	81	97	67	102
12	24	120	144	100	108	123	72	115	60	121

Tabelle 2: Angesetzte Lastfälle für Traversensystem mit 12m Spannweite

	Lastfall 1	Lastfall 2
Gleichmäßig verteilt (UDL)	24 kg/m = 0,24 kN/m	-
Zentrale Punktlast (CPL)	-	F = 1440 N
Eigenlast	F = 1629 N	F = 1629 N

Abbildung 4: Berechnete Biegemomente M_y für a) UDL und b) CPL

Damit die realen Verhältnisse abgebildet werden, wurden für die Auslegung des Referenzzustandes sowohl die entstehenden Momente in Belastungsrichtung, als auch die Momente und Querkräfte quer zur Belastungsrichtung berücksichtigt. Mit Hilfe von *FRILO Software* wurden die statischen Lastfälle am Traversensystem simuliert und folglich die entstehenden Momente berechnet, vergleiche Abbildung 4.

Numerische Simulation des Dreigurträger Knotens

Der Dreigurträger Knoten soll in den nächsten Arbeitspaketen zur Simulation des Last-Verformungsverhaltens, zur Optimierung unter den Aspekten der Bionik und zur Simulation des Herstellungsprozesses genutzt werden. Die statischen und dynamischen Lastfälle, sowie die Optimierung unter bionischen Aspekten in Anbetracht der Lasten wird mit dem Programm *ANSYS Workbench* realisiert. Dabei soll der Knoten als Vollmaterial abstrahiert werden, wobei unter Verwendung der vorhandenen Schnittstellen und Winkel eine vollständig neue Knotengeometrie entsteht. Dieser Ansatz stellt die grundlegende Topologieoptimierung dar. Die thermische Simulation des Schweißprozesses und somit des Herstellungsprozesses, soll mit Hilfe der *Simufact Welding Software* durchgeführt werden. Dadurch sollen Spannungen und Verzug während des Schweißens an der topologieoptimierten 3D-Knotenstruktur prognostiziert werden, sodass im Vorfeld Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können.

Material- und Prozessauswahl

Werkstoffe

Relevante Aluminiumlegierungen im Bauwesen

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Anforderungen ist die Auswahl des Materials zur Herstellung der Knotenstruktur. Aluminiumwerkstoffe, welche für die konstruktive Auslegung von Tragwerken geeignet sind, werden nach der Norm DIN EN 1999-1-1: Eurocode 9 festgelegt, vergleiche Tabelle 3. Bei der Herstellung von Hohlprofilen für den Traversenbau werden heutzutage vorwiegend AlMgSi-Legierungen (6xxx-Legierungen) verwendet. Typische Vertreter sind hier die Legierungen EN AW 6061 und EN AW 6082 [PRO18]. Die 6xxx-Legierungen sind aushärtbare Aluminiumlegierungen, welche je nach Wärmebehandlung bestimmte Festigkeitszustände erreichen können. Demgegenüber stehen die naturharten 5xxx-Legierungen, welche von Grund auf höhere Festigkeiten und Härten aufweisen. Die Festigkeitsänderung durch eine Wärmebehandlung wird dabei lediglich eine untergeordnete Rolle zugeschrieben. Für den additiven Aufbau notwendige Schweißzusatzwerkstoffe werden im Eurocode 9 nicht explizit deklariert und müssen artähnlich oder artgleich ausgewählt werden. Dabei orientiert sich der Eurocode 9 ebenfalls an der Norm DIN EN ISO 18273 [DIN10a], [DIN10b].

Tabelle 3: Auszug aus der DIN EN 1999-1-1 Eurocode 9; Aluminiumknetlegierungen für tragende Bauteile

Bezeichnung der Legierung		Produktform	Beständigkeitsklasse (siehe 4, Anhang C und Anhang D)	
Numerische Bezeichnung	Chemische Bezeichnung			
EN AW-3004	EN AW-AlMn1Mg1	SH,ST,PL	A	
EN AW-3005	EN AW-AlMn1Mg0,5	SH,ST,PL	A	
EN AW-3103	EN AW-Al Mn1	SH,ST,PL,ET,EP, ER/B	A	
EN AW-5005/5005A	EN AW-AlMg1(B)(C)	SH,ST,PL,	A	
EN AW-5049	EN AW-AlMg2Mn0,8	SH,ST,PL	A	
EN AW-5052	EN AW-Al Mg2,5	SH,ST,PL,ET ²⁾ ,EP ²⁾ ,ER/B, DT	A	
EN AW-5083	EN AW-Al Mg4,5Mn0,7	SH,ST,PL,ET ²⁾ ,EP ²⁾ ,ER/B,DT, FO	A ¹⁾	
EN AW-5454	EN AW-Al Mg3Mn	SH,ST,PL,ET ²⁾ ,EP ²⁾ ,ER/B	A	
EN AW-5754	EN AW-Al Mg3	SH,ST,PL, ET ²⁾ ,EP ²⁾ ,ER/B,DT,FO	A	
EN AW-6060	EN AW-Al MgSi	ET,EP,ER/B,DT	B	
EN AW-6061	EN AW-Al Mg1SiCu	SH, ST,PL,ET,EP,ER/B,DT	B	
EN AW-6063	EN AW-Al Mg0,7Si	ET,EP,ER/B,DT	B	
EN AW-6005A	EN AW-Al SiMg(A)	ET,EP,ER/B	B	
EN AW-6082	EN AW-Al Si1MgMn	SH,ST,PL,ET,EP,ER/B,DT,FO	B	
EN AW-6106	EN AW-AlMgSiMn	EP	B	
EN AW-7020	EN AW-Al Zn4,5Mg1	SH,ST,PL,ET,EP,ER/B,DT	C	
EN AW-8011A	EN AW-AlFeSi	SH, ST, PL	B	
Legende				
SH	Bleche (EN 485)	EP	stranggepresste Profile (EN 755)	
ST	Bänder (EN 485)	ER/B	stranggepresste Stangen (EN 755)	
PL	Platten (EN 485)	DT	gezogene Rohre (EN 754)	
ET	stranggepresste (EN 755)	Rohre	FO	Schmiedeteile (EN 586)
1) siehe Anhang C: C2.2.2(2)				
2) nur einfache, offen stranggepresste Vollquerschnitte oder dickwandige Rohre über einen Dorn (nahtlos)				

Grundwerkstoff

Um die Strukturen auftragen zu können, werden Aluminiumplatten als Substratmaterial verwendet. Die Substratplatten liegen in den Abmessungen 200 mm x 150 mm x 10 mm vor und bestehen aus EN AW 5083 bzw. EN AW 6082-T6, welche häufig im Bauwesen Anwendung finden. Die Aluminiumlegierungen entsprechen den ausgewählten Schweißzusatzdrahtwerkstoffen bzw. sind artähnlich. Die Substratplatten dienen in erster Linie zur Generierung und anschließenden Bearbeitung der Proben, sodass diese im Verlauf abgetrennt werden. Die Dicke der Platten wurde mit 10 mm gewählt, um eine gute Wärmeabfuhr aus der additiven Struktur zu gewährleisten und den Verzug durch den teilweise hohen Wärmeeintrag zu reduzieren.

Schweißzusatzwerkstoff

Schweißzusatzwerkstoffe für das Schmelzschweißen von Aluminium werden nach DIN EN ISO 18273 „Schweißzusätze - Massivdrähte und -stäbe zum Schmelzschweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen“ eingeteilt [DIN16]. Mit Hinblick auf den am meisten verwendeten Aluminiumwerkstoffen im Traversenbau und dem Hintergrund der Schweißbarkeit werden für die Bearbeitung der weiteren Arbeitspakete die Schweißzusatzwerkstoffe MA 6063-T6 und S Al 5183 ausgewählt.

Der Schweißzusatz MA-6063-T6 ist ein vergleichsweise neuer und größtenteils unerforschter Zusatzdraht, welcher für die drahtbasierte, additive Fertigung von 6xxx - Legierungen konzipiert wurde. Durch einen erhöhten Anteil an Ti5B1 - Partikeln wird die Bildung von Heißrissen unterbunden und folglich die mechanisch-technologischen Eigenschaften verbessert [Mig22]. Um einen qualitativen Vergleich zwischen aushärtbaren und naturharten Aluminiumlegierungen herzustellen, soll der in der Industrie weit verbreitete Substitutionswerkstoff S Al 5183 Schweißzusatz herangezogen werden. Zum einen besitzt diese 5xxx - Legierung eine höhere Festigkeit und ist dabei weniger anfällig für etwaige Wärmenachbehandlungen. Zum anderen bietet der Werkstoff wirtschaftliche Vorteile. Beide Schweißzusatzwerkstoffe werden mit, für die additive Fertigung, konventionellen Drahtdurchmessern von Ø 1,2 mm verwendet. Eine Gegenüberstellung der Schweißzusatzwerkstoffe und deren mechanischen Eigenschaften ist in Tabelle 4 dargestellt. Deren chemische Zusammensetzung ist in Tabelle 5 für S Al 5183 bzw. in der Tabelle 6 für MA 6063-T6 abzulesen.

Tabelle 4: Gegenüberstellung ausgewählter Aluminiumlegierungen [STA22], [MIG22]

Normbezeichnung (EN ISO 18273)	chem. Zusammensetzung	Legierungstyp	Durchmesser Massivdraht [mm]	Preis [€/kg] exkl. MwSt	Streckgrenze Re [MPa]	Zugfestigkeit Rm [MPa]	Dehnung A5 (L ₀ =5d ₀) [%]	Zwangslagegeneignung
S Al 5183	AlMg4,5Mn0,7	naturhart	Ø 1,2	9,75	130	275	18	Geeignet
MA 6063-T6	AlMgSi0,5	aushärtbar	Ø 1,2	21,5	200 - 260	250 - 280	6 - 12	Geeignet

Tabelle 5: chemische Zusammensetzung der Aluminiumlegierung S Al 5183 nach [DIN16]

Normbezeichnung (EN ISO 18273)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Be	Ti	Rest
S Al 5183	< 0,4	< 0,4	< 0,1	0,5 - 1,0	4,3 - 5,2	0,05 - 0,25	< 0,25	< 0,0003	< 0,15	< 0,05

Tabelle 6: chemische Zusammensetzung der Aluminiumlegierung MA 6063-T6 nach [DIN16]

Normbezeichnung (EN ISO 18273)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Be	Ti	B	Rest
MA 6063-T6	0,2 - 0,6	< 0,35	< 0,1	< 0,1	0,45 - 0,9	< 0,1	< 0,1	< 0,0003	0,2 - 0,3	0,04 - 0,06	< 0,05

Schweißverfahren

Metallschutzgasschweißen

Konventionelle Verfahren des Metallschutzgasschweißens werden mit Gleichstrom betrieben (DC-MSG). Dabei wird die Schweißzusatzelektrode meist positiv und das Werkstück negativ gepolt. Ein Verfahren zur Reduzierung des Energieeintrages und zur kontrollierten Tropfenablösung ist dabei der Impulslichtbogen. Während des Impulsschweißprozesses liegt ein geringer Niederstrom I_{S-Puls} an, welcher zur Vorwärmung des Drahtes dient. Zusätzlich wird der Niederstrom pulsartig von einem höheren Impulsstrom I_{Puls} überlagert. Der erhöhte Impulsstrom erhöht kurzzeitig die elektromagnetische Kraft (Lorentz-Kraft) am angeschmolzenen Zusatzdraht. Als Folge wird die Tropfenablösung verstärkt, sodass je nach Prozesseinstellung die Ablösefrequenz der Tropfen angepasst werden kann. Ein weiterer positiver Effekt des Impulslichtbogens ist die Durchmischung der Schmelze. Durch den periodischen Anstieg des Schweißstroms I_S , erhöht sich auch der auf die Schmelze wirkende Lichtbogendruck. Das Schmelzbad wird dabei kontinuierlich verformt, sodass zum einen die Homogenisierung des Gefüges, zum anderen auch die Wärmedissipation gefördert wird [WAN20], [ALD21].

Anders als beim konventionellem MSG, bei dem Gleichstrom als Energiequelle genutzt wird, wird beim AC-Metallschutzgasschweißen (AC-MSG), Wechselstrom als Energiequelle eingesetzt. Das AC-MSG unterscheidet dabei durch eine wechselnde Polarität der Elektrode. Während eines Zyklus wird die Elektrode sowohl positiv, als auch negativ gepolt. Insbesondere bei Aluminium wird die Verwendung des AC-MSG bevorzugt angewendet, da die wechselnde Polarität eine Reinigungswirkung der Werkstückoberfläche bewirkt und die Oxidschicht zerstört werden kann [SOU10], [ADA13].

Dank moderner Regelungs- und Steuerungstechnik können einzelne Eigenschaften der bekannten Schweißverfahren kombiniert und neuartige Lichtbogenprozesse entwickelt werden. So wurde es möglich, die Vorteile des konventionellen Impulslichtbogens mit dem zyklischen Polaritätswechsel beim AC-MSG zu kombinieren und das Impuls-AC-Metallschutzgasschweißen (arArc) zu ermöglichen.

arArc-Prozess

Das Metallschutzgasschweißen mit Wechselstrom bringt einige Vorteile gegenüber dem konventionellem Metallschutzgasschweißen mit Gleichstrom, mit sich. Beim arArc - Prozess wechselt während einer Wechselstromfrequenz f die Polarität der Elektroden zwischen einer Positivphase I_{pos} und einer Negativphase I_{neg} , vergleiche Abbildung 5. In der Positivphase ist die Drahtelektrode, wie auch beim DC-MSG, positiv gepolt, während das Werkstück (Substrat) negativ gepolt ist. In dieser Phase fließt der Strom vom Werkstück zur Drahtelektrode. Dadurch fließen die Elektronen in Richtung des Zusatzdrahtes, wodurch sie beim Aufprall ihre kinetische Energie in Wärmeenergie umwandeln. Folglich wird der Zusatzdraht thermisch beansprucht und schmilzt ab. Am Werkstück hingegen treffen die positiv geladenen Ionen des Schutzgases und der aufgeschmolzene Zusatzdraht (Tropfen) auf, sodass sich hier ein Schmelzbad entsteht. Wie auch beim Impulslichtbogen liegt beim Stromverlauf des arArc - Prozesses ein geringer Niederstrom I_{S-Puls} vor, welcher periodisch durch einen höheren Impulsstrom I_S überlagert wird. Gekennzeichnet ist die Positivphase durch einen stabilen, einstellbaren Lichtbogen und einem höheren Einbrand in das Substratmaterial [SOU10].

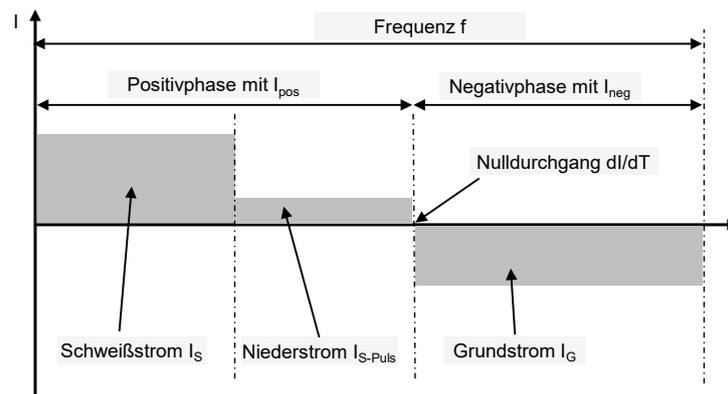


Abbildung 5: schematische Darstellung des Impulslichtbogens und dessen Phasen

Um ein schnelles Wiederezünden des Lichtbogens und um Prozessfehler zu vermeiden, muss der Nulldurchgang dl/dT in die Negativphase I_{neg} einen nahezu senkrechten Übergang aufweisen. Der Zusatzdraht ist in dieser Phase negativ und das Werkstück positiv gepolt. Der Wechsel der Polarität in einen Grundstrom I_G führt dazu, dass die thermische Beanspruchung in Richtung des Zusatzdrahtes umgelagert wird. Dadurch sind höhere Abschmelzleistungen möglich und der Einbrand in das Werkstück wird signifikant reduziert. Dies rührt daher, dass die thermische Energie bei einer negativen Polung zu 30 % auf das Schmelzbad und zu 70 % auf die Elektrode wirkt, während es bei einer positiven Polung umgekehrt ist. In der Literatur wird die Negativphase mit einem unruhigen Lichtbogen und einem Materialübergang im Globulartransfer charakterisiert [SOU10], [BRU18]. Verglichen mit den üblichen MSG-Verfahren im Bereich der additiven Fertigung, z.B. ColdArc (EWM), CMT (Fronius), sind beim acArc-Verfahren höhere Auftragsraten bei geringerer und regelbarer Wärmebringung möglich [GIE20], [ZHA18].

Ein weiterer Vorteil des arArc - Prozesses ist die, durch den periodischen Polaritätswechsel resultierende, höhere Schmelzbaddynamik, siehe Abbildung 6. Durch den Polaritätswechsel werden wirkende Kräfte umgekehrt, darunter die elektrische Feldstärke und die elektromagnetische Kraft. Folglich ändert sich der, auf das Schmelzbad wirkende, Lichtbogendruck und die Fließrichtung des Schmelzbades. Durch die plötzliche Richtungsänderung des Schmelzflusses werden die gebildeten, kolumnaren Dendriten in kleinere globulare Dendriten aufgespalten. Diese Umorientierung der Gefügestruktur bringt eine Verbesserung der mechanisch-technologischen Eigenschaften mit sich [ZHA18].

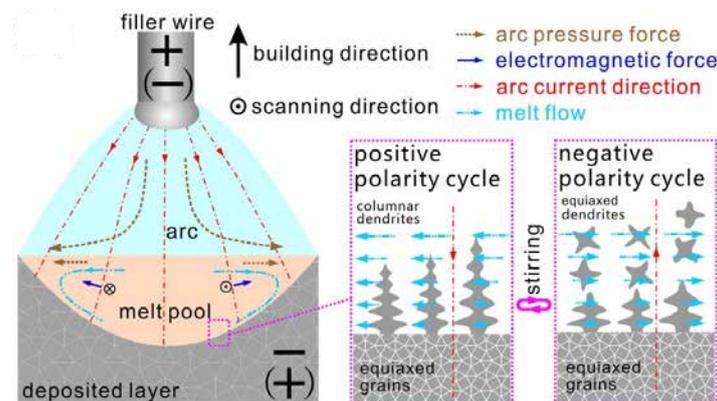


Abbildung 6: Der Effekt von wechselnder Polarität auf das Schmelzbad und den Festigungsprozess nach [ZHA18]

Ein relevanter Parameter beim arArc - Prozess ist der EN - Anteil, welcher das Stromstärkenverhältnis der positiven Phase EP und negativen Phase EN innerhalb eines Zyklus beschreibt. Der EN - Anteil wird mit der Gleichung (1) ausgedrückt. Dabei wird das Integral über den Zeitraum der Stromstärke der negativen Phase durch das Integral über die gesamte Zyklusdauer t_{zyklus} der Stromstärken beider Phasen (EN + EP) dividiert [ADA13]. Somit ergibt sich der prozentuale Anteil, den die Stromstärke in der negativen Phase im Zyklus ausmacht.

$$EN - Anteil = \frac{\int_{t_{EN0}}^{t_{EN}} EN}{\int_{t_0}^{t_{zyklus}} (EN+EP)} * 100 \quad \text{in [\%]} \quad (1)$$

Bei einem EN-Anteil von 50 % liegen beide Phasen mit einem Stromstärkeverhältnis von 1:1 an. Bei Werten unter 50 % überwiegt die positive Phase, bei Werten über 50 % überwiegt die negative Phase. Der Anteil der Phasen kann über zwei Wege beeinflusst werden. Zum einen kann die Dauer einer Phase innerhalb des Zyklus verändert werden. Zum anderen können die einzelnen Stromstärken I_{S-Puls} , I_{Puls} , I_G individuell angepasst werden. Somit können der Energieeintrag und das Auftragsverhalten individuell angepasst werden.

Schweißen von Aluminium mittels arArc

Der Einfluss der Lichtbogenmodi und der Prozessparameter auf die Nahteigenschaften von Aluminiumlegierungen, wurde in mehreren Veröffentlichungen untersucht. Aldalur et. al. verglichen den Impulslichtbogen (Pulsed-GMAW) und den energiereduzierten geregelten Kurzlichtbogen (Cold Arc) mit dem Impuls-AC-Metallschutzgasschweißprozess (arArc, hier: Pulsed-AC). Dabei wurde an der Legierung EN AW 5356 der Einfluss des Energieeintrags auf die Mikrostruktur und Porosität untersucht. Die Streckenenergien wurden über das Verhältnis des Drahtvorschubs und der Schweißgeschwindigkeit in Abbildung 7 aufgetragen. Es konnte festgestellt werden, dass der Einbrand beim Impulslichtbogen am höchsten war, während dieser beim Pulsed-AC-Prozess um 14 % und beim Cold Arc-Prozess um 20 % reduziert werden konnte [ALD21].

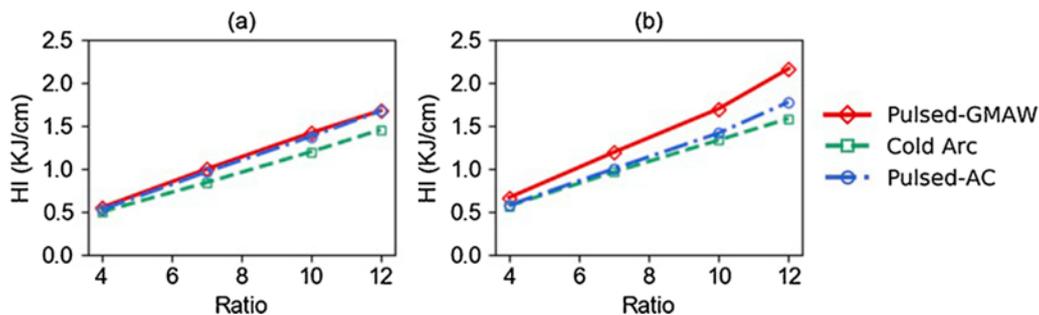


Abbildung 7: Eingetragene Streckenenergie (engl.: heat input, HI) in Abhängigkeit des Verhältnisses von Drahtvorschub und Schweißgeschwindigkeit (Ratio). Vergleich der Lichtbogenmodi: Impulslichtbogen (engl.: Pulsed-GMAW), energiereduzierter geregelter Kurzlichtbogen EWM (Cold Arc) mit dem Impuls-AC-Metallschutzgasschweißprozess (Pulsed-AC) und den Drahtvorschubgeschwindigkeiten (a) 4 m/min und (b) 8 m/min [ALD21]

Der Vorteil des Pulsed-AC zeigt sich allerdings besonders im Hinblick auf die Porosität, vergleiche Abbildung 8. Aldalur et. al. zeigten am Werkstoff EN AW 5356, dass die Porosität beim Pulsed-AC im Vergleich zum Cold-Arc und Impulslichtbogen, auf 0,13 % reduziert werden kann. Der Polaritätswechsel in die negative Phase sorgt dafür, dass die stets vorhandene Oxidschicht auf der Substratoberfläche leichter aufgebrochen werden kann. Dieser Vorgang ist allgemein auch als Reinigungseffekt bekannt. Dabei wird zum einen die Anbindung verbessert, zum anderen kann der in der Schmelze gefangene Wasserstoff besser ausgasen, sodass die Anzahl der Defekte (Poren) signifikant reduziert werden kann [ALD21].

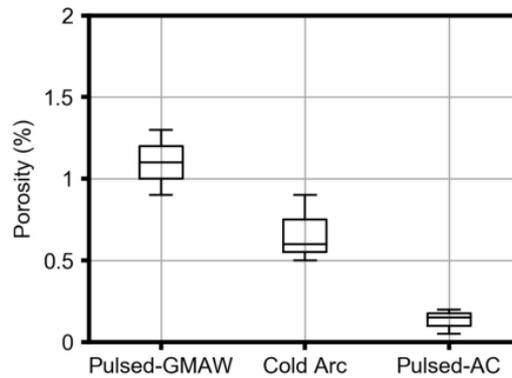


Abbildung 8: Durchschnittlicher Porenanteil für die Lichtbogenprozesse: Impulslichtbogen (Pulsed-GMAW), energiereduzierter geregelter Kurzlichtbogen EWM (Cold Arc) und Impuls-AC-Metallschutzgasschweißen, nach [ALD21]

Souza et. al. untersuchten den Einfluss des EN-Anteils auf den AC-Prozess und die resultierenden Nahteigenschaften an einem niedriglegierten Baustahl. Dabei zeigte sich, wie in vorherigen Kapiteln beschrieben, dass eine positive Polung der Drahtelektrode den Einbrand erhöht, da mehr Energie in das Werkstück eingebracht wird. Entgegen der bekannten Theorie jedoch, wurde bei einer negativen Polung eine geringere Abschmelzleistung beobachtet [SOU10]. Adamiec und Pfeifer bestätigten die Nahtausbildung an einer EN AW 5183 Aluminiumlegierung. Dabei wurde festgestellt, dass mit einer vergleichbaren Stromstärke von $I = 100$ A, ein EN-Anteil unter 50 % in einer Zunahme der Einbrandtiefe und einer Verbreiterung der Schweißraupen resultiert, vergleiche Abbildung 9. Ein EN-Anteil über 50 % hingegen, führt zu einer starken Nahtüberhöhung und einem geringeren Einbrand [ADA13].

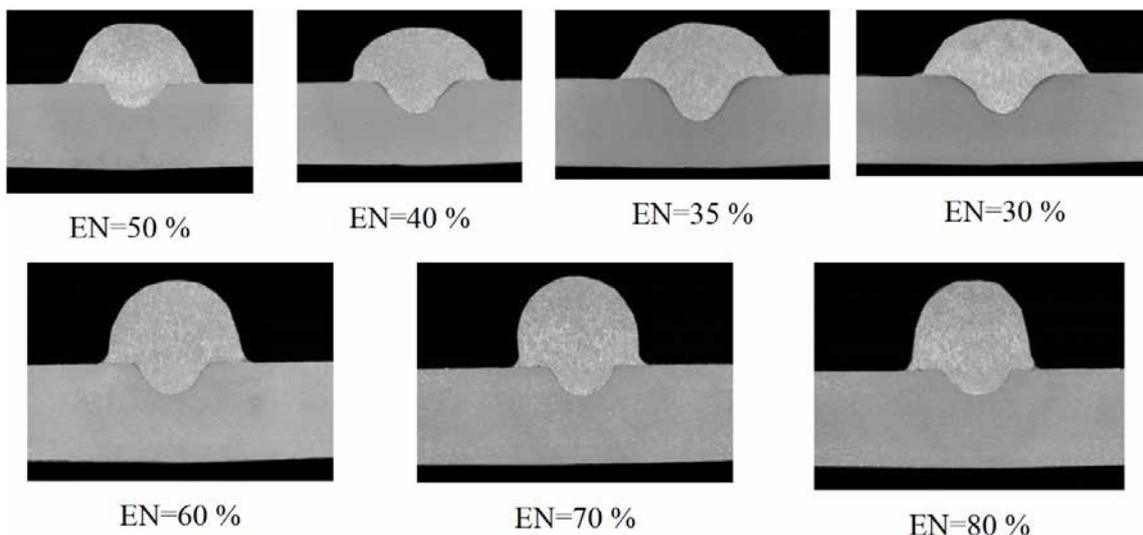


Abbildung 9: Makrostruktur der EN AW 5183 mit konstanter Stromstärke von 100 A und variierendem EN-Anteil, nach [ADA13]

Der Metallschutzgasschweißprozess mit Wechselstrom liefert einige Vorteile. Allerdings sind noch einige physikalische Effekte während des AC-Prozesses noch nicht vollständig verstanden. Der Großteil der Veröffentlichungen richtet sich an das Verbindungsschweißen. Insbesondere für die additive Fertigung eröffnen sich noch einige Fragen, die es zu beantworten gilt.

Charakterisierung der Zusatzwerkstoffe

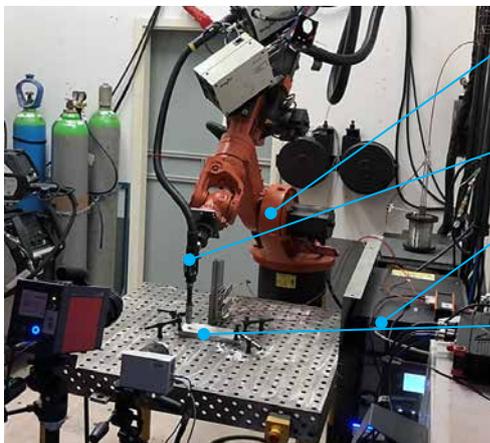
Allgemeines Vorgehen

Zunächst sollen in einzelnen Versuchsreihen geeignete Prozessparameter für das MSG-Schweißen der ausgewählten Aluminiumlegierungen und einer stabilen Prozessführungen ermittelt werden. Hierzu werden Prozessfenster deklariert welche einen additiven Aufbau ermöglichen. Dabei sollen gleichmäßige und dünnwandige Schweißraupen resultieren, welche eine sehr geringe Oberflächenwelligkeit aufweisen. Diese stellen die Grundlage für den Aufbau mehrerer Schichten dar. Durch die unterschiedlichen thermischen Eigenschaften (z.B. Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität) der ausgewählten Aluminiumlegierungen, sind auch unterschiedliche Prozessfenster zu erwarten. Mithilfe des gewonnenen Prozessverständnisses erfolgt die Erzeugung von mehrschichtigen Wandstrukturen. Bei der Generierung der Wandstrukturen wird stets eine gleichbleibende Zwischenlagentemperatur eingehalten. Diese bestimmt zum einen die mechanisch-technologischen Eigenschaften der geschweißten Struktur, zum anderen die Prozesszeit. Es werden mehrere Wandstrukturen mit unterschiedlichen Zwischenlagentemperaturen untersucht, um Wirkzusammenhänge zu den mechanisch-technologischen Eigenschaften herzustellen. Ziel ist die Generierung sowohl einreihiger Wandstrukturen, als auch zylindrischer Strukturen mit unterschiedlichem Durchmesser. Der Umfang der Untersuchungen wird im Wesentlichen durch den Aufwand zur Herstellung und Auswertung einzelner Proben bestimmt.

Versuchsaufbau

Um den Schweißbrenner vollautomatisiert entlang einer komplexen Bahn führen zu können, bedarf es eines mehrachsigen Handlingsystems. Abbildung 10 zeigt einmal den Versuchsaufbau für die Versuchsreihen a) und die Herstellung des Demonstrators b).

a) Versuchsreihen



b) Herstellung Demonstrator



Handlingsystem

Schweißbrenner

Schweißanlage

Substratplatte

Drehkipptisch

Abbildung 10: Versuchsaufbau für a) Versuchsreihen mit Messgeräten und b) die Herstellung des Demonstrators

Für die Versuchsreihen wurde ein 6 – Achs - Knickarmroboter KR 15 - 2 der KuKa GmbH mit einem fixierten Schweißtisch verwendet. Mit diesem instrumentalisierten Versuchsstand war es möglich neben der Aufnahme von Prozessleistung, auch zusätzlich Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und Temperaturmessungen durchzuführen. Die Herstellung dreidimensionaler Strukturen und des Demonstrators wurden an einem 6 - Achs - Knickarmroboter KR 60 HA der KuKa GmbH und einem Drehkipptisch DKP 400 der KuKa GmbH durchgeführt. Durch die erweiterten Freiheitsgrade des Drehkipptisches konnten so komplexere 3D-Strukturen hergestellt werden.

Als Energiequelle wurde ein elektronisch gesteuertes Inverterschweißgerät Titan 400 AC Pulse der EWM AG verwendet. Dabei werden innerhalb der Anlage die realen Schweißstrom- und Schweißspannungswerte im

μ s-Bereich gemessen, mit einer voreingestellten Kennlinie verglichen und kontinuierlich nachgeregelt. Um den Schweißzusatzwerkstoff konstant in die Fügezone zu fördern, wurde ein passendes Drahtvorschubgerät M drive ROB 5 XR, ebenfalls EWM GmbH, eingebaut. Die einzelnen Schweißparameter werden in der PC300 Software eingestellt und über eine Schnittstelle an die Schweißstromquelle kommuniziert. Je nach Schweißaufgabe liegen unterschiedliche Kennlinien vor, welche in Form von Jobs in der Anlage hinterlegt sind. Unterteilt werden die Jobs nach:

- Schweißverfahren
- Schweißzusatzwerkstoff
- Durchmesser des Schweißzusatzwerkstoffes
- Schutzgas

Je nach Kombination bietet die EWM AG hier ca. 400 Jobs an, welche je nach Schweißaufgabe noch einzeln modifiziert werden können. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Impulslichtbogen im Wechselstrom (arArc) verwendet. Dabei wird für die EN AW 5183 - Legierung der acArc puls - Job 392 (AlMg4,5Mn, Ar-100, \varnothing 1,2mm) ausgewählt. Für die EN AW 6063 – Legierung wird der acArc puls – Job 395 (AlSi, Ar-RestO₂, \varnothing 1,2mm) verwendet, welche sich besser für aushärtbare Aluminiumlegierungen eignet.

Um das Schmelzbad vor der Umweltatmosphäre zu schützen, wird für das Metallschutzgasschweißen ein Schutzgas eingesetzt. Für die Versuchsreihen wurde dabei das inerte Schutzgas Argon 5.0 verwendet. Das Schutzgas ist in der Norm DIN EN ISO 14175 definiert und hat einen Reinheitsgrad von 99,999% Ar. Die für den MSG-Schweißprozess benötigte Schutzgasmenge ist mittels eines Regulierventils am Druckminderer der jeweiligen Schutzgasflasche eingestellt worden. Dabei wurde die Durchflussmenge an der Schutzgasdüse mit einem Durchflussmesser, in Form eines Steigröhrchens an der Schutzgasdüse, abgelesen und die Durchflussmenge eingestellt. Dabei wird für Metallschutzgasschweißprozesse eine Durchflussmenge von ca. 10 - 12 x Drahtdurchmesser in Liter/Minute empfohlen. Bei einem Drahtdurchmesser von 1,2 mm ergibt sich somit eine empfohlene Durchflussmenge zwischen 12 und 14,4 l/min. Aufgrund der hohen Oxidationsneigung von Aluminium sind auch höhere Durchflussmengen möglich. In den Versuchsreihen galt dies zunächst einzustellen. Die Ergebnisse zeigten, dass mit einer Durchflussmenge von 15 - 17 l/min vorteilhafte Eigenschaften möglich waren, hinsichtlich Prozessstabilität und Gefügemorphologie.

Methoden der Prozessbewertung

Schweißspannung und Schweißstrom

Um eine Beurteilung der Prozessstabilität und des Werkstoffübergangs während des Schweißprozesses durchführen zu können, wurden die erzeugten Strom- und Spannungssignale aufgenommen. Die aufgezeichneten Messwerte geben Aussagen zur Prozessleistung während des MSG-Schweißprozesses und damit über den Energieeintrag. Die Spannung wurde dabei über die Analogschnittstelle der Schweißstromquelle abgegriffen. Die Messung der Stromstärke erfolgte mittels Hallsensor MWSTROM 500 der EWM GmbH, welches in die Masseleitungen zwischengeschaltet wurde. Die Aufnahme, Auswertung und Speicherung der Messwerte erfolgte über ein Mehrkanal-DAQ-System des Typs Sirius der Firma Dewesoft d.o.o. Da die Werte für die Schweißspannung U_s und den Schweißstrom I_s bei Wechselstrom nicht konstant sind und sich kontinuierlich ändern, muss für die Berechnung der Prozessleistung P die zeitabhängige Gleichung (2) verwendet werden.

$$P = \frac{1}{t_n - t_0} \int_{t_i}^{t_{i+1}} U_t * I_t + dt \quad \text{in [W]} \quad (2)$$

Wird die Gleichung um die Schweißgeschwindigkeit v_s erweitert, lässt sich die Streckenenergie E_s mit der Gleichung (3) berechnen:

$$E_s = \frac{P}{v_s} = \frac{\frac{1}{t_n - t_0} \int_{t_i}^{t_{i+1}} U_t * I_t + dt}{v_s} \quad \text{in } \left[\frac{\text{kJ}}{\text{cm}} \right] \quad (3)$$

Die Streckenenergie gibt an, wie viel Energie pro cm während des Schweißprozesses vorliegt. Da der größte Teil dieser Energie in Wärmeenergie umgewandelt wird, beeinflusst die Streckenenergie maßgeblich die Temperatur, welche sowohl auf den Zusatzdraht, als auch auf das Werkstück einwirkt. Folglich ändert sich auch das Auftragsverhalten, das Schmelzbad, die Einbrandtiefe und das Abkühlverhalten der Schweißraupe.

Metallografische Analyse

Um die Geometrie der erzeugten Schweißraupen und dessen Gefügemorphologie auszuwerten, werden aus den geschweißten Strukturen Querschliffe entnommen und metallografisch präpariert, vergleiche Abbildung 11. Dabei werden die Proben für die Metallografie aus den Strukturen herausgesägt und bis zu einer Oberflächenrauigkeit von $0,05 \mu\text{m}$ geschliffen und poliert. Um das Gefüge sichtbar zu machen werden die Proben in eine Ätzlösung nach Kroll getaucht oder mit einer Ätzlösung nach Barker anodisiert.

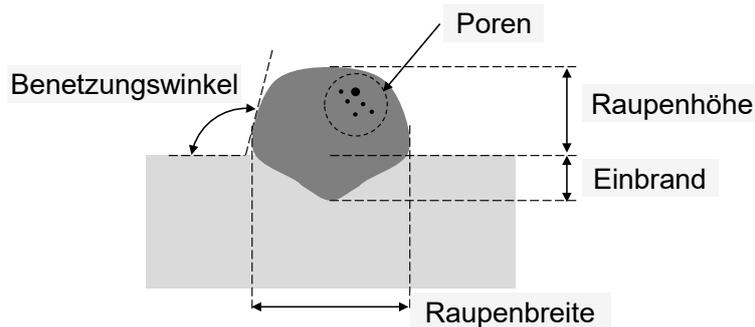


Abbildung 11: Schematische Darstellung der relevanten Schweißraupengeometrie

Bewertet werden dabei für die weiteren Untersuchungen relevanten Größen: Benetzungswinkel, Nahthöhe, Nahtbreite, Einbrand und Porenanteil. Zur Aufnahme der Geometrie und der Gefügemorphologie dient ein Lichtmikroskop vom Typ Zeiss AxioScope.A1 und eine Kamera AxioCam ICc3 der Firma Zeiss. Die Auswertung der Schweißnahtunregelmäßigkeiten erfolgte nach der DIN EN ISO 6520-1 und DIN EN ISO 5817.

Hochgeschwindigkeitskinematographie

Zur zeitlich hochaufgelösten Beobachtung der Lichtbogeninteraktion und des Werkstoffübergangs wurde eine Hochgeschwindigkeitskamera vom Typ CamRecord CR300x2 der Firma Optronics GmbH verwendet, welche mit einer Bildauflösung von 800×600 Pixeln und einer resultierenden Aufnahme Frequenz von 1000 Hz aufzeichnet. Um eine Überbelichtung des Bildes durch den Lichtbogen zu vermeiden, wurde ein Bandpassfilter mit einer Wellenlänge von 808 nm in den Strahlengang der Kamera integriert, die Blendenöffnung verringert, sowie eine Belichtungszeit von $1 / 50000$ eingestellt.

Bahnplanung und Bauteilslicing

Zur Herstellung der komplexen 3D - Bauteile werden die CAD - Modelle mittels DCAM - Software der Firma SKM Informatik bearbeitet. Dabei wird das Bauteilmodell in Schichten zerlegt und die Bahnplanung des Schweißbrenners simuliert. Somit kann im Vorfeld das System auf Unstetigkeiten bzw. Singularitäten oder Kollisionen überprüft werden. Die erhaltene Werkzeugbahn wird in einer für KuKa - Anlagen entsprechende Programmiersprache transformiert und aufgespielt. Vereinfachte Wandstrukturen oder zylindrische Strukturen wurden im Rahmen dieser Arbeit manuell im KuKa - Roboter programmiert.

Schichthöhenmessung

Je nach Schweißparameter und Abkühlbedingungen variiert die Geometrie der Schweißraupe. Für einen stabilen, automatisierten Schweißprozess gilt es nahezu konstante Schichthöhen einzustellen. Im Rahmen der Versuchsreihen werden die Schichthöhen manuell vermessen, um entsprechende Abweichungen zu erfassen. Die Schichthöhenmessung erfolgt mittels Messschieber an drei Punkten über die Nahtlänge hinweg. Der Mittel-

wert dient als Grundlage für die z-Zustellung (Höhenverstellung) des Schweißbrenners bei der Schichtgenerierung. Dies ist wichtig, um stets einen gleichbleibenden Abstand zwischen Stromkontaktröhre und der Schweißraupe (Stickout) einzuhalten. Während der Demonstratorherstellung dienten die zuvor in den Versuchsreihen gesammelten Werte als Referenz, sodass die Anpassung der z-Zustellung während des Prozesses vernachlässigt werden konnte.

Messung der Zwischenlagentemperatur T_{zw}

Die manuelle Temperaturmessung zur Einhaltung der Zwischenlagentemperatur T_{zw} während des Aufbauprozesses erfolgte, einem Messgerät MCR-4TC der Firma T&D. Hierzu wurden Thermoelemente des Typs K mit einem Temperaturbereich von -270 °C bis 1300 °C verwendet. Hierfür wurde die Oberfläche der Schweißraupe mit der Messspitze berührt. Der Messfehler des Messgerätes liegt laut Hersteller bei 2 K. Für die kontinuierliche Aufzeichnung der Temperaturmesswerte wurden Thermoelemente vom Typ C mit einem Temperaturbereich von 0 °C bis $+2315\text{ °C}$ in den Schweißprozess eingebracht und mittels DAQ-Systems vom Typ Krypton der Dewesoft d.o.o ausgewertet. Dabei wurden genannte Thermoelemente auf die zuletzt aufgetragene Schweißraupe positioniert und der Schweißprozess fortgesetzt. Die Position der Thermoelemente kann der schematischen Abbildung 12 entnommen werden. Durch das Überschweißen der Thermoelemente konnte der periodische Wärmeeintrag durch die darauffolgenden Schichten aufgezeichnet und die Abkühlzeiten berechnet werden.

