

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

www.baufachinformation.de

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

1	Einleitung und Motivation	4
1.1	Ausgangslage und Zielsetzung	4
1.2	Projektaufbau	6
2	Anwendungsgebiete 3D-Knoten	7
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
3	Werkstoffauswahl	12
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
4	Simulationsmodelle	41
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
5	Optimierung unter Aspekten der Bionik	56
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
6	Herstellung additiv gefertigter 3D-Knotenlösungen mittels Lichtbogentechnik	68
6.1	Prozessparameter	68
6.2	Zerstörungsfreie Prüfung	69
7	Experimentelle Analysen	71
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
8	Demonstrator	85
8.1	Aufbau	85
8.2	Validierung und Optimierung	88
8.3	Tests, Auswertung, Bewertung der Wirtschaftlichkeit	89
8.4	Planungsgrundlagen	91

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

1 Einleitung und Motivation

1.1 Ausgangslage und Zielsetzung

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 eine leichte Knotenstruktur mit maximaler Stabilität herzustellen ist häufig mit dem Wunsch eines minimalen und angepassten Materialeinsatz sowie geringen Herstellungskosten gepaart. Dazu ist eine Herstellungstechnologie für tragende Strukturen mit Abmessung von größer 900 x 500 x 400 mm aus metallischen Werkstoffen notwendig.

Die additive Herstellung komplexer 3D-Strukturen aus metallischen Werkstoffen wird bislang vordergründig mit laserbasierten Formgebungsverfahren, beispielsweise Laserstrahlschmelzen im Pulverbett oder Laserauftragsschweißen, bei kleinen, filigranen 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 derzeit aber auf die Herstellung von Baugruppen aufgrund der Bauräume der Anlagen zwischen typischerweise 280 x 280 x 300 mm und maximal 900 x 500 x 400 mm beschränkt. [ABE14], [GIE13], [MUD07] Die Anlagen mit einem größeren maximalen Bauraum laufen jedoch derzeit vor allem mit Aluminiumwerkstoffen. Dies ist zum einen auf die geringen Bauraten bei Stählen zurückzuführen und zum anderen resultieren aus der höheren Schmelztemperatur auch erhöhte thermisch-bedingte Eigenspannungen, die es zu beherrschen gilt. Daher muss je nach Bauteilgeometrie ein nicht unerheblicher Verzug einkalkuliert werden. Aufgrund der hohen Anlagenkosten und relativ kleinen Aufbaurate muss die Anwendung des Lasersinterns und seiner Verfahrensvarianten gut kalkuliert werden. Weiterhin ist eine Vorbehandlung des Pulvers notwendig, um eine optimale Güte des Bauteils zu erhalten. Häufig treten aber Unregelmäßigkeiten in Form von Poren auf, die zu undefinierten Eigenschaften – Festigkeit, Steifigkeit – des Bauteils führen. Beim Laserauftragsschweißen wird ein pulverförmiger (überwiegend in der Anwendung) oder ein drahtförmiger (teilweise in der Anwendung) Zusatzwerkstoff mit einem fokussierten Laserstrahl aufgeschmolzen und eine schmelzmetallurgische Verbindung zwischen dem Zusatzwerkstoff und der Oberfläche eines Bauteils erzeugt [HOF98]. Ein Vorteil des Verfahrens liegt darin, dass ein endkonturnahes Bauteil eine nahezu 100%ige Dichte aufweist und ein Eigenschaftsprofil, das den Spezifikationen des verwendeten Werkstoffes entspricht, oder teilweise übertrifft. Dabei erlaubt die geringe Aufmischung des Grundmaterials effiziente Beschichtungen schon mit nur einer dünnen Schweißlage [MUD07], [AGH12], [BAL13], [RAY14], [XU14].

Problematik

Die im Forschungsvorhaben fokussierte Technologie für die additive Fertigung von leichten, filigranen und beanspruchungsangepassten 3D-Knotenstrukturen basiert auf der Lichtbogentechnik. Aufgrund der angestrebten Festigkeiten, Steifigkeiten und Gestaltungen sind die Strukturen mittels Lichtbogenverfahren, welche schneller und kostengünstiger als Laserauftragsschweißen und Laserstrahlschmelzen sind, herzustellen. Es liegen keine Erkenntnisse zum Einsatz von Metall-Schutzgas-Prozessen zur additiven Fertigung im Bauwesen vor, welche das Prozessverhalten und die erzielbare Endkonturnähe und Konturtreue unter Verwendung von Massiv- oder Fülldraht mit unterschiedlichen Drahtdurchmessern zur Herstellung von 3D-Knotenstrukturen betrachten. Es wird im Rahmen des Forschungsvorhabens der Einsatz unterschiedlicher Werkstoffe (Stahl, Aluminium) sowie

Prozessparameter, z. B. Streckenenergie, Schweißfolge, experimentell untersucht. Die Möglichkeit der robotergesteuerten Fertigung garantiert eine hohe geometrische Präzision, Formenvielfalt und durch Anwendung der Topologieoptimierung eine effiziente Materialausnutzung. Es werden numerische Methoden für die additive Fertigung auf lichtbogenbasierte Verfahren unter Berücksichtigung der eingesetzten Werkstoffe zur Ermittlung von thermischen, metallurgischen und mechanischen Zuständen angesetzt. Die Knotenpunkte werden sowohl numerisch als auch experimentell untersucht, wobei aufgrund des räumlichen Aufbaus und Verformungsverhaltens ein zerstörungsfreies, optisches Messverfahren zum Einsatz kommt.

