

Jan Reimann, Jörg Hildebrand, Jean-Pierre Bergmann

# **3D-Weld – 3D gedruckte Knotenpunkte aus Stahllegierungen für bionische Tragstrukturen**

F 3208

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2020

ISBN 978-3-7388-0472-0

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)

## **3D-Weld –**

# **3D gedruckte Knotenpunkte aus Stahllegierungen für bionische Tragstrukturen**

## **Endbericht**

Projektlaufzeit: 01.08.2017 – 31.12.2019

Der Bericht umfasst  
169 Seiten Text

Autoren:

Jan Reimann  
Jörg Hildebrand  
Jean-Pierre Bergmann

Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Fertigungstechnik,  
Gustav-Kirchhoff-Platz 2, 98693 Ilmenau

Ilmenau, 18. Dezember 2019

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) gefördert (AZ: SWD-10.08.7-17.46)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

## Non Technical Summary

### 3D printed steel nodes for bionic support structures

Lightweight, material-saving, strength- and stiffness-adapted metal load-bearing structures are becoming increasingly important. Such structures make it possible not only to incorporate individual aesthetics into buildings or to create iconic architectural masterpieces, but also to generate structural solutions that are optimised to meet the demands of nature (bionics). The motivation of a light, strain-optimised node structure with maximum stability is often coupled with the desire for minimum and adapted material input and low manufacturing costs. Gas metal arc welding (GMAW) is particularly suitable for the production of large-volume load-bearing structures with build-up rates of up to 5 kg/h.

The aim of the research project is to investigate the relation between the heat input, the structure width and the resulting mechanical-technological properties of two different, low-alloy filler metals, during additive production using the MSG process. These results are then transferred into a process-specific solution for the production of a component from structural steel engineering. The required mechanical properties of the additive component result from the design of the component according to Eurocode 3 in combination with a static-mechanical simulation to determine the stresses prevailing in the component. In addition, topology optimization is presented as a method for the generation of material-saving, strength- and stiffness-adapted load-bearing structures and investigated under the background of the boundary conditions.

It could be shown that the additive production of structures made of low-alloy steel can produce strengths close to the manufacturer's specifications of the welding filler materials, which are almost identical in the direction of build-up and transverse to it and thus isotropic material properties can be produced. Furthermore, it was presented to what extent topology optimization as a method of numerical simulation can improve the stiffness of the nodes and thus reduce the prevailing stresses. Using a demonstrator, it could be shown that it is possible to reproduce the manufacturing process using certain simplifications by means of weld structure simulation. The experimentally determined material characteristic values for the filler metals make it possible to dimension the structural nodes according to the stress. With the help of demonstrators, the producibility of topologically optimized structural nodes could be ensured using WAAM.

## Kurzzusammenfassung

### 3D gedruckte Knotenpunkte aus Stählen für bionische Tragstrukturen

Filigrane, materialsparende, festigkeits- und steifigkeitsangepasste Tragstrukturen aus Metall gewinnen zunehmend an Bedeutung. Durch solche Strukturen ist es nicht nur möglich, individuelle Ästhetik in Bauwerke einfließen zu lassen oder ikonenhafte architektonische Meisterwerke zu kreieren, sondern auch beanspruchungsoptimierte bautechnische Lösungen in Anlehnung an die Natur (Bionik) zu generieren. Die Motivation einer leichten beanspruchungsoptimierten Knotenstruktur mit maximaler Stabilität ist häufig mit dem Wunsch eines minimalen und angepassten Materialeinsatz sowie geringen Herstellungskosten gepaart. Das Metall-Schutzgas-Schweißen (MSG) zeichnet sich besonders für die Fertigung großvolumiger, tragender Strukturen durch Aufbauraten von bis zu 5 kg/h aus.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist es, die Relation zwischen dem Wärmeeintrag, der Strukturbreite und den resultierenden mechanisch-technologischen an zwei unterschiedlichen, niedriglegierten Schweißzusatzwerkstoffen, einem G4Si1 Massivdraht und einer T 46 4 P M 1 H5 Fülldrahtelektrode, bei der additiven Fertigung mittels MSG-Prozess zu untersuchen. Neben der Analyse der Streckenenergie (Schweißstrom, -spannung, Vorschub) erfolgt die inline Prozesskontrolle über Temperaturmessungen mittels Thermoelement Typ-C. Die Bauteileigenschaften werden anhand von metallografischen Schlibbildern und der mechanischen Prüfung in Form von Härtemessungen, Zug- und Kerbschlagbiegeversuchen analysiert. Anschließend werden diese Ergebnisse in eine verfahrensspezifische Lösung zur Herstellung eines Bauteils aus dem konstruktiven Stahlbau überführt. Die benötigten mechanischen Eigenschaften des additiv gefertigten Bauteils ergeben sich aus der Bemessung des Bauteils nach Eurocode 3 in Kombination mit einer statisch-mechanischen Simulation zur Ermittlung der im Bauteil vorherrschenden Spannungen. Außerdem wird die Topologieoptimierung als Methode zur Erzeugung von materialsparenden, festigkeits- und steifigkeitsangepassten Tragstrukturen vorgestellt und unter dem Hintergrund der Randbedingungen untersucht. Basierend auf den Randbedingungen des Wire Arc Additive Manufacturing Verfahrens (WAAM) wird die Bahnplanung und damit die Herstellbarkeit der topologieoptimierten Tragwerksknoten evaluiert und mittels einer topologieoptimierten Knotenstruktur verifiziert.