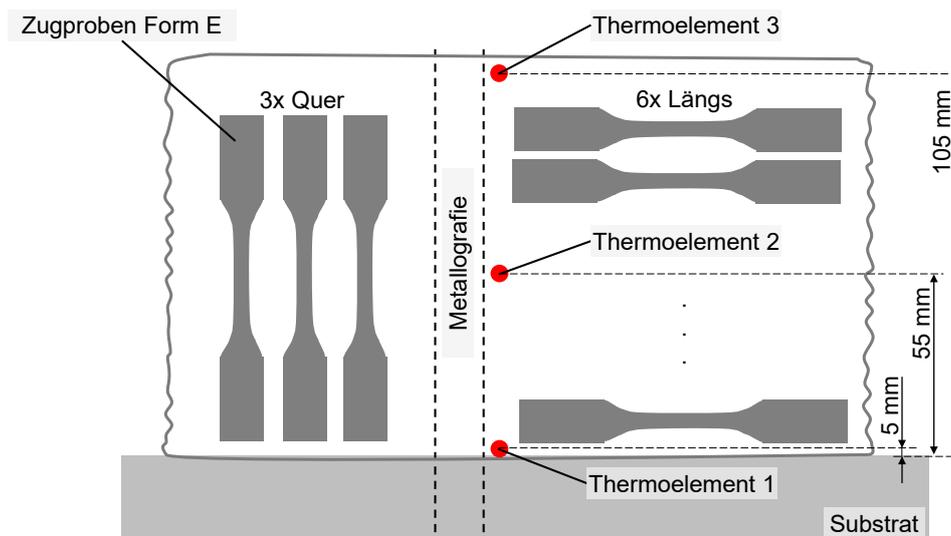


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Wandstrukturen. Dargestellt sind Positionen der eingelegten Thermoelemente 1 (5mm), 2 (55mm) und 3 (105mm), der Bereich der Metallografieprobe und den Zugproben

Vermessung der Endkontur

Die Vermessung der Außengeometrie bzw. Endkontur erfolgte durch den Einsatz eines 3D-Scanners vom Typ GOM Atos Core der Carl Zeiss GOM Metrology GmbH. Dabei wird mit Hilfe eines Streiflichtprojektors ein Muster auf die Bauteiloberfläche projiziert, welches von zwei Kamerasystemen gescannt wird. Der Schnittpunkt der Strahlengänge ermöglicht dabei die kamerabasierte Aufnahme und Berechnung von 3D-Flächenpunkten mit einer Auflösung $\geq 80\text{ }\mu\text{m}$. Die Probenpositionierung erfolgte dabei durch einen automatisierten Drehtisch. Die geschweißten Strukturen wurden auf den Drehtisch fixiert. Als Referenzebene diente die obere Substratoberfläche. Für die Analyse der Strukturbreite und dessen Endkontur wurde jeweils eine vertikale Ebene in die Mitte der Struktur gelegt.

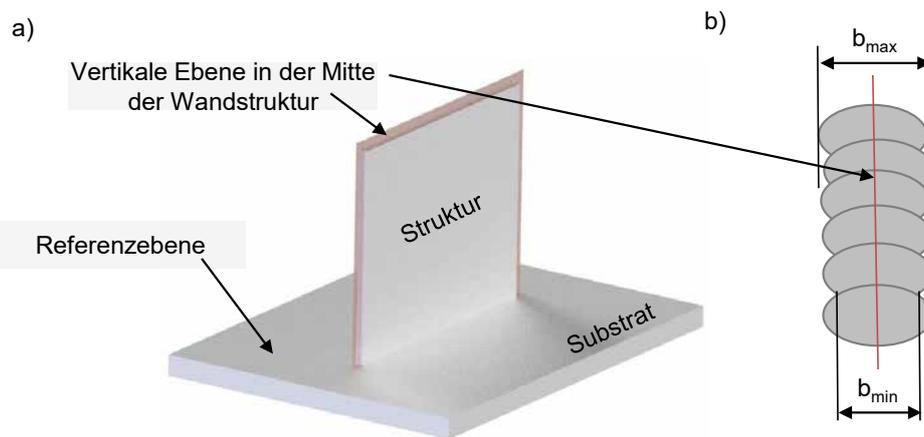


Abbildung 13: schematische Darstellung a) der Ebenenpositionierung zur Vermessung der Außengeometrie und b) Vermessung der minimalen Strukturbreite (b_{\min}) und maximalen Strukturbreite (b_{\max}) zur Berechnung der Endkontur

Die Maßabweichung errechnet sich aus der eingescannten Bauteiloberfläche bezogen auf die vertikale Ebene vergleiche Abbildung 13. Bei der Bewertung steht insbesondere die Korrelation zwischen Zwischenlagentemperatur und Strukturbreite bzw. Endkontur im Fokus. Die Endkontur berechnet sich dabei nach der Gleichung (4), wobei b_{\min} für die minimal und b_{\max} für die maximal gemessene Strukturbreite steht.

$$\text{Endkontur} = \frac{b_{\min}}{b_{\max}} \quad \text{in [\%]} \quad (4)$$

Durch eine angepasste Temperaturführung, soll die Strukturbreite konstant über die -höhe verlaufen. Je höher die Endkontur, desto geringer ist Oberflächenrauigkeit und die im Lastfall wirkende Kerbwirkung.

Quasi-statische Zugversuche

Die Ermittlung der Zugfestigkeit erfolgte mit Hilfe quasi-statischer Zugversuche. Hierzu wurden aus den geschweißten Wandstrukturen Prüfkörper nach DIN EN ISO 6892, Zugprobe Form E entnommen, siehe Abbildung 12. Die Zugproben wurden beidseitig auf eine Sollstärke a_0 gefräst, sodass die Kerbwirkung der Schweißraupenoberfläche ausgeschlossen werden kann. Geprüft wurden die Probekörper an einer Universalprüfmaschine der Hegewald & Peschke Mess- und Prüftechnik GmbH, welche eine maximale Prüfkraft von 20 kN aufweisen kann. Die Prüfung erfolgte mit einer Prüfgeschwindigkeit von 2 mm/min und einer Vorspannkraft von 100 N. Um die Proben untereinander vergleichen zu können, wurde der Querschnitt A einer Probe gemessen und auf die erhaltene, maximale Prüfkraft F_{\max} bezogen.

$$R_m = \frac{F_{\max}}{A} = \frac{F_{\max}}{(a_0 \cdot b_0)} \quad \text{in [N/mm}^2\text{]} \quad (5)$$

Wobei a_0 die Dicke der Probe und b_0 die Breite der parallelen Länge entspricht. Nach Gleichung (5) ergibt sich daraus die Zugfestigkeit R_m . Um den Einfluss der Aufbaurichtung auf die Festigkeit zu ermitteln, werden Zugproben sowohl quer, als auch längs zur Aufbaurichtung geprüft. Während den quasi-statischen Zugversuchen wurde mittels GOM Aramis SRX System der Firma Carl Zeiss GOM Metrology GmbH, die Dehnung der Prüfkörper aufgezeichnet. Abschließend wurden die erreichten Zugfestigkeiten mit den dazugehörigen Dehnungswerten in Spannungs – Dehnungs - Diagrammen gegenübergestellt. Im Rahmen der Untersuchungen wurden zur statistischen Absicherung jeweils 3 Proben geprüft.

Härtemessung

Die mikrostrukturelle Analyse der erzeugten Strukturen erfolgte über Härtemessungen nach Vickers gemäß DIN EN ISO 6507-1. Zum Einsatz kam ein Härteprüfgerät vom Typ DuraScan 70 der Firma Struers GmbH. Für eine direkte Vergleichbarkeit der beiden Legierungen wurden werkstoffunabhängig eine Prüfkraft von 9,807 N (HV1) und eine Prüfdauer von 10 s festgelegt.

Versuchsstrategie

Die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Versuche dienen der Ermittlung stabiler und reproduzierbarer Prozessparameter. Die zu untersuchenden Einflüsse wurden in Versuchsreihen unterteilt, sodass sich folgende Versuchsstrategie ergab:

Versuchsreihe 1

Zunächst galt es ein grundlegendes Verständnis für den im Wechselstrom betriebenen Impulslichtbogen arArc Prozess zu erlangen. Hierfür wurden zunächst einlagige Blindraupen auf einer Substratplatte geschweißt. Je nach Werkstoff wurde hier der Job 392 (EN AW 5183) oder der Job 395 (EN AW 6063) im 2-Takt-Spezial-Modus verwendet. Um sowohl den Energieeintrag, als auch die Wärmeverteilung anzupassen, wurden die Job-Kennlinien modifiziert. Dabei wurden die Parameter

- Drahtvorschub v_D
- Schweißspannung U_s
- Schweißstrom I_s
- Grundstrom I_G
- Impulsdauer t_d
- Negativanteil der Phase EN-Anteil
- Schweißgeschwindigkeit v_s

variiert, um eine gleichmäßige Raupengeometrie zu erzeugen. Vorgegriffen auf den Anwendungsfall, wurden bereits hier dünnwandige Wandstärken, mit einer hohen Auftragsrate adressiert. Die gewählten Grenzwerte für den Werkstoff EN AW 5183 sind in Tabelle 7 und für EN AW 6063 in Tabelle 8 dargestellt. Die theoretische Auftragsrate A ergibt sich dabei aus dem Drahtvorschub v_D , dem Drahtdurchmesser d und der spezifischen Dichte q , nach der Gleichung (6):

$$A = v_D * (q * \pi * (\frac{d}{2})^2) \quad \text{in [kg/h]} \quad (6)$$

Die Bewertung dieser Merkmale und der Stabilität des gesamten Schweißprozesses diente der ersten Eingrenzung der verwendbaren Schweißparameter.

Tabelle 7: Parameterfeld für Versuchsreihen am Werkstoff EN AW 5183

Schweißparameter	Versuchsparameter	
	Unterer Grenzwert	Oberer Grenzwert
Drahtvorschub [m/min]	3	7
Spannung [V]	15,5	20,5
EN-Anteil [%]	10	90
Grundstrom [A]	28	68
Schweißgeschwindigkeit [m/min]	0,48	2,0
Schutzgasdurchfluss [l/min]	8	12
Brennerposition	Neutral	
Stickout [mm]	15	

Tabelle 8: Parameterfeld für Versuchsreihen am Werkstoff EN AW 6063

Schweißparameter	Versuchsparameter
------------------	-------------------

	Unterer Grenzwert	Oberer Grenzwert
Drahtvorschub [m/min]	3,5	8
Spannung [V]	15,5	22,5
EN-Anteil [%]	10	90
Grundstrom [A]	55	75
Schweißgeschwindigkeit [m/min]	0,6	2,4
Schutzgasdurchfluss [l/min]	8	12
Brennerposition	Neutral	
Stickout [mm]	15	

Versuchsreihe 2

Um eine geeignete Aufbaustrategie für die Herstellung des Demonstrators zu entwickeln, wurden aufgrund der bislang eingegrenzten Parameter einige Grundlagenversuche zur Schichtgenerierung vorgenommen. Folglich wurden linienförmige, einreihige, 4 - 10 Lagen übereinander (z-Richtung) aufgebaut. Weiter erfolgte der flächige Aufbau in Form von linienförmigen, mehrreihigen Lagen nebeneinander (y-Richtung). Dies diente der Ermittlung der geeigneten Überlappung der Schweißnähte in y-Richtung und dem Erarbeiten einer geeigneten Aufbaustrategie für flächige Strukturen. Neben den linienförmigen Strukturen wurden auch zylindrische Strukturen geschweißt. Hier wurden die Durchmesser 30 mm, 50 mm und 100 mm ausgewählt, um den Einfluss eines möglichen Wärmestaus zu untersuchen. In allen Fällen galt es neben dem Anbindungsverhalten, auch die resultierende Raupengeometrie und die veränderte Gefügemorphologie zu analysieren. In Korrelation mit der zugeführten Streckenenergie und der resultierenden Raupengeometrie wurden so Maßnahmen abgeleitet für die Herstellung größerer Wandstrukturen. Diese Vorgehensweise galt es für beide Werkstoffe durchzuführen.

Versuchsreihe 3

Als abschließende Versuchsreihe wurden mehrlagige Wandstrukturen mit Abmaßen 180 x 110 mm (L x H) geschweißt. Dabei wurden für jeden Werkstoff drei Zwischenlagentemperaturen (40 °C, 100 °C, > 300 °C) und für die anschließende zerstörende Werkstoffprüfung zwei Oberflächenzustände („as welded“, „plangefräst“) festgelegt, siehe Abbildung 14 und Tabelle 9.

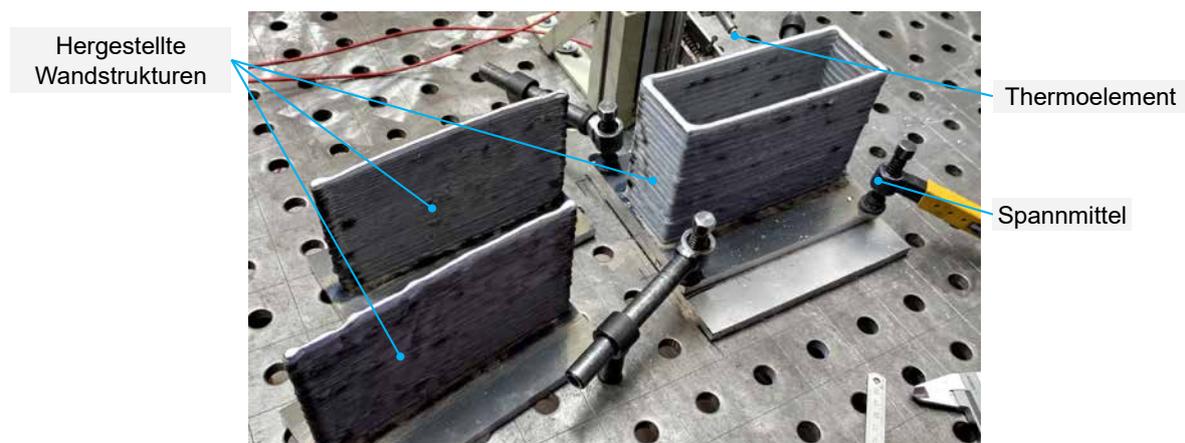


Abbildung 14: Versuchsaufbau für mehrlagige Wandstrukturen und Temperaturmessung

Tabelle 9: Versuchsplan für die Versuchsreihe 3 mit den Werkstoffen EN AW 5183 und EN AW 6063

	$T_{zw} = 40 \text{ °C}$	$T_{zw} = 100 \text{ °C}$	$T_{zw} > 300 \text{ °C}$

OF „as welded“	5183	6063	5183	6063	5183	6063
OF „plangefräst“	5183	6063	5183	6063	5183	6063

Die Einhaltung der Zwischenlagentemperatur wurde via Thermolemente kontrolliert. Die unterschiedlichen Zwischenlagentemperaturen geben dabei Aussagen zur Gesamtprozesszeit (Schweißzeit + Wartezeit) und zu den resultierenden Gefügeeigenschaften. Ziel dieser Versuchsreihe war es, zum einen herauszufinden, wie sich die mechanisch-technologischen Eigenschaften in Abhängigkeit der Zwischenlagentemperatur verändert. Zum anderen galt es, eine Korrelation zwischen Abkühlverhalten, Wandgeometrie und Gesamtprozessdauer zu erhalten. Somit können für die Herstellung des Demonstrators Aussagen zu mechanisch-technologischen Eigenschaften und Prozesszeiten abgeleitet werden.

Untersuchungen zu EN AW 5183

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Versuchsreihen gegenübergestellt und diskutiert. Abschließend sollen die gewonnenen Erkenntnisse zusammengetragen und Bedingungen für die Herstellung des Demonstrators abgeleitet werden.

Versuchsparameter und Durchführung

Zu Beginn wurden einlagige Blindraupen erzeugt und die Größen Schweißspannung U_s , Drahtvorschubgeschwindigkeit v_D und Schweißgeschwindigkeit v_s variiert, um eine erste Eingrenzung des Prozessfensters vorzunehmen. Weitere Prozessparameter wie Schutzgasdurchfluss, Stickout oder Substrattemperatur ($T = 40\text{ °C}$) wurden für eine Vergleichbarkeit konstant gehalten. Die erzeugten Raupen wurden anschließend hinsichtlich ihrer Raupengeometrie optisch bewertet. Als Bewertungsgrundlage diente die DIN EN ISO 5817. Neben der Gleichmäßigkeit und der Geradlinigkeit wurden Parameter für dünnwandige Raupen priorisiert. Im nächsten Schritt wurden die priorisierten Parameter modifiziert, um den Einfluss der Prozessparameter Schweißspannung U_s , EN-Anteil und Grundstrom I_G auf die Raupengeometrie und die Porosität zu ermitteln. Der untersuchte Versuchsumfang ist in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Versuchsparameter für Vorversuche an EN AW 5183

	v_D	v_s	U_s	I_{Puls}	EN-Anteil	I_G
Variation der Schweißspannung U_s						
1	6,5 m/min	0,48 m/min	15,5 V	99 A	50 %	48 A
2	6,5 m/min	0,48 m/min	16,5 V	99 A	50 %	48 A
3	6,5 m/min	0,48 m/min	17,5 V	99 A	50 %	48 A
4	6,5 m/min	0,48 m/min	18,5 V	99 A	50 %	48 A
5	6,5 m/min	0,48 m/min	19,5 V	99 A	50 %	48 A
6	6,5 m/min	0,48 m/min	20,5 V	99 A	50 %	48 A
Variation des EN-Anteils						
7	6,5 m/min	0,48 m/min	17,5 V	99 A	90 %	48 A
8	6,5 m/min	0,48 m/min	17,5 V	99 A	70 %	48 A
9	6,5 m/min	0,48 m/min	17,5 V	99 A	50 %	48 A
10	6,5 m/min	0,48 m/min	17,5 V	99 A	30 %	48 A
11	6,5 m/min	0,48 m/min	17,5 V	99 A	10 %	48 A
Variation des Grundstromes						
12	6,5 m/min	0,48 m/min	15,5 V	99 A	50 %	28 A

13	6,5 m/min	0,48 m/min	15,5 V	99 A	50 %	38 A
14	6,5 m/min	0,48 m/min	17,5 V	99 A	50 %	48 A
15	6,5 m/min	0,48 m/min	15,5 V	99 A	50 %	58 A
16	6,5 m/min	0,48 m/min	15,5 V	99 A	50 %	68 A

Auswertung

Einfluss der Streckenenergie

Die Streckenenergie ist ein Maß für den Wärmeeintrag. Bei konstanter Schweißgeschwindigkeit v_s und einer Erhöhung der Schweißspannung U_s , steigt die eingebrachte Prozessleistung P und somit auch die Streckenenergie E_s , vergleiche Kapitel 3.3.3.1. Wird diese geringgehalten, wird der Zusatzdraht nicht ausreichend aufgeschmolzen, sodass dieser in Kontakt mit dem Substrat gerät. Es kommt zum Kurzschluss, vergleiche Abbildung 15 a). Im Kurzschluss sinkt die Schweißspannung auf Null und ein Anstieg des Schweißstroms ist zu erkennen. Dabei wird der Zusatzdraht sehr stark erhitzt und teilweise verdampft, sodass es zu einer Spritzerbildung kommen kann. Diese Art des Lichtbogens wird auch Kurzlichtbogen genannt. Der vergleichsweise energiearme Lichtbogen wird vordergründig für den additiven Aufbau eingesetzt, allerdings bevorzugt als geregelter energiereduzierter Kurzlichtbogen im DC-Betrieb.

Mit der Erhöhung der Schweißspannung wird mehr Wärmeenergie freigesetzt, sodass der Lichtbogenmodus in einen Globulartransfer wechselt. Dieser ist kurzschlussfrei, sodass der Materialübergang über das Abtropfen des Zusatzdrahtes stattfindet. Ein beispielhafter kurzschlussfreier Strom-Spannungsverlauf im arArc-Prozess ist in Abbildung 15 b) dargestellt. Bei der Variation der Schweißspannung zeigte sich für den Werkstoff EN AW 5183 bis zu einer $U_s = 16,5$ V ein kurzschlussbehafteter Lichtbogen. Ab $U_s = 17,5$ V war dieser kurzschlussfrei.

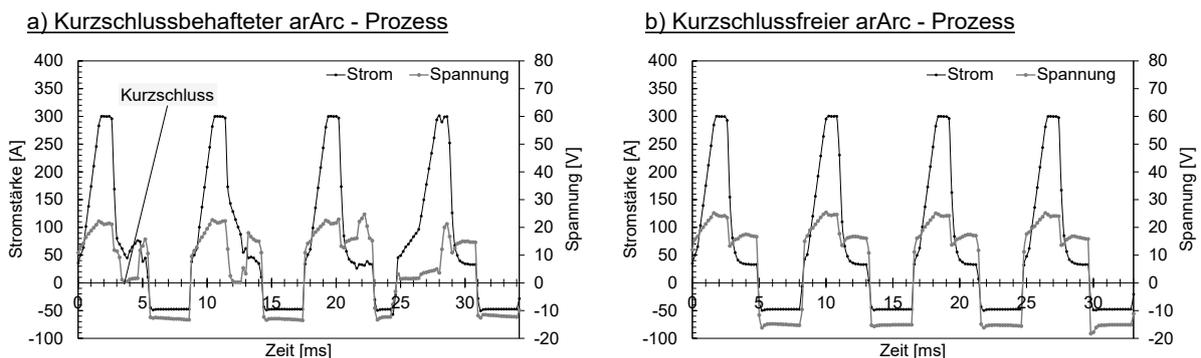


Abbildung 15: Strom-Spannungsverläufe am Werkstoff EN AW 5183 für a) einen kurzschlussbehafteten Lichtbogen mit Schweißspannung $U_s = 15,5$ V und b) kurzschlussfreien Lichtbogen mit Schweißspannung $U_s = 17,5$ V

Abbildung 16 zeigt die berechneten Streckenenergien E_s über die untersuchten Schweißspannungen U_s . Aufgeteilt sind die Streckenenergien sowohl in die Streckenenergien in der jeweiligen positiven und negativen Phase, als auch in die daraus resultierende summierte Streckenenergie im gesamten Zyklus. Die erhobenen Messwerte wurden dabei über den gesamten Schweißprozess ausgewertet. Zusätzlich sind Querschliffe der einzelnen Blindraupen dargestellt, welche die Raupengeometrie und Porosität für die jeweilige Prozesseinstellung darstellen sollen. Im kurzschlussbehafteten arArc-Prozess mit $U_s = 15,5$ V ist eine vergleichsweise unförmige Raupenkontur mit hoher Porosität zu erkennen. Zurückgeführt wird das zum einen auf den geringen Energieeintrag, sodass der Werkstoff bedingt durch die hohe Wärmeleitung, vorzeitig erstarrt. Zum anderen entsteht durch den wiederholten Kurzschluss eine sehr hohe Schmelzbaddynamik. Dabei werden verdampfte Partikel oder Fremdstoffe in die Schmelze mit eingebunden und durch die verkürzte Erstarrung nicht ausreichend ausgasen. Mit der Erhöhung der Schweißspannung steigt der positive Anteil der Streckenenergie signifikant von $E_{s_pos} = 2,5$ kJ/cm auf $E_{s_pos} = 3,9$ kJ/cm an. Dies führt dazu, dass mehr Wärmeenergie in das Schmelzbad übergeht. Der negative Anteil hingegen bleibt nahezu konstant zwischen $E_{s_neg} = 0,7$ - $0,9$ kJ/cm. Als Folge

ist ein erhöhter Einbrand, eine breitere Raupe mit besserer Anbindung und eine gleichmäßigere Oberfläche zu erkennen. Weiter hat die Schmelze länger Zeit auszugasen, sodass die Porosität sinkt.

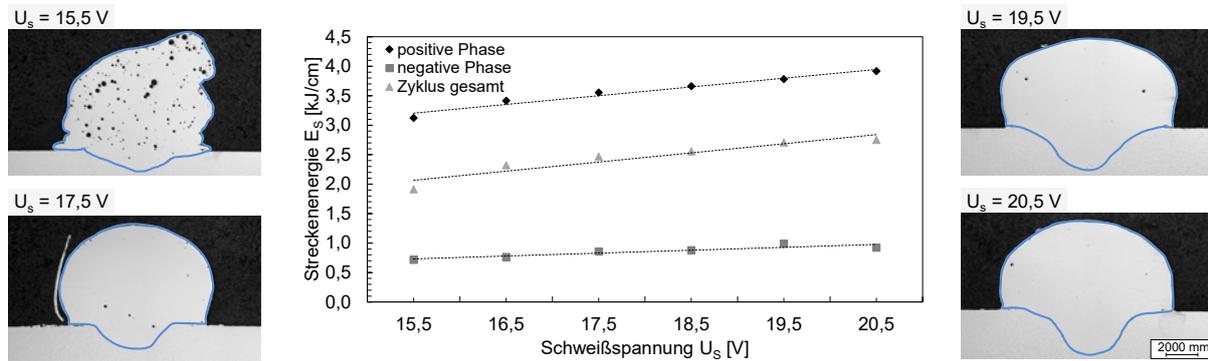


Abbildung 16: Streckenergie E_s beim arArc-Prozess aufgeteilt in positive Phase, negative Phase und die resultierende summierte Streckenergie über die Schweißspannung U_s . Querschliffe der EN AW 5183 für die Schweißspannungen 15,5V, 17,5V, 19,5V und 20,5V

Einfluss des EN-Anteils

Im Rahmen der Untersuchung zum EN-Anteil wurde dieser zwischen den maximal einstellbaren Werten 90 % und 10 % mit einer Schrittweite von 10 % variiert. Der EN-Anteil verändert den zeitlichen Anteil der negativen Phase am Zyklus. Die Schweißanlage gleicht dabei den Anstieg der Streckenergie in der negativen Phase mit der positiven Niederstromphase I_{S-Puls} aus, um ein nahezu konstantes Energieniveau beizubehalten. Mit steigendem EN-Anteil, steigt zum einen die Dauer der negativen Phase, zum anderen sinkt die Dauer der positiven Niederstromphase. Somit gleichen sich die durchschnittlichen positiven bzw. negativen Streckenergien aus.

Abbildung 17 zeigt, die Streckenergie in Abhängigkeit des untersuchten EN-Anteils und die dazugehörigen Blindraupen. Zu erkennen ist, dass mit sinkendem EN-Anteil die Streckenergie der positiven Phase signifikant abnimmt. Dies wird auf den deutlich höheren Anteil der leistungsärmeren Niederstromphase zurückgeführt, vergleiche Kapitel 3.2.2. Deutlich wird, dass die Änderung des EN-Anteils (negative Phase) nicht direkt proportional zur positiven Phase ist, da diese sich nur marginal zwischen $E_{S,neg} = 0,77 - 0,86\text{ kJ/cm}$ bewegt. Dadurch nimmt die Streckenergie der positiven Phase im Vergleich zur negativen Phase signifikant mehr ab. Widersprüchlich scheint der marginal zunehmende Einbrand bei reduzierender positiver Streckenergie zu sein.

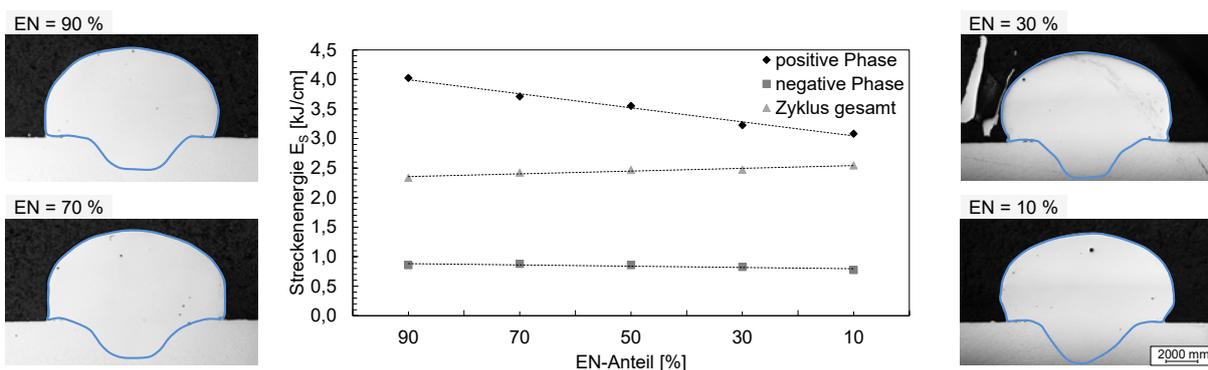


Abbildung 17: Streckenergie E_s beim arArc-Prozess aufgeteilt in positive Phase, negative Phase und die resultierende summierte Streckenergie über den EN-Anteil. Querschliffe der EN AW 5183 für die EN-Anteile 90%, 70%, 30% und 10%

Durch die Reduzierung der positiven Streckenergie ist mit einer reduzierten, thermischen Beanspruchung des Substrates zu rechnen, sodass der Einbrand rückgängig wäre. Der maßgebende Faktor an dieser Stelle ist jedoch die Stromdichteverteilung. Abbildung 18 zeigt zwei Hochgeschwindigkeitsaufnahmen für einen EN-Anteil = 90 % und EN-Anteil = 10 %. Im Fall 90 % ist ein deutlich breiterer Lichtbogen, mit Ansatz an der Drahtelektrode zu erkennen. Während bei 10 % der Lichtbogen sehr fokussiert und schmal ist. Bei Betrachtung des

Materialtransfers wird deutlich, dass die Tropfengröße bei einem EN-Anteil = 90 % größer ist als bei einem EN-Anteil = 10 %. Dies kommt durch die längere Aufschmelzzeit des Zusatzwerkstoffes während der negativen Phase zustande.

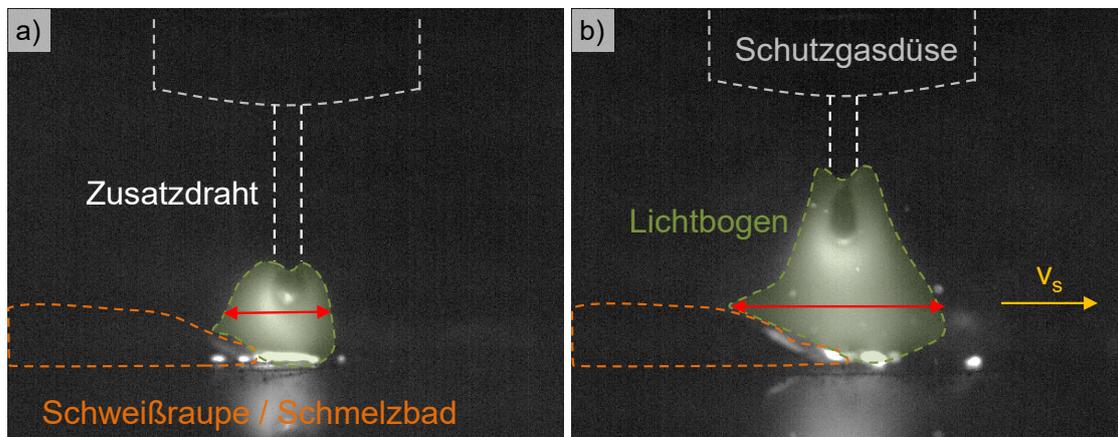


Abbildung 18: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des arArc Prozesses mit a) EN Anteil 10 % und b) EN-Anteil 90 %

Folglich kann mit der Modifizierung des EN-Anteils primär der Anteil der positiven Streckenenergie und gleichzeitig die Wärmeverteilung angepasst werden. Dabei können die Auftragsrate und die Porosität ebenfalls leicht angepasst werden.

Einfluss des Grundstromes

Als letzte untersuchte Größe für den arArc - Prozess wurde der Grundstrom I_G analysiert. Die Variation des Grundstroms I_G verschiebt die Anteile der positiven und negativen Phasen bei einem konstanten Energieniveau. Mit steigendem Grundstrom werden die Maxima in der negativen Phase größer und die zeitlichen Anteile länger.

Abbildung 19 stellt die Streckenenergien über den untersuchten Grundstrom im Bereich 28 A bis 68 A dar. Außerhalb dieses Bereichs wurde eine erhöhte Prozessinstabilität beobachtet, weswegen diese nicht weiter betrachtet wurden. Ähnlich wie bei der Variation des EN-Anteils versucht die Schweißanlage auch hier ein konstantes Energieniveau zu halten. Berechnet wurde eine Streckenenergie E_s von 2,25 – 2,45 kJ/cm. Mit steigendem Grundstrom ist zu erkennen, dass die negative Streckenenergie von 0,4 kJ/cm (28 A) auf 1,2 kJ/cm (68 A) ansteigt. Gleichzeitig, um das Energieniveau auszugleichen, sinkt die positive Streckenenergie von ca. 3,7 kJ/cm (28 A) auf ca. 3,1 kJ/cm (68 A). Somit wird signifikant mehr Energie in den Zusatzdraht, als in das Substrat bzw. Schmelzbad eingebracht. Folglich steigt die Abschmelzleistung durch mehr abtropfendes Material. Dazu sinkt sowohl der Einbrand, als auch die Raupenbreite aufgrund des kühleren Substrates und dem damit verbundenen erhöhten Abkühlgradienten. Für die additive Fertigung ist ein geringer Einbrand vom Vorteil, da hier bereits aufgetragene Lagen weniger thermisch beansprucht werden und so meist Unregelmäßigkeiten vermieden werden. Allerdings ist im Sinne der Anbindung und der Benetzung ein bestimmtes Maß an positiver Streckenenergie notwendig.

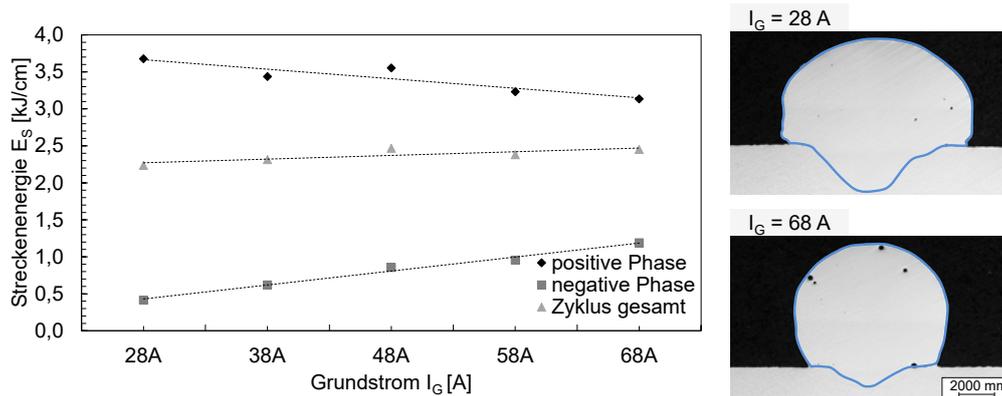


Abbildung 19: Streckenergie E_s beim arArc-Prozess aufgeteilt in positive Phase, negative Phase und die resultierende summierte Streckenergie über den Grundstrom I_G . Querschliffe der EN AW 5183 für den Grundstrom 28A und 68A

Gefügemorphologie mehrlagiger Strukturen

Nachdem die Einflüsse der grundlegenden Prozessparameter auf den arArc-Prozess untersucht wurden, wurden Kombinationen dieser ausgewählt, um erste mehrlagige Strukturen herzustellen. Die Anzahl der Lagen wurde zunächst auf $L = 4$ begrenzt. Dabei lag besonderes Augenmerk auf eine hohe Raupenqualität im Hinblick auf eine Gleichmäßigkeit und einer hohen Endkontur. Die geschweißten 4-lagigen Wandstrukturen wurden anschließend metallografisch analysiert und bewertet. Tabelle 11 stellt exemplarisch für die Untersuchungen der 4-lagigen Wandstrukturen sechs Parametervariationen dar. Die betrachteten Aspekte dienen zur Findung von stabilen Prozessparametern und für den Aufbau größerer Strukturen.

Tabelle 11: Versuchsübersicht der 4-lagigen Wandstrukturen aus EN AW 5183

Bezeichnung	Schweißspannung U_s [V]	EN-Anteil [%]	Grundstrom I_G [A]
Wand 1	17,5	50	48
Wand 2	19,5	50	48
Wand 3	17,5	90	48
Wand 4	17,5	10	48
Wand 5	17,5	50	28
Wand 6	17,5	50	68

Während dieser Untersuchung wurden Zwischenlagentemperaturen $T_{zw} = 100^\circ\text{C}$ eingehalten. Anhand einer Ätzlösung nach Kroll konnte das Makrogefüge sichtbar gemacht werden, sodass unter anderem die Grenzen und Schichthöhen der unterschiedlichen Lagen erkenntlich wurden, vergleiche Abbildung 20 (blaue Linien). Ziel der Untersuchung war es, eine Parameterkombination zu finden, welche einen geringen Energieeintrag hat (geringe thermische Beanspruchung) und gleichzeitig eine hohe Abschmelzleistung und eine hohe Raupenqualität aufweist. Im Vergleich zu einlagigen Raupen, spielt bei einem mehrlagigen Aufbau sowohl die Wärmeverteilung, als auch die Ableitung der Wärmeenergie eine signifikant größere Rolle. Die Geometrie der Raupe, die Anzahl der Defekte (z.B. Poren) und die Gefügemorphologie werden davon primär bestimmt.

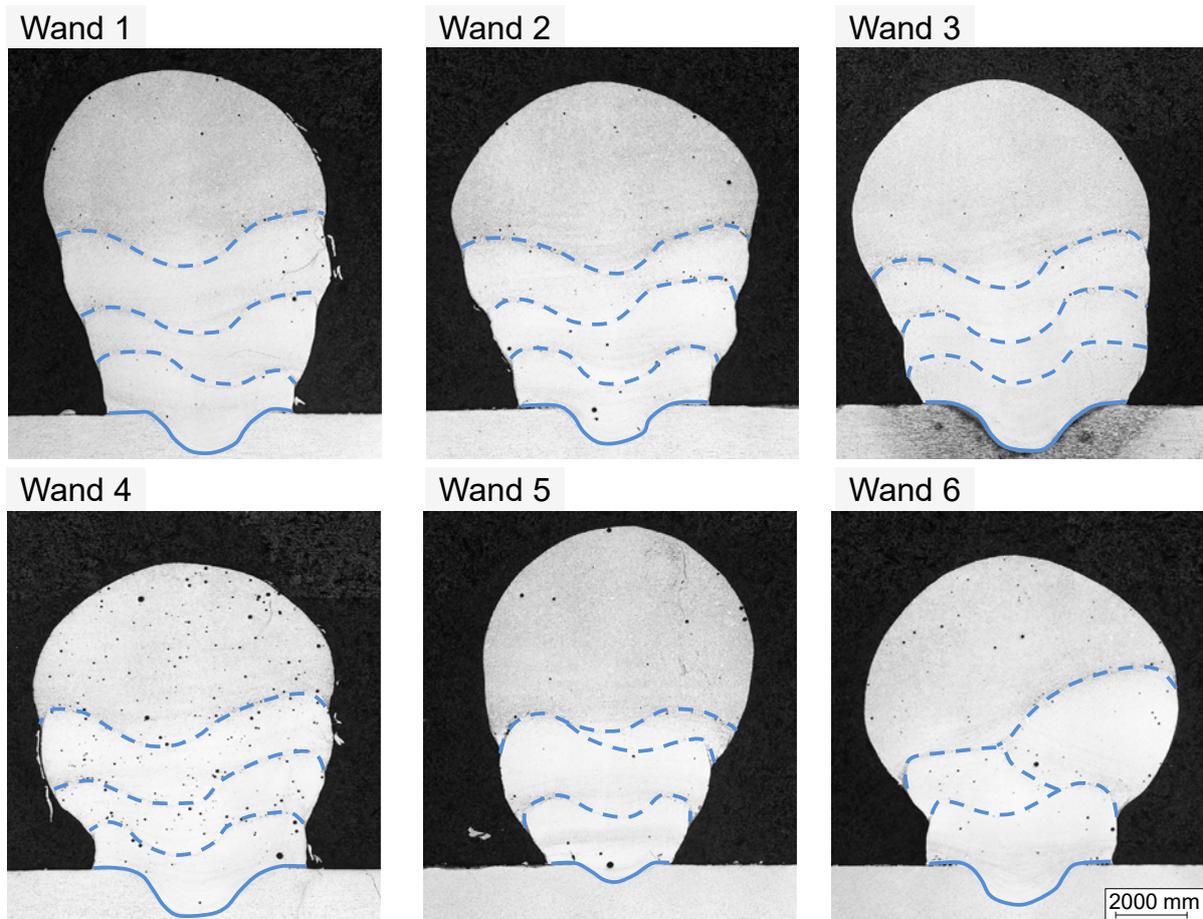


Abbildung 20: Querschliffe der untersuchten 4-lagigen Wandstrukturen aus EN AW 5183. Die Proben wurden mittels Ätzlösung nach Kroll präpariert.

Als ungeeignet stellten sich beispielsweise die Parameter der Wand 5 und Wand 6 heraus. Der vergleichsweise hohe Energieeintrag entweder in die darunterliegende Lage ($I_G = 28 \text{ A}$) oder in den Zusatzdraht ($I_G = 68 \text{ A}$) führt zu einer bauchigen Form der Schweißnaht und ungleichmäßigen Schichthöhen. Für den additiven Aufbauprozess sind diese Parameter weniger geeignet. Die Parameter für die Wand 1 hingegen zeigten sehr gute Ergebnisse. Die Schichthöhen sind relativ gleichmäßig, sodass für höhere Strukturen die benötigten Lagen genauer berechnet werden können.

Porosität

Die zulässige Porosität für Aluminiumlegierungen im Bauwesen wird im Eurocode 9 unter C.3.4.2 definiert und darf maximal 4 % betragen, wobei die Porendurchmesser nicht größer als 2 mm sein dürfen. Die Qualitätsanforderung bezieht sich dabei allerdings nur auf Gusslegierungen (4xxx - Legierungen) und nicht für geschweißte Strukturen. In der DIN EN ISO 10042 werden Bewertungsgruppen für das Schmelzschweißen von Aluminiumlegierungen definiert. Hier wird eine maximale Porosität $\leq 2 \%$ angesetzt (Nr. 2.4, $t > 3$ bis 12 mm, Bewertungsgruppe B) [DIN19]. Die Untersuchung zur Porosität ergab, dass sowohl die geschweißten, einlagigen Blindraupen, als auch die 4-lagigen Wandstrukturen eine Porosität $< 0,7 \%$ aufweisen, siehe Abbildung 21. Dabei ist positiv zu bewerten, dass sämtliche Untersuchungen nach der DIN EN ISO 10042 die Anforderungen der Bewertungsgruppe B erfüllen. Als einziger Ausreißer gilt der Versuch mit einer Schweißspannung $U_s = 15,5 \text{ V}$, vergleiche Abbildung 21 a) und Wand 4 Abbildung 21 d).