Lösungsansatz

Die Untersuchung erfolgt sowohl an numerischen als auch an realen Modellen. Anhand der numerischen, parametrischen Modelle können eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle differierender Systemspezifikationen untersucht und hinsichtlich Tragfähigkeit der Knoten aus Stahllegierungen bewertet werden. Die Verifikation und Validierung der numerisch ermittelten Ergebnisse erfolgt über begleitende experimentelle Belastungstests an räumlichen Modellen. Hierbei kommen auch Messsysteme zur dreidimensionalen Erfassung von Verformungen während des Herstellungsprozesses und der Belastungsanalyse zur Anwendung.

Begleitend zu den numerischen als auch experimentellen Betrachtungen werden Empfehlungen bezüglich der Materialspezifikationen für den 3D-Druck von metallischen Knotenpunkten mittels Lichtbogentechnik entwickelt, welche für weitere Planungsaufgaben und Materialkombinationen zunehmend von Interesse sein werden.

Aufgrund des individuellen Charakters der Untersuchungsstruktur lassen sich verschiedene Zustände bzgl. Geometrie-, Festigkeits- und Steifigkeitszuständen einstellen. Hierzu werden einzelne Szenarien dargestellt.

Das Forschungsvorhaben verfolgt einen interdisziplinären Charakter, wobei auf experimentellem und numerischem Wege neue Ansätze für effiziente, steifigkeits- und festigkeitsangepasste Knotenkonstruktionen erarbeitet werden. Basierend auf den bisherigen Erfahrungen in der Herstellung von metallischen Strukturen mittels Lichtbogentechnik und den weiterführenden Erkenntnissen in der generativen Fertigung werden zukünftige Anwendungsfelder aufgezeigt. Hierbei wird sowohl ein Technologietransfer als auch eine maßstäbliche Skalierbarkeit angestrebt. In Zusammenarbeit mit Forschern und Praktikern der Fachbereiche der Lichtbogen- und Robotertechnik und Werkstofftechnologie werden geeignete Werkstoffkombinationen für die Ausführung adaptiver Knotenkonstruktionen bei Tragstrukturen mit bionischem Charakter ermittelt. Hierbei werden generativ gefertigte Knotenkonstruktionen aus Stahllegierungen untersucht und geeignete Fertigungstechnologien insbesondere Schweißfolgen analysiert und entwickelt, wobei den Kriterien eines reproduzierbaren und robusten Herstellungsprozesses für endkontur-nahen und verzugsarmen Strukturen Rechnung getragen wird. Die 3D-Drucktechnologie werden vor dem Hintergrund der materialtechnischen, mechanischen Einsetzbarkeit und hinsichtlich eines wirtschaftlichen, nachhaltigen Einsatzes im Bauwesen diskutiert. Zur Überführung der 3D-Drucktechnologien in den Größen- und Belastungsmaßstab des Bauwesens sind Systeme zu favorisieren, welche von der Praxis mit geringer Anpassung sofort genutzt werden können.

1.2 Projektaufbau

Das 24-monatige Forschungsprojekt wird von einer 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:

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

Das Projekt wurde von folgenden Projektpartnern finanziell unterstützt:

- Westfälische Drahtindustrie GmbH
- Linde AG
- EWM AG

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

2 Anwendungsgebiete 3D-Knoten

2.1 Tragwerkvarianten

Fachwerkträger werden in Skelettbausystemen als Balken genutzt. Sie bestehen in der Regel aus mehreren Stäben und nicht aus einem einzelnen Stab. Die Grundform innerhalb eines Fachwerkträgers bildet das Dreieck, dabei werden drei Stäbe gelenkig miteinander verbunden. Diese Verbindung ist formstabil und kann nur verändert werden, wenn einer der Stäbe plastisch verformt wird. Rechtecke aus gelenkig verbundenen Stäben können hingegen ihre Form ändern, ohne dass ein Stab sich verformt. Dieses Verhalten kann durch das Einführen eines Diagonalstabs geändert werden. Dadurch entstehen zwei formstabile Dreiecke mit einem gemeinsamen Stab. Diese als Dreieck verbundenen Stäbe bilden durch ihre Formstabilität die Grundlage für Fachwerkträger. Es gibt drei grundlegende Typen, diese sind in Abbildung 1 zu sehen, außerdem ergibt sich eine nahezu unbegrenzte Anzahl von Variationen und Kombinationen. [KUF13]