Es konnte gezeigt werden, dass die additive Fertigung von Strukturen aus niedriglegiertem Stahl Festigkeiten nahe den Herstellerangaben der Schweißzusatzwerkstoffe hervorbringen kann, welche in Aufbaurichtung und quer dazu nahezu identisch sind und dadurch isotrope Materialeigenschaften erzeugt werden können. Im Weiteren wurde vorgestellt, inwiefern die Topologieoptimierung als Methode der numerischen Simulation die Steifigkeit der Knotenpunkte verbessern und damit die vorherrschenden Spannungen verringern kann. Anhand eines Demonstrators konnte gezeigt werden, dass die Abbildung des Herstellungsprozesses unter Verwendung von gewissen Vereinfachungen mittels Schweißstruktursimulation möglich ist. Die experimentell ermittelten Materialkennwerte für die Schweißzusatzwerkstoffe ermöglichen es, die Tragwerksknoten beanspruchungsgerecht zu dimensionieren. Mit Hilfe von Demonstratoren konnte die Herstellbarkeit topologieoptimierter Tragwerksknoten mittels WAAM sichergestellt werden

Schlagworte: 3D-Druck, WAAM, Tragwerk, niedriglegierter Stahl, MSG, Topologieoptimierung, Schweißstruktursimulation

## Abstract

### 3D printed steel nodes for bionic support structures

Lightweight, material-saving, strength- and stiffness-adapted metal load-bearing structures are becoming increasingly important. Such structures make it possible not only to incorporate individual aesthetics into buildings or to create iconic architectural masterpieces, but also to generate structural solutions that are optimised to meet the demands of nature (bionics). The motivation of a light, strain-optimised node structure with maximum stability is often coupled with the desire for minimum and adapted material input and low manufacturing costs. Gas metal arc welding (GMAW) is particularly suitable for the production of large-volume load-bearing structures with build-up rates of up to 5 kg/h.

The aim of the research project is to investigate the relation between the heat input, the structure width and the resulting mechanical-technological properties of two different, low-alloy filler metals, a G4Si1 solid wire and a T 46 4 P M 1 H5 flux cored wire electrode, during additive production using the MSG process. In addition to the analysis of the line energy (welding current, welding voltage, feed rate), the inline process control is carried out by temperature measurements using Type C thermocouples. The component properties are analyzed on the basis of metallographic micrographs and mechanical component testing in the form of hardness measurements, tensile and notched bar impact tests. These results are then transferred into a process-specific solution for the production of a component from structural steel engineering. The required mechanical properties of the additive component result from the design of the component according to Eurocode 3 in combination with a static-mechanical simulation to determine the stresses prevailing in the component. In addition, topology optimization is presented as a method for the generation of material-saving, strength- and stiffness-adapted load-bearing structures and investigated under the background of the boundary conditions. Based on the boundary conditions of the Wire Arc Additive Manufacturing method (WAAM), the path planning and thus the manufacturability of the topology-optimized structural nodes is evaluated and verified by means of a topology-optimized node structure.

It could be shown that the additive production of structures made of low-alloy steel can produce strengths close to the manufacturer's specifications of the welding filler materials, which are almost identical in the direction of build-up and transverse to it and thus isotropic material properties can be produced. Furthermore, it was presented to what extent topology optimization as a method of numerical simulation can improve the stiffness of the nodes and thus reduce the prevailing stresses. Using a demonstrator, it could be shown that it is possible to reproduce the manufacturing process using certain simplifications by means of weld structure simulation. The experimentally determined material characteristic values for the filler metals make it possible to dimension the structural nodes according to the stress. With the help of demonstrators, the producibility of topologically optimized structural nodes could be ensured using WAAM.

Keywords: 3D printing, WAAM, supporting structure, low-alloy steel, GMAW, topology optimization, welding structure simulation

Forschungsvorhaben  
**3D-gedruckte faserverstärkte Gelenkpunkte  
für adaptive Falwerke - „HiPlast“**

Gefördert vom BBSR  
Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung



**Abschlussbericht**

**Forschungsstelle:**

Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Fertigungstechnik (IFt)  
Prof. Dr.-Ing. habil. Jean Pierre Bergmann, Gustav-Kirchhoff-Platz 2, 98693 Ilmenau

**Mitfinanzierende Stellen:**

Westfälische Drahtindustrie GmbH  
Linde AG  
EWM AG

**Partner:**

Rudolstädter Systembau GmbH

**Bearbeiter:**

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

**Laufzeit:** 01.08.2017 – 31.12.2019

**Datum:** 18.12.2019

**Das Forschungsvorhaben wurde mit den Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau  
des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt-, und Raumforschung gefördert.  
(Aktenzeichen: SWD-10.08.7-17.46)**

**Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.**

---

**Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Einleitung und Motivation</b>	<b>4</b>
1.1	Ausgangslage und Zielsetzung	4
1.2	Projektaufbau	6
<b>2</b>	<b>Anwendungsgebiete 3D-Knoten</b>	<b>7</b>
2.1	Tragwerkvarianten	7
2.2	Beanspruchung und Gestaltung des Knotenpunktes	9
2.3	Anwendungsbeispiele von Tragwerken und bionischen Strukturen	9
2.4	Anforderungsprofil und Wirtschaftlichkeit	10
<b>3</b>	<b>Werkstoffauswahl</b>	<b>12</b>
3.1	Recherche zu den Werkstoffen: Relevante Stähle im Bauwesen	12
3.2	Charakterisierung der Zusatzwerkstoffe	15
3.2.1	Allgemeines Vorgehen	15
3.2.2	Werkstoffe	15
3.2.2.1	Grundwerkstoff	15
3.2.2.2	Schweißzusatzwerkstoff	15
3.2.2.3	Schutzgas	16
3.2.3	Versuchsaufbau	17
3.2.3.1	Versuchsaufbau Vor- und Hauptversuche	17
3.2.3.2	MSG-Schweißanlage	19
3.2.3.3	Methoden der Prozessbewertung	20
3.2.4	Vorversuche	21
3.2.4.1	Versuchsparameter und Durchführung	21
3.2.4.2	Versuchsstrategie der Vorversuche	23
3.2.5	Auswertung Vorversuche	24
3.2.5.1	Untersuchungen zur eingebrachten Streckenenergie	24
3.2.5.2	Untersuchungen zur Aufbaustrategie	25
3.2.5.3	Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Vorversuchen	27
3.2.6	Hauptversuche	28
3.2.6.1	Versuchsaufbau und Durchführung	28
3.2.6.2	Versuchsstrategie der Hauptversuche	29
3.2.7	Bewertung der Schweißergebnisse	29
3.2.7.1	Visuelle Prüfung	29
3.2.7.2	Prozesszeiten	30
3.2.7.3	Ermittlung der $t_{8/5}$ -Zeit	31
3.2.7.4	Metallografische Untersuchung	34
3.2.7.5	Ermittlung der Porosität	36



---

3.2.7.6	Auswertung der Gefügebilder .....	37
<b>4</b>	<b>Simulationsmodelle .....</b>	<b>41</b>
4.1	Materialmodelle .....	41
4.2	Geometriemodell .....	43
4.3	Abbildung des Herstellungsprozesses .....	46
4.3.1	Ansys Workbench .....	46
4.3.2	Simufact Welding .....	48
4.4	Parameteridentifikation .....	49
4.5	Mechanische Untersuchungen .....	50
4.6	Validierung und Verifizierung .....	54
4.6.1	Ansys Workbench .....	54
4.6.2	Simufact Welding .....	54
<b>5</b>	<b>Optimierung unter Aspekten der Bionik .....</b>	<b>56</b>
5.1	Topologieoptimierung .....	56
5.1.1	Vorversuche zur Topologieoptimierung .....	57
5.1.2	Topologieoptimierung am T-Stoß .....	58
5.1.3	Topologieoptimierung anhand unterschiedlicher Rohrknotten .....	61
5.2	Formoptimierung .....	64
5.3	Materialoptimierung .....	66
<b>6</b>	<b>Herstellung additiv gefertigter 3D-Knotenlösungen mittels Lichtbogentechnik</b>	<b>68</b>
6.1	Prozessparameter .....	68
6.2	Zerstörungsfreie Prüfung .....	69
<b>7</b>	<b>Experimentelle Analysen .....</b>	<b>71</b>
7.1	Mechanische Untersuchungen .....	71
7.1.1	Zugversuch .....	71
7.1.2	Kerbschlagbiegeprüfung .....	76
7.1.3	Härtemessung .....	79
7.1.4	Fazit .....	81
7.2	Untersuchung der Zuverlässigkeit, Sicherheit und Resttragfähigkeit der 3D- gedruckten Knotenstruktur .....	83
<b>8</b>	<b>Demonstrator .....</b>	<b>85</b>
8.1	Aufbau .....	85
8.2	Validierung und Optimierung .....	88
8.3	Tests, Auswertung, Bewertung der Wirtschaftlichkeit .....	89
8.4	Planungsgrundlagen .....	91

---

<b>9</b>	<b>Entwicklung und Spezifikation weiterer Anwendungsfelder.....</b>	<b>92</b>
9.1	Parameteranalyse .....	92
9.2	Untersuchung zur Gestaltung .....	92
9.3	Untersuchung zur Variation des Materials .....	92
<b>10</b>	<b>Weitere Anwendungsmöglichkeiten .....</b>	<b>94</b>
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>95</b>
<b>12</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>99</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>103</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>107</b>
<b>A</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>108</b>