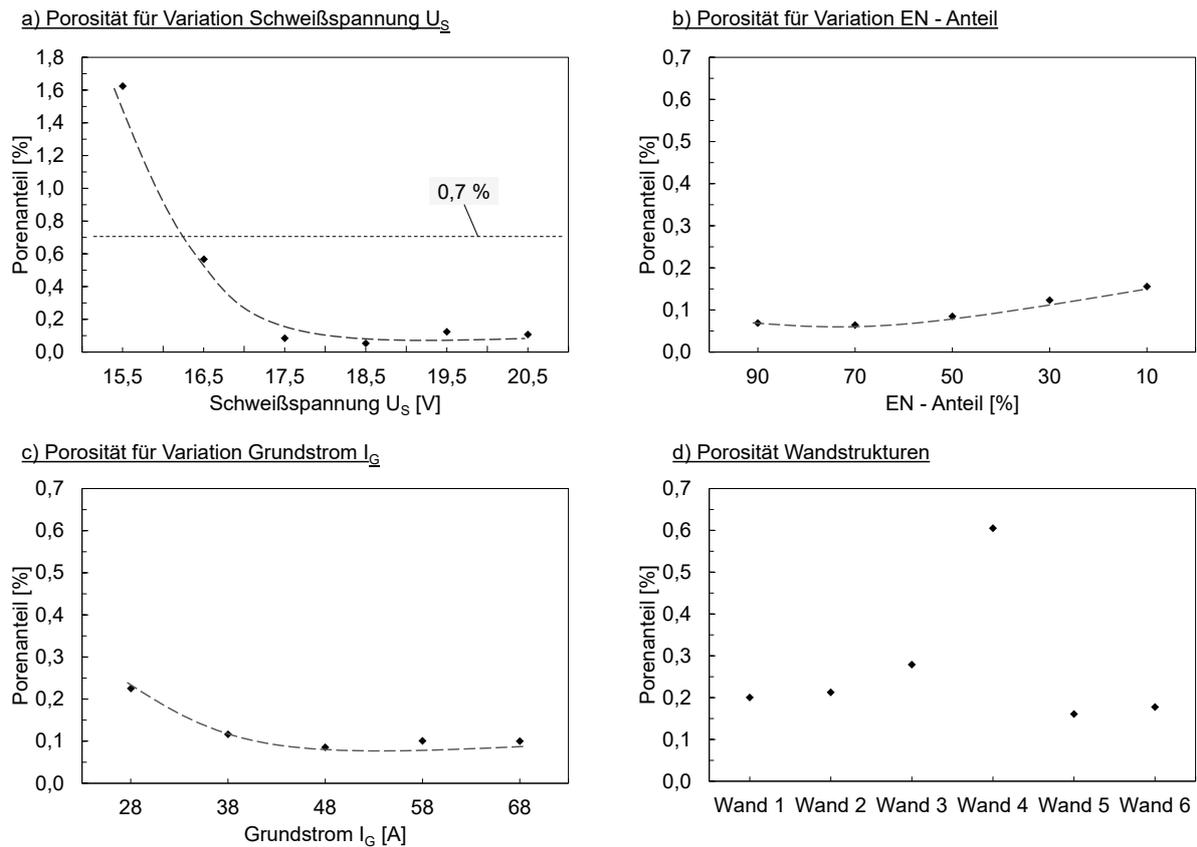


Abbildung 21: Vergleich der EN AW 5183 Blindraupen und 4-lagigen Wandstrukturen hinsichtlich der Porosität

Wandstrukturen

Nachdem die grundlegenden Prozessparameter gefunden wurden und die Korrelation zwischen Eingangsparameter und resultierender Raupengeometrie bekannt sind, wurden die Erkenntnisse genutzt um großvolumige Wandgeometrien zu erzeugen. Bei der Herstellung großvolumiger Strukturen ist die Temperaturführung maßgebend für die Qualität der Schweißverbindung. Als Regelgröße dient die Zwischenlagentemperatur. Diese beeinflusst zum Großteil die Raupengeometrie, das entstehende Gefüge und im Hinblick auf die notwendigen Abkühlzeiten auch die resultierende Gesamtprozesszeit. Die verwendeten Schweißparameter für die Untersuchungen an der EN AW 5183 sind in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Schweißparameter für die Untersuchung unterschiedlicher Zwischenlagentemperaturen an der EN AW 5183

Schweißparameter	Wert
Drahtvorschub v_D [m/min]	6,5
Schweißspannung U_s [V]	17,5
Niederstrom I_{S-Puls} [A]	99
EN-Anteil [%]	90
Grundstrom I_G [A]	48
Schweißgeschwindigkeit v_s [m/min]	0,48
Schutzgasdurchfluss [l/min]	12

Stickout [mm]	15
---------------	----

Untersucht wurden die drei Zwischenlagentemperaturen $T_{ZW} = 40\text{ °C}$, $T_{ZW} = 100\text{ °C}$ und $T_{ZW} > 300\text{ °C}$. Je niedriger die Zwischenlagentemperatur, desto höher der Temperaturgradient zwischen der zu schweißenden Lage und den bereits aufgetragenen Lagen. Je höher die Zwischenlagentemperatur, desto niedriger der Temperaturgradient, sodass das Gefüge länger thermisch beansprucht wird. Durch die hohe Wärmeleitung der Aluminiumlegierungen ist mit einer schnellen Erstarrung zu rechnen, sodass mit einer $T_{ZW} = 40\text{ °C}$ vergleichsweise hohe mechanisch-technologische Eigenschaften zu erwarten sind. Allerdings können die Abkühlzeiten das 10 bis 12 - fache der Schweißzeit betragen. Bedingt durch die sehr hohen Abkühlzeiten auf nahezu Raumtemperatur und den entsprechenden Leerlaufzeiten, ist dieser Prozess wenig wirtschaftlich. In der Literatur oft angewendet sind Zwischenlagentemperaturen zwischen $100 - 150\text{ °C}$. Dabei wird auf einen Kompromiss zwischen kurzen Abkühlphasen und guten mechanisch-technologischen Eigenschaften abgezielt. Aus diesem Grund wurde, für einen direkten Vergleich, die zweite Wandgeometrie mit einer $T_{ZW} = 100\text{ °C}$ geschweißt. Abschließend wurde untersucht, welche Eigenschaften erzeugt werden können, wenn die Abkühlzeit vernachlässigt wird. In diesem Fall wird auf eine Abkühlpause verzichtet und die Wandstruktur am Stück geschweißt. Dies bedingt, dass der Schweißprozess nicht angehalten wird. Um etwaige Schweißnahtunregelmäßigkeiten an den Wendepunkten der einlagigen Wandstrukturen zu vermeiden, wurden hierfür Rechteckstrukturen geschweißt.

Die Wandstrukturen wurden nach dem Schweißprozess eingescannt und vermessen. Abbildung 22 stellt die geschweißten Strukturen hinsichtlich ihrer Endkontur gegenüber. Für die Messung wurde eine mittlere Ebene in die Wandstruktur positioniert, der Abstand der Strukturoberfläche zu der Ebene berechnet und farblich gekennzeichnet, vergleiche Abbildung 13. Der qualitative Vergleich der Wandstrukturen zeigt, dass mit zunehmender Zwischenlagentemperatur die Wandbreite zunimmt und die Wandhöhe abnimmt. Bedingt durch die höheren Temperaturen zerfließen die einzelnen Schweißraupen in die Breite, sodass eine geringere Schichthöhe resultiert. Dadurch sind glattere, aber auch breitere Oberflächen möglich. Geringe Zwischenlagentemperaturen (40 °C und 100 °C) zeigen eine gleichmäßige Welligkeit über die gesamte Strukturhöhe. Defekte auf der Oberfläche sind nicht erkennbar.

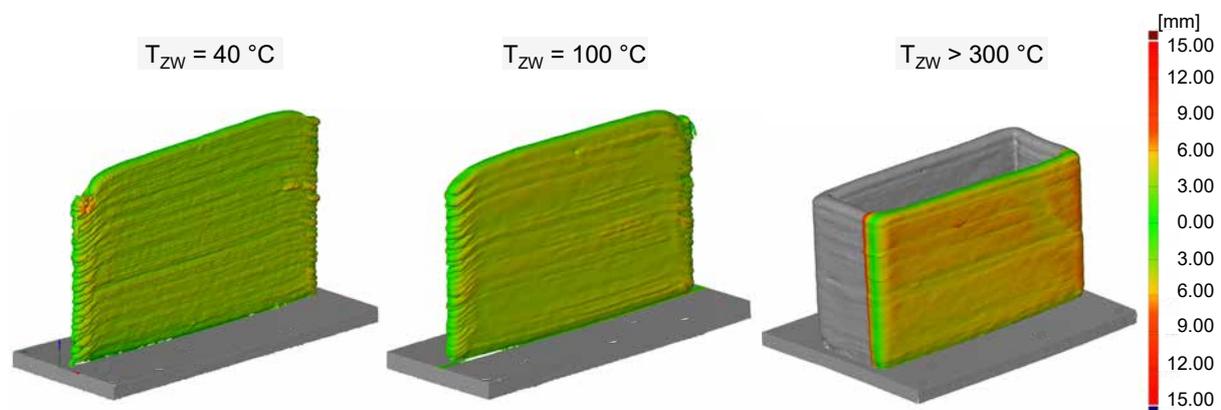


Abbildung 22: 3D-Scans der gefertigten Wandstrukturen aus EN AW 5183 mit unterschiedlichen Zwischenlagentemperaturen

Aus den Wandstrukturen wurden metallografische Proben entnommen um die Lagenbreite, die Gefügemorphologie und die Härte darzustellen. Die Breite der Wandstruktur nimmt, bei konstanten Schweißparametern, mit steigender Zwischenlagentemperatur zu. Während bei einer Zwischenlagentemperatur $T_{ZW} = 40\text{ °C}$ die Wandstruktur eine mittlere Breite $b_{\text{mittl}} = 8,3\text{ mm}$ aufzeigt, steigt diese bei $T_{ZW} = 100\text{ °C}$ auf $b_{\text{mittl}} = 9,2\text{ mm}$ und bei $T_{ZW} > 300\text{ °C}$ auf bis zu $b_{\text{mittl}} = 11,8\text{ mm}$ an. Die zunehmende Lagenbreite ist das Resultat eines geringeren Temperaturgradienten und der damit reduzierten Abkühlung. Um die notwendigen dünnen Wandstärken $d < 4\text{ mm}$ des Demonstrators herzustellen, werden in einem späteren Kapitel Untersuchungen erarbeitet. Für die Untersuchung der Härte wurden charakteristische Bereiche ausgewählt, siehe Abbildung 23. Im substratnahen Bereich (a) ist die Abkühlung, bedingt durch das signifikant höhere Substratvolumen, am

höchsten, weswegen hier andere Härtewerte im Vergleich zur restlichen Struktur erwartet wurden. Im mittleren Bereich der Wand (b) bei einer Strukturhöhe von ca. 50 mm wird die Wärmeenergie allein über die additive Struktur abgeleitet und befindet sich, unabhängig vom Substrat, in einem quasi-statischem Zustand. Durch die folgenden Lagen ist an dieser Stelle der Einfluss des periodischen Wärmeeintrages ersichtlich. Der oberste Bereich (c) betrachtet die letzten Lagen der Wandstruktur. Im Vergleich zum mittleren Bereich (b) erfuhren diese Lagen eine bis keine Wärmenachbehandlung durch weitere Schweißraupen.

Der Vergleich der Wandstrukturen mit $T_{ZW} = 40\text{ °C}$ und $T_{ZW} = 100\text{ °C}$ zeigt keine signifikanten Unterschiede der Härtewerte. Die Härtewerte liegen im Durchschnitt bei $77,9 \pm 2,9\text{ HV1}$ ($T_{ZW} = 40\text{ °C}$) und $77,2 \pm 2,3\text{ HV1}$ ($T_{ZW} = 100\text{ °C}$). Der Verlauf der Werte zeigt in den drei Bereichen eine homogene Verteilung, sodass auch für die restliche Struktur eine angenommen werden kann. Der Einfluss der Temperatur auf eine EN AW 5183 Legierung wird bei einer Zwischenlagentemperatur von $T_{ZW} > 300\text{ °C}$ ersichtlich. Im substratnahen Bereich sind durch die vergleichsweise hohe Wärmeleitung noch ähnlich hohe Härtewerte erzielt worden. Im steigender Strukturhöhe zeigt sich die Entfestigung. Im obersten Bereich werden Minimalwerte von $38,2\text{ HV1}$ gemessen. Der mittlere Bereich zeigt, dass durch den periodischen Wärmeeintrag eine geringe Aufhärtung möglich ist. Vermutet wird, dass durch die wiederholte Wärmebehandlung, mehrere Rekristallisationsphasen und Vorgänge der Mischkristallverfestigung möglich werden. Die Durchschnittshärte der gesamten Struktur sinkt jedoch vergleichsweise auf $74,5 \pm 4,5\text{ HV1}$ ($T_{ZW} > 300\text{ °C}$) herab. Generell kann gesagt werden, dass durch den AC-Prozess die Schmelzbaddynamik verstärkt wird und ein Ausgasen der Wasserstoffverbindungen, durch Öffnen der Magnesiumoxide auf der Strukturoberfläche begünstigt wird [ALD21]. In Kombination mit der geringen Streckenergie und den erhöhten Abkühlgradienten wird einem übermäßigem Dendritenwachstum entgegen gewirkt und die Bildung eines epiaxiales Feinkorngefüge gefördert. Dies mündet in einer Erhöhung der Festigkeit.

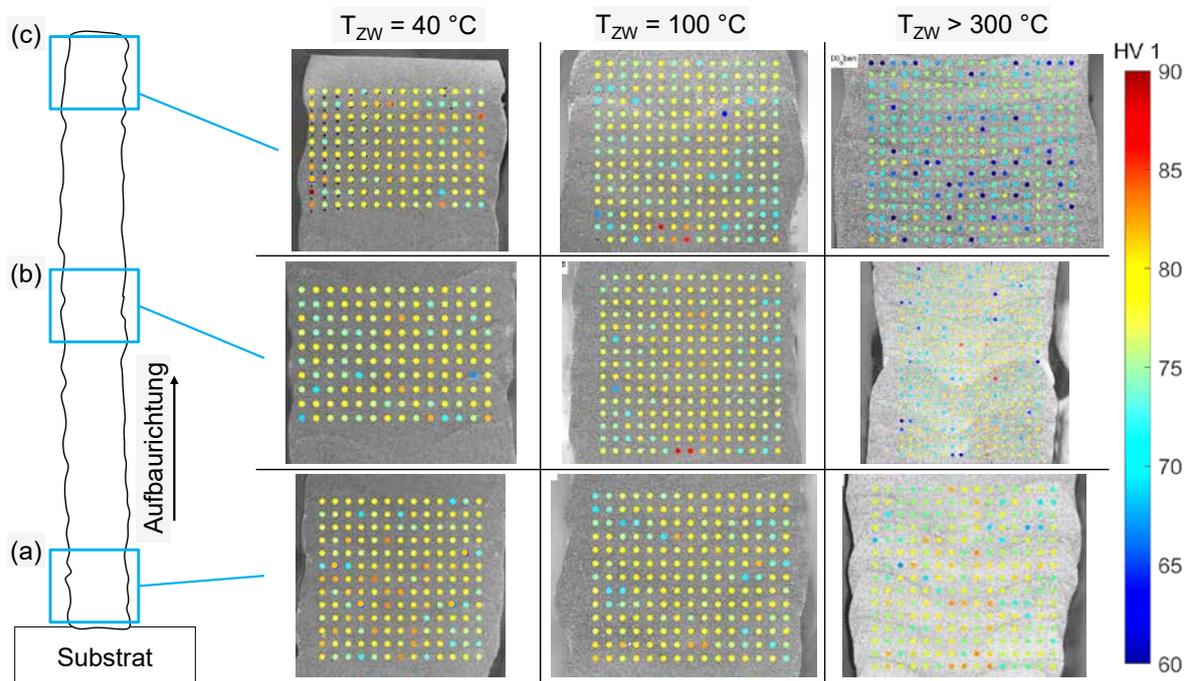


Abbildung 23: schematische Darstellung der gemessenen Bereiche der Wandstrukturen (a), (b) und (c) und die gemessenen Härtewerte einer EN AW 5183 mit den Zwischenlagentemperaturen $T_{ZW} = 40\text{ °C}$, $T_{ZW} = 100\text{ °C}$, $T_{ZW} > 300\text{ °C}$.

Um die Härtewerte zu erklären, wurden die einzelnen Bereiche anodisch geätzt und die Gefügemorphologie analysiert. Abbildung X stellt aus den obersten Lagen der Wandstrukturen mit den Zwischenlagentemperaturen $T_{ZW} = 40\text{ °C}$ und $T_{ZW} > 300\text{ °C}$ exemplarisch die entstandenen Gefügestrukturen dar. Für geringe Zwischenlagentemperaturen sind feine gleichachsige, interdendritische Strukturen innerhalb der Körner zu erkennen.

Diese feine Schraffur ist auf die Bildung der feindispersiven $\text{Al}_3\text{Mg}_2 - \beta$ - Phase zurückzuführen [HOR74]. Die β - Phase beeinflusst die Korrosionsbeständigkeit der Legierung und löst sich durch sein elektronegeres Potential im Vergleich zur α - Phase anodisch auf [SCH05]. Bei erhöhten Temperaturen löst sich die β - Phase vollständig auf, sodass keine interdendritische Struktur mehr innerhalb des Kornes zu erkennen ist, vergleiche Abbildung 24 b). Durch die erhöhte, periodisch wirkende Temperatur durchläuft das Gefüge eine Art Homogenisierung, sodass hier die Bildung von Gleichgewichtsphasen gefördert wird und keine dendritischen Strukturen im Korn entstehen [HOR74]. Bei den erkennbaren Fehlstellen, wird vermutet, dass es sich um herausgelöste Primärausscheidungen handelt, welche durch die iterativen Schleif- und Polierprozesse weiter verfestigt und aus dem Gefüge herausgelöst haben.

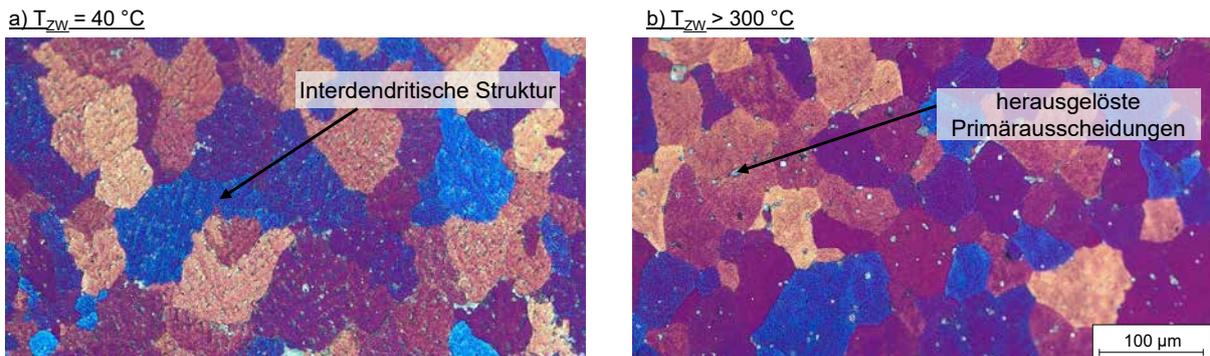


Abbildung 24: Gefügemorphologie einer EN AW 5183 mit einer Zwischenlagentemperatur T_{zw} von a) 40 °C und b) $> 300\text{ °C}$. Das Gefüge wurde mit einem Ätzverfahren nach Barker anodisiert.

Zylindrische Strukturen

Bei der Herstellung von nicht geradlinigen, einlagigen Strukturen kann es sein, dass durch die bauteileigene Wärmestrahlung veränderte Abkühlbedingungen vorliegen und demnach die Gefügeeigenschaften lokal beeinträchtigt werden. Mit Hinblick auf die zu schweißende Struktur des Demonstrators wurden zylindrische Strukturen mit dem Durchmesser $d = 50\text{ mm}$ geschweißt und mit zylindrischen Strukturen mit $d = 30\text{ mm}$ und $d = 100\text{ mm}$ verglichen. Diese lagen jeweils mit einer Strukturhöhe von je 35 mm vor, vergleiche Abbildung 25.

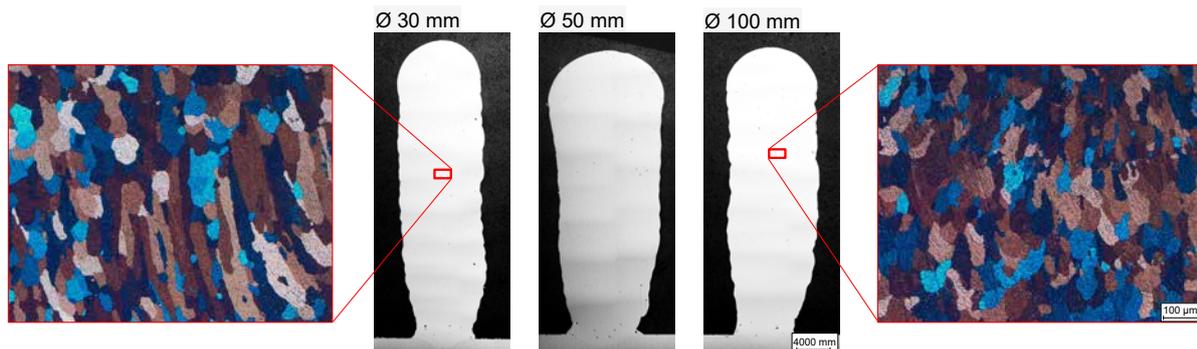


Abbildung 25: Querschliffe zylindrischer Strukturen aus EN AW 5183 mit einem Durchmesser von 30 mm , 50 mm und 100 mm .

Die zylindrischen Strukturen zeigen unabhängig vom Durchmesser ein nahezu porenfreies Gefüge mit einer sehr hohen Endkontur. Mit geringer werdendem Durchmesser müsste der Einfluss der Wärmestrahlung größer werden. Demnach wurden zunächst die Durchmesser $d = 30\text{ mm}$ und $d = 100\text{ mm}$ untersucht. Betrachtet wurden sowohl die Innenseiten, das Zentrum, als auch die Außenseiten der Strukturen. Dabei wurden nur marginale Änderungen in der Länge der Dendriten beobachtet, welche als vernachlässigbar eingestuft werden.

Untersuchungen zu EN AW 6063

Im Folgenden werden die systematischen Untersuchungen zu der Aluminiumlegierung EN AW 6063 vorgestellt. Dabei wird besonders die Eignung für die Herstellung additiver Strukturen fokussiert.

Versuchsparameter und Durchführung

Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen zu der EN AW 5183 werden herangezogen, um ebenfalls ein geeignetes Prozessfenster für die Herstellung additiver Strukturen aus EN AW 6063 zu erzeugen. Das Vorgehen gleicht dabei, im Sinne der Vergleichbarkeit, dem Vorgehen aus der Versuchsreihe für die EN AW 5183. Zunächst soll das Prozess - Werkstoff - Verhalten analysiert werden. Die Tabelle 13 stellt dabei den Versuchsraum für die Analyse der Blindraupen dar. Die höhere Wärmeleitfähigkeit der EN AW 6063 mit $\lambda_{6063} \approx 200 \text{ W/mK}$ (vgl. $\lambda_{5083} = 117 \text{ W/mK}$) und die höhere Liquidustemperatur $T_{L,6063} = 655 \text{ °C}$ (vgl. $T_{L,5083} = 640 \text{ °C}$) lassen ein heißeres und gleichzeitig kleineres Schmelzbad aufgrund der schnelleren Erstarrung erwarten. Die ausgewählten Parameterfenster sollen ein breites Versuchsfeld darstellen um, Aussagen über Anbindung, Raupengeometrie und Porenanfälligkeit zu liefern.

Tabelle 13: Versuchsparameter für Vorversuche an EN AW 6063

	v_D	v_s	U_s	I_{Puls}	EN-Anteil	I_G
Variation der Schweißspannung U_s						
1	5,0 m/min	0,72 m/min	15,5 V	72 A	50 %	38 A
2	5,0 m/min	0,72 m/min	16,5 V	72 A	50 %	38 A
3	5,0 m/min	0,72 m/min	17,5 V	72 A	50 %	38 A
4	5,0 m/min	0,72 m/min	18,5 V	72 A	50 %	38 A
5	5,0 m/min	0,72 m/min	19,5 V	72 A	50 %	38 A
6	5,0 m/min	0,72 m/min	20,5 V	72 A	50 %	38 A
Variation des EN-Anteils						
7	5,0 m/min	0,72 m/min	17,5 V	72 A	90 %	38 A
8	5,0 m/min	0,72 m/min	17,5 V	72 A	70 %	38 A
9	5,0 m/min	0,72 m/min	17,5 V	72 A	50 %	38 A
10	5,0 m/min	0,72 m/min	17,5 V	72 A	30 %	38 A
11	5,0 m/min	0,72 m/min	17,5 V	72 A	10 %	38 A
Variation des Grundstromes						
12	5,0 m/min	0,72 m/min	15,5 V	72 A	50 %	28 A
13	5,0 m/min	0,72 m/min	15,5 V	72 A	50 %	38 A
14	5,0 m/min	0,72 m/min	17,5 V	72 A	50 %	48 A
15	5,0 m/min	0,72 m/min	15,5 V	72 A	50 %	58 A
16	5,0 m/min	0,72 m/min	15,5 V	72 A	50 %	68 A

Auswertung

Gefügemorphologie

Auf den ersten Blick ist zu erkennen, dass im Vergleich zu der EN AW 5183, die EN AW 6063 ein signifikant schlechteres Benetzungsverhalten aufzeigt. Die erhöhte Wärmeleitfähigkeit führt zu einer intensiveren Wärmeableitung und somit zu einem schnelleren Erstarren. Dadurch erhöht sich die Oberflächenspannung und das aufgetragene Material bindet schlechter am Substrat an. Die Variation der Schweißeingangsgrößen: EN-Anteil, Grundstrom I_G oder Schweißspannung U_s haben einen nur marginalen Einfluss, vergleiche Abbildung 26. Selbst bei einem EN-Anteil = 10 % (viel Wärmeenergie in den abschmelzenden Tropfen), bleibt der Benet-

zungswinkel $< 90^\circ$. Um die Anbindung zu verbessern, wird empfohlen entweder die Substratdicke zu verringern oder das Substrat vorzuwärmen. In beiden Fällen wird der Temperaturgradient zwischen Substrat und Schmelze verringert, sodass eine langsamere Abkühlung und folglich eine bessere Anbindung resultieren kann.

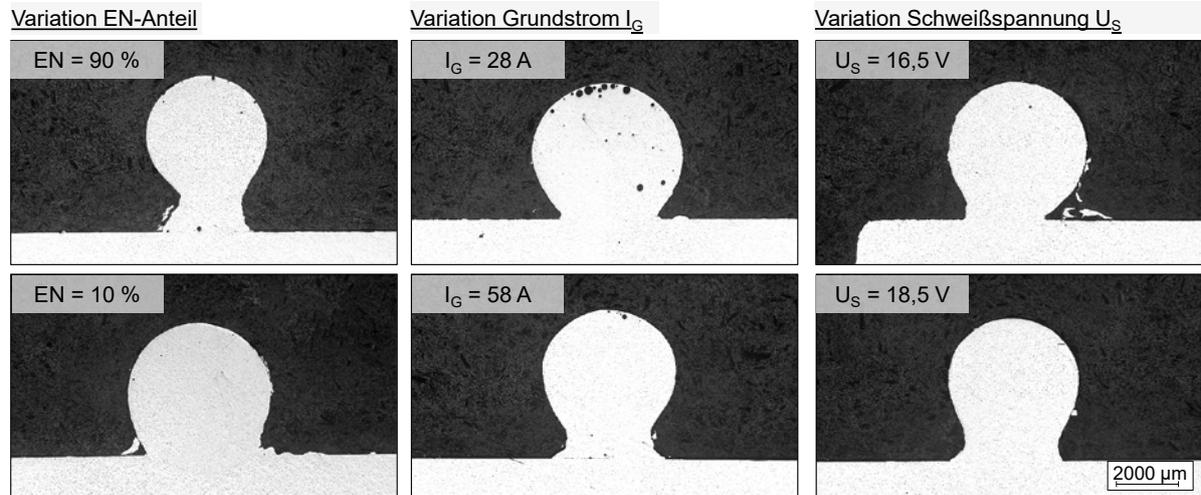


Abbildung 26: Blindraupen aus EN AW 6063. Variation der Eingangsgrößen EN-Anteil, Grundstrom I_G und Schweißspannung U_S .

Mehrlagige Strukturen

Aus den Vorversuchen wurden geeignete Parameter ausgewählt und kombiniert, um kleinere 4-lagige Strukturen zu schweißen. Für die Auswertung dieser wurden insbesondere die Raupengeometrie und das Benetzungsverhalten analysiert, um Aussagen zu der Gleichmäßigkeit und Reproduzierbarkeit treffen zu können. Abbildung 27 zeigt fünf beispielhafte Querschliffe der 4-lagigen Strukturen, Tabelle 14 die dazugehörigen, kombinierten Schweißparameter.

Tabelle 14: Versuchsübersicht der 4-lagigen Wandstrukturen aus EN AW 6063

Bezeichnung	Schweißspannung U_S [V]	EN-Anteil [%]	Grundstrom I_G [A]
Wand 1	16,5	50	38
Wand 2	19,5	90	38
Wand 3	16,5	50	48
Wand 4	16,5	70	38
Wand 5	18,5	50	48

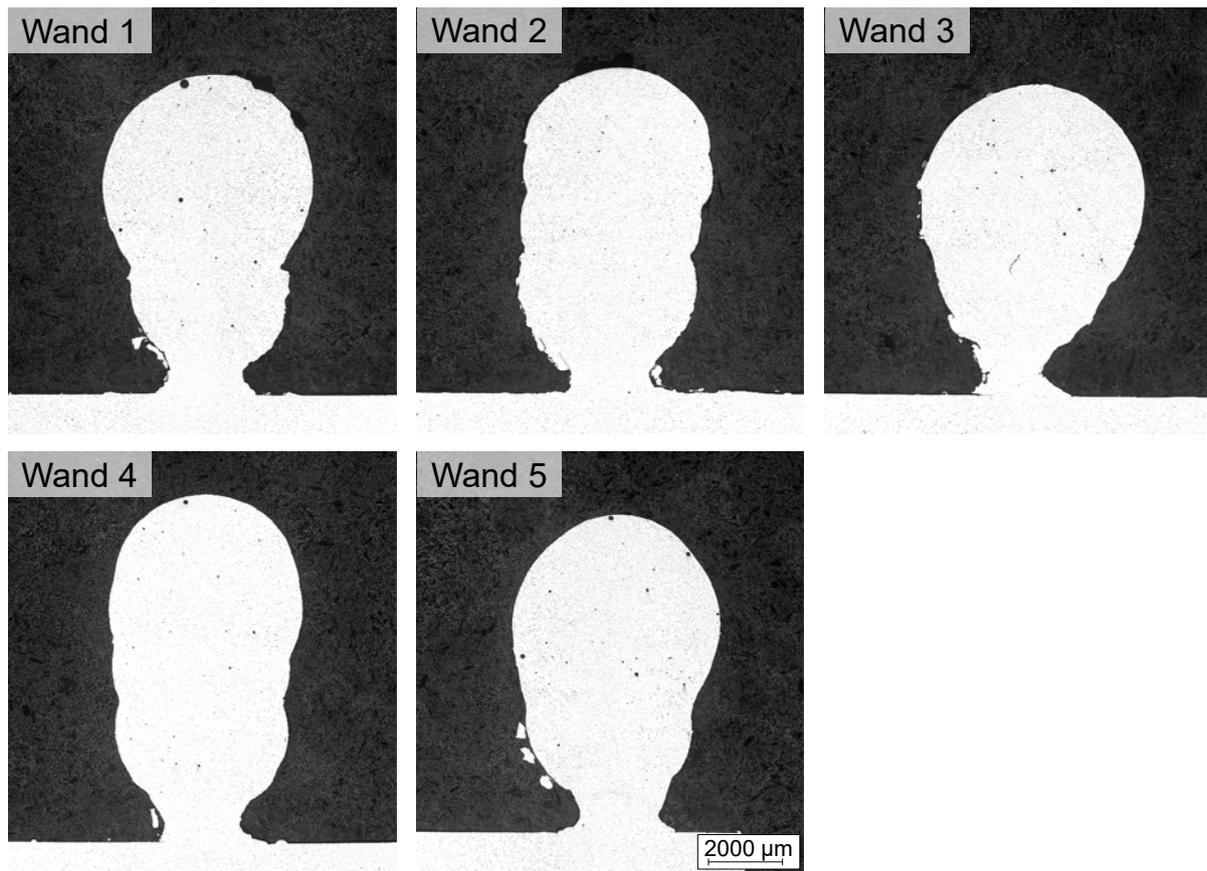


Abbildung 27: 4-lagige Strukturen aus EN AW 6063 mit kombinierten Eingangsgrößen.

Die Querschliffe zeigen, dass die Anbindung an das Substrat in allen Fällen, verglichen mit der Breite der eigentlichen Wandstruktur, sehr gering ausfällt. Dadurch kann die eingebrachte Wärmeenergie durch den Lichtbogenprozess nur schlecht aus der Wandstruktur in das Substrat abgeleitet werden. Es kommt zum Wärmestau. Die aufgetragenen Lagen verbleiben länger in ihrer schmelzflüssigen Form und zerfließen in die Breite. Dieser Effekt ist für die additive Herstellung eher ungeeignet, da zum einen die resultierende Endkontur stark herabgesenkt wird. Zum anderen können durch den künstlich erzeugten Wärmestau, resultierende Umwandlungsvorgänge nur bedingt kontrolliert oder vermieden werden. Um dies zu umgehen, werden für die folgenden Untersuchungen die ersten zwei Lagen mit einer höheren Streckenenergie aufgetragen. Somit soll eine gute Anbindung an das Substrat gewährleistet werden.

Porosität

Die dargestellten Blindraupen und 4-lagigen Wandstrukturen werden hinsichtlich ihrer Porosität verglichen und bewertet. Wie auch bei der EN AW 5183 greift hier die DIN EN ISO 10042. Damit geschweißte Aluminiumlegierungen die Bewertungsgruppe B erfüllen, muss eine maximale Porosität $\leq 2\%$ vorliegen. Im Eurocode 9 darf die maximale Porosität maximal 4% betragen, wobei die Porendurchmesser nicht größer als 2 mm sein dürfen. Abbildung 28 stellt die Porosität der einzelnen Versuche in Abhängigkeit der untersuchten, variierenden Eingangsgröße bzw. kombinierten Eingangsgröße (4-lagige Strukturen) dar.

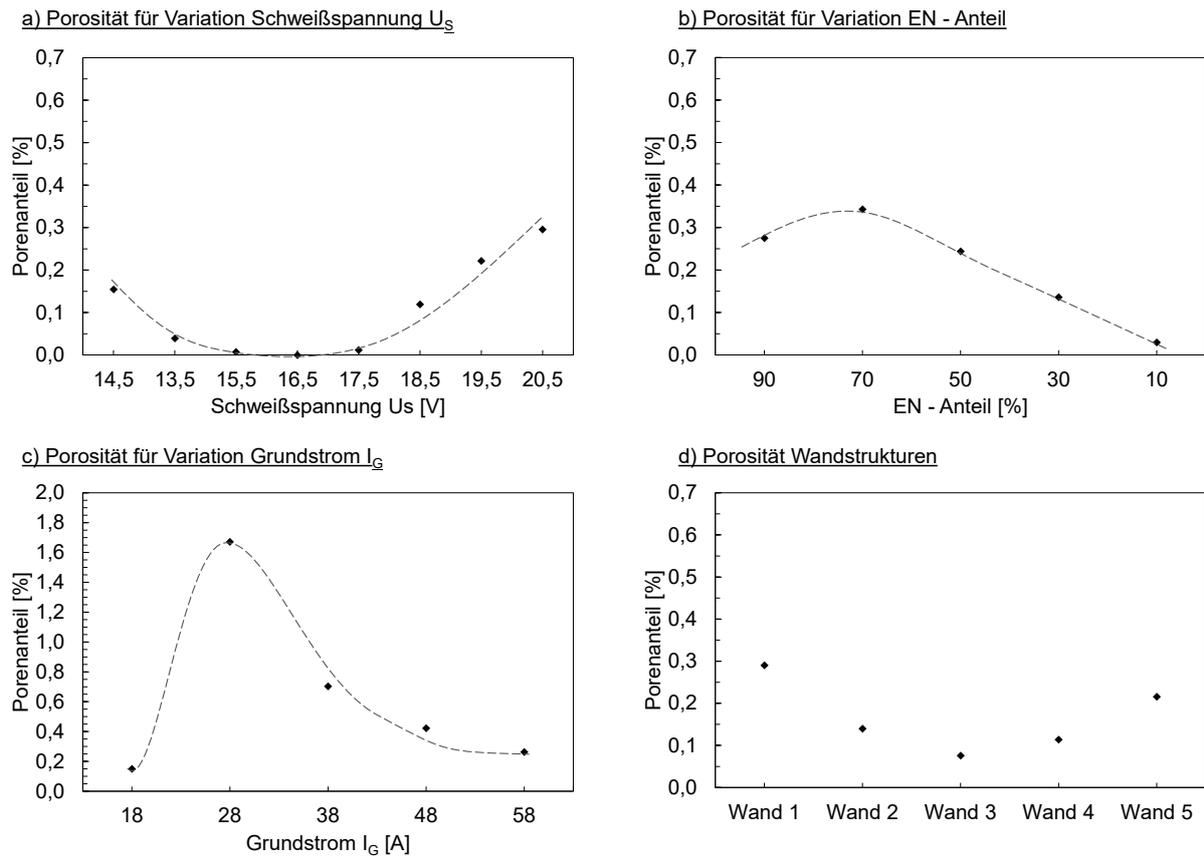


Abbildung 28: Vergleich der EN AW 6063 Blindraupen und 4-lagigen Wandstrukturen hinsichtlich der Porosität

Erneut positiv anzumerken ist, dass die Porosität an dieser Stelle keine Herausforderung beim Schweißen von Aluminiumlegierungen darstellt. Bezogen auf das Schweißgut liegen, bis auf einen Ausreißer (Grundstrom $I_G = 28$ A) mit 1,67 %, sämtliche Werte unterhalb 1 %. Prinzipiell lassen die Ergebnisse erkennen, dass ein zu geringer Energieeintrag in das Schweißgut, zu einer vorzeitigen Erstarrung und mangelnden Ausgasung führen kann, siehe Abbildung X a) $U_s = 14,5$ V und b) EN-Anteil 90 – 70 %. Ein zu hoher Energieeintrag hingegen führt vermutlich zu einem Überhitzen der Schmelze und zu einem zusätzlichen Legierungsabbrand, vergleiche a) $U_s > 18,5$ V. Aufgrund der dennoch geringen Porosität und der geringen Stichprobe werden die Effekte zunächst als vernachlässigbar eingestuft.

Wandstrukturen

Um die mechanisch-technologischen Eigenschaften der additiv hergestellten Strukturen aus EN AW 6063 zu untersuchen, sollen einreihige Wandstrukturen generiert werden. Um den Einfluss der prozessbedingten wiederkehrenden Wärmenachbehandlung deutlich zu machen, wurden die unterschiedlichen Zwischenlagentemperaturen $T_{ZW} = 40$ °C, $T_{ZW} = 100$ °C und $T_{ZW} > 300$ °C betrachtet. Wie bereits angemerkt werden in den ersten zwei Lagen abgeänderte Parameter verwendet um eine ausreichende Anbindung an das Substrat zu gewährleisten. Die verwendeten Parameter der Wandstrukturen sind in Tabelle 15 festgehalten.

Tabelle 15: Schweißparameter für die Untersuchung unterschiedlicher Zwischenlagentemperaturen an der EN AW 6063

Schweißparameter Allgemein	Wert
Schweißgeschwindigkeit v_s [m/min]	0,72
Grundstrom I_G [A]	28
Schutzgasdurchfluss [l/min]	12

Brennerposition	Neutral
Stickout [mm]	12
Schweißparameter Lage 1 & 2	Wert
Drahtvorschub v_D [m/min]	7,5
Schweißspannung U_s [V]	18,0
Niederstrom I_{S-Puls} [A]	129
EN-Anteil [%]	90
Schweißparameter Lage 3 - Ende	Wert
Drahtvorschub v_D [m/min]	5,0
Schweißspannung U_s [V]	18,7
Niederstrom I_{S-Puls} [A]	72
EN-Anteil [%]	50

Bei der Berechnung der Streckenenergie für die ersten zwei Lagen, nach Gleichung (3), ergibt sich eine mittlere Streckenenergie $E_s = 1,32$ kJ/cm. Ab der dritten Lage wurde einer mittleren Streckenenergie $E_s = 1,7$ kJ/cm geschweißt. Auf den ersten Blick erscheint die eingebrachte Wärmeenergie der ersten beiden Lagen geringer, sodass die getroffene Annahme, der verbesserten Anbindung, zunächst als nicht erfüllt erscheint. Mit Hinblick auf den erhöhten Drahtvorschub $v_D = 7,5$ m/min und der erhöhten Streckenenergie in der positiven Phase durch den EN-Anteil = 90 %, wird der Drahtwerkstoff jedoch intensiver thermisch beansprucht, vergleiche Abbildung 17. Durch das größere und heißere Schmelzvolumen wird, trotz geringerer mittlerer Streckenenergie, eine ausreichende Anbindung an das Substrat möglich. Der 3D-Scan der geschweißten Wandstrukturen in Abbildung 29 zeigt, dass die Wandstärken im Vergleich zu den Wandstrukturen der EN AW 5183 um ein Vielfaches geringer sind. Für $T_{ZW} = 40$ °C lag diese bei $b_{mittl} = 5,1$ mm, für $T_{ZW} = 100$ °C bei $b_{mittl} = 5,2$ mm und für $T_{ZW} > 300$ °C bei $b_{mittl} = 5,8$ mm. Abbildung 29 zeigt jedoch auch, dass einige Oberflächendefekte, die Raupengeometrie beeinflussen und folglich die Endkontur herabsetzen. Hervorzuheben sei an dieser Stelle jedoch, dass die mittlere Wandstärke nahezu unabhängig von der Zwischenlagentemperatur entlang der Struktur konstant bleibt. Sowohl die Wärmeleitfähigkeit, als auch die Schmelzviskosität der EN AW 6063 Legierung zeigen, dass es somit möglich wäre, ohne den üblichen, notwendigen Wartezeiten, vergleichbare Lagengeometrien zu erzeugen.

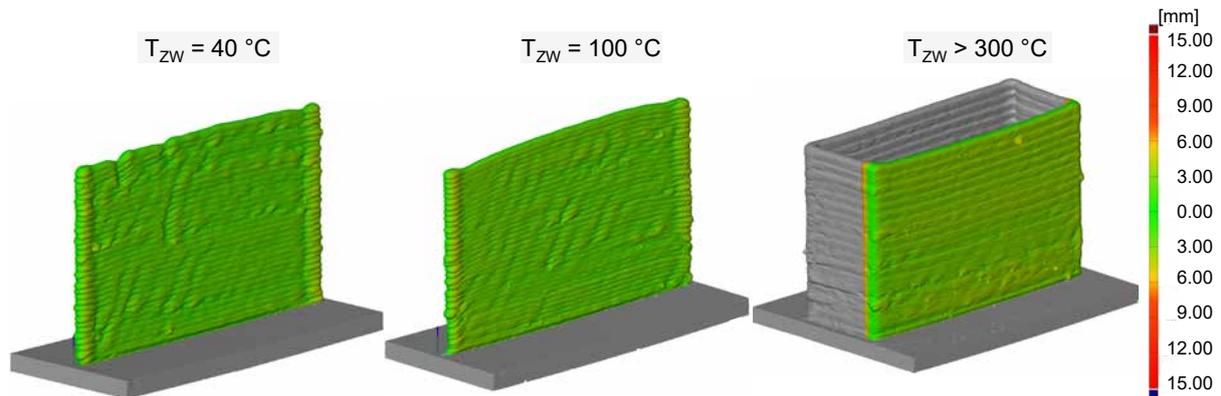


Abbildung 29: 3D-Scans der gefertigten Wandstrukturen aus EN AW 6063 mit unterschiedlichen Zwischenlagentemperaturen

Aus den geschweißten Strukturen wurden, entsprechend den Untersuchungen der EN AW 5183, Querschliffe entnommen und metallografisch bearbeitet. Um die erzeugten mechanisch-technologischen Eigenschaften zu ermitteln, wurden erneut in den charakteristischen Bereichen Härtemessungen durchgeführt, vergleiche Abbildung 30. Die Proben mit den Zwischenlagentemperaturen $T_{ZW} = 40\text{ °C}$ und $T_{ZW} = 100\text{ °C}$ zeigen dabei marginale Unterschiede. In beiden substratnahen Bereichen a) liegen die Härten bei ca. $51,1 \pm 0,9\text{ HV1}$. Mit steigender Aufbauhöhe findet die Wärmeableitung primär über die dünnwandige Struktur statt, sodass hier der thermisch quasi-statische Zustand eintritt, Abbildung 30 b). Bei einer Zwischenlagentemperatur $T_{ZW} = 100\text{ °C}$ sinkt, durch den geringer werdenden Temperaturgradienten, die Härte von $49,8\text{ HV1}$ ($T_{ZW} = 40\text{ °C}$) auf $47,4\text{ HV1}$ ($T_{ZW} = 100\text{ °C}$). In den obersten Lagen c) sind höhere Härtewerte von durchschnittlich $51,8 \pm 0,3\text{ HV1}$ vorhanden. Dies kann damit begründet werden, dass die zuletzt aufgetragenen Lagen keine bis maximal eine Wärmenachbehandlung durch eine anschließende Überschweißung, erfahren haben. Nach demselben Prinzip lassen sich auch die Härtewerte der $T_{ZW} > 300\text{ °C}$ begründen. Allerdings liegen diese aufgrund des sehr geringen Temperaturgradienten signifikant niedriger. Im thermischen quasi-statischen Zustand b) sinken die Härtewerte auf durchschnittlich $37,6\text{ HV1}$ ($T_{ZW} < 300\text{ °C}$). Auch die Bereiche a) und c) erreichen im Mittel lediglich $49,2 \pm 0,1\text{ HV1}$.

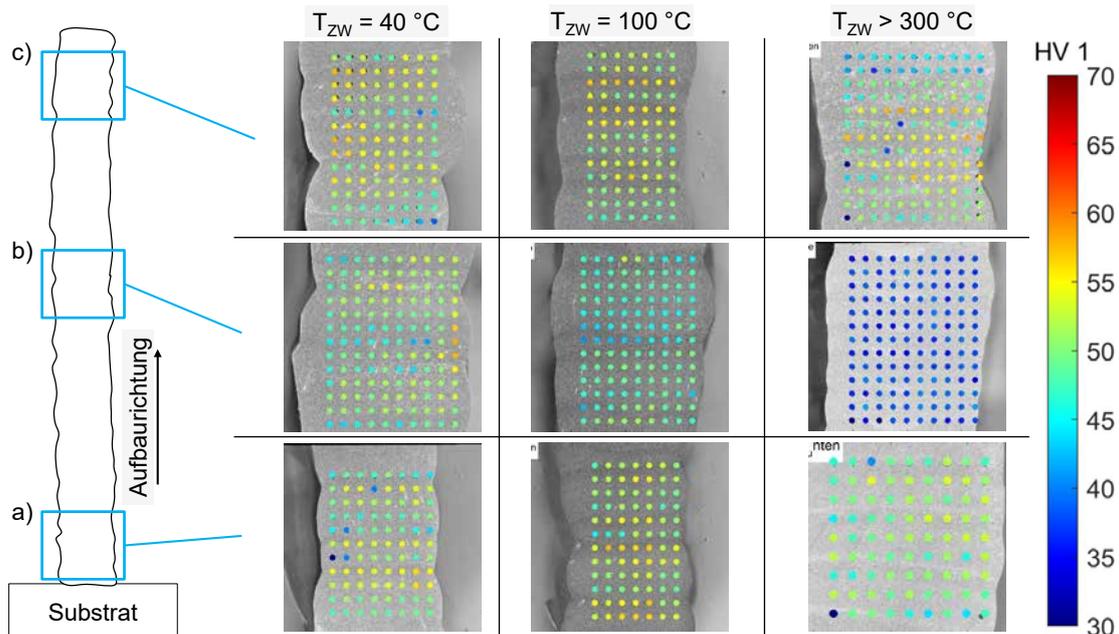


Abbildung 30: schematische Darstellung der gemessenen Bereiche der Wandstrukturen (a), (b) und (c) und die gemessenen Härtewerte einer EN AW 6063 mit den Zwischenlagentemperaturen $T_{ZW} = 40\text{ °C}$, $T_{ZW} = 100\text{ °C}$, $T_{ZW} > 300\text{ °C}$.

Um die erreichten Härtewerte validieren zu können, liegen allerdings keine exakten Normdaten zur Verfügung. Beispielsweise gelten angegebene Werte für eine EN AW 6063 aus der Norm DIN EN 754 - 2 lediglich für Strangpress- und Rundprofile und nicht für geschweißte Strukturen. Weiter werden die typischen Werte in Brinell (HBW) angegeben. Eine Vergleichstabelle für Aluminiumlegierungen mit HV1 und HBW ist nicht bekannt. Die Norm DIN EN ISO 18265 stellt für Aluminiumknetlegierungen jedoch in Tabelle f.5 dar, dass Vickerswerte mit HV10 bis zu einem Wert 90 vergleichbar mit Brinellwerte (HB) sind [DIN14c]. Dabei liegen die HV10 Werte im Durchschnitt um den Wert 3,5 höher als die HB Werte. Für einen Vergleich der erreichten Härtewerte mit vorhandenen Normwerten werden die gemessenen Härtewerte aus den Versuchen um 3,5 subtrahiert, um als Brinell (HBW) zu gelten. In der DIN EN 754 – 2 wird für gezogene Stangen der wärmebehandelte Zustand T4 mit einem typischen Wert von 50 HBW deklariert [DIN17]. Dieser Minimalwert wird von den geschweißten Wandstrukturen, unabhängig von der Zwischenlagentemperatur, nicht erreicht. Vergleichsweise wird für gezogene Rohre im wärmebehandeltem Zustand H111, O ein HBW von 25 angegeben. Die gemessenen Härtewerte liegen dazwischen, wobei die Härtewerte aus dem mittleren Bereich b) der $T > 300\text{ °C}$ Struktur besonders hervorstechen.

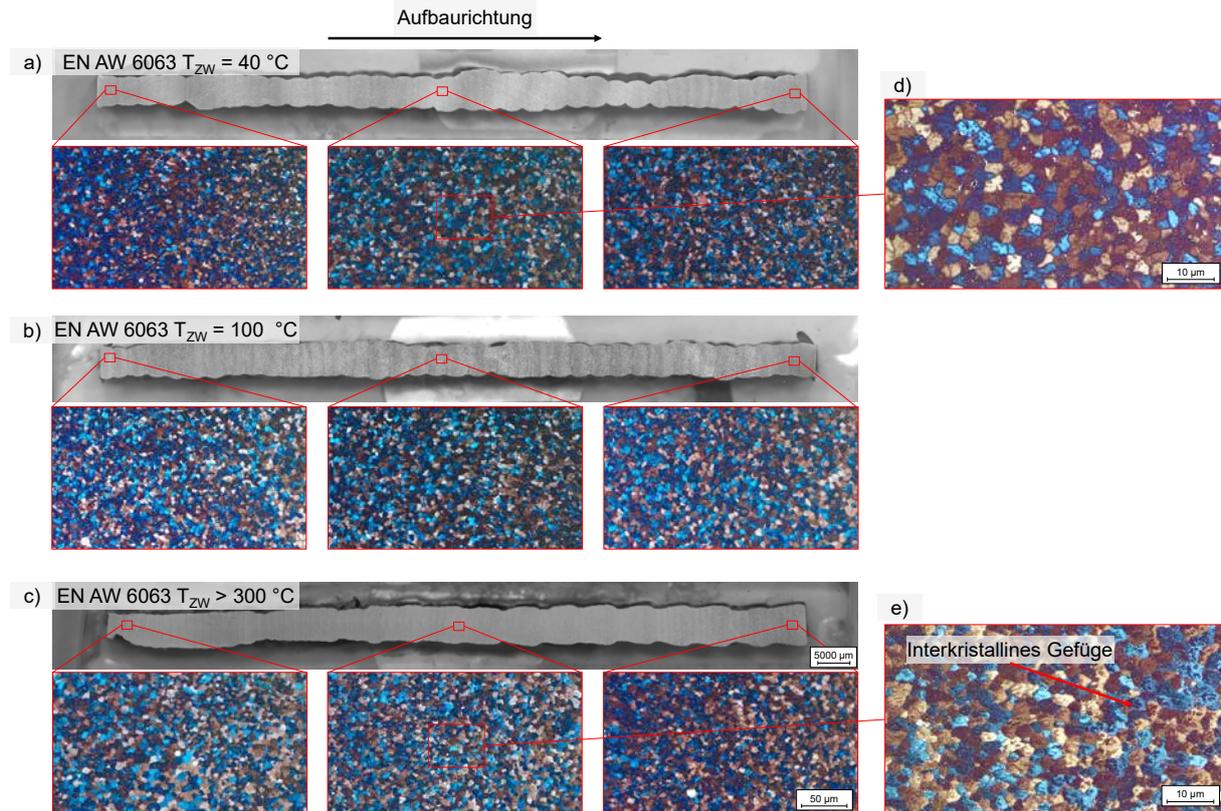


Abbildung 31: Gefügemorphologie der Wandstrukturen aus EN AW 6063 mit Zwischenlagentemperaturen a) $T_{ZW} = 40\text{ °C}$, b) $T_{ZW} = 100\text{ °C}$ und c) $T_{ZW} > 300\text{ °C}$. Detailliertere Aufnahmen aus den thermisch quasi-statischen Bereichen von d) $T_{ZW} = 40\text{ °C}$ und e) $T_{ZW} > 300\text{ °C}$.

Um den Härteunterschied nachzuvollziehen, wurden für die jeweiligen Bereiche metallografische Untersuchungen durchgeführt, siehe Abbildung 31. Die Wandstrukturen wurden hierzu mit einem Ätzmittel nach Barker anodisiert und unter polarisiertem Licht mikroskopiert. Anhand der Ätzung können sowohl die Korngrößen, als auch deren Ausrichtung im Gefüge farblich dargestellt werden. Es zeigt sich, dass in den geprüften Bereichen keine signifikante Veränderung der Korngröße vorliegt. Zurückzuführen ist dies auf die in der EN AW 6063 vorliegenden kornfeinenden Ti_5B_1 -Partikel. Demnach kann eine Entfestigung durch ein Kornwachstum zunächst ausgeschlossen werden. Die Vermutung liegt nahe, dass durch die länger anhaltenden Temperaturregime bestimmte Diffusionsvorgänge begünstigt werden, sodass entfestigende interkristalline Verbindungen gebildet werden. Im direkten Vergleich des thermisch quasi-statischen Zustandes für $T_{ZW} = 40\text{ °C}$ und $T_{ZW} > 300\text{ °C}$ ist zu erkennen, dass sich innerhalb der Kornstrukturen interkristalline Verbindungen gebildet haben, vergleiche Abbildung 31 d) und e). Diese sind in e) als dunklere Flecken innerhalb eines Kornes erkennbar.

Fest steht, dass die geschweißten Wandstrukturen entlang der Aufbauhöhe inhomogene Eigenschaften aufweisen und mit einer Zunahme der Zwischenlagentemperatur die Festigkeit der Aluminiumlegierung negativ beeinflusst wird. Im Vergleich zu der naturharten EN AW 5183 wird auch ersichtlich, dass die mechanisch-technologischen Eigenschaften der aushärtbaren EN AW 6063 abhängig von der resultierenden Temperaturführung sind. Um homogene Eigenschaften zu erzielen und die angegebenen Werte bestimmter wärmebehandelter Zustände zu erreichen, ist eine Wärmenachbehandlung zwingend erforderlich.

Zylindrische Strukturen

Die Entfestigung an den Wandstrukturen lässt den Anschein zu, dass ebenfalls an zylindrischen Strukturen ebenfalls Entfestigungsvorgänge zu erwarten sind. Abbildung 32 zeigt einseitige Querschliffe und Härtemessungen geschweißter, zylindrischer Rohrstrukturen aus EN AW 6063 mit den Durchmessern $d = 30\text{ mm}$, $d = 50\text{ mm}$ und $d = 100\text{ mm}$. Die Härtemessung an dieser Stelle erfolgte mittels UCI Härtescanner vom Typ UT200 der

Firma BAQ. Dadurch war es möglich, die Anpresskraft und die Haltezeit zu reduzieren und ein signifikant höher aufgelöstes Prüffeld über die gesamte Probe zu erzeugen. Gemessene Härtewerte sind dabei nach Norm DIN 50159 als UCI zu kennzeichnen.

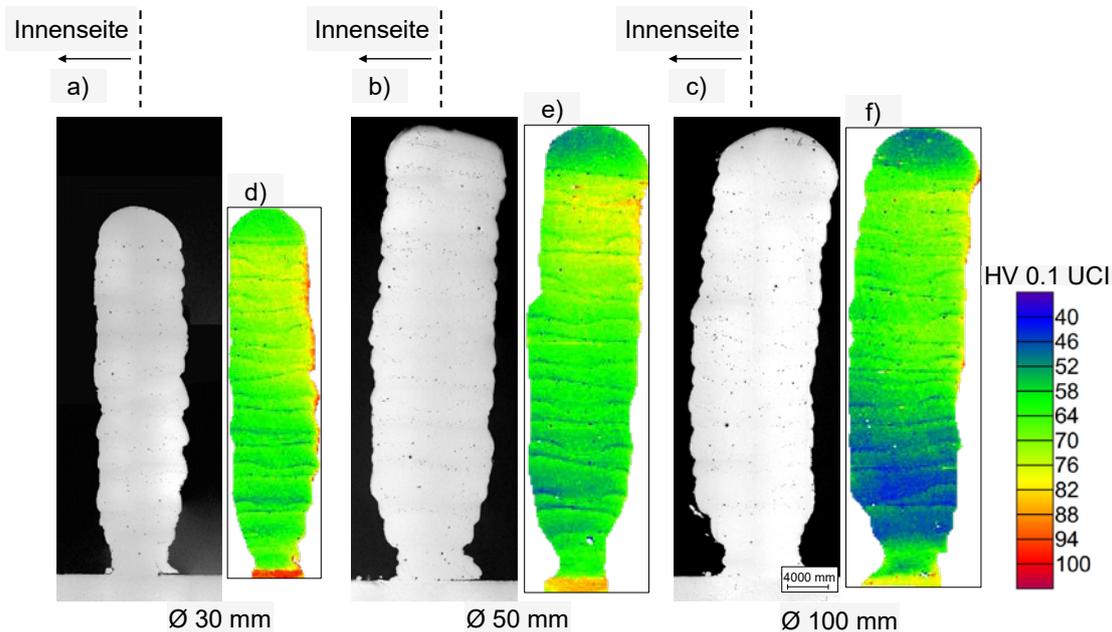


Abbildung 32: Einseitige Querschliffe und dazugehörige UCI Härtemessung von zylindrischen Strukturen aus EN AW 6063 mit Durchmessern $d = 30$ mm, $d = 50$ mm und $d = 100$ mm.

Entlang der Aufbauhöhe in Abbildung 32 d) ist zu erkennen, dass die Außenseite höhere Härtewerte aufweist, als die Innenseite. Aufgrund der Wärmestrahlung der gegenüberliegenden Struktur auf der Innenseite der Rohrgeometrie, ist mit einem geringeren Temperaturgradienten und folglich einer erhöhten thermischen Beanspruchung zu rechnen. Die resultierende schlechtere Abkühlung führt zu einer Entfestigung auf der Innenseite der zylindrischen Struktur. Der Effekt nimmt bei zunehmenden Durchmesser tendenziell ab, ist jedoch bei einem Durchmesser von $d = 100$ mm immer noch ersichtlich. Anhand der UCI Härtemessung wird ebenfalls deutlich, dass es an den Lagengrenzen zu einer signifikanten Entfestigung kommt. Im Falle einer Beanspruchung in Aufbaurichtung wären diese Bereiche potentielle Sollbruchstellen. Für die additive Herstellung von AluTruss Rohrprofilen würde dies bedeuten, dass die Rohrgeometrien über den Querschnitt inhomogene mechanische Eigenschaften aufweisen. Um dem entgegenzuwirken sind Wärmenachbehandlungen notwendig.

Vergleich der EN AW 5183 und EN AW 6063

Beide Legierungen sollen im Folgenden verglichen und für die folgenden Untersuchungen hinsichtlich ihrer Eignung für die additive Herstellung des topologieoptimierten Dreigurtträger Knotens bewertet werden.

Endkontur

Tabelle 16 fasst die erreichten Endkonturen der beiden Legierungen in Abhängigkeit der Zwischenlagentemperatur zusammen. Dabei wurden die Endkonturen entsprechend der Gleichung (4) ermittelt. Die EN AW 5183 sticht mit nahezu konstanten Endkonturen > 78 % hervor. Bei der EN AW 6063 wird die Raupengeometrie und damit auch die Endkontur maßgeblich durch die bereits beschriebenen thermischen Effekte beeinflusst, so dass hier geringe Werte von beispielsweise 40 % erreicht werden. Eine geringere Endkontur spricht dabei für eine hohe Oberflächenwelligkeit und im Falle einer Belastung für eine erhöhte Kerbwirkung.

Tabelle 16: Vergleich der Endkonturen für EN AW 5183 und EN AW 6063 in Abhängigkeit der Zwischenlagentemperaturen

	$T_{ZW} = 40\text{ °C}$			$T_{ZW} = 100\text{ °C}$			$T_{ZW} > 300\text{ °C}$		
	b_{max}	b_{min}	Endkontur	b_{max}	b_{min}	Endkontur	b_{max}	b_{min}	Endkontur
EN AW 5183	8628,7 μm	7371,4 μm	85 %	9853,6 μm	7712,7 μm	78 %	8791,3 μm	7282,6 μm	83 %
EN AW 6063	7106,2 μm	2824,5 μm	40 %	5882,8 μm	3772,0 μm	64 %	6878,3 μm	5133,2 μm	75 %

Abkühlverhalten und Prozesszeiten

Wie für Abbildung 14 beschrieben, wurden bei der Herstellung der Wandstrukturen Thermolemente in die Schmelze eingebracht, um das Abkühlverhalten in Abhängigkeit der Zwischenlagentemperatur zu detektieren. Abbildung 33 a) stellt, exemplarisch für die ausgewerteten Temperaturverläufe, den Temperaturverlauf der EN AW 5183 über die gesamte Schweißzeit dar. Weitere Temperaturverläufe der geschweißten Wandstrukturen sind der Anlage A beigefügt. Im Temperatur – Zeit – Diagramm sind dabei die gemessenen Temperaturen der Thermolemente 1 bis 3 übereinander farblich gekennzeichnet. Ein jeder Peak entspricht dabei einer neu aufgetragenen Schweißlage, da durch die Überfahrt des Lichtbogens die Temperatur signifikant erhöht wird. Je weiter der Lichtbogen von der Messtelle entfernt ist, bedingt durch die aufbauenden Schweißlagen, desto geringer die Wiedererwärmung durch den Lichtbogen. Abbildung 33 b) stellt einen direkten Vergleich zwischen der EN AW 5183 und EN AW 6063 dar. Dargestellt sind die Temperaturkurven zu Beginn der Messung am Thermolement 2 für eine Zwischenlagentemperatur $T_{ZW} = 40\text{ °C}$. Mit der Annahme, dass die Rekristallisationstemperatur $T_{Rekris} = 0,45 * T_{Schmelz}$ beträgt [ROO08], zeigen die Verläufe, dass eine bereits aufgetragene Schweißlage nachträglich mindestens 6 - mal oberhalb der T_{Rekris} gebracht wird. Dies verdeutlicht den Entfestigungsmechanismus der EN AW 6063. Abbildung 33 b) zeigt auch, dass durch die höhere Wärmeleitung der EN AW 6063 in einer definierten Zeit mehr Lagen als bei der EN AW 5183 geschweißt werden können. Im Zeitraum von 25 min können z.B. für die EN AW 6063 12 Lagen und für die EN AW 5183 lediglich 6 Lagen, unter Einhaltung der Zwischenlagentemperatur, aufgebracht werden.

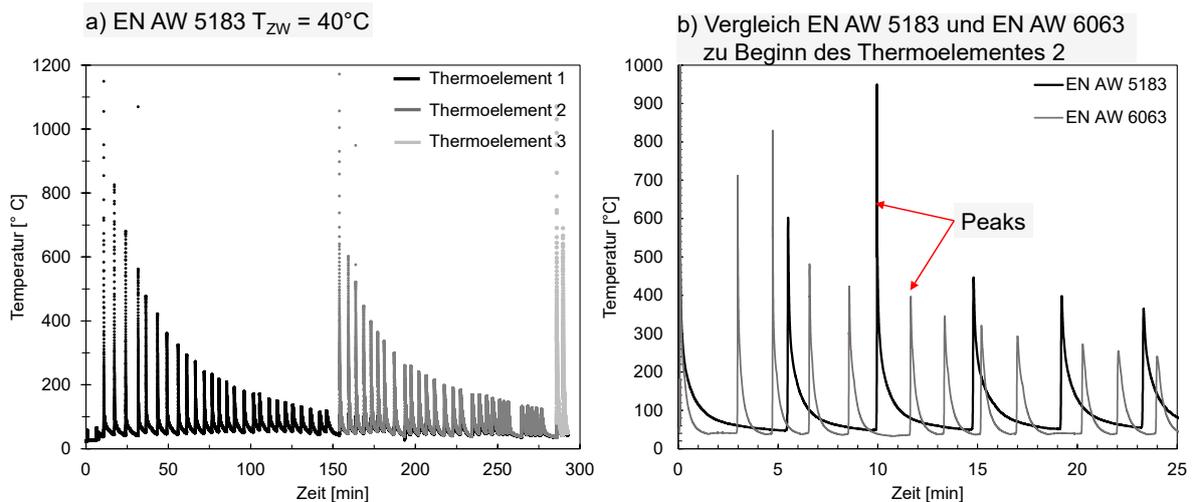


Abbildung 33: a) Temperaturverlauf der EN AW 5183 für $T_{ZW} = 40\text{ °C}$. b) Vergleich der Temperaturkurven der EN AW 5183 und EN AW 6063 für $T_{ZW} = 40\text{ °C}$ zu Beginn der Messung am Thermoelement 2.

In Abhängigkeit der Zwischenlagentemperatur wurden die notwendigen Gesamtprozesszeiten ausgewertet und in Abbildung 34 aufgetragen. Für $T_{ZW} = 40\text{ °C}$ ist ein deutlicher Unterschied der Prozesszeiten erkennbar. Aufgrund der unterschiedlichen thermischen Eigenschaften ergibt sich für die EN AW 5183 durch die schlechteren Abkühlvorgänge eine nahezu doppelt so hohe Gesamtprozesszeit. Für die Zwischenlagentemperatur $T_{ZW} = 100\text{ °C}$ ist kein Unterschied zwischen den Prozesszeiten erkennbar. In diesem Temperaturregime weisen beide Legierungen ein ähnliches Abkühlverhalten auf. Die Gesamtprozesszeit reduziert sich dabei für die EN AW 5183 um ein Vielfaches mehr als für die EN AW 6063. Der Vergleich bei einer Zwischenlagentemperatur $T_{ZW} > 300\text{ °C}$ zeigt, dass die Prozesszeit der EN AW 5183 die Prozesszeit der EN AW 6063 sogar unterschreitet. Dies ist allerdings nicht zwangsläufig auf veränderte Abkühlvorgänge zurückzuführen, sondern auf die definierte, erreichte Wandhöhe. Die Schweißlagen der EN AW 5183 waren für $T_{ZW} > 300\text{ °C}$ höher als die der EN AW 6063, sodass die maximale Wandhöhe von ca. 105 mm mit einer geringeren Lagenanzahl erreicht wurde. Demnach wurde der Prozess früher beendet.

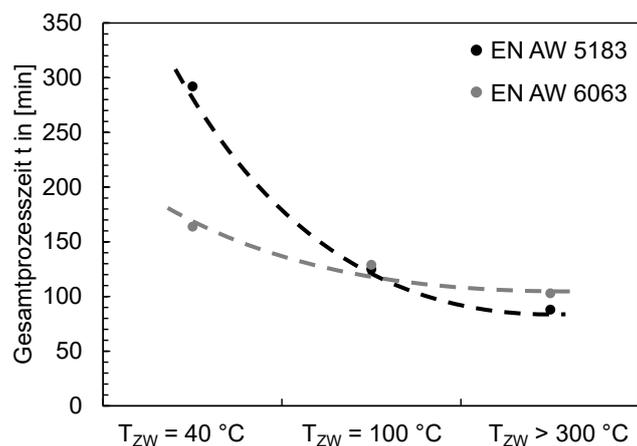


Abbildung 34: Gesamtprozesszeit der Wandstrukturen in Abhängigkeit der Zwischenlagentemperatur für die Aluminiumlegierungen EN AW 5183 und EN AW 6063.

Aus wirtschaftlicher Sicht empfiehlt es sich die Zwischenlagentemperatur so hoch wie möglich zu wählen, um minimale Prozesszeiten zu realisieren. In Anbetracht der resultierenden mechanisch – technologischen Eigenschaften jedoch ist ein Kompromiss zwischen maximaler Zwischenlagentemperatur und Gefügemorphologie zu wählen.

Mechanisch - technologische Eigenschaften

Abschließend wurden die geschweißten Wandstrukturen einer quasi-statischen Zugprüfung unterzogen. Abbildung 35 stellt die Ergebnisse der maximalen Zugfestigkeit und den erreichten Dehnungen für die Aluminiumlegierung a) EN AW 5183 und b) EN AW 6063 dar. Um einen Einfluss der Aufbaustrategie zu ermitteln, wurden Zugproben entlang und quer zur Aufbaurichtung geprüft. Somit sind pro Zwischenlagentemperatur drei Querproben und drei Längsproben untersucht worden. Die Streckgrenze f_0 (oder $R_{p0.2}$) wird beispielhaft in Abbildung 36 ermittelt. Die erreichten Werte werden mit den Angaben des Eurocode 9 und den Herstellerangaben verglichen. Diese sind in Tabelle 17 zusammengefasst.

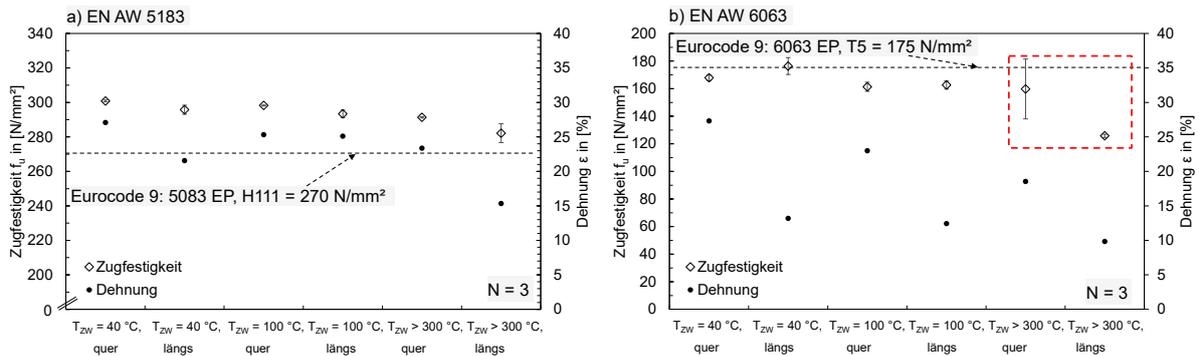


Abbildung 35: Maximale Zugfestigkeiten und Dehnungen in Abhängigkeit der Zwischenlagentemperatur und Aufbaurichtung (quer, längs) für a) EN AW 5183 und b) EN AW 6063.

Die Ergebnisse der EN AW 5183 zeigen mit Erhöhung der Zwischenlagentemperatur einen marginalen Abfall der maximalen Zugfestigkeit. Auch ist erkennbar, dass Zugproben längs zur Aufbaurichtung um ca. 5 - 10 MPa weniger belastet werden können, als Zugproben quer zur Aufbaurichtung. Diese richtungsabhängige Abweichung kann mit den Grenzflächen der einzelnen Schweißraupen erklärt werden, vergleiche z.B. Abbildung 19, blaue Linien. An diesen Grenzflächen können sich die meisten Unregelmäßigkeiten, wie beispielsweise Poren oder Ausscheidungen, ansammeln. Im Falle einer Längsprobe, greift die Zugkraft orthogonal auf die Querschnittsfläche einer Grenzfläche. Diese ist dann gleich der Prüffläche (Prüfdicke a_0 x Prüfbreite b_0) der Zugprobe. Im Falle einer Querprobe, greift die Zugkraft entlang der Grenzfläche, sodass sich die geprüfte Grenzfläche nun mit der Prüfdicke a_0 und der Gesamtlänge L_t definieren lässt. Je nachdem wie die Probe aus der Struktur entnommen bzw. gefräst wurde, können auch mehrere Grenzflächen parallel vorliegen. Unter Berücksichtigung der geringen richtungsabhängigen Abweichung von ca. 2,5 % kann dennoch ein isotropes Verhalten beobachtet werden. Verglichen mit den angegebenen Werten aus dem Eurocode 9 oder den Herstellerangaben kann festgehalten werden, dass unabhängig von der Zwischenlagentemperatur die erreichten maximalen Zugfestigkeiten mindestens einem wärmebehandeltem Zustand H111 entsprechen. Bei der Betrachtung der Dehnung ist ebenfalls ein richtungsabhängiger Trend zu erkennen. Geprüfte Zugproben längs zur Aufbaurichtung zeigen eine geringere Dehnung als Zugproben quer zur Aufbaurichtung. Dabei sind die Abweichungen in Abhängigkeit der Zwischenlagentemperatur deutlich höher als bei den maximalen Zugfestigkeiten. Die Werte streuen zwischen 27 % bis 15 %, liegen jedoch im angegebenen Bereich des Eurocode 9 bzw. der Herstellerangaben.

Die Ergebnisse der EN AW 6063 zeigen einen ähnlichen Trend wie die Ergebnisse der EN AW 5183, siehe Abbildung 35 b). Die maximalen Zugfestigkeiten der Zwischenlagentemperaturen $T_{ZW} = 40^\circ\text{C}$ und $T_{ZW} = 100^\circ\text{C}$ zeigen vergleichbare Werte bei ca. 167 MPa. Wohingegen die maximalen Zugfestigkeiten für $T_{ZW} > 300^\circ\text{C}$ signifikante Abweichungen aufzeigen. Die Entfestigung des Gefüges durch die hohen Zwischenlagentemperaturen deckt sich mit den Ergebnissen der Härtemessung. Der richtungsabhängige Abfall der Festigkeit kann auch bei dieser Aluminiumlegierung festgestellt werden. Die angegebenen Festigkeiten für einen wärmebehandelten Zustand T5 werden nur bedingt erreicht. Hinsichtlich der Dehnung ist ebenfalls eine richtungsabhängige Abweichung zu erkennen, welche mit den unterschiedlichen Prüfflächen der Grenzflächen erklärt werden

kann. Dabei erfüllen die erreichten Dehnungen die angegebenen Werte, trotz einer Streuung zwischen 27 % und 9 %.

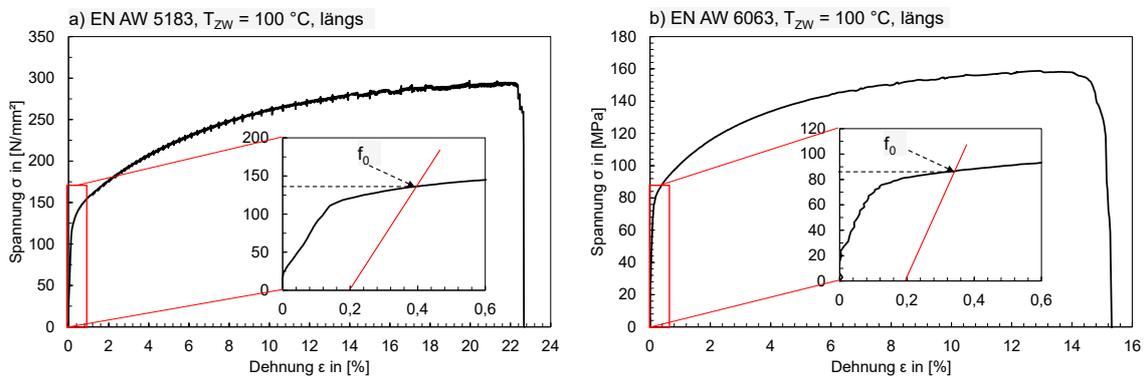


Abbildung 36: Dehnung-Spannung-Diagramme für a) EN AW 5183 und b) EN AW 6063 mit einer Zwischenlagertemperatur $T_{ZW} = 100 \text{ °C}$ und einer Prüfrichtung längs zur Aufbaurichtung. Detailliert dargestellt, die jeweiligen Bereiche zum Ablesen der erreichten f_0 (bzw. $R_{p0,2}$) Werte.

Für die jeweiligen Zugproben wurden Dehnung – Spannung - Diagramme erzeugt, um die erreichten Dehn-
grenzen f_0 analytisch ablesen zu können. Abbildung 36 zeigt für die Auswertung exemplarisch das Vorgehen
für a) EN AW 5183 und b) EN AW 6063. Zunächst wird die hook'sche Gerade parallel entlang der x-Achse in den
Wert 0,2 % verschoben. Am Schnittpunkt mit der Spannungskurve ist die Dehngrenze abzulesen. Für die EN
AW 5183 lässt sich hier eine Dehngrenze $f_0 = 136 \text{ MPa}$ und für die EN AW 6063 eine Dehngrenze $f_0 = 87 \text{ MPa}$
ablesen. Die Auswertungen für die restlichen Zugproben sind in der Anlage B beigefügt. Die erreichten Werte
liegen erneut im Bereich der angegebenen Normwerte bzw. Herstellerangaben.

Tabelle 17: Angegebene Werte für Dehngrenze f_0 , Zugfestigkeit f_u und Dehnung A für die Aluminiumlegierungen EN AW 5083 und EN AW 6063 aus dem Eurocode 9 bzw. aus den Herstellerangaben des verwendeten Zusatzwerkstoffes.

	Werkstoff	f_0 [MPa]	f_u [MPa]	A [%]
Eurocode 9	EN AW 5083 H111	110	270	12
Herstellerangaben	EN AW 5183	130	275	18
Eurocode 9	EN AW 6063 T5	130	175	8
Herstellerangaben	EN AW 6063 F	80	150	15

Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Versuchsreihen

Beide Legierungen wurden systemisch hinsichtlich der Raupengeometrie, der Temperaturführung und der mechanisch - technologischen Eigenschaften untersucht. Dabei wurde der Einfluss der Prozessparameter, insbesondere der positiven und negativen Streckenenergie, des EN-Anteils und des Grundstromes auf die einzelne Schweißraupe diskutiert. Die Erkenntnisse wurden auf mehrlagige, geradlinige und zylindrische Strukturen übertragen, sodass die Grundlage für die Herstellung großvolumiger Strukturen gegeben ist.

Die Untersuchungen zu der Aluminiumlegierung EN AW 5183 zeigten unabhängig von der Zwischenlagentemperatur gleichmäßige Raupengeometrien auf, welche eine gute Anbindung sowohl auf die Substratplatte, als auch auf die nachfolgenden Schweißraupen aufwiesen. Hinsichtlich der Prozessstabilität sind so weniger Defekte wie Bindefehler oder Abweichungen zu erwarten. Dem gegenüber veranschaulichen die Ergebnisse der EN AW 6063, dass das Benetzungsverhalten und die Ausbildung der Raupengeometrie stark von der Temperaturführung abhängen. Zurückzuführen sei dies auf die verhältnismäßig höhere Wärmeleitfähigkeit. Um dies steuern zu können, empfiehlt es sich, die Substratplatte vorzuwärmen und mit höheren Zwischenlagentemperaturen zu arbeiten, sodass geringe Temperaturgradienten vorliegen. Allerdings entspräche eine Vorwärmung, durch z.B. Ofen oder Heizplatte, einer zusätzlichen, externen Energieeinbringung, welche negativ in die Ökobilanz einfließen würde. Bei der Übertragung auf mehrlagige Strukturen wurden insbesondere Defekte wie Poren oder Bindefehler betrachtet und die entstandenen Endkonturen bewertet. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass unabhängig von der Zwischenlagentemperatur und den eingestellten Prozessparametern für beide Legierungen ein Porenanteil der Bewertungsgruppe B möglich ist. Der größte Unterschied jedoch liegt in der Temperaturführung und der daraus resultierenden Gefügemorphologie. Unabhängig von der Zwischenlagentemperatur bildet die EN AW 5183 entlang der Struktur nahezu konstante mechanisch - technologische Eigenschaften. Die EN AW 6063 hingegen ist stark temperaturabhängig. In Abhängigkeit des Abkühlverhaltens treten unterschiedlich starke Entfestigungsmechanismen auf. Um Prozesszeiten zu sparen, empfiehlt es sich für beide Verfahren mit Zwischenlagentemperaturen $T > 100 \text{ °C}$ zu arbeiten. Jedoch ist in jedem Fall eine weitere Wärmenachbehandlung der EN AW 6063 notwendig, um isotrope, mechanisch-technologische Eigenschaften zu erzielen.

Im Sinne der Wirtschaftlichkeit und der Prozesssicherheit wird sich dafür entschieden, die weiteren Untersuchungen mit Hilfe der EN AW 5183 fortzuführen. Somit werden die numerischen Simulationen und die Herstellung des Demonstrators auf Grundlage der zur Verfügung stehenden Daten einer EN AW 5083 herangezogen.

Simulationsmodelle

Werkzeuge zur numerischen Simulation

Ansys Workbench

Mit Hilfe der Ansys Workbench Software (Version 21.2a) sollen in den kommenden Abschnitten der Dreigurtträger Knoten und die mechanischen Untersuchungen numerisch abgebildet werden. Hierzu wird zunächst ein Geometriemodell des Knotens und des gesamten Lastfalles erstellt und in Ansys Workbench hochgeladen. Die Geometriemodelle werden fortan mit einer konstanten Elementgröße von max. 20 mm zerlegt und mit einem möglichst hohen Anteil an Voxel-elementen vernetzt. Somit können die einzelnen Modelle besser untereinander verglichen werden. Anhand einer statischen Strukturanalyse werden die Biegebeanspruchungen und Verformungen, sowohl in der Knotenstruktur, als auch im Gesamtsystem numerisch berechnet und als Referenzfall deklariert. In einem zweiten Schritt wird die zu optimierende Struktur hinsichtlich ihres Bauraumes erneut abstrahiert und erneut modelliert. Die berechneten Beanspruchungen und Verformungen, in Kombination mit dem abstrahierten Geometriemodell, dienen nun als Grundlage für die darauffolgende Topologieoptimierung. Die optimierte, an den Lastfall angepasste, Struktur muss in einem weiteren Schritt oberflächentechnisch korrigiert werden. Durch die Simulation entstandene Fehlstellen, scharfe Kanten, Hinterschneidungen wurden geglättet bzw. manuell behoben, sodass eine Schweißmöglichkeit für den additiven Fertigungsprozess vorliegt. In einem letzten Schritt soll die topologieoptimierte, für die additive Fertigung angepasste, Struktur in den ursprünglichen Lastfall eingesetzt werden. Somit sollen die neuen Biegebeanspruchungen und Verformungen überprüft und die Veränderung zum Referenzfall dargestellt werden.

Simufact Welding

Die thermische Simulation des Schweißprozesses und somit des Herstellungsprozesses soll mit Hilfe der Simufact Welding Software (Version 2020) erfolgen. Mit Hilfe der Schweißstruktursimulation können thermische Fügeprozesse, wie beispielsweise der Lichtbogenprozess, modelliert und berechnet werden. Die Folgen des in der additiven Fertigung charakteristischen, wiederkehrenden Wärmeeintrages können so annähernd vorhergesagt werden und Aussagen zur Temperaturführung getroffen werden. Dabei wird die Wärmewirkung des Schweißprozesses aus einer mathematischen Beschreibung des Wärmestromes in Form einer äquivalenten Wärmequelle beschrieben. In der Literatur hat sich für den Lichtbogenprozess das dreidimensional - verteilte Wärmequellenmodell von Goldak etabliert [GOL84]. Die Simulation stützt sich auf ein tetragonales FEM-Netz. Aufgrund der vorliegenden Demonstratorgeometrie und der vorhandenen Softwarelösungen zur Erstellung eines FEM-Netzes ergaben sich keine sinnvollen hexagonalen Netze, welche die benötigte Rechenleistung und Simulationszeiten erheblich reduziert hätten.

Um die angenommenen Prozesszeiten zu evaluieren, wurde ein Teilsegment im oberen Bereich des Demonstrators modelliert und mit den realen Begebenheiten validiert. Die Schweißtrajektorien wurden mit Hilfe einer importierten Bahnplanung, im G-Code, des Bauteils realisiert. Diesem G-Code wurde die Geometrie des noch zu schweißenden Bereichs, also der noch zu aktivierenden Voxel, zugewiesen. Als Ergebnis können sowohl orts aufgelöste Temperatur-Zeit-Diagramme entnommen werden, als auch Aussagen über die Anzahl der lagenweisen Wärmenachbehandlungen getroffen werden. Somit können im Vorfeld Prozessanpassungen erfolgen, um die Qualität des Demonstratorbauteils zu erhöhen.

Geometriemodell

Der Dreigurträger Knoten mit einem Öffnungswinkel von 60° lag nicht als dreidimensionales CAD-Modell vor und musste anhand zugänglicher technischer Zeichnungen nachmodelliert werden, siehe Abbildung 37 a). Dabei wurde der Dreigurträger Knoten nach den Vorgaben des Eurocode 9 konstruiert [EUR19]. Die zylindrischen Hohlprofile der Gurte haben einen Außendurchmesser von 50 mm und die Fachwerkstreben einen Durchmesser von 20 mm. Die Wandstärke sowohl der Gurte, als auch der Fachwerkstreben beträgt 2 mm. Passend zu den Abmaßen des Knotens wurden Dreigurträger modelliert, um die Lastfälle, vergleiche Abbildung 4, abzubilden. Dabei besitzen die einzelnen Dreigurträger eine Länge von je 4 m und werden via Rohrverbinder verbunden. Die senkrechten Dreigurträger werden in Endplatten auf dem Boden gefasst und ebenfalls mittels Rohrverbinder fixiert. Die Bodenplatten sind im Geometriemodell in allen 6 Freiheitsgraden fixiert. Als Begründung für die gewählten Abmaße sei auf das Anforderungsprofil verwiesen. Das gesamte Traversensystem ist in Abbildung 37 b) dargestellt.

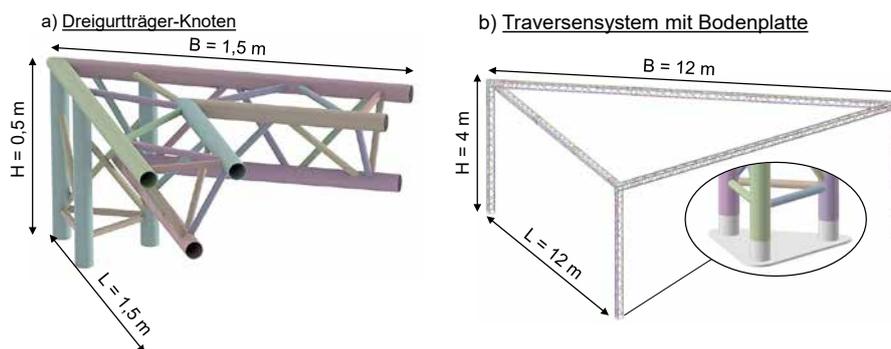


Abbildung 37: Referenzmodell des a) Dreigurträger-Knotens und des b) gesamten Traversensystems mit fixierten Bodenplatten

Für die Optimierung des Knotens unter Aspekten der Bionik ist es notwendig, den Bauraum abstrakt darzustellen. So kann, unter der Verwendung der Strukturoptimierung von Ansys Workbench, der Kraftverlauf innerhalb eines Designbereiches idealerweise berechnet werden. In den folgenden numerischen Untersuchungen gilt es zu untersuchen, ob sowohl der Bauraum, als auch das Volumen des optimierten Knotens, im Vergleich zum Referenzmodell reduziert werden kann und dabei zulässige Beanspruchungen und Verformungen eingehalten werden. Aus diesem Grund wurde das abstrahierte Geometriemodell (TopoModell1) aus Abbildung 38 b) konstruiert. Der zu optimierende Designbereich ist dabei grün markiert und besitzt ebenfalls einen Öffnungswinkel von 60° . Die Anschlussgeometrie bleibt dabei unangetastet, um eine sichere Verbindung mit den Rohrverbindern (rot) zu gewährleisten, vergleiche Abbildung 38 a).

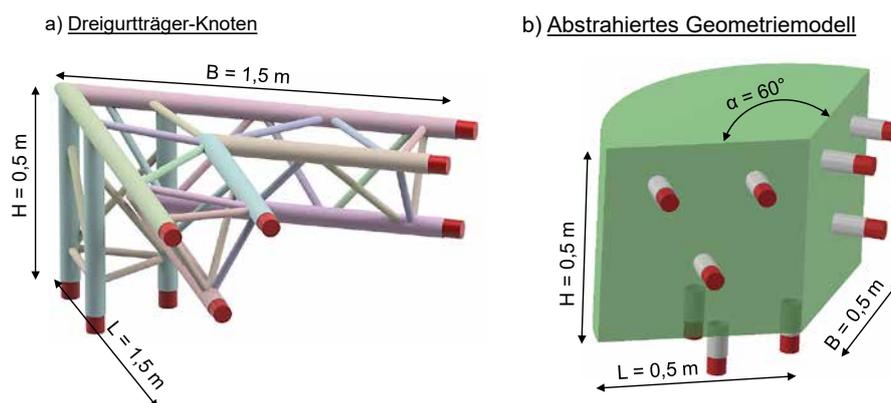


Abbildung 38: Dreigurträger Knoten mit Rohrverbindern (rot) als a) Referenzmodell und b) abstrahiertes Geometriemodell (TopoModell1).

Mechanische Untersuchung

Modellierung Referenzzustand

Zu Beginn wurden die möglichen Lastfälle: zentrale Punktlast (CPL) und gleichmäßig verteilte Last (UDL) berechnet, um einen Referenzwert für die kommenden Untersuchungen zu erhalten. Dabei wurden die entsprechenden Werte für die beiden Lastfälle verwendet. Die Lasten wurden für jede der drei Spannweiten angenommen und auf den drei Gurten (2x Obergurt, 1x Untergurt) der Dreigurtträger gleichmäßig verteilt. Aus softwaretechnischen Gründen, konnte an dieser Stelle keine vollständige Darstellung des berechneten Referenzzustandes erfolgen. Da die Lasten symmetrisch am Traversensystem anliegen, wurde je eine Schnittansicht ausgewählt, vergleiche Abbildung 39 a) und b).

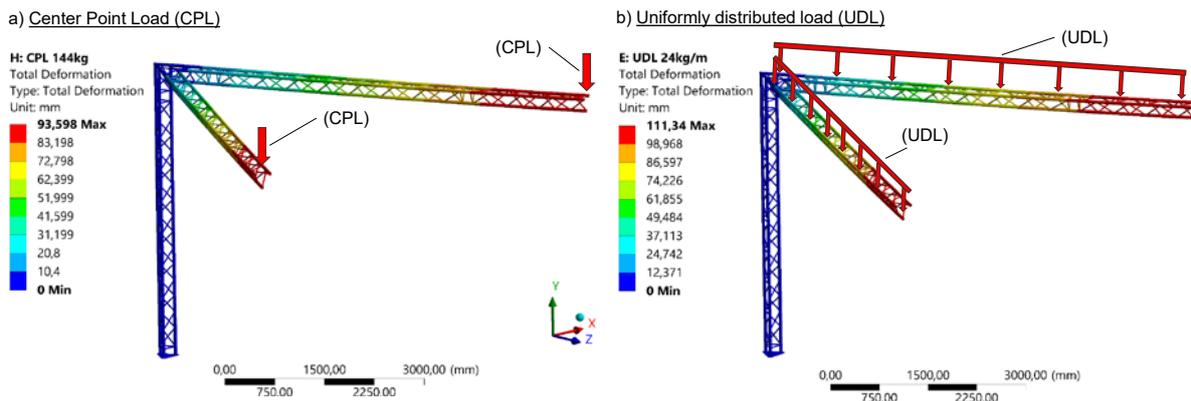


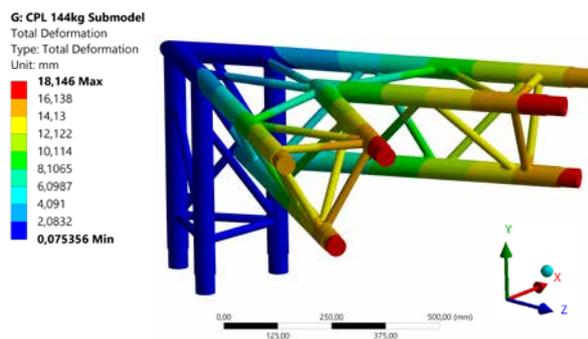
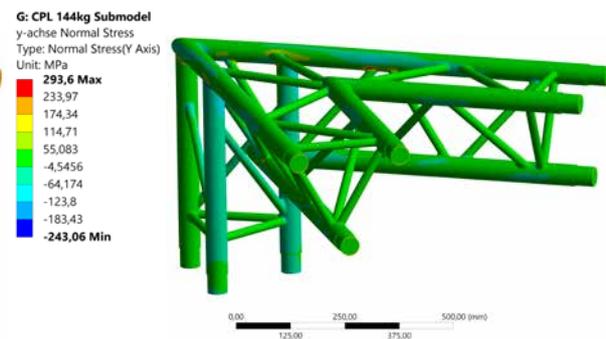
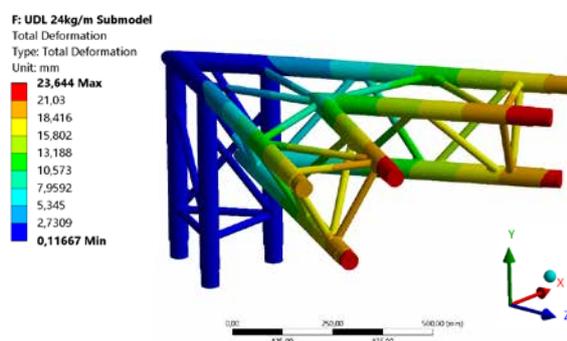
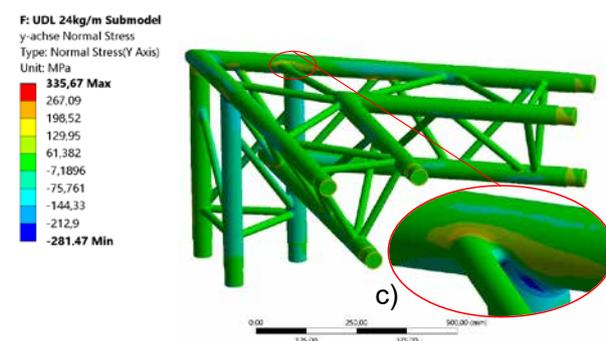
Abbildung 39: Berechnung der Verformung ϵ im Traversensystem (Schnittansicht) mit a) zentraler Punktlast (CPL) und b) gleichmäßig verteilter Last (UDL)

Aus den Berechnungen ist zu entnehmen, dass das Referenzmodell für den Lastfall (CPL) um $\epsilon_{CPL} = 93,598$ mm und für den Lastfall (UDL) $\epsilon_{UDL} = 111,34$ mm verformt wird. Verglichen mit den zulässigen Werten aus Tabelle 1 ($\epsilon_{CPL_krit} = 100$ mm bzw. $\epsilon_{UDL_krit} = 120$ mm) weichen die Verformungen um $\Delta \epsilon_{CPL} = 6,4$ % bzw. $\Delta \epsilon_{UDL} = 7,2$ % ab. Zurückzuführen sind diese Abweichungen auf das vorliegende Materialmodell für Aluminiumlegierungen in Ansys Workbench. Die Materialdaten der Software beziehen sich auf allgemeine Aluminiumlegierungen für die Luft- und Raumfahrt [MIL98]. Da es sich bei den weiteren Berechnungen lediglich um Vergleichswerte handelt, werden die Abweichungen als vernachlässigbar angesehen.

Ableiten der Beanspruchungen auf Dreigurtträger Knoten

Im nächsten Schritt wurde analysiert welche Spannungen und Verformungen der Dreigurtträger Knoten im Referenzzustand ausgesetzt ist. Hierzu wurden Submodelle aus dem Referenzzustand (CPL) und Referenzzustand (UDL) extrahiert. Abbildung 40 stellt die a) Verformung ϵ und b) Biegespannung M_{BY} (y - Achse) des Dreigurtträger Knotens im Lastfall (CPL) dar. Abbildung 41 ergänzend für den Lastfall (UDL). Aus den Abbildungen lässt sich erkennen, dass die Verformung im Lastfall (UDL) mit $\epsilon_{UDL_K} = 23,644$ mm um 23,25 % höher ist, als die Verformung im Lastfall (CPL) mit $\epsilon_{CPL_K} = 18,146$ mm.

Dieses Ergebnis korreliert mit den Daten aus dem gesamten Traversensystem. Demnach kann von einem validen Modell ausgegangen werden. Im Hinblick auf die Biegemomente M_{BY} fällt auf, dass in beiden Fällen die maximale Festigkeit, sowohl Zug als auch Druck, teilweise überschritten wird. Verglichen mit den zulässigen Festigkeitswerten einer EN AW 6061-T6, welche häufig im Traversenbau eingesetzt wird, würde ab einer Festigkeit $f_u = 290$ MPa bzw. $f_{u,haz} = 175$ MPa (für Schweißverbindungen) ein Versagensverhalten auftreten. Allerdings ist zu erkennen, dass derartige Spannungsspitzen hauptsächlich zwischen Gurt und Fachwerkstrebe auftreten, vergleiche Abbildung 41 c).

a) Verformung ϵ im Lastfall CPLb) Biegemoment M_{BY} im Lastfall CPLAbbildung 40: a) Verformung ϵ und b) Biegemoment M_{BY} des Dreigurträger Knotens im Lastfall CPLa) Verformung ϵ im Lastfall UDLb) Biegemoment M_{BY} im Lastfall UDLAbbildung 41: a) Verformung ϵ und b) Biegemoment M_{BY} des Dreigurträger Knotens im Lastfall UDL

Eine genauere Betrachtung dieser kritischen Zonen lässt darauf schließen, durch die gekrümmte Oberfläche es zu einer Verzerrung des Voxelnetzes kommt. Eine fehlerhafte Interpolation der Spannungswerte zwischen den Knotenpunkten innerhalb dieser verzerrten Regionen ist demnach nicht auszuschließen. Im Falle einer tatsächlichen, kritischen Beanspruchung wären signifikant größere Bereiche der Struktur zu erkennen. Bei der Auswertung der Oberflächenspannung zeigt sich, dass der Knoten mit ca. $\sigma_{\text{Ref}_K} = \pm 20 \text{ MPa}$ beansprucht wird.

Fazit

Das Referenzmodell zeigt sinnvolle Verformungs- und Momentenverläufe, sodass von einem validen Referenzzustand ausgegangen wird. Berechnete Verformungen des gesamten Traversensystems liegen für beide Lastfälle im zulässigen Bereich. Die Ergebnisse aus den mechanischen Untersuchungen im Referenzzustand ergaben, dass eine gleichmäßig verteilte Last (UDL) sowohl das Traversensystem, als auch den Dreigurträger Knoten stärker verformt. Auch sind die Biegemomente im Lastfall (UDL) höher als im Lastfall (CPL). Aus diesem Grund wurde für die weitere Berechnung bzw. Optimierung der kritischere Lastfall (UDL) verwendet.

Optimierung unter Aspekten der Bionik

Topologieoptimierung

Nach der Definition und Validierung des Referenzzustandes, soll das Geometriemodell nun unter Aspekten der Bionik einer Topologieoptimierung unterzogen werden. Hierzu wurde der ursprüngliche Dreigurträger Knoten durch das abstrahierte Geometriemodell (TopoModell1) im Traversensystem substituiert und erneut mechanisch untersucht, siehe Abbildung 42. Der deutliche Rückgang der Verformung auf $\epsilon = 47,347 \text{ mm}$ ist auf

die signifikant höhere Steifigkeit des abstrahierten Geometriemodells zurückzuführen, welches als Vollmaterial vorliegt. Interessant für die bevorstehende Strukturanpassung sind zum einen die Kraftverläufe innerhalb des abstrahierten Geometriemodells, zum anderen die anliegenden Verformungen und Spannungen.

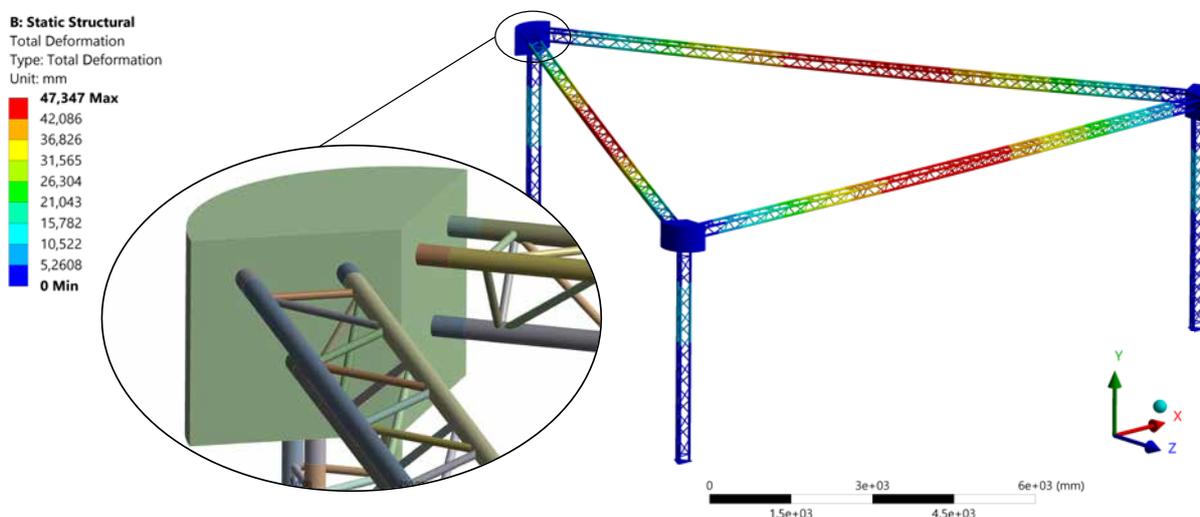


Abbildung 42: Verformung des Traversensystems mit abstr. Geometriemodell (TopoModell1) im Lastfall (UDL)

Die Zielfunktion der Topologieoptimierung war die Reduzierung der Masse bei konstanter Steifigkeit. Die Simulation wurde mit den Ergebnissen aus der vorangegangenen mechanischen Untersuchung durchgeführt. Somit wurde die Masse des Modells TopoModell1 mit einer Schrittweite von 5 % systematisch reduziert und die erhaltene Struktur ausgewertet, vergleiche Abbildung 43. Eine Restmasse zwischen 95 – 35 % ergab keine erkennbare Verbesserung der Struktur und wurden bei der Auswertung vernachlässigt. Dargestellt sind die topologieoptimierten Strukturen ab einem maximalen Restmassegehalt von 30% vom ursprünglichem TopoModell1 (100 %). Gesucht wurde eine Optimierungsstufe, bei der eine noch zusammenhängende Struktur bei minimaler Masse vorliegt. Erst ab einer Restmasse von 20 % ist das Volumen der Struktur ausreichend reduziert worden, sodass die Anschlüsse der Verbindungsstellen erkennbar sind. Eine Restmasse von 10% zeigt hingegen nicht zusammenhängende Strukturfragmente, was auf eine Überschreitung der Massenreduzierung hindeutet. Somit erschloss sich die Optimierungsstufe mit einem restlichen Masseanteil von 15% als geeignet für die weiteren Untersuchungen.

	100 %	30 %	25 %	20 %	15 %	10 %
Masse [kg]	362,59	108,02	90,086	71,719	53,61	35,423
Volumen [cm ³]	130,9	38,998	32,522	25,891	19,354	12,788

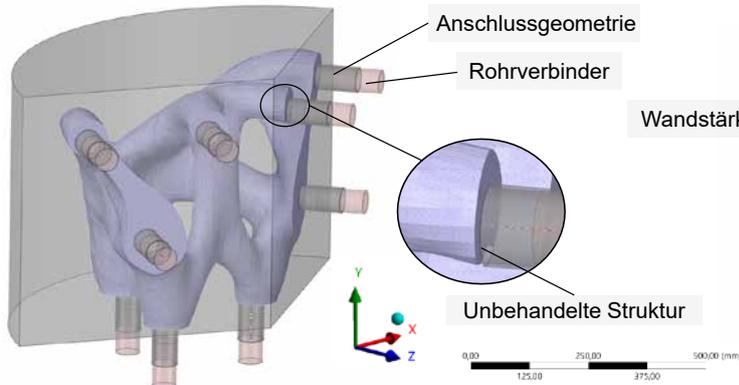
Abbildung 43: Schrittweise Topologieoptimierung des TopoModells1 (100%). Start bei 30% der Restmasse. tabellarische Darstellung der resultierenden Masse und des übrigen Volumens.

Formoptimierung

Bevor das optimierte Geometriemodell zum Einsatz kam, musste das Modell zunächst nachbehandelt werden. Hierzu wurden die, durch die Simulation, entstandenen Fehlstellen wie: scharfen Kanten, offenen Konturen, gebrochene Netzstrukturen, behoben und geglättet. Weiter war es notwendig die Anschlussgeometrien für die Rohrverbinder neu in das Geometriemodell zu implementieren. Eine vollständige Verbindung ist essentiell, sodass entstehende Kräfte und Momente innerhalb der Struktur aufgenommen und abgeleitet werden können. Entsprechend wurden die Übergänge angepasst, um vermeintliche Spannungsspitzen durch auftretende

Lasten zu vermeiden. Abschließend wurde das neue Geometriemodell TopoModell2 mit einer Wandung von $d = 2 \text{ mm}$ versehen um eine Vergleichbarkeit zum Referenzknoten zu ermöglichen, vergleiche Abbildung 44.

a) Unbehandeltes TopoModell1 (blau)



b) Nachbehandeltes Modell (TopoModell2)

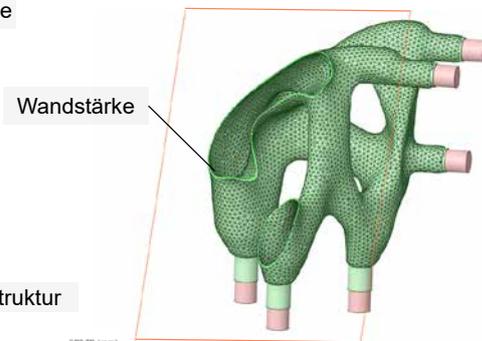


Abbildung 44: a) abstrahiertes Geometriemodell mit unbehandeltem TopoModell1 (15% Restmasse, blau) und b) Nachbearbeitetes TopoModell1 mit einer Wandstärke von 2 mm (TopoModell2)

Durch die Wandung konnte die Masse von ursprünglichen $m_{\text{TM1}} = 53,61 \text{ kg}$ auf weitere $m_{\text{TM2}} = 9,44 \text{ kg}$ reduziert werden. Das nun vorliegende TopoModell2 wurde in das Traversensystem eingesetzt und die Durchbiegung der Dreigurträger erneut berechnet, siehe Abbildung 45. Der optimierte Knoten reduziert die Verformung von $\epsilon_{\text{UDL}} = 111,34 \text{ mm}$, um 45,3 % auf $\epsilon_{\text{TM2}} = 60,965 \text{ mm}$. Um ein weiteres Optimierungspotential abzuleiten, wurden die Spannungen und Verformungen am Knoten selbst genauer analysiert. Die maximale Verformung $\epsilon_{\text{TM2}_K} = 3,41 \text{ mm}$ ist um 85,5 % geringer als die Verformung im Referenzzustand, vergleiche Abbildung 39.

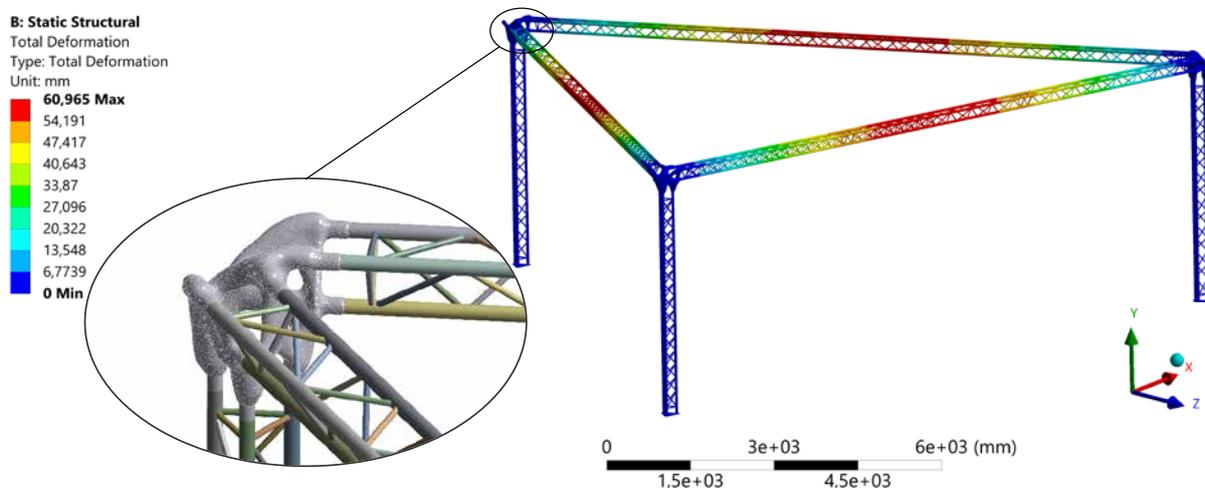
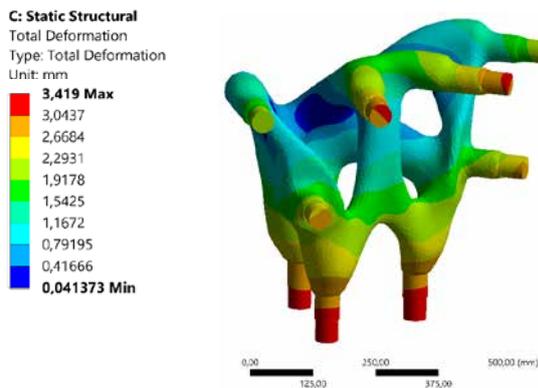


Abbildung 45: Verformung des gesamten Traversensystems mit TopoModell2 als optimierten Dreigurträger Knoten im Lastfall (UDL)

Dies deutet auf eine deutlich bessere Kraft- bzw. Momentableitung hin. Allerdings zeigt sich auch hier, dass die vermeintlichen Biegemomente weit oberhalb der zulässigen Maximalspannung liegt. Die Erklärung findet sich wieder in den fehlerhaften Interpolationen zwischen den Knotenpunkten. Bei Betrachtung der mittleren Spannung auf der Strukturoberfläche wird ersichtlich, dass das TopoModell2 mit ca. $\sigma_{\text{TM2}_K} = \pm 50 \text{ MPa}$ beansprucht wird.

a) Verformung ϵ TopoModell2



b) Biegemoment M_{BY} TopoModell2

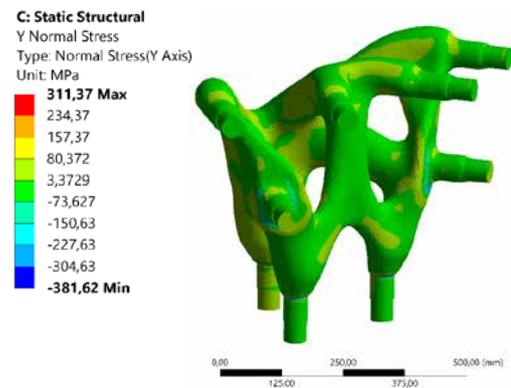


Abbildung 46: a) Verformung ϵ und b) Biegemoment M_{BY} des TopoModell2-Knotens im Lastfall UDL

Das TopoModell2 zeigt im Vergleich zum Referenzzustand zwar eine deutliche Steifigkeitsverbesserung, allerdings zeigen sich durch die Strukturoptimierung weiterhin Bereiche welche vereinfacht werden können. Beispielsweise können die verbreiterten, Flächen an den Anschlussgeometrien geometrisch vereinfacht werden, vergleiche Abbildung 46. Daraus bietet sich weiteres Potential zur Massereduktion und folglich auch zu einer wirtschaftlicheren Herstellung an. Als finaler Schritt wurde demnach die unförmige, topologieoptimierte Struktur in eine vereinfachte Rohrstruktur umgewandelt. Als Grundlage wurden die Rohrgeometrien der Referenzstruktur mit einem Rohrdurchmesser von $d = 50$ mm verwendet. Als grundlegende Struktur wurde das Geometriemodell TopoModell2 herangezogen, welcher maßgeblich den notwendigen Kraftfluss darstellt. Als Ergebnis ist das Geometriemodell TopoModell3 entstanden. Dieses wurde in das Traversensystem eingesetzt und final die Verformung des Gesamtsystems berechnet, siehe Abbildung 47. Die Vereinfachung der Struktur bewirkte eine weitere Reduzierung der Verformung auf $\epsilon_{TM2} = 53,813$ mm. Im Vergleich zum Referenzzustand ist hier eine Reduzierung von ca. 51,67 % zu sehen.

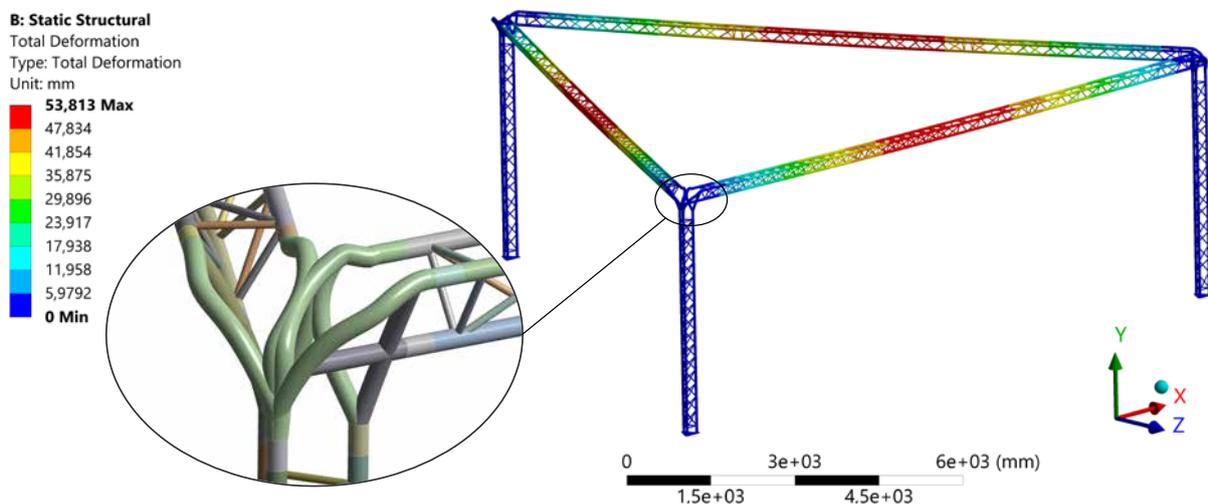
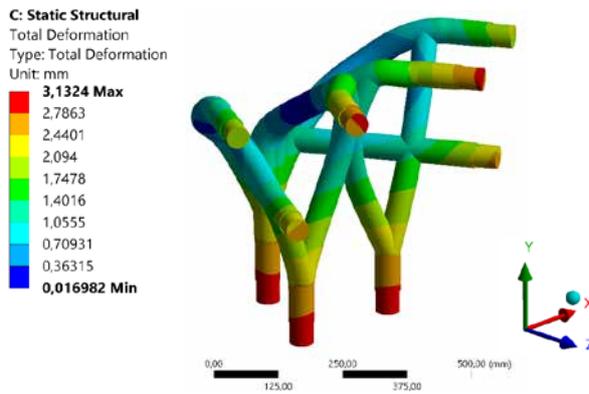


Abbildung 47: Verformung des gesamten Traversensystems mit TopoModell3 als optimierten Dreigurträger Knoten im Lastfall (UDL)

a) Verformung ϵ TopoModell3



b) Biegemoment M_{BY} TopoModell3

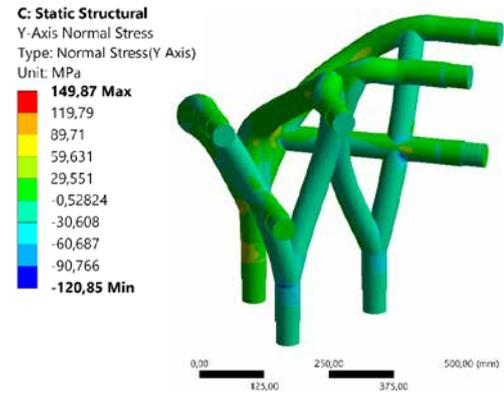
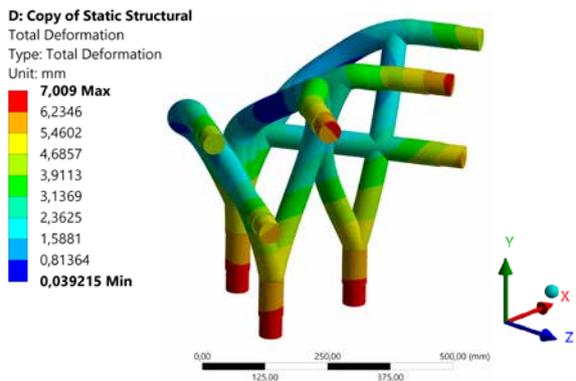


Abbildung 48: a) Verformung ϵ und b) Biegemoment M_{BY} des TopoModell3-Knotens im Lastfall UDL

Bis hierher konnte numerisch der Nachweis erbracht werden, dass durch die Topologieoptimierung in Form einer Massereduktion, die Steifigkeit bei gleicher Belastung erhöht werden kann. Nun soll untersucht werden, inwieweit die Last erhöht werden kann um die maximal zulässige Verformung $\epsilon_{UDL_krit} = 120 \text{ mm}$ zu erreichen. Es zeigte sich, dass die zulässigen Lasten (UDL) der Dreigurtträger von 24 kg/m um $+ 143 \%$ auf $58,5 \text{ kg/m}$ erhöht werden können, ohne dabei die zulässige Verformung des Referenzsystems ϵ_{UDL_krit} zu überschreiten. Die dabei auftretenden Beanspruchungen am Knoten sind in Abbildung 49 dargestellt. Die Verformung des Knotens ist durch die erhöhte Last auf $\epsilon_{TM3max} = 7,0 \text{ mm}$ gestiegen. Dadurch unterliegt der Knoten auch deutlich höheren Biegebeanspruchungen, vergleiche Abbildung 49 b). Abgesehen von den Maxima und Minima, welche auf eine fehlerhafte Interpolation zurückzuführen sind, ist ersichtlich, dass die Werte relativ nah an der maximal zulässigen Festigkeitsgrenze für Aluminiumlegierungen liegt. Abbildung 50 zeigt die Rückansicht des TopoModell3 – Knotens im maximal beanspruchten Zustand. Dabei ist zu erkennen, dass insbesondere der Bereich der Rohrzusammenführung am höchsten beansprucht ist. Hier liegen Spannungen im Bereich von $\sigma = 235 \pm 10 \text{ MPa}$ vor. Für die Herstellung des Knotens ist an dieser Stelle zu beachten, dass je nach wärmebehandeltem Zustand, bereits die ersten 6xxx - Aluminiumlegierungen versagen werden [DIN 14a].

a) Verformung ϵ_{max} TopoModell3



b) Biegemoment M_{BYmax} TopoModell3

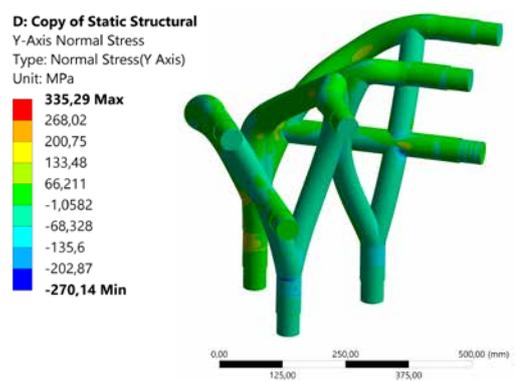
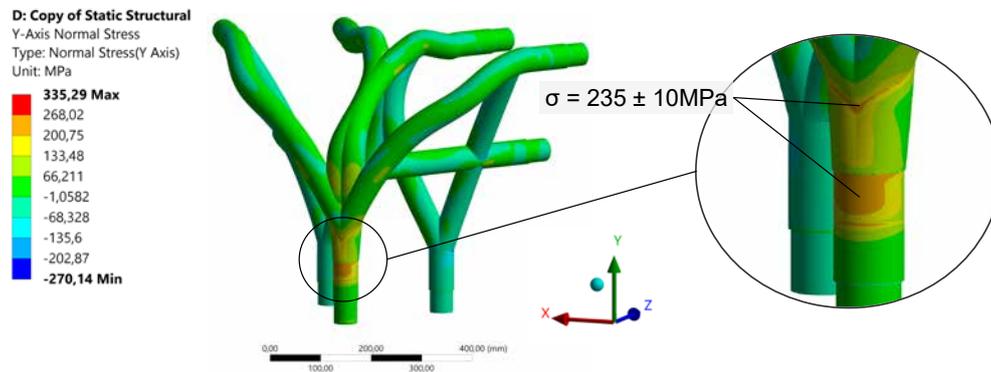


Abbildung 49: a) Verformung ϵ_{max} und b) Biegemoment M_{BYmax} des TopoModell3-Knotens im Lastfall UDL während maximal zulässiger Verformung des Gesamtsystems ϵ_{UDL_krit}

a) Biegemoment M_{BYmax} TopoModell3 - RückansichtAbbildung 50: Rückansicht des Biegemomentes M_{BYmax} des TopoModell3-Knotens im Lastfall UDL

Fazit

Es wurde ein Dreigurträger Knoten mit einem Öffnungswinkel von 60° herangezogen und im Rahmen einer Topologieoptimierung sowohl die Masse und den Bauraum, als auch die Optik im Sinne einer Bionik angepasst. Dabei wurde der Knoten zunächst unterschiedlichen Lastfällen unterzogen. Die entstandenen Verformungen und Spannungen wurden in einen abstrahierten Designbereich des Knotens übertragen und mit Hilfe der Topologieoptimierung unterschiedliche Massereduktionen numerisch simuliert. Die resultierenden Strukturen wurden nachbehandelt und in das Traversensystem eingesetzt. Somit wurde iterativ ein Modell konzipiert, welches im Vergleich zum Referenzmodell verbesserte Eigenschaften aufweist und dabei noch fertigbar ist. Die errechneten Verformungen und Biegemomente der einzelnen Modelle sind in Tabelle 18 zusammen aufgelistet. Die erhöhte Steifigkeit des TopoModell3 Knotens führt dazu, dass die Verformung des Knotens im Lastfall UDL von ursprünglichen 23,6 mm um - 86,8 % auf 3,1 mm gesenkt werden konnte. Dies führt dazu, dass die maximale Verformung der Dreigurträger im Traversensystem von ursprünglichen 111,4 mm um - 51,7 % auf 53,8 mm reduziert wird. Gleichzeitig wiegt der TopoModell3 Knoten ca. 5,6 kg und zeigt somit eine Massereduktion von - 38,8 %. Zurückzuführen ist dies ebenfalls auf die verkleinerten Abmaße, welche ebenfalls eine Reduktion um ca. - 74,2 % erfahren. Final ist abzulesen, dass die Biegemomente sich nur marginal verändert haben, was dafürspricht, dass die Berechnungen im Lastfall UDL korrekt sind. Die Beanspruchungen bleiben durch die Lasten gleich, werden allerdings durch die Topologieoptimierung besser innerhalb der Struktur aufgenommen und weitergeleitet, sodass unnötige Bereiche erfolgreich erkannt und entfernt wurden.

Darüber hinaus wurde untersucht, welche maximalen Lasten für den neuen, topologieoptimierten Knoten TopoModell3 anliegen können, um die maximal zulässige Verformung des Traversensystems nicht zu überschreiten. Tabelle 19 fasst zusammen, dass die Last (UDL) auf 58,5 kg/m und somit um 143 % erhöht werden kann. Allerdings muss an dieser Stelle eine bestimmte Auswahl der Aluminiumlegierung erfolgen, um innerhalb der zulässigen Zugfestigkeit zu bleiben.

Tabelle 18: Übersicht der einzelnen Verformungen und Biegemomente am Dreigurtträger Knoten im Lastfall UDL

	Traversensystem	Knoten				
	ϵ_{UDL} [mm]	ϵ_{max} [mm]	M_{by_min} [MPa]	M_{by_max} [MPa]	m [kg]	L x B x H [mm]
DIN EN 1991-1-1 (zulässig)	120	-	-	-	-	-
RefModell1	111,4	23,6	-212,9 / (-281,5)	267,1 / (335,7)	9,0	1000 x 1000 x 500
TopoModell2	61,0	3,4	-304,6 / (-381,6)	234,4 / (311,4)	5,5	764 x 532 x 454
TopoModell3	53,8	3,1	-202,9 / (-270,1)	268,02 / (335,3)	5,6	500 x 500 x 515
% Abw. TopoModell3 zu RefModell1	- 51,7 %	- 86,8 %	-	-	- 38,8 %	-74,2 %

Tabelle 19: Verformung und Biegespannung des TopoModell3s im Vergleich zum Referenzmodell RefModell1

	Traversensystem	Knoten			
	ϵ_{UDL} [mm]	ϵ_{max} [mm]	M_{by_min} [MPa]	M_{by_max} [MPa]	UDL [kg/m]
DIN EN 1991-1-1 (zulässig)	120	-	-	-	
RefModell1	111,4	23,6	-212,9 / (-281,5)	267,1 / (335,7)	24
TopoModell3max	120,6	7,0	-202,9 / (-270,1)	268,02 / (335,3)	58,5
% Abw. TopoModell3max zu RefModell1	+ 7,6 %	- 70,4 %	-	-	+ 143 %

Herstellung additiv gefertigter Traversenelemente mittels Lichtbogentechnik

Prozessparameter und Slicing

Die bislang gewonnenen Erkenntnisse werden genutzt, um erste dreidimensionale Strukturen herzustellen. Um die Übertragbarkeit der bislang vereinfachten Strukturen auf komplexe Geometrien darzulegen, soll ein Teilsegment des finalen TopoModell3 - Knotens geschweißt werden. Für die Generierung muss das CAD-Modell des TopoModell3 - Knotens in Schweißbahnen transferiert werden. Hierfür wird das Teilsegment zunächst in einen virtuellen Zwilling der Schweißzelle geladen und entlang der Aufbaurichtung (hier: z-Achse) in einzelne Werkzeugbahnen aufgeteilt, siehe Abbildung 51. Die Abstände der Werkzeugbahnen entsprechen dabei den Schichthöhen der Schweißraupen, welche in den Vor- und Hauptversuchen ermittelt wurden. Als Zusatzwerkstoff wird der untersuchte EN AW 5183 adressiert. Nachdem die Werkzeugbahnen erzeugt wurden, werden die Roboterbewegungen überprüft, um etwaige Kollisionen oder Singularitäten zu vermeiden.

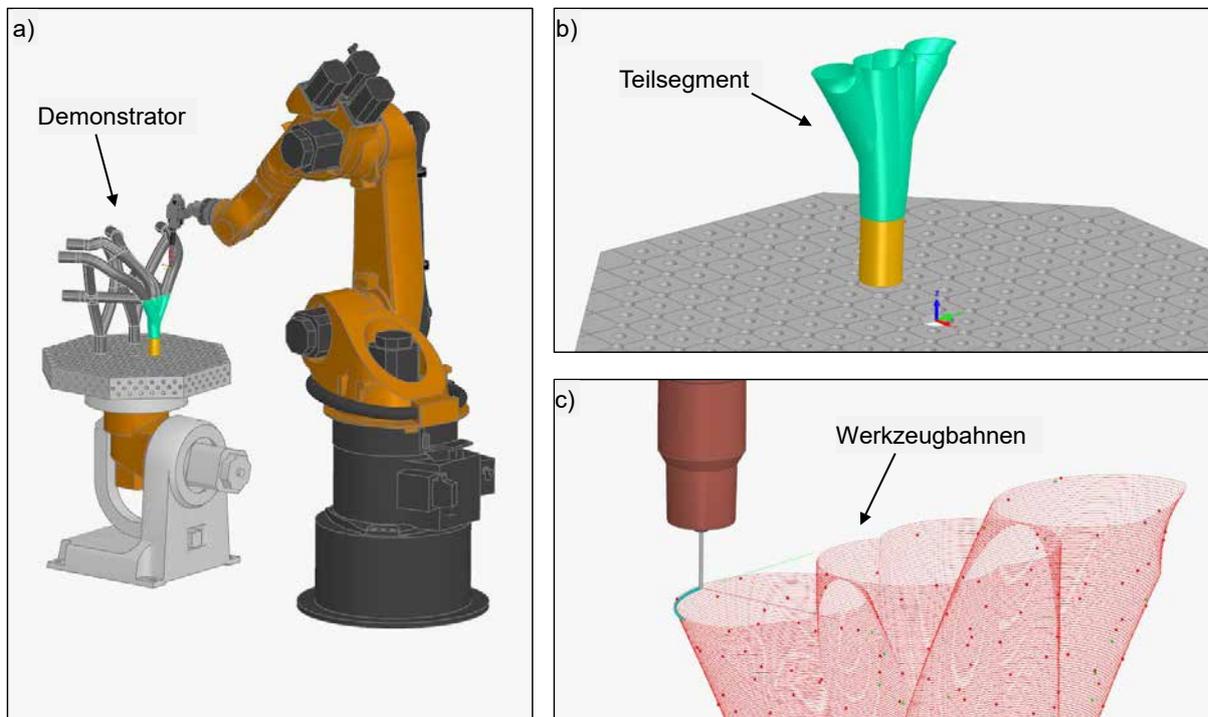


Abbildung 51: a) Gesamtübersicht des Demonstrators im simulierten Schweißbereich. b) Detailansicht des Teilsegmentes aus Demonstrator. c) Überprüfung der Werkzeugbahnen des Teilsegmentes

Mit dem Hintergrund, dass konventionelle Traversen aus Aluminium eine Wandstärke von 2 bis 3 mm haben, wurden die Schweißparameter derart angepasst, dass trotz hoher Auftragsrate dünnwandige Strukturen erzeugt werden können. Bei der Herstellung komplexer Strukturen sind geometrische Besonderheiten wie Überhänge oder Knotenpunkte zu berücksichtigen. Diese benötigen in der Regel eine weitere Anpassung der Schweißparameter, um Bindefehler zwischen den Lagen oder ein Abschmelzen der Schweißraupe zu vermeiden. Derartige Unregelmäßigkeiten resultieren in erster Linie aus Konturabweichungen in Folge lokaler Wärmestaus. Um im Vorfeld eine Aussage zu erhalten, ob die Werkzeugbahnen des TopoModell3 - Knotens kritische Bereiche aufweisen und Wärmestaus für Unregelmäßigkeiten sorgen, soll mit Hilfe einer thermischen Untersuchung der Schweißprozess simuliert werden. Für den Aufbau und die thermische Untersuchung verwendete Schweißparameter sind Tabelle 20 hinterlegt.

Tabelle 20: Parameter für die Herstellung des Teilsegments und des Demonstrators

Parameter	Wert
Drahtvorschub [m/min]	6,5 m/min
Spannung [V]	17,5
EN-Anteil [%]	90
Grundstrom [A]	48
Schweißstrom [A]	99
Schweißgeschwindigkeit [m/min]	1,8
Schutzgasdurchfluss [l/min]	10
Auftragsrate [kg/h]	1,19
Schweißleistung [W]	1879
Streckenenergie [kJ/cm]	0,6

Thermische Untersuchung

Abbildung 52 stellt das modellierte Teilsegment des Demonstrators dar, aufgeteilt in Substratplatte, Teilsegment und Bahnplanung. Die thermische Untersuchung erfolgt vorwiegend an der Bahnplanung und entspricht 5 mm der Strukturhöhe. Ausgewählt wurde dieser Bereich des Teilsegmentes, da hier kritische Bereiche für den DED-Arc Prozess zusammen abgebildet werden. Bedingt durch die offenen Konturen in diesem Bereich ergaben sich im G-Code 33 Schweißtrajektorien, wobei die letzten 4 Schweißtrajektorien die oberste Lage in der Simulation bilden.

Materialmodelle

Das Materialmodell wird aus der vorhandenen Datenbank der Simufact Welding Software entnommen. Da der Zusatzwerkstoff EN AW 5183 (bzw. EN AW 5083) nicht in der Datenbank enthalten war, wurde der Werkstoff EN AW 5056 aufgrund der vergleichbaren, chemischen und thermischen Eigenschaften als Materialmodell herangezogen. Um realitätsnahe Ergebnisse zu erzeugen, wurden die Wärmeableitbedingungen mit Hilfe der vorhandenen Thermoelementmessungen aus den Hauptversuchen kalibriert. Die Daten entsprachen dabei den Abkühlbedingungen der geschweißten Wandstrukturen im isothermen Zustand. Weiter wurden für den Simulationsbeginn die Zwischenlagentemperatur und die Vorwärmtemperatur des Teilsegments auf $T = 100 \text{ °C}$ festgelegt. Die Temperatur der Substratplatte wird mit einer Raumtemperatur von $T = 20 \text{ °C}$ angenommen. Anders als im Realzustand wird demnach davon ausgegangen, dass zu Beginn des Schweißprozesses eine homogene Temperaturverteilung im Teilsegment vorliegt, sodass für die Abkühlung ein geringerer Temperaturgradient berechnet wird. Im Falle eines Wärmestaus durch ungünstige Überhänge oder mehrfacher, lokaler Überschweißung könnten sich hier längere Abkühlzeiten ergeben. Ebenfalls zu berücksichtigen gilt es, dass die Simulation erst fortgesetzt wird, wenn die Temperatur jedes Knotenpunktes $T < 100 \text{ °C}$ beträgt. In der Praxis hingegen wird am Schweißende der zuletzt aufgetragenen Lage gemessen, da hier zuletzt der Wärmeeintrag durch den Lichtbogen erfolgte. Diese Annahmen bilden zwar einen von der Realität marginal abweichenden Zustand ab, werden jedoch aufgrund einer ersten Abschätzung zunächst hingenommen.

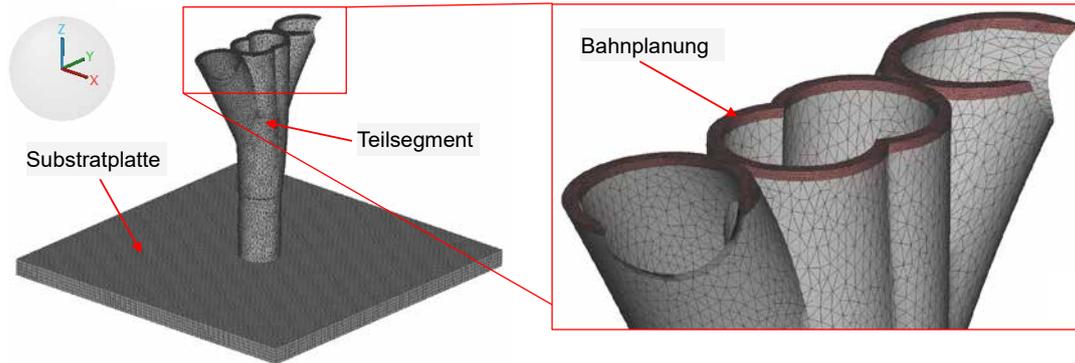


Abbildung 52: Teilesegment mit Substratplatte Bereich der Bahnplanung für die thermische Untersuchung.

Auswertung

Die Ergebnisse der thermischen Untersuchung an den kritischen Bereichen sind in Abbildung 53 zusammengefasst. Dabei ist jeweils das entstehende Temperaturfeld im Moment des aktiven Schweißprozesses dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Ausbreitung des Wärmefeldes, bedingt durch die Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums, sich großflächig über die Struktur erstreckt. Die Wärmefelder zeigen über den zeitlichen Verlauf der Simulation nachvollziehbare Formen und Größen auf, sodass die Wärmeableitungen als valide eingestuft wurden. Die kritischen Bereiche b) Überfahrt und c) Überhang werden dabei mit der d) Rückwand verglichen, um mögliche Abweichungen der Abkühlzeiten auszumachen. Die Überfahrt in b) ist für die additive Fertigung mittels DED-Arc kritisch, da zum einen mehrere Strukturen ohne Stützstruktur zusammengeführt werden. Zum anderen wird die Wärme, aufgrund des fehlenden Materials auf der Strukturunterseite, langsamer abgeleitet. In beiden Fällen droht bei zu hohem Energieeintrag oder Wärmestau, ein Herabfallen der Schweißraupe und damit zu einer fehlerhaften Anbindung. Weiter wird das Teilesegment im Bereich b) durch die Schweißbahnen der herauswachsenden Obergurte doppelt thermisch belastet. Analog kann sich im Bereich c) Überhang ebenfalls ein Wärmestau, aufgrund des nur einseitig vorhandenen Materials, bilden. Im Falle einer signifikant längeren Abkühlung durch den entstandenen Wärmestau ist mit einer flacheren und herabtropfenden Schweißraupe zu rechnen. Die dabei entstandene Konturabweichung führt zu einem mangelnden Aufbau der darauffolgenden Lage, sodass nach kurzer Zeit ein Prozessabbruch eintritt.

Damit der Temperaturverlauf in den jeweiligen Bereichen dokumentiert werden kann, wurde in jedem spezifischen Bereich ein Knotenpunkt analysiert. Die Position der Knotenpunkte befindet sich jeweils in der Mitte der jeweiligen Lagenbreite. So können unerwünschte asymmetrische Abkühlereffekte durch die Oberfläche vermieden werden. Für die Messung wurden die Temperaturänderungen an den jeweiligen Knotenpunkten über die gesamte Prozesszeit aufgezeichnet. Abbildung 54 stellt die drei entstandenen Temperatur – Zeit - Verläufe für die Bereiche Überfahrt, Überhang und Rückwand qualitativ gegenüber. Darüber hinaus sind die jeweiligen Schweißtrajektorien (S#) eingezeichnet, welche den Beginn einer neuen Schweißlage in der Simulation markieren. Fehlende Nummern der Schweißtrajektorien haben aufgrund der Distanz auf die betrachteten Knoten keinen Einfluss, sodass diese für die Auswertung vernachlässigt wurden. Zu erkennen ist, dass die Knoten in den Bereichen Überhang und Rückwand unabhängig von der Anzahl der nachfolgenden Schweißtrajektorien gleichmäßig abkühlen. Die Abkühlzeit beträgt dabei $t_1 \approx t_2 \approx 110$ s, womit sich eine Lagentemperatur von $T \approx 50$ °C einstellt. Dieses Ergebnis wird positiv bewertet, da keine Unregelmäßigkeiten durch einen möglichen Wärmestau zu erwarten sind. Der Bereich der Überfahrt hingegen zeigt zwischen den Schweißtrajektorien S25 und S33 signifikant kürzere Abkühlzeiten t_3 auf. Zwar kühlt laut Simulation der betrachtete Bereich auf $T \approx 60$ °C herab, doch liegen die eigentlichen Abkühlzeiten in diesen Bereichen bei $t_3 \approx 15 - 30$ s. Erfahrungsgemäß sind diese Abkühlzeiten zu gering, sodass eine übermäßige thermische Beanspruchung zu erwarten ist. Als Folge resultieren Unregelmäßigkeiten in Form von Konturabweichungen, Abschmelzen der Kontur oder Bindefehler. Für die Herstellung des Demonstrators wird geschlussfolgert, speziell in diesem Bereich verlängerte Wartezeiten einzuplanen, sodass Unregelmäßigkeiten entgegengewirkt werden kann.

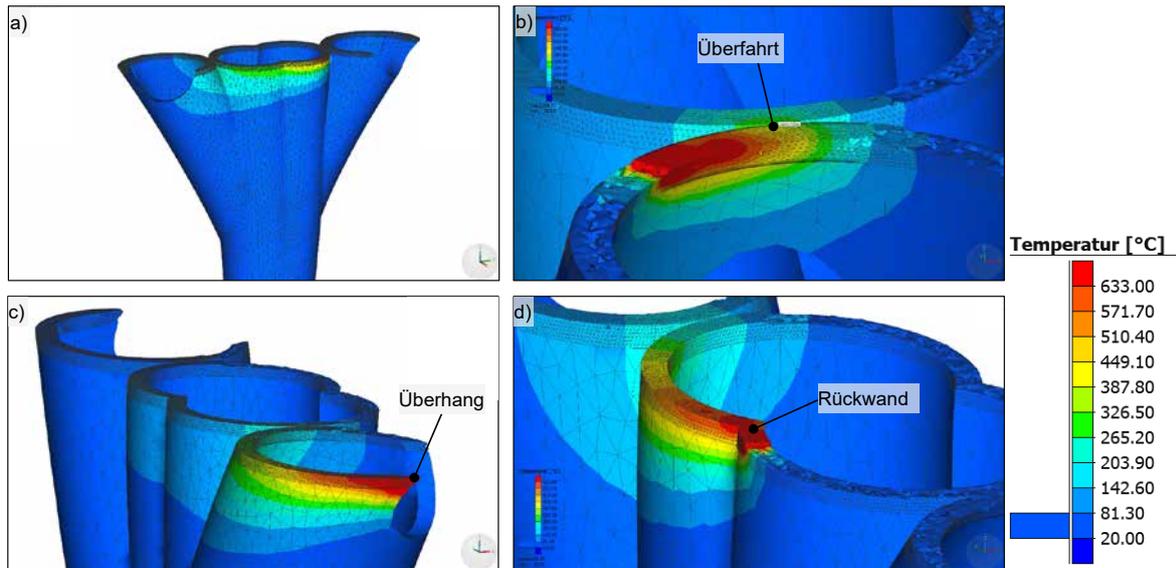


Abbildung 53: a) Simuliertes Temperaturfeld am Teilsegment, allgemein. Simulierte Temperaturfelder in den speziell betrachteten Bereichen b) Überfahrt, c) Überhang, d) Rückwand.

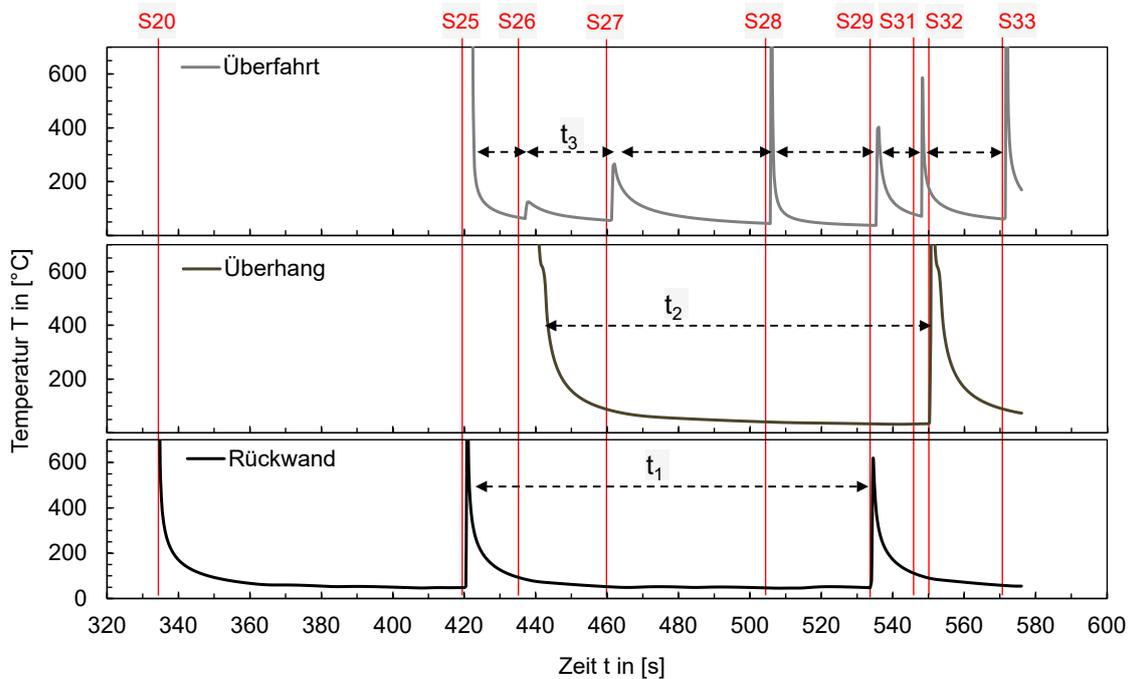


Abbildung 54: Temperatur - Zeit -Verläufe der Knotenpunkte in den Bereichen Überfahrt, Überhang und Rückwand. Beginn der neuen Schweißlagen, gekennzeichnet durch die Schweißstrajektorien S20 bis S33.

Abschließend soll noch prognostiziert werden, wie viele Lagen durch den wiederholten Energieeintrag des Lichtbogens wärmebeeinflusst wurden. Hierzu zeigt Abbildung 55 die lokalen Temperaturmaxima entlang der Strukturhöhe. Es wird definiert, dass Bereiche zwischen der Schmelztemperatur T_{Schmelz} und der Rekristallisationstemperatur $T_{\text{Rekris}} = 0,45 \cdot T_{\text{Schmelz}}$ als wärmebeeinflusst gelten. Gemessen wurde von der zuletzt aufgetragenen Lage bis zum Unterschreiten der Rekristallisationstemperatur. Unter Berücksichtigung der modifizierten, thermischen Eigenschaften einer EN AW 5056, ergibt sich für das Teilsegment eine durchschnittliche, wärmebeeinflusste Höhe $h \approx 10 \text{ mm}$. Bei einer Lagenhöhe von $z = 1,7 \text{ mm}$, kann davon ausgegangen werden, dass mindestens 6 Schweißlagen eine Wärmenachbehandlung oberhalb T_{Rekris} erfahren. Im kritischen Bereich des Überhangs, erhöht sich aufgrund des Wärmestaus, die durchschnittliche, wärmebeeinflusste Höhe auf $h \approx 15,5 \text{ mm}$, sodass mindestens 9 Lagen beeinflusst werden. Aus den durchgeführten mechanisch - technologischen

Untersuchungen ging hervor, dass keine signifikanten Festigkeitsänderungen für die naturharte EN AW 5183 stattfinden. Die Festigkeiten von aushärtbaren Aluminiumlegierungen jedoch, werden von der wärmebeeinflussten Höhe geprägt. Um Entfestigungseffekte und mögliche Sollbruchstellen zu vermeiden, empfiehlt es sich, hierzu die wärmebeeinflussten Höhen so gering wie möglich einzustellen.

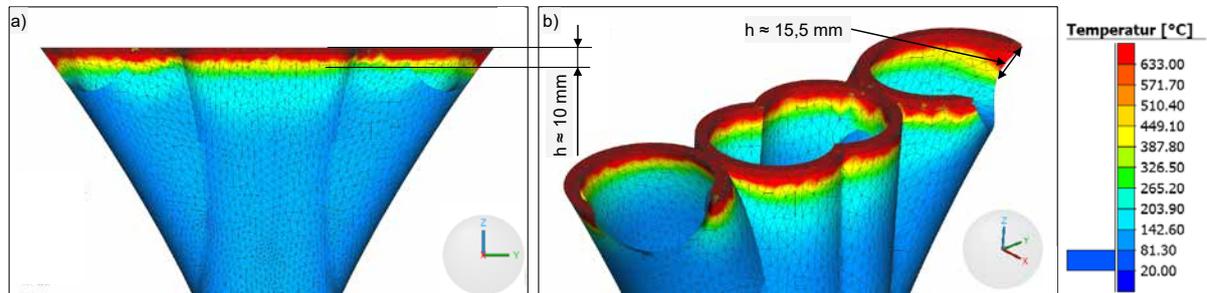


Abbildung 55: Darstellung maximaler Temperaturen entlang der Strukturhöhe. Wärmebeeinflusste Höhe h zwischen zuletzt geschweißter Lage und Unterschreitung der Rekristallisationstemperatur.

Bewertung

Das Teilsegment konnte in einem ersten Schritt erfolgreich generiert werden. Beobachtete Unregelmäßigkeiten werden im Folgenden erläutert und Verbesserungen anhand geometrischer Anpassungen vorgestellt. Abbildung 56 zeigt die erzeugten Teilsegmente und Rohrstrukturen. Die Strukturen weisen entlang der gesamten Aufbauhöhe eine Wandstärke von $4,1 \pm 0,1$ mm auf. Mit Hinblick auf eine mögliche, fräsende Nachbearbeitung der äußeren Oberfläche, läge weiterhin eine Wandstärke von mindestens 2 mm vor, sodass die notwendigen Festigkeiten eingehalten werden.

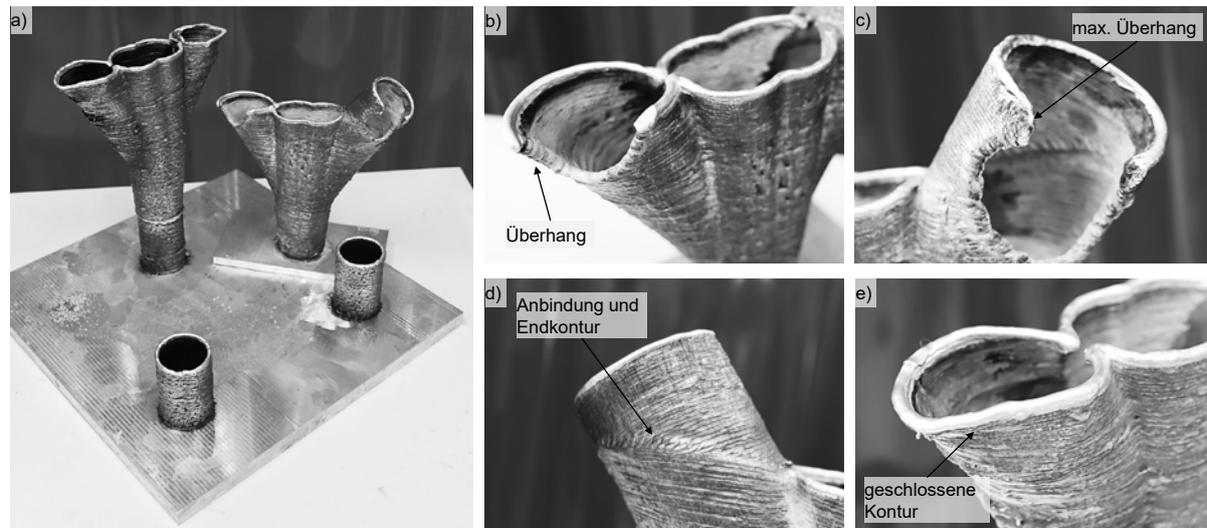


Abbildung 56: a) Hergestellte Teilsegmente und Rohrstrukturen des Demonstrators. b) Detailansicht des Überhangs am Teilsegment. c) Obergurtansatz mit offener Kontur und maximal möglichem Überhang. d) Anbindung und Endkontur des Obergurtansatzes auf Teilsegment. e) Teilsegment mit geschlossener Kontur.

Der kritische Bereich des Überhangs zeigt durch die im Vorfeld angepassten Schweißparameter im Start- und Endbereich gleichmäßige und konturtreue Strukturen, vergleiche Abbildung 56 b). Da in der weiteren Herstellung des Demonstrators die Obergurte auf die oberen Lagen des Teilsegmentes folgen, wurde der Ansatz eines Obergurts testweise aufgetragen, siehe c). Somit können Konturabweichungen durch Verzug oder maximale Überhangwinkel überprüft werden. Der Obergurtansatz musste allerdings abgebrochen werden. Es zeigt sich, dass die offene Kontur für den aufzubringenden Untergurt nicht geschlossen werden kann. Das Material wird ab einem Überhangwinkel von ca. 80 % nicht mehr konturgetreu aufgetragen. Das Material an den Start- und

Endpunkten fällt infolge des Energieeintrages und der freischwebenden, verschobenen Koordinatenpunkte in sich zusammen. Dadurch weichen die Lichtbogenansatzpunkte von der vom Roboter geplanten Werkzeugbahn ab. Die einzelnen Konturabweichungen summieren sich auf, bis der Schweißprozess vollständig an der Struktur vorbeischweißt und es zum Prozessabbruch kommt. Positiv zu bewerten ist zum einen die Anbindung des Obergurtes auf das Teilsegmentes. Hier zeigen sich keine Unregelmäßigkeiten auf der Nahtoberfläche durch Verzug oder veränderten Raupengeometrien. Auch wird die Endkontur durch den Wechsel der Aufbau-richtung nicht beeinflusst. Zum anderen ist der kritische Bereich der Überfahrt ebenfalls gut angebunden und weist nur marginale Konturabweichungen auf. Für den Demonstrator werden hier, wie in der thermischen Untersuchung erarbeitet, längere Wartezeiten angesetzt. Das Problem des Prozessabbruchs durch den maximalen Überhang, soll durch die Schließung der offenen Kontur behoben werden. Im Sinne der erhöhten Prozesssicherheit und Machbarkeit wird die marginale Gewichtszunahme und Prozesszeit hingenommen. Die neue geschlossene Kontur ist in e) dargestellt.

Die in der thermischen Untersuchung simulierten Abkühlzeiten und kritischen Bereiche konnten erfolgreich am geschweißten Teilsegment evaluiert werden. Etwaige Konturabweichungen wurden analysiert und Gegenmaßnahmen eingeplant. Mit den gewonnenen Erkenntnissen kann weiter der gesamte Demonstrator in Werkzeugbahnen eingeteilt werden und final hergestellt werden.

Demonstrator

Aufbau

Mit dem Hintergrund der aufeinander aufbauenden Rohrgeometrien, wird der Demonstrator in 29 einzelne Segmente unterteilt, siehe Abbildung 57 a). Die Bahnplanung der einzelnen Segmente erfolgt sukzessiv, so dass eine Kollision zwischen Brennersystem und erzeugter Struktur vermieden wird, vergleiche Abbildung 57 b). Demnach werden einzelne Segmente nicht mit einem Mal, sondern Stück für Stück hergestellt. Entscheidend bei der Bahnplanung ist die Orientierung des Brenners mit der Orientierung des Drehkipptisches mathematisch exakt zu koppeln. Somit können, sowohl Zwangslagen, als auch Positionierungsfehler vermieden und Unregelmäßigkeiten wie beispielsweise eine Abweichung der tatsächlichen Schichthöhe vorgebeugt werden.

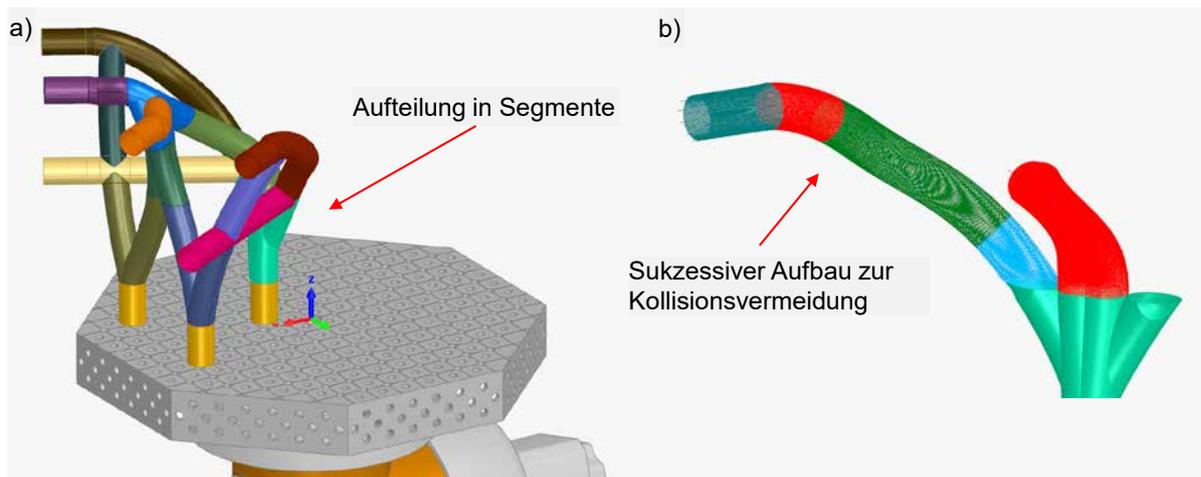


Abbildung 57: Segmentierung und Bahnplanung des topologieoptimierten Dreigurträger Knotens im virtuellen Zwilling

Die für die Bahnplanung notwendigen Schichthöhen und Prozessparameter wurden in vorangegangenen Untersuchungen ermittelt. Die für die Herstellung verwendeten Parameter gleichen denen in Tabelle 20 hinterlegten Werte. Die erstellten Schweißbahnen wurden für jedes Segment auf Kollision, Orientierung und Singularitäten überprüft, sodass eine automatisierte Herstellung des Demonstrators möglich ist.

Validierung und Optimierung

Abbildung 58 zeigt den hergestellten, topologieoptimierten Dreigurträger Knoten. Die Abmaße betragen 516 x 516 x 512 mm (Länge x Breite x Höhe) mit einer Wandstärke von ca. 3,5 mm. Die Gesamtprozesszeit beträgt ca. 49,5 Stunden und teilt sich dabei in eine Schweißzeit von ca. 7 Stunden und eine Abkühlzeit von ca. 42,5 Stunden auf. Anders als bei den bisherigen Untersuchungen wurde an dieser Stelle auf eine Überprüfung der Zwischenlagentemperatur mittels Pyrometer verzichtet. Stattdessen wurde eine konstante Wartezeit zwischen 20 - 30 s pro Lage eingeplant. In dieser Zeit wurde mittels Druckluft die jeweilige Schweißlage gekühlt, um auf die Zwischenlagentemperatur $T_{ZW} = 110 - 120 \text{ °C}$ zu kommen. Somit konnte die Gesamtprozesszeit erheblich reduziert werden.

Im Sinne einer möglichen Prozessoptimierung könnten effektivere Kühlstrategien Anwendung finden. Beispielsweise können andere Kühlmedien wie Wasser oder flüssiger Stickstoff eingesetzt werden, oder die additive Struktur großflächiger gekühlt werden. Durch den folglich erhöhten Temperaturgradienten können die Wartezeiten weiter gesenkt werden. Ist eine Anpassung der Kühlung nicht möglich, bietet sich eine parallele Herstellung von mehreren Knotenstrukturen an. Bei Betrachtung der Schweiß- und Wartezeit zeigt sich, dass die Wartezeit um ca. Faktor 6 größer ist als die Schweißzeit. Demnach bietet es sich an, 6 Knoten parallel zu schweißen und somit die Standzeiten während der Wartezeit zu reduzieren. Dabei wird insbesondere die Effi-

zienz und die Produktivität des Prozesses gesteigert, da in derselben Gesamtprozesszeit mehr Knotenstrukturen hergestellt werden können. Als letztes bietet sich noch an, für die einzelne Knotenstruktur eine effektivere Bahnplanung zu erstellen, sodass während der Wartezeit andere Schweißlagen an der Knotenstruktur geschweißt werden. Zwar kann damit die Gesamtprozesszeit des einzelnen Knotens reduziert werden, doch müssen im Vorfeld die notwendigen Hard- und Softwarelösungen vorhanden sein, um dies auch umsetzen zu können.

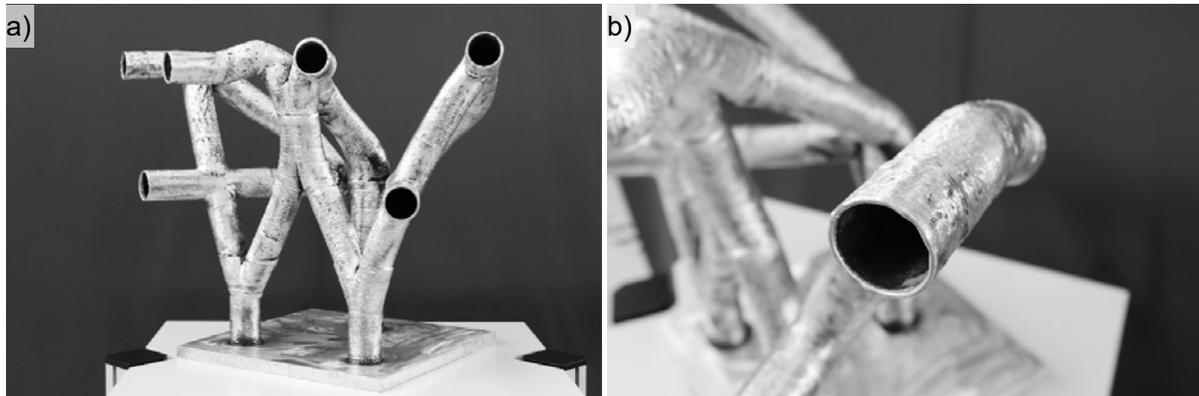


Abbildung 58: Hergestellter topologieoptimierter Dreigurträger Knoten, Demonstrator

Bei der Herstellung des Demonstrators zeigte sich, dass Anpassung der Geometrie in gewählte Rohrstrukturen (TopoModell3) für die Prozessstabilität und Einfachheit sinnvoll gewählt wurden. Allerdings empfiehlt es sich, die Kreuzungspunkte der Rohrstrukturen nochmal für die automatisierte, additive Fertigung anzupassen, da hier die Zugänglichkeit eines Brennersystems nur marginal gegeben ist.

Auswertung und Bewertung

Der geschweißte Demonstrator weist eine Masse von 6,38 kg auf. Zusammen mit der Substratplatte erhöht sich die Gesamtmasse auf 15,07 kg. Die im Vergleich zur Simulation erhöhte Masse von ca. 0,78 kg, resultiert in erster Linie aus der breiteren Wandstärke der geschweißten Struktur, vergleiche Tabelle 18. Weiter wurde das Bauteil eingescannt und mit der ursprünglichen CAD - Geometrie auf Form- und Gestaltabweichungen abgeglichen. Abbildung 59 zeigt links den fotografierten Dreigurträger Knoten und rechts die Messergebnisse des eingescannten Bauteils. Im Durchschnitt ist eine geringfügige Abweichung von ca. 2,54 mm über die gesamte Struktur gemessen worden. Dies ist ebenfalls auf die breitere Wandstärke von ca. 3,5 mm zurückzuführen, da die CAD-Geometrie mit einer Wandstärke von 2,0 mm angesetzt wurde. Eine deutlich höhere Abweichung hingegen ist an den Anschlusselementen zu erkennen. Hier sind teilweise Abweichungen von bis zu 18,4 mm zu messen. Zurückzuführen ist dies auf die bereits angesprochene, notwendige Positioniergenauigkeit des Handlingsystems. Die Systeme 6 – Achs – Knickarmroboter und Drehkipptisch müssen exakt mathematisch und vektoriell eingemessen sein. Geringfügige Abweichungen der Richtungsachsen X, Y, Z oder der Rotationsachsen A, B, C, führen mit zunehmendem Abstand zum Koordinatenursprung zu sichtbaren Fehlpositionierungen. Durch die variierende Positionierung des Bauteils zur Kollisionsvermeidung und der wechselnden Ausrichtung des Brenners zum Bauteil pro Lage, summierten sich mehrere kleinere Abweichungen, zu größeren Fehlpositionierungen.

Trotz der zunächst messbaren Form- und Gestaltabweichung wird die Qualität des Demonstrators positiv bewertet. Die entstandenen Abweichungen und Herausforderungen bei der Herstellung wurden erkannt und diskutiert. Für eine prozesssichere, automatisierte Herstellung derartiger additiver Knotenstrukturen müssen jedoch mehrere Stichproben geschweißt und erneut ausgewertet werden.

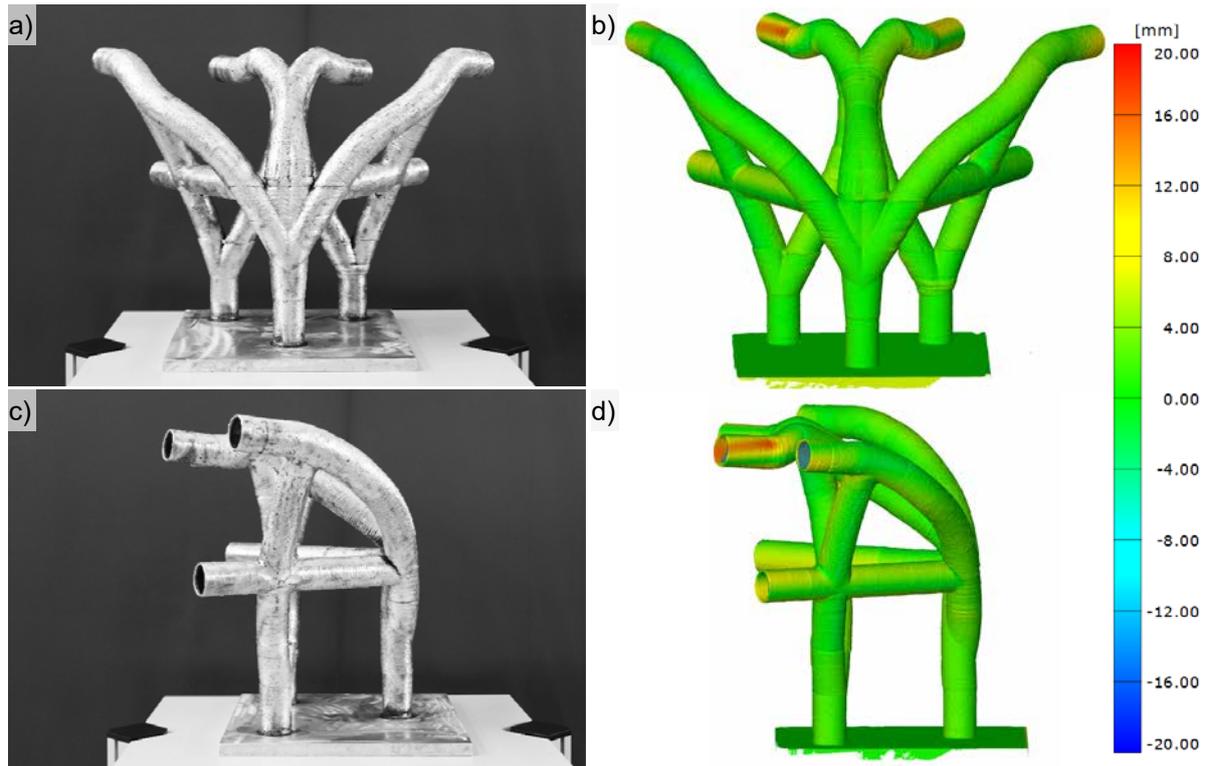
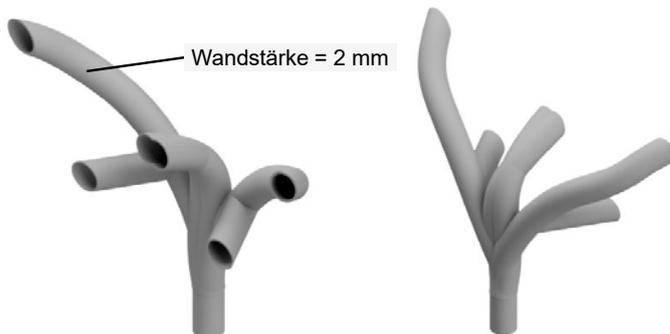


Abbildung 59: Demonstrator Dreigurträger Knoten in der a) Rückansicht und c) Seitenansicht. Eingescannter Demonstrator in der b) Rückansicht und d) Seitenansicht.

Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit wurde über die Stückkosten zur Herstellung eines Segmentes aus dem Demonstrator, auf Basis auf dem Markt verfügbarer additiver Herstellungsverfahren, ermittelt. Das zu fertigende Segment ist in Abbildung 60 abgebildet.

a) Demonstrator Segment vorne b) Demonstrator Segment hinten



Bezeichnung	Abmaße	Einheit
Rohrdurchmesser	50 x 2	mm
Bauraumvolumen	50.000	cm ³
Materialvolumen	780,35	cm ³
Abmaße ca.	625 x 500 x 160	mm
Gewicht	2,0	kg

Abbildung 60: Segment des Demonstrators für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Um einen Vergleich der Fertigungskosten darzustellen, wurden folgende additive Fertigungsverfahren deutschlandweit in Betracht gezogen:

- EBAM™
- Cold Metal Fusion
- Laser-Draht sowie Laser-Pulver-Auftragschweißverfahren
- Directed Energy Depositon – Arc
- Laser-Sinter- sowie Laser-Schmelzverfahren im Pulverbett

Ausgewertet wurden Verfahren, bei denen eine ausreichend hohe Rückmeldung der Industrien und Kostenabschätzung vorlag. Für den Vergleich ausgewählt wurden das DED-Arc, Laser-wire-build-up-welding und das LaserCUSING®. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung richtet sich an die Lebenszykluskosten, welche in der DIN EN 60300-3-3 definiert ist [DIN14b]. Dabei werden die Gesamtkosten einer Einheit über ihren gesamten Lebenszyklus, während der Beschaffung, Nutzung, Erweiterung und Beseitigung aufgelistet. Ca. 80 % der verursachten Lebenszykluskosten entstehen zu Beginn des Lebenszyklus, sodass im Folgenden vordergründig die Beschaffungskosten des Bauteils ermittelt werden [DIN14b]. Die im weiteren Verlauf des Lebenszyklus anfallenden Kosten können für alle betrachteten Verfahren als konstant angesehen werden (bspw. Wartung und Entsorgung sind unabhängig vom Fertigungsverfahren). Die Bewertung der Fertigungsoptionen soll aus der Ermittlung der Beschaffungskosten unter Verwendung des jeweiligen additiven Fertigungsverfahrens erfolgen. Nach der DIN EN 60300-3-3 wird für eine bessere Bewertung der jeweiligen Fertigungsverfahren eine Kostenauflösungsstruktur der Fertigungskosten in einzelne Teilkosten festgelegt. Die Kosten gliedern sich demnach in:

- *Vorbereitungskosten*
beinhalten insbesondere Programmierung und Einrichtung der Fertigungsanlagen bzw. CAM
- *Materialkosten*
erfassen die Kosten der verwendeten Werkstoffe in der verwendeten Form (Pulver oder Draht)
- *Bauprozesskosten*
umfassen die Kosten des eigentlichen Aufbauprozesses des Bauteils innerhalb der Fertigungsanlagen, einschließlich Energiekosten, Schutzgaskosten, Personalkosten für Überwachung und Bedienung sowie Werkzeugkosten
- *Post-Processing-Kosten*
enthalten Kosten für die je nach Verfahren notwendige Entformung und Nachbearbeitung durch Fräsen oder andere Verfahren

Die Summe der ermittelten Teilkosten ergibt im Rahmen dieses Modells die Fertigungskosten des Bauteils. Angefragt wurden Losgrößen von 1 Stück und 50 Stück, um eine mögliche Stückkostenreduktion zu erkennen. Zusätzlich wurden Informationen bzgl. Bearbeitungsdauer, Materialausnutzung während des Bauprozesses sowie zur Auftragsrate des jeweiligen Verfahrens erhoben. Fehlende Informationen wurden anhand Erfahrungswerte als Annahmen ergänzt (gekennzeichnet als ¹⁾) und bezüglich einzelner Teilkosten im Rahmen der jeweiligen Verfahren approximiert. Die gesammelten Kosten sind in Tabelle 21 gegenübergestellt.

Tabelle 21: Gegenüberstellung von drei additiven Fertigungsverfahren hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit

Anzahl	Directed Energy Deposition - Arc		Laser wire build up welding		LaserCUSING®	
	1 Stück	50 Stück	1 Stück	50 Stück	1 Stück	50 Stück
Auftragsrate	≤ 1,5 kg/h		≤ 1 kg/h ¹⁾		57,2 cm ³ /h ¹⁾	
Materialausnutzung	100 %		100 %		95 % ¹⁾	
Zeitdauer	5 h	250 h	10 h	500 h	16 h ¹⁾	800 h ¹⁾
Vorbereitungskosten	840,00 €	840,00 €	1.100,00 €	1.100,00 €	1000,00 € ¹⁾	1.000,00 € ¹⁾
Material	(EN AW 5183 Draht)		(EN AW 5183 Draht)		(EN AC 43000 Pulver)	
Materialkosten	97,50 €	4.875,00 €	97,50 € ¹⁾	4.875,00 € ¹⁾	235,00 € ¹⁾	11.750,00 € ¹⁾
Bauprozesskosten	1.552,50 €	77.625,00 €	1.500,00 €	75.000,00 €	10.200,00 €	360.000,00 €
Post-Processing-Kosten	1.700,00 €	85.000,00 €	1.700,00 € ¹⁾	85.000,00 € ¹⁾	300,00 €	15.000,00 €
Fertigungskosten (Summe)	4.190,00 €	168.340,00 €	4.397,50 €	165.975,00 €	11.735,00 €	387.750,00 €

Das Directed Energy Deposition – Arc sticht durch eine schnelle Herstellung und vergleichsweise günstigen Fertigungskosten hervor. Die hohen Post-Processing-Kosten resultieren, laut Anbietern, aus dem Fräsen der

Oberfläche in mehreren Ebenen und dem damit verbundenen Programmieraufwand. Weiter wird für die Herstellung ein Drehkipptisch empfohlen. Sowohl die Komplexität der Geometrie, als auch der Werkstoff wird von Anbietern als weniger kritisch eingestuft. Die Herstellung des Segmentes mittels Laser wire build up welding wurde von den Anbietern prinzipiell als schwierig angesehen. An den zahlreichen Knotenpunkten würden Überhänge entstehen, welche schwer kontrollierbar seien. Prinzipiell ist die Herstellung aus Aluminium machbar, jedoch führen Oxidschichten und die hohe Wärmeleitung zu einer erschwerten Verarbeitung. Andere Anbieter haben die Verarbeitbarkeit von Aluminium in diesem Verfahren vollständig in Frage gestellt. Trotz dessen zeigt sich das Laser wire build up welding mit ähnlich hohen Auftragsraten und den günstigsten Fertigungskosten als mögliche Alternative. Beim LaserCusing Verfahren wurde angemerkt, dass bei Stückzahlen > 1 sich die Bauprozesskosten pro Stück von 10.200 € auf 7.200 € reduzieren, da mehrere Bauteile gleichzeitig bearbeitet werden könnten. Es wurden aufgrund unternehmerischer Geheimhaltung keine konkreten Aussagen zum Materialverbrauch, Aufbauraten oder Bearbeitungsdauer getätigt, weswegen die Werte aus Datenblättern abgeschätzt wurden. Mittels dieses Verfahrens ist eine hohe Endkonturnähe mit geringer Nachbearbeitung möglich, sodass der Zeitaufwand für ein Post-Processing reduziert wird. Kritisch jedoch werden die Abmaße des Bauteils bewertet. Weltweit existieren nur wenige Anlagen, welche die vorgegebenen Abmaße fertigen können. Somit ist die Fertigung des gesamten Demonstrators nicht realisierbar. Die wirtschaftliche Sinnhaftigkeit derartiger, großvolumiger Bauteile wird durch die benötigten, hohen Pulvermengen, welche zum Befüllen der Anlage benötigt werden, allgemein in Frage gestellt.

Zusammengefasst kann geschlussfolgert werden, dass bei der Verwendung drahtbasierter Verfahren die Fertigungskosten weniger als 50 % im Vergleich zu pulverbettbasierten Verfahren betragen. Das DED-Arc benötigt die geringste Fertigungsdauer. Die Vorbereitungskosten sind bei allen betrachteten Verfahren ähnlich. Weiter ist die Verwendung von Draht mehr als 50 % günstiger als die Verwendung von Pulverwerkstoffen. Die Prozesskosten drahtbasierter Verfahren betragen weniger als 25 % im Vergleich zu pulverbettbasierten Verfahren. Allerdings können die Post-Processing-Kosten bei drahtbasierten Verfahren mitunter höher als bei Pulverbettverfahren ausfallen. Grund hierfür sei die geringere Endkonturnähe zu nennen und der damit verbundene erhöhte Fräsaufwand. Die angefragten Preise dienen lediglich einer groben Abschätzung und sind nicht allgemeingültig, da Unternehmen derartige Kosten intern unterschiedlich kalkulieren, nur eine begrenzte Anzahl an deutschen Unternehmen befragt wurden und keine Vergleichsdaten zu anderen Fertigungsverfahren vorliegen.

Ein konventionell hergestellter Dreigurtträger Knoten mit einem Öffnungswinkel von 60° kostet je nach Hersteller ca. 370 €. Dabei gilt zu berücksichtigen, dass es sich um keine Einzelteilfertigung handelt. Mit dem am Fachgebiet zur Verfügung stehenden Kalkulationstool ergeben sich für die additive Einzelteilfertigung des Segmentes aus Abbildung 60 mittels Lichtbogentechnologie, Fertigungskosten i. H. v. 231 €. Dabei wurde davon ausgegangen, dass der Prozess automatisiert abläuft und aufgrund der hohen Endkontur keine Nacharbeiten in Form von Fräsen oder Beschichten anfallen. In diesen Kosten enthalten, sind 123 € Rüst- und Datenvorbereitungskosten, sowie 56 € Materialkosten. Der Schweißprozess macht lediglich 24 % der gesamten Fertigungskosten aus. Eine Batch- oder Kleinserienfertigung würde den Anteil der Rüst- und Datenvorbereitungskosten marginal erhöhen und somit die Gesamtkosten deutlich senken. Für die additive Einzelteilfertigung des gesamten Demonstrators mittels Lichtbogentechnologie werden die Kosten auf ca. 1340 € geschätzt. Dies ist im Vergleich zur konventionellen Herstellung um ein Vielfaches teurer, jedoch ebenfalls ein Vielfaches günstiger als die angefragten Preise der deutschen Unternehmen für das kleinere Segment. Die additive Fertigung des topologieoptimierten Knotens mittels DED-Arc ist verglichen mit der konventionellen Herstellung teurer. Allerdings ist im Umkehrschluss zu sagen, dass eine konventionelle Herstellung des topologieoptimierten Knotens mit deutlich höherem Aufwand verbunden ist. Im Falle eines Gießverfahrens müssten extra Formen und Werkzeuge entwickelt werden, welche die Wirtschaftlichkeit signifikant herabsetzen würden.

Ökobilanzierung

Die Herstellung von Traversensystemen hängt von verschiedenen Faktoren ab. Beispielsweise der Produktionsmethode, dem Energieverbrauch, dem Transport und der Entsorgung am Ende der Lebensdauer. Eine umfassende Ökobilanzanalyse erfordert eine detaillierte Untersuchung des gesamten Lebenszyklus eines Produkts, einschließlich der Rohstoffgewinnung, der Herstellung, der Nutzung, dem Recycling und der Entsorgung. Im Rahmen dieser Arbeit konnten keine detaillierten Informationen von den Herstellern erhoben werden, sodass lediglich ein qualitativer Vergleich möglich war.

Traversensysteme sind in der Regel stranggepresste oder gezogene Rohrhohlprofile, welche zugesägt und mittels Lichtbogenschweißprozesse gefügt werden. Generell kann gesagt werden, dass Aluminium ein zu 100% recycelbares Material ist, welches ohne Qualitätsverlust kontinuierlich recycelt werden kann. Dies trägt zur Reduzierung des Bedarfs an primären Aluminiumressourcen bei und verringert den CO₂-Ausstoß im Vergleich zur Herstellung von Aluminium aus primären Quellen. Dennoch erfordert die Herstellung von Traversensystemen den Einsatz von Energie und die mögliche Verwendung von Chemikalien. Die Umweltauswirkungen dieser Prozesse hängen von weiteren Faktoren ab, wie beispielsweise der Energiequelle (erneuerbar oder nicht erneuerbar), der Effizienz der Produktionsanlagen und dem Einsatz von umweltfreundlichen Verfahren. Die Ökobilanz eines Directed Energy Deposition - Arc Prozesses hängt ebenfalls von verschiedenen Faktoren ab, einschließlich der Energiequelle, des Materialverbrauchs, der Abfallerzeugung und des gesamten Lebenszyklus des resultierenden Produkts. Mehrere Studien zeigen auf, dass DED - Arc im Vergleich zu konventionellen Herstellungsmöglichkeiten eine signifikant bessere ökologische Alternative bieten kann. So berichten Reis et al., dass DED - Arc im Vergleich zur spanenden Bearbeitung, für drei untersuchte 3D - Geometrien, sich als ökologischstes Verfahren herausstellte. Die Ergebnisse der Analyse zur Umweltbelastung zeigen, dass DED - Arc die umweltfreundlichste Option ist und bei der Herstellung der unterschiedlichen Geometrien eine Verringerung der Umweltbelastung von ca. 12-45 % möglich ist. Reis et al. berichten außerdem, dass der Rohstoffverbrauch als Hauptfaktor für die Umweltbelastung gilt. Daher kann gesagt werden, dass DED - Arc bei der Herstellung der untersuchten Geometrien umweltfreundlicher ist, da es eine bessere Materialeffizienz aufweist als das CNC-Fräsen [REI23]. Dieser Konsens wird mit den Untersuchungen von Dias et al. bestätigt. Dabei berechnen sie, dass nahezu 75 % der Herstellungskosten von den Materialkosten getragen werden. Zwar ergeben sich durch die Einbindung der additiven Fertigung mehrere Teilprozesse in der gesamten Prozesskette, die finalen Produktionskosten können im Vergleich zu einer konventionellen subtraktiven Herstellung am untersuchten Bauteil um ca. 34 % reduziert werden [DIA22].

Die additive, drahtbasierte Fertigung behauptet sich folglich als lukrative Alternative zu konventionellen Herstellungsmethoden. So schreiben Bekker und Verlinden, dass DED-Arc durch den sehr effizienten Materialeinsatz und einer Topologieoptimierung, das Potential besitzt Gewicht und Kosten zu reduzieren. Die Beziehung zwischen Gewicht und Umweltbelastung sei linear. Wenn durch eine Topologieoptimierung das Produktgewicht um 20 % gesenkt werden kann, werden auch die Umweltbelastungen um 20 % reduziert. Je höher die Materialausnutzungen ist, desto größer ist der Nutzen von DED-Arc im Vergleich zum Sandformverfahren und CNC-Fräsen, aufgrund des geringeren Materialverbrauchs [BEK18]. Laut Brough und Jouhara liegt das CO₂ - Äquivalent bei der Herstellung von Aluminium in Deutschland bei 17 -18 CO₂ eq. / kg [BRO20]. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass bei einer intensiveren Materialausnutzung und der, durch eine Topologieoptimierung erhaltenen, Materialreduzierung mittels DED -Arc eine Reduzierung des CO₂ - Äquivalents umsetzbar ist. Des Weiteren ist die Herstellung von Zusatzdrähten energetisch und ökologisch günstiger als die von Halbzeugen.

Kontrovers dazu sind die Untersuchungen von Salcido et al. In deren Untersuchungen wurden unterschiedliche Werkstoffe wie Aluminium, Stahl, Furnierschichtholz und laminiertes Bambus verglichen, um eine netzartige Kuppelstruktur mit den Abmaßen 20 x 2,5 m [D x H] zu errichten. Dabei berechneten sie für Aluminium bezogen auf Stahl ein um ca. Faktor 7 höheres CO₂ - Äquivalent. An dieser Stelle sei jedoch angemerkt, dass die Berechnungen sich auf die Daten eines einzigen Unternehmens beziehen und die gewählte Software davon ausgeht, dass der Stahl zu 60 % recycelt und das Aluminium neu hergestellt wurde. Der entstandene Faktor wird demnach in Frage gestellt [SAL16]. Die Herstellung von NE - Metallen in Deutschland, wovon Aluminium ca. 18 % ausmacht, haben ein ca. 90 % geringes CO₂ - Äquivalent als die Eisen und Stahl - Herstellung [STA23]. Somit wird der angegebene Faktor von Salcido et al. kritisiert. Bezogen auf die additive Fertigung wird

das CO₂ – Äquivalent marginal ansteigen, da aus dem Aluminiumwerkstoff der benötigte Zusatzdraht gezogen werden muss und der Schweißprozess dazu kommt. Allerdings erreichen die summierten Äquivalente keinesfalls die der Stahlherstellung.

Final können keine allgemeingültigen Aussagen zu einer Ökobilanz getroffen werden. Das Einsparpotential durch den Einsatz von additiven Fertigungsverfahren wie dem DED - Arc muss im Einzelfall, produkt- und herstellerabhängig geprüft werden. Unumstritten bietet die additive Fertigung jedoch einen Wandel der „Just-in-Case“-Philosophie zu einer "Just-in-Time"-Philosophie. Additive Verfahren liefern das Potenzial, Wartung, Reparatur und Ersatzteilproduktion durchzuführen, auch wenn diese Möglichkeiten bisher weniger kommuniziert wurden. Die Möglichkeit, Komponenten zu warten und zu reparieren, anstatt sie zu entsorgen, bringt erhebliche Vorteile in Bezug auf Kosten und Umweltbelastung mit sich. Additive Verfahren können die Lieferkette und die teilweise kostenintensive Lagerung von Ersatzteilen vermeiden. Sektoren, die für Betriebsausfälle anfällig sind, z. B. die Schifffahrt oder Bauindustrie, sind auf eine schnelle Lieferung von Ersatzteilen angewiesen, sodass derzeit eine umfangreiche Ersatzteillagerung Anwendung findet. Eine richtige Einbindung von additiven Fertigungsverfahren in bestehende Prozessketten kann Betriebsausfallzeiten, Lagerhaltung oder Entsorgungen erheblich reduzieren [LAN21].

Planungsgrundlagen

Der Einsatz der additiven Fertigung erlaubt einen hohen Grad an Designfreiheit. Allerdings fehlen den derzeitigen Softwarelösungen notwendige Randbedingungen, sodass eine digitale Nacharbeit des z.B. topologieoptimierten Knotens zwingend erforderlich ist. Möglichkeiten, bestimmte Grenzwinkel, kritische Überhänge oder Anschlusselemente im Vorfeld zu berücksichtigen, sind für eine verbesserte Automatisierbarkeit wesentlich. Dabei ist auch das Zusammenspiel von Soft- und Hardware essentiell. Komplexe dreidimensionale Bauteile wie der topologieoptimierte Knoten erfordern ein entsprechendes 5-Achsiges Handlingsystem mit integriertem Drehkipptisch. Somit können Zwangslagen vermieden und Aufbaurichtungen optimiert gestaltet werden. Für die exakte Auswertung der Prozessdaten sind ebenfalls geeignete DAQ- und Messsysteme erforderlich. Nachfolgend sind die notwendigen Schritte und Planungsgrundlagen zur Herstellung topologieoptimierter, komplexer Knotenstrukturen aufgeführt:

Anlagen- und Messtechnik

- Mindestens 5 - Achsiges Handlingsystem (z.B. 3 – Achs - Portal mit 2 – Achs - Drehkipptisch)
- Ohne Drehkipptisch: Überhänge mit einem Winkel von 40° zur Vertikalen vermeiden
- Schweißstromquelle inkl. Schweißbrenner und Zubehör
- DAQ-System zur Aufnahme von Strom und Spannungswerten
- Thermoelemente oder Pyrometer zur Aufnahme der Zwischenlagentemperatur

Software

- Auswertung von Temperatur-, Strom- und Spannungsmesswerten
- CAD Programm zur Erstellung und Nachbearbeitung des Geometriemodells

- Simulationsprogramm für statische oder dynamische Festigkeitsanalyse
- Simulationsprogramm für Topologieoptimierung
- CAD/CAM Programm zum Slicen des Bauteils und zur Erstellung der Werkzeugbahn

Geometriemodell und Lastfall

- Exakte Knotenlasten und Lastfälle müssen bekannt sein
- Anpassung maximaler Bauraum für den Knoten an Tragwerk
- Definition der Randbedingungen in Abhängigkeit des Materials
- Vorabdefinition der maximal zulässigen Knotenmasse
- Definition der Zielfunktion gemäß Anforderungen

Arbeitsschritte

- Ermittlung geeigneter Schweißparameter für den zu verwendenden Zusatzwerkstoff
- Überprüfung der Simulationsergebnisse
- Mit Dreh-Kipptisch: Zugänglichkeit über Simulation der Bahnplanung überprüfen
- Herstellung des Bauteils

Entwicklung und Spezifikation weiterer Anwendungsfelder

Parameteranalyse

Die Parameteranalyse bezieht sich auf die gewonnenen Erkenntnisse aus den Versuchsreihen, der mechanischen Untersuchungen, auf die Herstellung der Demonstratorsegmente und des Demonstrators selbst. Dabei zeigt sich, dass die Berücksichtigung der Zwischenlagentemperatur einen erheblichen Faktor in der additiven Fertigung von Aluminiumlegierungen darstellt. Zum einen sind je nach Temperaturführung unterschiedliche Raupengeometrien zu erwarten, sodass beispielsweise die Schichthöhe die notwendige Lagenanzahl und Endkontur bestimmt. Zum anderen bilden sich in Abhängigkeit der Aluminiumlegierung (naturhart bzw. aushärtbar) bestimmte Gefügemorphologien und damit charakteristische, mechanisch – technologische Eigenschaften. Anders als beim konventionellen Auftrag- oder Verbindungsschweißen verändern sich bei der additiven Fertigung die Abkühlbedingungen in Abhängigkeit der Strukturgeometrie und -höhe. Um homogene Werkstoffeigenschaften entlang der gesamten Bauteilhöhe zu erhalten, muss insbesondere die Zwischenlagentemperatur eingehalten werden.

Das untersuchte Versuchsfeld zeigt außerdem, dass minimale Wandstärken von ca. 3,5 mm mit einem 1,2 mm Drahtdurchmesser (EN AW 5183) möglich sind. Allerdings sind bei den hier gewählten Parametern die Toleranzen für mögliche Instabilitäten wie z.B. Stromschwankungen, Unterschreitung der Zwischenlagentemperatur oder ungleichmäßige Schweißgeschwindigkeit sehr gering. Im Sinne eines größeren Toleranzfeldes für Prozessinstabilitäten empfiehlt es sich, Bauteilgeometrien zu wählen, welche eine Mindestwandstärke von 4,0 mm aufweisen. Somit kann beispielsweise die Schweißgeschwindigkeit reduziert werden, sodass die Empfindlichkeit für Unregelmäßigkeiten abnimmt. Sind dennoch Strukturen < 4,0 mm gefordert, empfiehlt es sich auf dünnere Drahtdurchmesser, z.B. 1,0 mm, umzusteigen.

Untersuchung zur Variation des Materials

Dargestellte Traversen für die Veranstaltungstechnik sind aufgrund ihrer unkomplizierten Handhabung, kombiniert mit einer hohen Festigkeit und Stabilität, an die Leichtbautechnologie gebunden. Daher ist es nicht sinnvoll, Traversensysteme aus Stahl, Messing oder ähnlichen Werkstoffen herzustellen. Die Variation des Materials befasst sich folglich innerhalb der Aluminiumlegierungen. Wie bereits erläutert, ist das Schweißen von Aluminium oftmals mit Defekten wie Poren oder Heißrissen verbunden. Insbesondere die 4xxx-Aluminiumgusslegierungen (z.B. AlMgSi10, AlSi12) sind sehr anfällig für Poren, sodass die zulässigen Festigkeiten nur bedingt erreicht werden. Untersuchungen zeigen jedoch, dass es möglich wäre der Porosität entgegenzuwirken, wenn beim Schweißprozess eine Niederdruckatmosphäre von 10 bar anliegen würde [TREU21]. Allerdings wird der Aufwand für eine Serienfertigung und der resultierende Nutzen vergleichsweise gering eingestuft.

Für die additive Fertigung von Traversen aus Aluminium werden erwiesenermaßen 5xxx - und 6xxx - Aluminiumlegierungen empfohlen. Unter den 5xxx - Aluminiumlegierungen besitzt die ausgewählte AlMg4,5Mn zum Zeitpunkt der Arbeit die höchsten mechanisch - technologischen Eigenschaften und ist darüber hinaus besonders gut schweißbar. Mit Hinblick auf die simulierten Ergebnisse könnten durch die geringere Beanspruchung der topologieoptimierten Knotenstruktur Aluminiumlegierungen eingesetzt werden, welche geringere Festigkeiten aufweisen. Somit könnten Legierungen verwendet werden, welche nicht so hochlegiert sind und günstiger in der Beschaffung wären (z.B. AlMg3). Den praktischen Nachweis hierfür gilt es in der Schweißtechnik zunächst noch zu erbringen.

Bei den 6xxx - Aluminiumlegierungen dominieren die Legierungen AlSi1MgMn (bzw. AlMg1SiCu) aufgrund ihrer hohen Festigkeit. Da es sich um aushärtbare Legierungen handelt, kann der Festigkeitszustand durch Wärmebehandlungen stark beeinflusst werden. Als geeigneter Schweißzusatzwerkstoff existiert lediglich die untersuchte AlMg0,7Si, als artähnliche Aluminiumlegierung. Mit einigen Prozessanpassungen und veränderten Randbedingungen (z.B. Wandstärken > 4,0 mm) sind auch hier erfolgsversprechende Ergebnisse zu erwarten.

Weitere Anwendungsmöglichkeiten

Anwendungsmöglichkeiten additiver Fertigungsverfahren wie dem Directed Energy Deposition – Arc sind an sich mannigfaltig. In erster Linie beziehen sich diese Anwendungen auf großvolumige Bauteile mit mittlerem bis hohem Komplexitätsgrad, welche mit mittleren und hohen Aufbauraten hergestellt werden können. Wichtig an dieser Stelle ist, dass für die Anwendung die notwendigen Werkstoffe zum einen als Schweißzusatzwerkstoffe vorliegen und zum anderen diese auch schweißbar sind. Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens lassen sich auf eine große Anzahl von Anwendungen übertragen. Die Topologieoptimierung beispielsweise kann nicht nur im Traversenbau Anwendung finden, sondern kann besonderes in folgenden Bereichen eingesetzt werden:

- Luft- und Raumfahrt
- Fahrzeugbau
- Brückenbau
- Anlagenbau
- Fassadenbau
- Werkzeug- und Formbau.

Topologieoptimierte Bauteile finden bereits Anwendung im Güterverkehr, im Fassadenbau oder im Brückenbau. So sind in Amsterdam beispielsweise bereits zwei Brücken additiv mittels DED – Arc gefertigt worden [MX23, OOS23]. In Anbetracht der noch notwendigen Ingenieursleistung und den aufwändigen Vorarbeiten hinsichtlich Prozesseinstellung und Ermittlung der resultierenden Schweißqualität, ist die additive Fertigung mittels DED-Arc für eine Massenfertigung nur bedingt geeignet. Hinsichtlich der notwendigen Stückzahlen ist trotz der vorteilhaften, geschätzten Ökobilanz eine Einzel- bis Kleinstserienfertigung zu empfehlen.

Abhängig vom Werkstoff und von der Prozessart können generell sowohl dünnwandige, als auch dickwandige Bauteile additiv gefertigt werden. Somit können beispielsweise Flugzeugträger aus Titanwerkstoffen effizienter hergestellt werden. Weiter können Formen für Gießprozesse oder für den Werkzeugbau mittels additiver Fertigung erheblich einfacher und günstiger gefertigt werden. Auch werden Bereiche, bei denen eine hybride Bauweise erforderlich ist, mit der additiven Fertigung abgedeckt. Beispielsweise kann an einem Bauteil eine Verschleißschutzschicht durch den Einsatz eines zweiten Brennersystems, direkt integriert werden, um funktionalisierte Oberflächen zu erzeugen.

Zuletzt sei insbesondere das Anwendungsfeld der Reparatur bestehender Werkzeuge, Bauteile oder Bauwerke zu nennen. So könnten mit Hilfe der additiven Fertigung, beschädigte Tragwerke und –bauten via 3D-Scan analysiert, beschädigte Oberflächen bzw. Geometrien erkannt, mittels CAD – Modellierung rekonstruiert und lokal mittels additiver Fertigung neu aufgebaut und instandgesetzt werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Eignung additiv hergestellter Strukturen für die Anforderungen des Bauwesens untersucht. Hierbei wurden die mechanisch - technologischen Eigenschaften von zwei Aluminiumlegierungen, EN AW 5183 und EN AW 6063, mittels eines Directed Energy Deposition - Arc AC-Prozesses analysiert. Ziel war es, den Einfluss der Schweißparameter auf die erzielten Prozessleistungen, Schweißraupengeometrien und Gefügemorphologien systematisch zu untersuchen und zu bewerten.

Zunächst wurden die Aluminiumlegierungen charakterisiert. Es wurden Grenzwerte für einen stabilen AC-Prozess definiert, die Festigkeitseigenschaften durch geeignete Temperaturführung kontrolliert und die Bildung von Unregelmäßigkeiten vermieden. Zudem wurden hohe Auftragsraten von mehr als 1,1 kg/h und eine Endkontur von über 80 % angestrebt, um sowohl kurze Prozesszeiten als auch geringe Nacharbeiten zu erzielen. Während der Versuche wurden die Eingangsgrößen wie Drahtvorschubgeschwindigkeit, Schweißgeschwindigkeit, Schweißspannung, Schweißstrom sowie Grundstrom, Niederstrom, EN-Anteil und Zwischenlagentemperatur analysiert. Die berechneten Streckenenergien lagen je nach Aluminiumlegierung zwischen 0,6 und 2,75 kJ/cm. Neben einlagigen Schweißraupen wurden sowohl mehrlagige, einreihige Wandstrukturen, als auch mehrlagige zylindrische Strukturen geschweißt. Dabei wurde der Einfluss der Zwischenlagentemperatur auf den Temperaturgradienten ermittelt, um Aussagen über die entstandene Geometrie, Endkontur und Gefügemorphologie zu treffen und deren Auswirkungen auf die mechanisch - technologischen Eigenschaften zu diskutieren.

Die mechanischen Eigenschaften wurden mittels standardisierter Prüfmethode für Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Vickershärte ermittelt. Metallografische Untersuchungen zeigten, dass unabhängig von der Aluminiumlegierung keine Heißrisse festgestellt wurden und die Porosität mit maximal 0,7 % keinen signifikanten Einfluss auf die Schweißqualität hatte. Es zeigte sich zudem, dass die naturharte EN AW 5183 unabhängig von der Zwischenlagentemperatur vergleichbare Festigkeiten aufwies, während die aushärtbare EN AW 6063 bei unterschiedlichen Temperaturen stark entfestigende Effekte zeigte. Durch empfohlene Wärmenachbehandlungen kann das entstandene, additive Gefüge jedoch in einen gewünschten Festigkeitszustand gebracht werden. Ein Vergleich der ermittelten Werkstoffeigenschaften mit den Datenblättern des Herstellers und den angegebenen Normwerten ergab ähnliche Kennwerte. Durch zusätzliche Wärmenachbehandlungen könnten diese Eigenschaften weiter verbessert werden. Die Schweißzeiten und Gesamtaufbauzeiten wurden erfasst, um den technischen Aufwand der Fertigung zu quantifizieren. Unabhängig von den thermischen Eigenschaften der untersuchten Aluminiumlegierungen wurde festgestellt, dass eine Zwischenlagentemperatur von etwa 100°C einen optimalen Kompromiss zwischen der Gesamtdauer des Prozesses und den daraus resultierenden Gefügeeigenschaften darstellt. Im Rahmen der Demonstratorherstellung wurden Grenzparameter festgelegt, um potenzielle Entfestigungsmechanismen zu vermeiden und dünnwandige Strukturen zu erzeugen.

Parallel zur Charakterisierung der Zusatzwerkstoffe wurde ein Dreigurtträgerknoten mit einem Öffnungswinkel von 60° ausgewählt, um eine Topologieoptimierung durchzuführen. In diesem Forschungsvorhaben konnte gezeigt werden, dass durch den Einsatz von Topologieoptimierung eine bionische Knotenstruktur erzeugt werden kann, die sowohl eine bedeutende Steifigkeitserhöhung als auch eine erhebliche Massenreduktion aufweist. Dadurch konnten die vorherrschenden Spannungen und die Gesamtverformung des Knotens und des angeschlossenen Traversensystems deutlich verringert werden. Im Vergleich zu herkömmlich hergestellten Knoten wies der topologieoptimierte Knoten eine Massereduktion von -38,8 % und eine Verringerung des Bauraums um -74,2 % auf, während gleichzeitig die Steifigkeit erhöht wurde. Als Ergebnis konnte die Verformung am Knoten um -86,8 % reduziert werden. Dies ermöglicht eine potenzielle Erhöhung der Belastung des Traversensystems um 143 %, während die ursprüngliche Funktionalität des Dreigurtträgerknotens erhalten bleibt.

Basierend auf den Forschungsergebnissen wurde eine neuartige und innovative Strategie zur Erzeugung additiver Aluminiumstrukturen mittels AC – MSG erarbeitet. Die Erkenntnisse der Charakterisierung dienen als Grundlage für die Einbindung additiver Fertigungsverfahren in das Bauwesen. So können die gewonnenen Erfahrungen beispielsweise auf weitere Legierungssysteme bzw. Schweißzusatzwerkstoffe übertragen werden und in Abhängigkeit des Anwendungsfalls zu einer erheblichen Ressourceneinsparung und Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von deutschen Unternehmen führen. Mit dem Vorhaben wird den Anwendern des Metall-Schutzgasschweißens in Deutschland eine Prozessstrategie übermittelt, die zur Herstellung additiver Aluminiumstrukturen dient und somit auch zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit und der Wettbewerbsfähigkeit führt. Die technische Umsetzung des AC – MSG – Prozesses ist auch für die Anwender problemlos möglich und wirtschaftlich tragbar, da Standardkomponenten von nahezu allen Systemlieferanten verwendet werden können. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden die Versuchsreihen so geplant, dass eine allgemeine Übertragung auf andere Schweißanlagen ermöglicht wird. So erfolgte beispielweise die Prozessführung und Bewertung über die industriell bekannten Prozessparameter und anerkannte Schweißgröße Streckenenergie. Es ist zu erwarten, dass der Einsatzbereich des Verfahrens erweitert wird, da sich die Freiheiten bei der Parametereinstellung je nach Handling- und Schweißsystem steigern lassen. Das Simulationsmodell kann als Grundlage für weitere Geometrieauslegungen von Knotenstrukturen dienen und so das Potential einer Topologieoptimierung unterstreichen.

Weiterführende Untersuchungen können in folgenden Bereichen zusätzliche Erkenntnisse hervorbringen:

- Untersuchung des Einflusses der Aufbaustrategie für deutlich größere Wandstärken auf die mechanisch - technologischen Eigenschaften,
- Untersuchung des Einflusses der Verwendung von unterschiedlichen Schweißprozessparametern und Lichtbogenarten für die Herstellung von Außenkonturen und Füllungen für additiv gefertigte Bauteile,
- Ermittlung der optimalen Art die Größe des Designraumes für die Topologieoptimierung zu bestimmen,
- Validierung der Topologieoptimierung für unterschiedliche Lastfälle und Knotenstrukturen mit unterschiedlichen Öffnungswinkeln,
- Entwicklung genauerer Vorhersagemodelle für die Schweißbeigenspannungen, den Schweißverzug und die mechanischen Eigenschaften mittels der Schweißstruktursimulation.

Ergebnispräsentationen

Im Rahmen der 17. Projektetage der Bauforschung vom 08. Bis 10. Juni 2021 (online) wurden die ersten Herangehensweisen diskutiert und Forschungsergebnisse präsentiert. Während der Projektlaufzeit wurden zwei LinkedIn Beiträge November 2021 und März 2022 online veröffentlicht. Im Rahmen der 22. Projektetage der Bauforschung vom 22. bis 23. November 2022 (online) wurde der Zwischenstand des Projektes präsentiert. Am 22. März 2023 wurde das Projekt auf der „Fachausschusssitzung 03 des deutschen Verbandes für Schweißen und verwandte Verfahren (DVS e.V.)“ in Chemnitz vorgetragen. Ergebnisse und Bauteile des Vorhabens wurden im Rahmen der Rapid.tech 3D Messe in Erfurt präsentiert und ausgestellt. Inhalte des Forschungsvorhabens wurden kontinuierlich in Lehrveranstaltungen des Fachgebietes Fertigungstechnik an der Technischen Universität präsentiert. Weitere Veröffentlichungen sind geplant.

Außerhalb der Projektlaufzeit wurde ein weiterer LinkedIn Beitrag im Juli 2023 veröffentlicht, welcher die Herstellung des Demonstrators veranschaulicht.

Abschluss- und Projektarbeiten

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde im Jahr 2021 eine Bachelorarbeit mit dem Thema „Additive Fertigung und werkstofftechnische Prüfung von Aluminiumstrukturen mittels AC-Metallschutzgasschweißen“ abgeschlossen.

Weitere Themen wurden mit Studierenden in verschiedenen Projekten bearbeitet.

Mitwirkende

Autorinnen und Autoren

M.Sc. Schmidt, Kiril (Technische Universität Ilmenau)

Dr.-Ing. Hildebrand, Jörg (Technische Universität Ilmenau)

Prof. Dr.-Ing. habil. Bergmann, Jean-Pierre (Technische Universität Ilmenau)

Projektpartner und weitere Fördermittelgeber

EWM AG, Dr. Günther-Henle-Straße 8, 56271 Mündersbach

Messer SE & Co. KGaA, Kleinewedersstraße 1, 47803 Krefeld

RSB Rudolstädter Systembau GmbH, Oststraße 40, 07407 Rudolstadt

Westfälische Drahtindustrie GmbH, Friedensstr. 21, 06420 Rothenburg

Fachliche Betreuung

Dr.-Ing. Michael Brüggemann

BRÜGGEMANN KISSELER INGENIEURE, i.A. BBSR, Referat WB 3

Kurzbiographien



M.Sc. Kiril Schmidt

Kiril Schmidt, Jahrgang 1993, studierte zwischen 2012 und 2019 Maschinenbau in der Vertiefungsrichtung Produktionstechnik an der Technischen Universität Ilmenau. Von 2017 bis 2019 war er als wissenschaftlicher Assistent am Fachgebiet Fertigungstechnik der Technischen Universität tätig. Seit 2019 ist Kiril Schmidt als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich der Lichtbogentechnik, additiven Fertigung und Numerischen Simulation tätig.



Dr.-Ing. Jörg Hildebrand

Jörg Hildebrand, Jahrgang 1976, studierte Bauingenieurwesen an der Bauhaus-Universität Weimar. Von 2001 bis 2010 war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Stahlbau Bauhaus-Universität Weimar beschäftigt und erlangte den Grad des Dr.-Ing. im Jahre 2008. Von 2010 bis 2015 leitete er die Juniorprofessur „Simulation und Experiment“ der Bauhaus-Universität Weimar und war im selben Zeitraum wissenschaftlicher Leiter der Versuchstechnischen Einrichtung (VTE). Seit 2016 ist er im akademischen Rat und am Fachgebiet Fertigungstechnik der Technischen Universität Ilmenau tätig.

Dr.-Ing. Hildebrand ist Obmann des DIN/DVS Gemeinschaftsausschusses „Schweißsimulation“, Vorsitzender des Vereins zur Förderung der „numerischen Analyse von Wärmebehandlungs- und Schweißprozessen“ (FWS e.V.), sowie Mitglied im deutschen Verband für Schweißen und verwandte Verfahren (DVS e.V.), Bauhaus-Institut für experimentelle Architektur (ifex), Institut für autarke Energieversorgung (IAE e.V.) und in der Bauforumstahl Arbeitsgemeinschaft Stahl & Glas.



Prof. Dr.-Ing. habil. Jean Pierre Bergmann

Jean Pierre Bergmann, Jahrgang 1972, studierte Maschinenbau an der Universität Ancona (Italien), mit Aufenthalten an der Universität Split (Kroatien) und an der Technischen Universität Braunschweig (Institut für Schweißtechnik). Von 1999 bis 2003 war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter und anschließend als wissenschaftlicher Assistent (C1) am Lehrstuhl Metallische Werkstoffe an der Universität Bayreuth und erlangte den Grad des Dr.-Ing. im Jahre 2003. Von 2003 bis 2007 war er wissenschaftlicher Assistent (C1) im Fachgebiet Fertigungstechnik der Technischen Universität Ilmenau und habilitierte im Jahr 2008. Von 2007 bis 2010 war er Abteilungsleiter Laser Metal Processing und dann Profit Center Leiter Automotive Packaging in der JENOPTIK Automatisierungstechnik GmbH Jena. Seit 2010 ist er als Universitätsprofessor (W3) für die Festigungstechnik an der TU Ilmenau tätig. Jean Pierre Bergmann ist Mitglied in der Wissenschaftlichen Gesellschaft Lasertechnik WLT e.V., Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig und Mitglied im Forschungsrat der FV des DVS E.V.

Literaturverzeichnis

- ABE14 Abele E. 2014. Einordnung und Ausblick von additiven Fertigungsverfahren aus produktions-technischer Sicht. Fachvortrag zur Veranstaltung des hess. Minist. für Wirtschaft, Energie, Ver-kehr und Landesentwicklung, Hanau
- ADA13 Adamiec J, Pfeifer T. 2014. Effect of Electrode Negative Ratio in AC MIG Welding of Aluminium Alloy 6082 on the Microstructure and Properties of Heat Affected Zone. *Solid State Phenomena*. 211:39–46. doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.211.39.
- ALD21 Aldalur E, Suárez A, Veiga F. 2021. Metal transfer modes for Wire Arc Additive Manufacturing Al-Mg alloys: Influence of heat input in microstructure and porosity. *Journal of Materials Processing Technology*. 297:117271. doi:10.1016/j.jmatprotec.2021.117271.
- BAI17 Bai J, Ding HL, Gu JL, Wang XS, Qiu H. 2017. Porosity evolution in additively manufactured alu-minium alloy during high temperature exposure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 167:012045. doi:10.1088/1757-899x/167/1/012045.
- BEK18 Bekker ACM, Verlinden JC. 2018. Life Cycle Assessment of Wire + Arc Additive Manufacturing compared to green sand casting and CNC milling in stainless steel, *Journal of Cleaner Produc-tion*. doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.148
- BRO20 Brough D, Jouhara H. 2020. The aluminium industry: A review on state-of-the-art technologies, environmental impacts and possibilities for waste heat recovery. *International Journal of Ther-mofluids*. Volumes 1–2. ISSN 2666-2027. doi.org/10.1016/j.ijft.2019.100007.
- CON15 Cong B, Ding J, Williams S. 2015. Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy. *The International Journal of Advanced Manufac-turing Technology*. 76(9-12):1593–1606. doi:10.1007/s00170-014-6346-x.
- CON16 Cong B, Ouyang R, Qi B, Ding J. 2016. Influence of Cold Metal Transfer Process and Its Heat Input on Weld Bead Geometry and Porosity of Aluminum-Copper Alloy Welds. *Rare Metal Ma-terials and Engineering*. 45(3):606–611. doi:10.1016/S1875-5372(16)30080-7.
- CON17 Cong B, Qi Z, Qi B, Sun H, Zhao G, Ding J. 2017. A Comparative Study of Additively Manufac-tured Thin Wall and Block Structure with Al-6.3%Cu Alloy Using Cold Metal Transfer Process. *Applied Sciences*. 7(3):275. doi:10.3390/app7030275.
- DIA22 Dias M, Pragana, JPM, Ferreira B, Ribeiro I, Silva CMA. 2022. Economic and Environmental Po-tential of Wire-Arc Additive Manufacturing. *Sustainability*. 14. 5197. doi.org/10.3390/su14095197.
- DIN14a DIN e.V. (Hrsg.) (EN 1999-1-1:2007 + A1:2009 + A2:2013): DIN EN 1999-1-1:2014-03. Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln; Deutsche Fassung EN 1999-1-1:2007 + A1:2009 + A2:2013. Beuth-Verlag. Berlin. 2014.
- DIN14b DIN e.V. (Hrsg.) (IEC 56/1549/CD:2014): DIN EN 60300-3-3:2014-09. Zuverlässigkeitsmanage-ment - Teil 3-3: Anwendungsleitfaden – Lebenszykluskosten. Beuth-Verlag. Berlin. 2014.
- DIN14c DIN e.V. (Hrsg.). DIN EN ISO 18265:2014-02. Metallische Werkstoffe - Umwertung von Härte-werten. Beuth-Verlag. Berlin. 2014.

- DIN17 DIN e.V. (Hrsg.) (ISO 18265:2013): DIN EN 754-2:2017-02. Aluminium und Aluminiumlegierungen - Gezogene Stangen und Rohre - Teil 2: Mechanische Eigenschaften, Beuth-Verlag. Berlin. 2017.
- DIN19 DIN e.V. (Hrsg.) (ISO 10042:2018): DIN EN ISO 10042:2018. Schweißen - Lichtbogenschweißverbindungen an Aluminium und seinen Legierungen - Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten. Beuth-Verlag. Berlin. 2019.
- EUR19 Eurotruss Catalogue 2019-V5. Eurotruss BV. Niederlande. S.38f
- FAN18 Fang X, Zhang L, Li H, Li C, Huang K, Lu B. 2018. Microstructure Evolution and Mechanical Behavior of 2219 Aluminum Alloys Additively Fabricated by the Cold Metal Transfer Process. *Materials*. 11(5):812. doi:10.3390/ma11050812.
- GIE13 Gieseke M. 2013. Additive Fertigung: Neue Wege in der Medizintechnik. Vortrag zum Technologietag „Laserlicht für die Medizintechnik“. Hamburg.
- GIE20 Gierth M, Henckell P, Ali Y, Scholl J, Bergmann JP. 2020. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Aluminum Alloy AlMg5Mn with Energy-Reduced Gas Metal Arc Welding (GMAW). *Materials*. 13(12):2671. doi:10.3390/ma13122671.
- GOL84 Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. 1984. A new finite element model for welding heat sources. *Metallurgical Transactions B*. 15(2). S. 299–305.
- GU14 Gu JL, Ding JL, Cong BQ, Bai J, Gu HM, Williams SW, Zhai YC. 2014. The Influence of Wire Properties on the Quality and Performance of Wire+Arc Additive Manufactured Aluminium Parts. *Advanced Materials Research*. <https://www.scientific.net/AMR.1081.210>.
- GU16 Gu J, Ding J, Williams SW, Gu H, Ma P, Zhai Y. 2016. The effect of interlayer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys. *Journal of Materials Processing Technology*. 230:26–34. doi:10.1016/j.jmatprotec.2015.11.006.
- HOR74 Horn V, Bernhard W, Buneß K, Kretschmar E, Stein H. 1974. Schweißtechnischer Gefügeatlas. VEB Verlag Technik Berlin. Berlin. VLN 201.
- LAN21 Langelandsvik G, Akselsen OM, Furu T, Roven HJ. 2021. Review of Aluminum Alloy Development for Wire Arc Additive Manufacturing. *Materials*. 145370. doi.org/10.3390/ma14185370
- MIL98 Military Handbook. 1998. MIL-HDBK-5H-Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures. S. 3 – 277.
- MUD07 Mudge RP, Wald NR. 2007. Laser engineered net shaping advances additive manufacturing and repair. *Welding Journal-New York-*, 86(1), 44.
- MX23 MX3D. 30.03.2023. MX3D Bridge. <https://mx3d.com/industries/mx3d-bridge/>.
- OOS23 Oost-online. 27.06.2023. <https://oost-online.nl/zonnewendebbrug-geopend/>.
- REI23 Reis RC, Kokare S, Oliveira JP, Matias JCO, Godina R. 2023. Life cycle assessment of metal products: A comparison between wire arc additive manufacturing and CNC milling. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. Volume 6. ISSN 2666-9129. doi.org/10.1016/j.aime.2023.100117.
- ROO08 Roos E, Maile K. 2008. *Werkstoffkunde für Ingenieure*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-68398-8. doi:10.1007/978-3-540-68403-9.

- RYA18 Ryan EM, Sabin TJ, Watts JF, Whiting MJ. 2018. The influence of build parameters and wire batch on porosity of wire and arc additive manufactured aluminium alloy 2319. *Journal of Materials Processing Technology*. 262:577–584. doi:10.1016/j.jmatprotec.2018.07.030.
- SAL16 Salcido JC, Raheem AA, Ravi S. 2016. Comparison of embodied energy and environmental impact of alternative materials used in reticulated dome construction. *Building and Environment*. Volume 96. S. 22-34. ISSN 0360-1323. doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.010.
- SCH05 Schumann H, Oettel H. 2005. *Metallografie*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim. 14.Auflage. ISBN 3-527-30679-X
- SOU10 Souza D, de Resende AA, Scotti A. 2010. A qualitative model to explain the polarity influence on the fusion rate in the MIG/MAG process. *Welding International*. 24(12):934–941. doi:10.1080/09507110903569032.
- STA96 Starke EA, Staley JT. 1996. Application of modern aluminum alloys to aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*. 32(2-3):131–172. doi:10.1016/0376-0421(95)00004-6.
- STA23 Statista.com. 30.03.2023. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1078829/umfrage/treibhausgasemissionen-der-deutschen-industrie-nach-branchen/>.
- TREU21 Treutler K, Brechelt S, Wiche H, Wesling V. 2021. Beneficial use of hyperbaric process conditions for welding of aluminium and copper alloys. *Welding in the World*. Volume 65. Pages 1623–1631. doi.org/10.1007/s40194-021-01088-1
- WAN20 Wang Y, Wang Z, Hu S, Chen Y. 2020. Numerical investigation on the influences of molten pool behavior on weld penetration depth in pulsed gas metal arc welding. *Eng. Res. Express* 2 025040. doi:10.1088/2631-8695/ab9964
- WIL15 Ding D, Pan Z, Cuiuri D, Li H, van Duin S, Larkin N. 2016. Bead modelling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 39:32–42. doi:10.1016/j.rcim.2015.12.004.
- ZHA18 Zhang C, Li Y, Gao M, Zeng X. 2018. Wire arc additive manufacturing of Al-6Mg alloy using variable polarity cold metal transfer arc as power source. *Materials Science and Engineering: A*, 711, 415-423. doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.084.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht der im Forschungsvorhaben definierten Arbeitspakete	13
Abbildung 2: Begriffsdefinition anhand einer Dreigurträger Traverse	15
Abbildung 3: a) Festgelegtes Traversensystem mit Detailansicht des zu optimierenden Dreigurträger Knotens (grün), b) Auf dem Markt erhältlicher Dreigurträger Knoten mit Öffnungswinkel 60° und entsprechenden Maßen nach [MPK21]	16
Abbildung 4: Berechnete Biegemomente M_y für a) UDL und b) CPL	17
Abbildung 5: schematische Darstellung des Impulslichtbogens und dessen Phasen	21
Abbildung 6: Der Effekt von wechselnder Polarität auf das Schmelzbad und den Festigungsprozess nach [ZHA18]	21
Abbildung 7: Eingebrachte Streckenenergie (engl.: heat input, HI) in Abhängigkeit des Verhältnisses von Drahtvorschub und Schweißgeschwindigkeit (Ratio). Vergleich der Lichtbogenmodi: Impulslichtbogen (engl.: Pulsed-GMAW), energiereduzierter geregelter Kurzlichtbogen EWM (Cold Arc) mit dem Impuls-AC-Metallschutzgasschweißprozess (Pulsed-AC) und den Drahtvorschubgeschwindigkeiten (a) 4 m/min und (b) 8 m/min [ALD21]	22
Abbildung 8: Durchschnittlicher Porenanteil für die Lichtbogenprozesse: Impulslichtbogen (Pulsed-GMAW), energiereduzierter geregelter Kurzlichtbogen EWM (Cold Arc) und Impuls-AC-Metallschutzgasschweißen, nach [ALD21]	23
Abbildung 9: Makrostruktur der EN AW 5183 mit konstanter Stromstärke von 100 A und variierendem EN-Anteil, nach [ADA13]	23
Abbildung 10: Versuchsaufbau für a) Versuchsreihen mit Messgeräten und b) die Herstellung des Demonstrators	24
Abbildung 11: Schematische Darstellung der relevanten Schweißraupengeometrie	26
Abbildung 12: Schematische Darstellung der Wandstrukturen. Dargestellt sind Positionen der eingelegten Thermolemente 1 (5mm), 2 (55mm) und 3 (105mm), der Bereich der Metallografieprobe und den Zugproben	27
Abbildung 13: schematische Darstellung a) der Ebenenpositionierung zur Vermessung der Außengeometrie und b) Vermessung der minimalen Strukturbreite (b_{\min}) und maximalen Strukturbreite (b_{\max}) zur Berechnung der Endkontur	28
Abbildung 14: Versuchsaufbau für mehrlagige Wandstrukturen und Temperaturmessung	30
Abbildung 15: Strom-Spannungsverläufe am Werkstoff EN AW 5183 für a) einen kurzschlussbehafteten Lichtbogen mit Schweißspannung $U_s = 15,5V$ und b) kurzschlussfreien Lichtbogen mit Schweißspannung $U_s = 17,5 V$	32
Abbildung 16: Streckenenergie E_s beim arArc-Prozess aufgeteilt in positive Phase, negative Phase und die resultierende summierte Streckenenergie über die Schweißspannung U_s . Querschliffe der EN AW 5183 für die Schweißspannungen 15,5V, 17,5V, 19,5V und 20,5V	33
Abbildung 17: Streckenenergie E_s beim arArc-Prozess aufgeteilt in positive Phase, negative Phase und die resultierende summierte Streckenenergie über den EN-Anteil. Querschliffe der EN AW 5183 für die EN-Anteile 90%, 70%, 30% und 10%	33
Abbildung 18: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des arArc Prozesses mit a) EN Anteil 10 % und b) EN-Anteil 90 %	34

- Abbildung 19: Streckenenergie E_s beim arArc-Prozess aufgeteilt in positive Phase, negative Phase und die resultierende summierte Streckenenergie über den Grundstrom I_G . Querschliffe der EN AW 5183 für den Grundstrom 28A und 68A 35
- Abbildung 20: Querschliffe der untersuchten 4-lagigen Wandstrukturen aus EN AW 5183. Die Proben wurden mittels Ätzlösung nach Kroll präpariert. 36
- Abbildung 21: Vergleich der EN AW 5183 Blindraupen und 4-lagigen Wandstrukturen hinsichtlich der Porosität 37
- Abbildung 22: 3D-Scans der gefertigten Wandstrukturen aus EN AW 5183 mit unterschiedlichen Zwischenlagentemperaturen 38
- Abbildung 23: schematische Darstellung der gemessenen Bereiche der Wandstrukturen (a), (b) und (c) und die gemessenen Härtewerte einer EN AW 5183 mit den Zwischenlagentemperaturen $T_{ZW} = 40\text{ °C}$, $T_{ZW} = 100\text{ °C}$, $T_{ZW} > 300\text{ °C}$. 39
- Abbildung 24: Gefügemorphologie einer EN AW 5183 mit einer Zwischenlagentemperatur T_{ZW} von a) 40 °C und b) $> 300\text{ °C}$. Das Gefüge wurde mit einem Ätzverfahren nach Barker anodisiert. 40
- Abbildung 25: Querschliffe zylindrischer Strukturen aus EN AW 5183 mit einem Durchmesser von 30 mm, 50 mm und 100 mm. 40
- Abbildung 26: Blindraupen aus EN AW 6063. Variation der Eingangsgrößen EN-Anteil, Grundstrom I_G und Schweißspannung U_s . 42
- Abbildung 27: 4-lagige Strukturen aus EN AW 6063 mit kombinierten Eingangsgrößen. 43
- Abbildung 28: Vergleich der EN AW 6063 Blindraupen und 4-lagigen Wandstrukturen hinsichtlich der Porosität 44
- Abbildung 29: 3D-Scans der gefertigten Wandstrukturen aus EN AW 6063 mit unterschiedlichen Zwischenlagentemperaturen 46
- Abbildung 30: schematische Darstellung der gemessenen Bereiche der Wandstrukturen (a), (b) und (c) und die gemessenen Härtewerte einer EN AW 6063 mit den Zwischenlagentemperaturen $T_{ZW} = 40\text{ °C}$, $T_{ZW} = 100\text{ °C}$, $T_{ZW} > 300\text{ °C}$. 47
- Abbildung 31: Gefügemorphologie der Wandstrukturen aus EN AW 6063 mit Zwischenlagentemperaturen a) $T_{ZW} = 40\text{ °C}$, b) $T_{ZW} = 100\text{ °C}$ und c) $T_{ZW} > 300\text{ °C}$. Detailliertere Aufnahmen aus den thermisch quasi-statischen Bereichen von d) $T_{ZW} = 40\text{ °C}$ und e) $T_{ZW} > 300\text{ °C}$. 48
- Abbildung 32: Einseitige Querschliffe und dazugehörige UCI Härtemessung von zylindrischen Strukturen aus EN AW 6063 mit Durchmessern $d = 30\text{ mm}$, $d = 50\text{ mm}$ und $d = 100\text{ mm}$. 49
- Abbildung 33: a) Temperaturverlauf der EN AW 5183 für $T_{ZW} = 40\text{ °C}$. b) Vergleich der Temperaturkurven der EN AW 5183 und EN AW 6063 für $T_{ZW} = 40\text{ °C}$ zu Beginn der Messung am Thermoelement 2. 51
- Abbildung 34: Gesamtprozesszeit der Wandstrukturen in Abhängigkeit der Zwischenlagentemperatur für die Aluminiumlegierungen EN AW 5183 und EN AW 6063. 51
- Abbildung 35: Maximale Zugfestigkeiten und Dehnungen in Abhängigkeit der Zwischenlagentemperatur und Aufbaurichtung (quer, längs) für a) EN AW 5183 und b) EN AW 6063. 52
- Abbildung 36: Dehnung-Spannung-Diagramme für a) EN AW 5183 und b) EN AW 6063 mit einer Zwischenlagentemperatur $T_{ZW} = 100\text{ °C}$ und einer Prüfrichtung längs zur Aufbaurichtung. Detailliert dargestellt, die jeweiligen Bereiche zum Ablesen der erreichten f_0 (bzw. $R_{p0,2}$) Werte. 53
- Abbildung 37: Referenzmodell des a) Dreigurträger Knotens und des b) gesamten Traversensystems mit fixierten Bodenplatten 56

Abbildung 38: Dreigurträger Knoten mit Rohrverbindern (rot) als a) Referenzmodell und b) abstrahiertes Geometriemodell (TopoModell1).	56
Abbildung 39: Berechnung der Verformung ϵ im Traversensystem (Schnittansicht) mit. a) zentrale Punktlast (CPL) und b) gleichmäßig verteilte Last (UDL)	57
Abbildung 40: a) Verformung ϵ und b) Biegemoment M_{BY} des Dreigurträger Knotens im Lastfall CPL	58
Abbildung 41: a) Verformung ϵ und b) Biegemoment M_{BY} des Dreigurträger Knotens im Lastfall UDL	58
Abbildung 42: Verformung des Traversensystems mit abstr. Geometriemodell (TopoModell1) im Lastfall (UDL)	59
Abbildung 43: Schrittweise Topologieoptimierung des TopoModells1 (100%). Start bei 30% der Restmasse. tabellarische Darstellung der resultierenden Masse und des übrigen Volumens.	59
Abbildung 44: a) abstrahiertes Geometriemodell mit unbehandeltem TopoModell1 (15% Restmasse, blau) und b) Nachbearbeitetes TopoModell1 mit einer Wandstärke von 2 mm (TopoModell2)	60
Abbildung 45: Verformung des gesamten Traversensystems mit TopoModell2 als optimierten Dreigurträger Knoten im Lastfall (UDL)	60
Abbildung 46: a) Verformung ϵ und b) Biegemoment M_{BY} des TopoModell2-Knotens im Lastfall UDL	61
Abbildung 47: Verformung des gesamten Traversensystems mit TopoModell3 als optimierten Dreigurträger Knoten im Lastfall (UDL)	61
Abbildung 48: a) Verformung ϵ und b) Biegemoment M_{BY} des TopoModell3-Knotens im Lastfall UDL	62
Abbildung 49: a) Verformung ϵ_{max} und b) Biegemoment M_{BYmax} des TopoModell3-Knotens im Lastfall UDL während maximal zulässiger Verformung des Gesamtsystems ϵ_{UDL_krit}	62
Abbildung 50: Rückansicht des Biegemomentes M_{BYmax} des TopoModell3-Knotens im Lastfall UDL	63
Abbildung 51: a) Gesamtübersicht des Demonstrators im simulierten Schweißbereich. b) Detailansicht des Teilsegmentes aus Demonstrator. c) Überprüfung der Werkzeugbahnen des Teilsegmentes	65
Abbildung 52: Teilsegment mit Substratplatte Bereich der Bahnplanung für die thermische Untersuchung.	67
Abbildung 53: a) Simuliertes Temperaturfeld am Teilsegment, allgemein. Simulierte Temperaturfelder in den speziell betrachteten Bereichen b) Überfahrt, c) Überhang, d) Rückwand.	68
Abbildung 54: Temperatur – Zeit -Verläufe der Knotenpunkte in den Bereichen Überfahrt, Überhang und Rückwand. Beginn der neuen Schweißlagen, gekennzeichnet durch die Schweißtrajektorien S20 bis S33.	68
Abbildung 55: Darstellung maximaler Temperaturen entlang der Strukturhöhe. Wärmebeeinflusste Höhe h zwischen zuletzt geschweißter Lage und Unterschreitung der Rekristallisationstemperatur.	69
Abbildung 56: a) Hergestellte Teilsegmente und Rohrstrukturen des Demonstrators. b) Detailansicht des Überhangs am Teilsegment. c) Obergurtansatz mit offener Kontur und maximal möglichem Überhang. d) Anbindung und Endkontur des Obergurtansatzes auf Teilsegment. e) Teilsegment mit geschlossener Kontur.	69
Abbildung 57: Segmentierung und Bahnplanung des topologieoptimierten Dreigurträger Knotens im virtuellen Zwilling	71
Abbildung 58: Hergestellter topologieoptimierter Dreigurträger Knoten, Demonstrator	72
Abbildung 59: Demonstrator Dreigurträger Knoten in der a) Rückansicht und c) Seitenansicht. Eingescannter Demonstrator in der b) Rückansicht und d) Seitenansicht.	73
Abbildung 60: Segment des Demonstrators für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	73

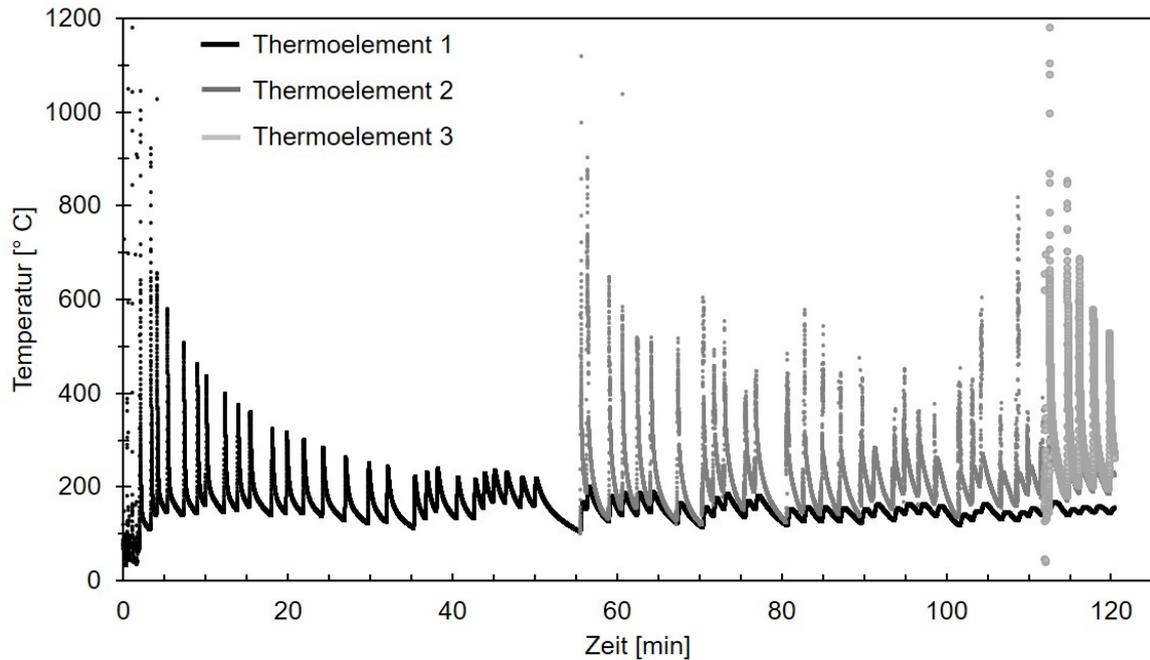
Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zulässige Belastung für Dreigurtträger (FD33) nach [EUR19]	16
Tabelle 2: Angesetzte Lastfälle für Traversensystem mit 12m Spannweite	16
Tabelle 3: Auszug aus der DIN EN 1999-1-1 Eurocode 9; Aluminiumknetlegierungen für tragende Bauteile	18
Tabelle 4: Gegenüberstellung ausgewählter Aluminiumlegierungen [STA22], [MIG22]	19
Tabelle 5: chemische Zusammensetzung der Aluminiumlegierung S Al 5183 nach [DIN16]	19
Tabelle 6: chemische Zusammensetzung der Aluminiumlegierung MA 6063-T6 nach [DIN16]	20
Tabelle 7: Parameterfeld für Versuchsreihen am Werkstoff EN AW 5183	29
Tabelle 8: Parameterfeld für Versuchsreihen am Werkstoff EN AW 6063	29
Tabelle 9: Versuchsplan für die Versuchsreihe 3 mit den Werkstoffen EN AW 5183 und EN AW 6063	30
Tabelle 10: Versuchsparameter für Vorversuche an EN AW 5183	31
Tabelle 11: Versuchsübersicht der 4-lagigen Wandstrukturen aus EN AW 5183	35
Tabelle 12: Schweißparameter für die Untersuchung unterschiedlicher Zwischenlagentemperaturen an der EN AW 5183	37
Tabelle 13: Versuchsparameter für Vorversuche an EN AW 6063	41
Tabelle 14: Versuchsübersicht der 4-lagigen Wandstrukturen aus EN AW 6063	42
Tabelle 15: Schweißparameter für die Untersuchung unterschiedlicher Zwischenlagentemperaturen an der EN AW 6063	44
Tabelle 16: Vergleich der Endkonturen für EN AW 5183 und EN AW 6063 in Abhängigkeit der Zwischenlagentemperaturen	50
Tabelle 17: Angegebene Werte für Dehngrenze f_0 , Zugfestigkeit f_u und Dehnung A für die Aluminiumlegierungen EN AW 5083 und EN AW 6063 aus dem Eurocode 9 bzw. aus den Herstellerangaben des verwendeten Zusatzwerkstoffes.	53
Tabelle 18: Übersicht der einzelnen Verformungen und Biegemomente am Dreigurtträger Knoten im Lastfall UDL	64
Tabelle 19: Verformung und Biegespannung des TopoModell3s im Vergleich zum Referenzmodell RefModell1	64
Tabelle 20: Parameter für die Herstellung des Teilsegments und des Demonstrators	66
Tabelle 21: Gegenüberstellung von drei additiven Fertigungsverfahren hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit	74

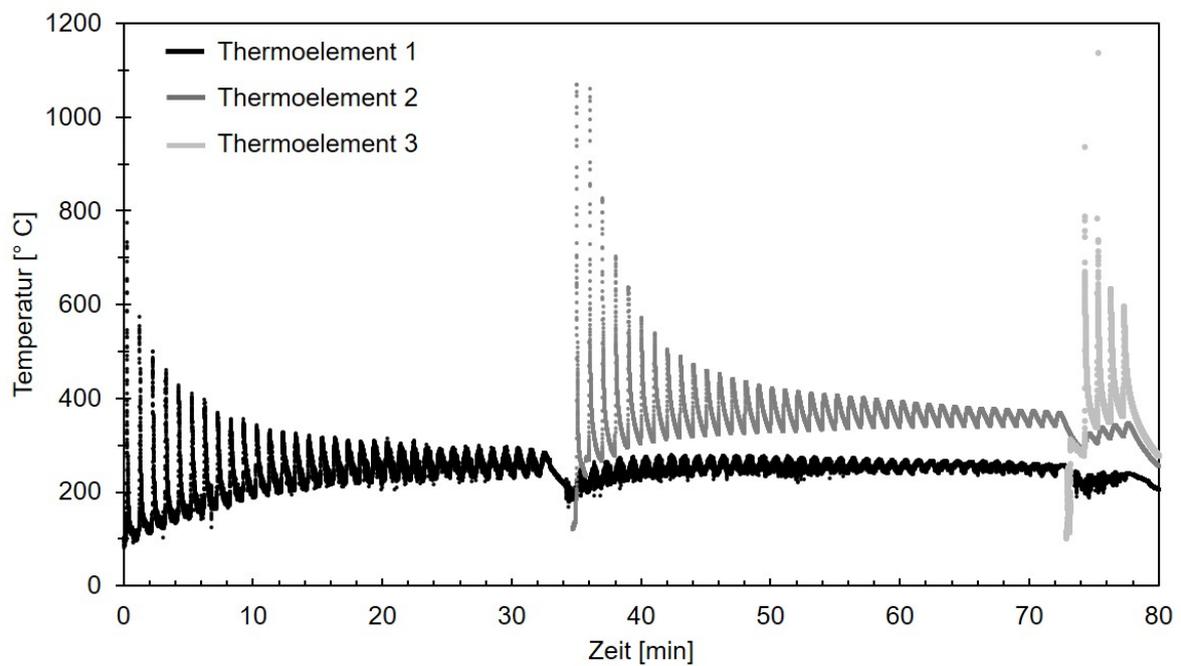
Anlagen

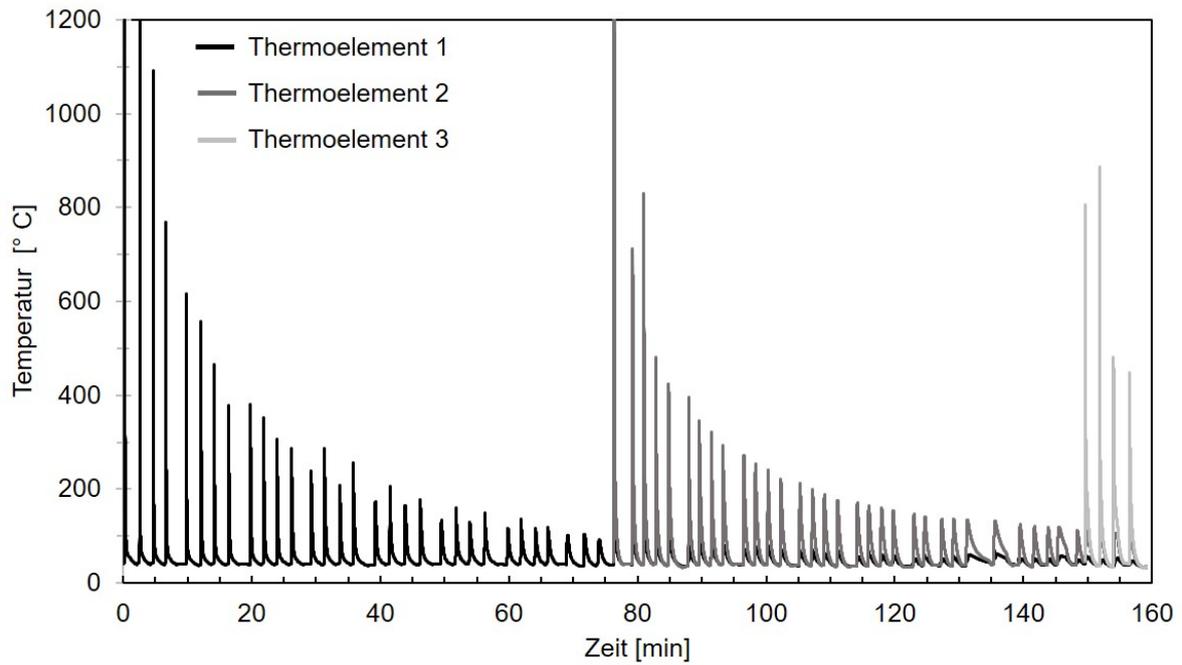
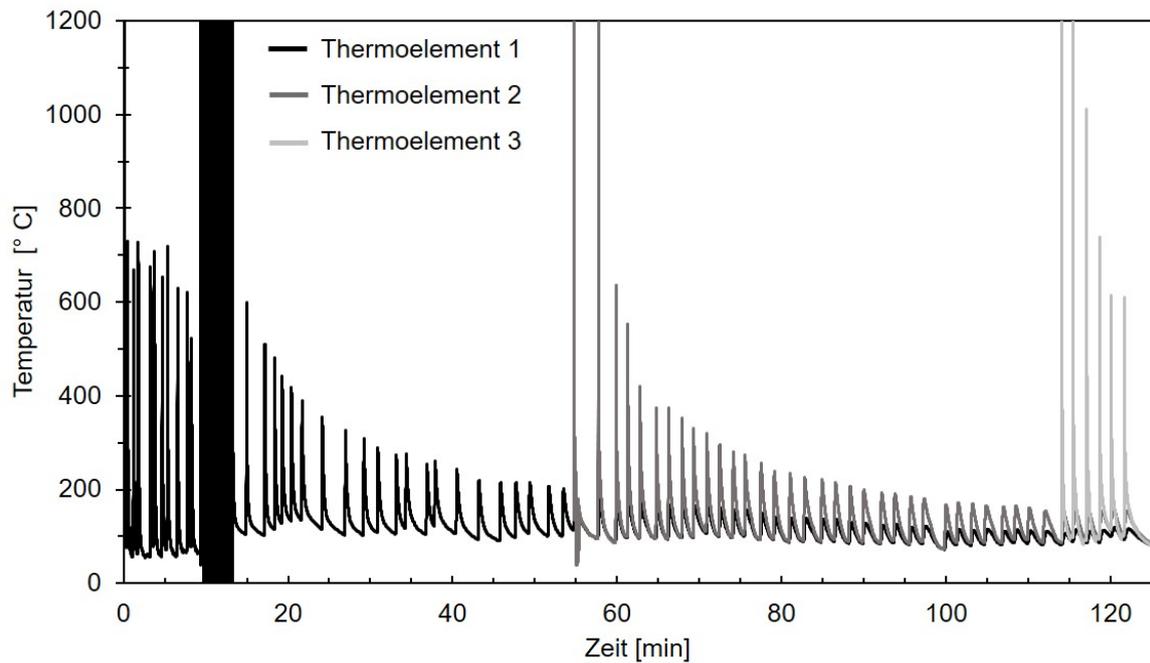
Anlage A

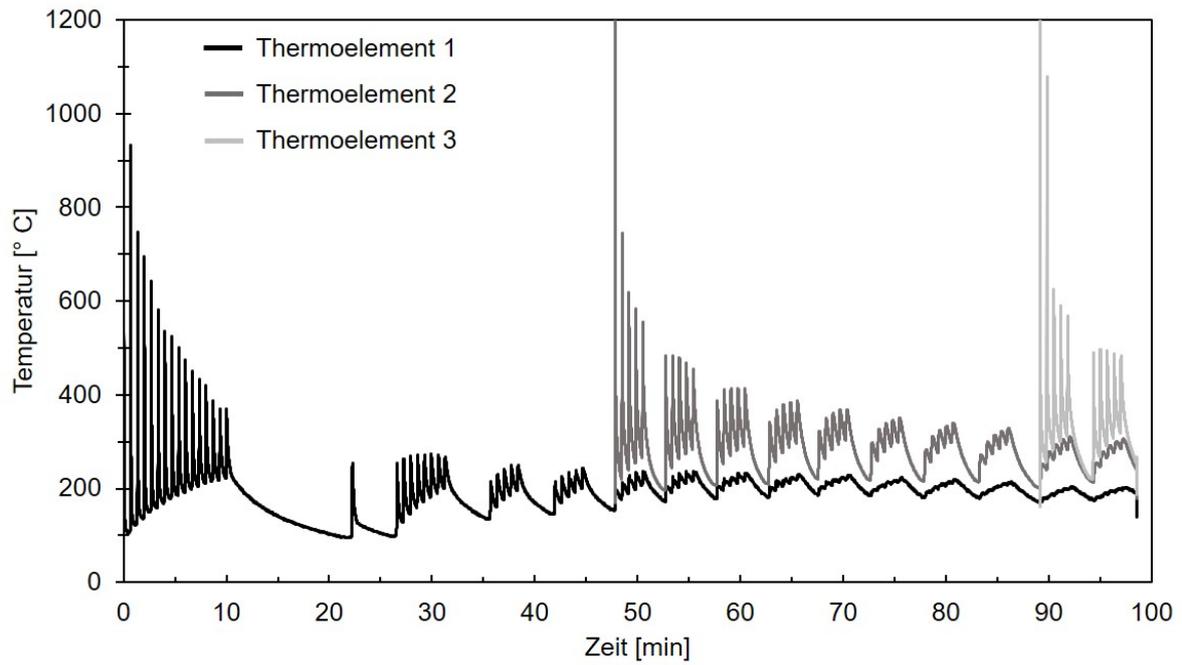
Temperatur – Zeit Verlauf EN AW 5183, $T_{ZW} = 100\text{ °C}$



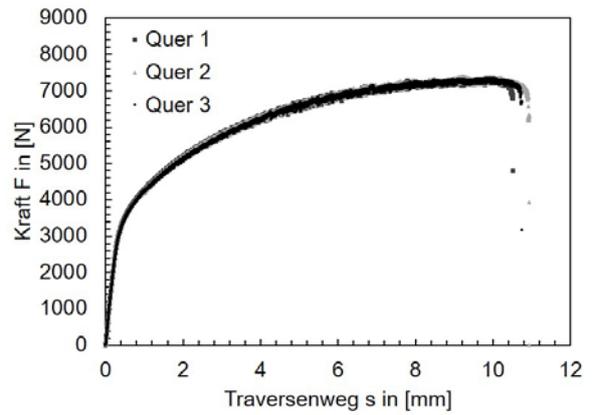
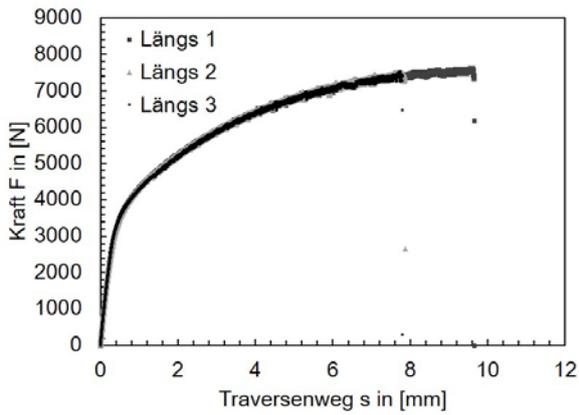
Temperatur – Zeit Verlauf EN AW 5183, $T_{ZW} > 300\text{ °C}$



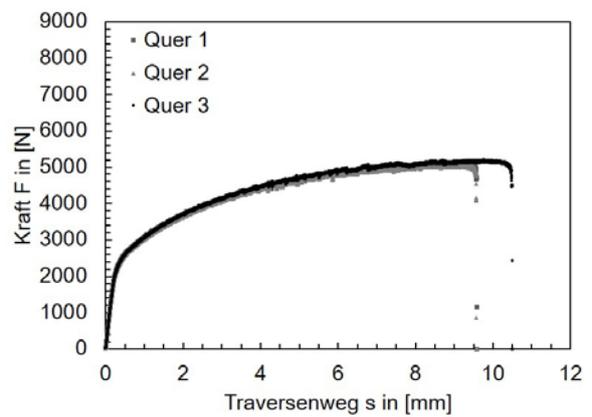
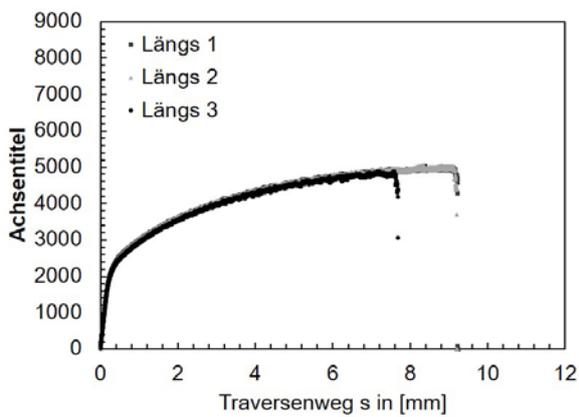
Temperatur – Zeit Verlauf EN AW 6063, $T_{ZW} = 40\text{ °C}$ Temperatur – Zeit Verlauf EN AW 6063, $T_{ZW} = 100\text{ °C}$ 

Temperatur – Zeit Verlauf EN AW 6063, $T_{ZW} > 300\text{ °C}$ **Anlage B**

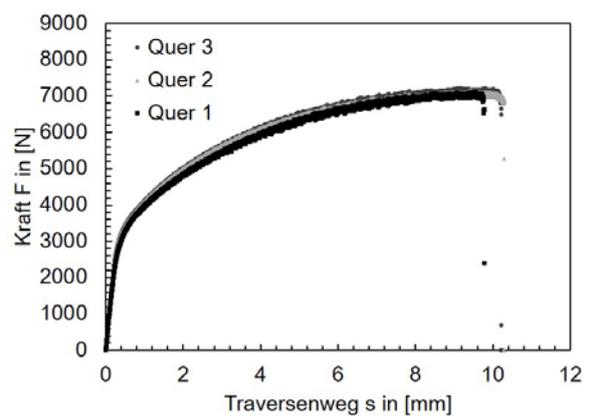
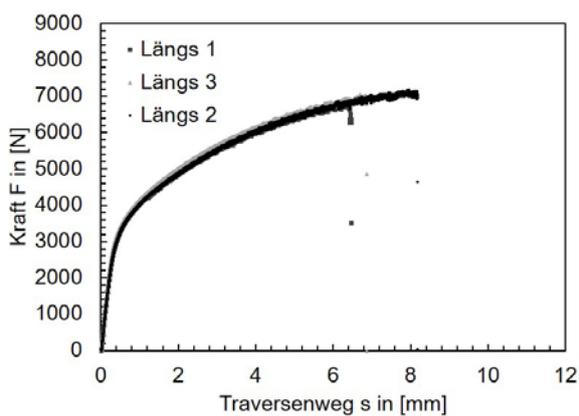
Kraft – Weg Verlauf EN AW 5183, $T_{ZW} = 40\text{ °C}$



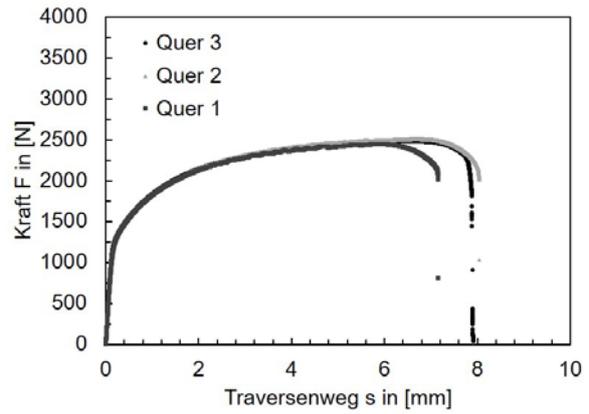
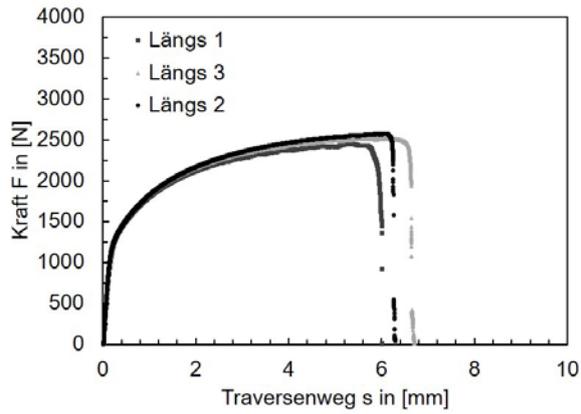
Kraft – Weg Verlauf EN AW 5183, $T_{ZW} = 100\text{ °C}$



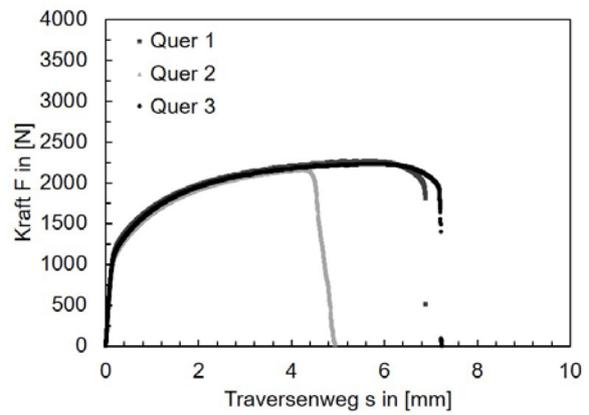
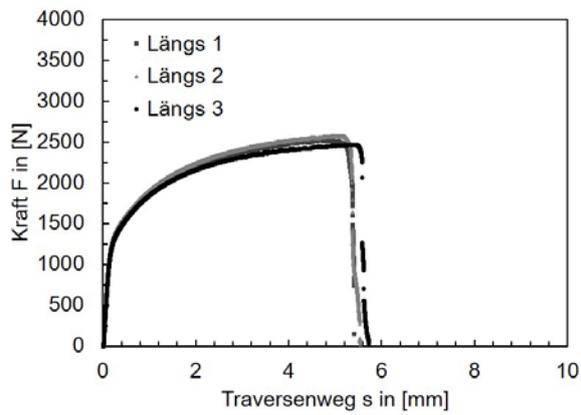
Kraft – Weg Verlauf EN AW 5183, $T_{ZW} > 300\text{ °C}$



Kraft – Weg Verlauf EN AW 6063, $T_{ZW} = 40\text{ °C}$



Kraft – Weg Verlauf EN AW 6063, $T_{ZW} = 100 \text{ °C}$



Kraft – Weg Verlauf EN AW 6063, $T_{ZW} > 300 \text{ °C}$