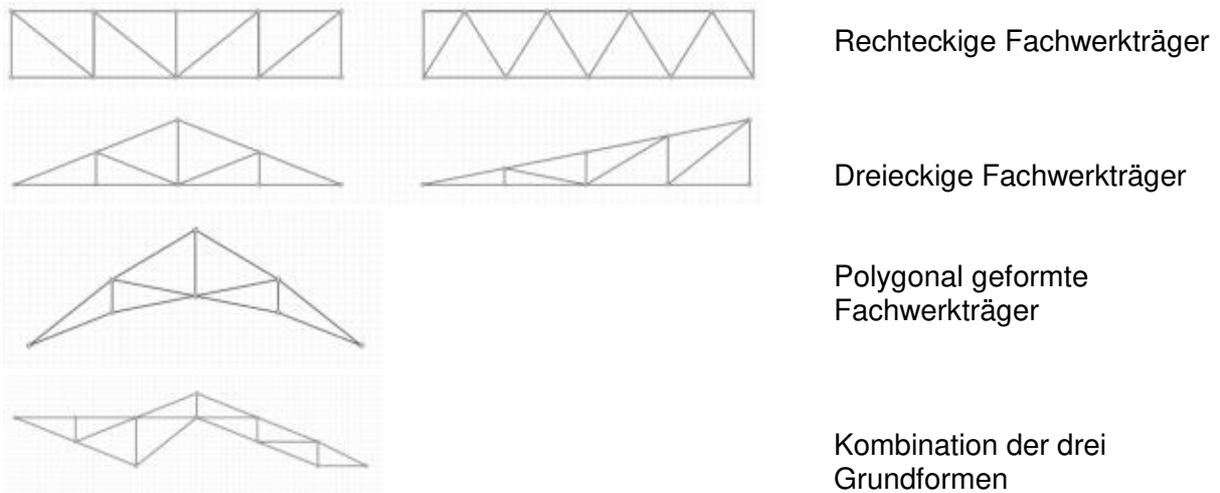


Abbildung 1: Typen von Fachwerkträgern in Anlehnung an [KUF13]

Die Beschreibung von Fachwerkträgern erfordert einige Fachbegriffe, diese sind in Abbildung 2 zu sehen. Die Stäbe im oberen Fachwerkträgerteil werden als „Obergurt“ bezeichnet und werden meistens auf Druck belastet. Dahingegen befindet sich der „Untergurt“ im unteren, meist auf Zug belasteten, Teil des Fachwerkträgers. „Vertikalstäbe“ verlaufen vertikal und „Diagonalstäbe“ entsprechen diagonal im Fachwerkträger. Die Verbindungspunkte zwischen den einzelnen Stäben werden als „Knoten“ bezeichnet. Die Einleitung der Kräfte in die Knotenpunkte ist eine Grundvoraussetzung um die Stäbe nur auf Druck oder Zug zu belasten. [KUF13]

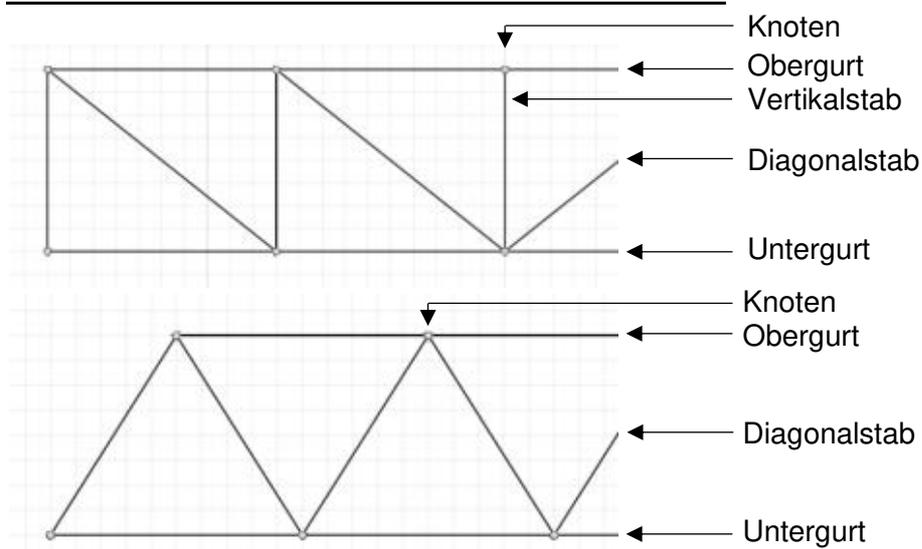


Abbildung 2: Fachbegriffe für Fachwerkträgern [KUF13]

Da bei ebenen Tragwerken die Gefahr besteht, dass Ober- oder Untergurt ausweichen oder ausknicken können, ist es sinnvoll Fachwerkträger direkt dreidimensional auszulegen. Dafür gibt es grundsätzlich drei Möglichkeiten. Es ist möglich den Obergurt, den Untergurt oder beide gegen seitliches Ausweichen zu stabilisieren. (Abbildung 3).

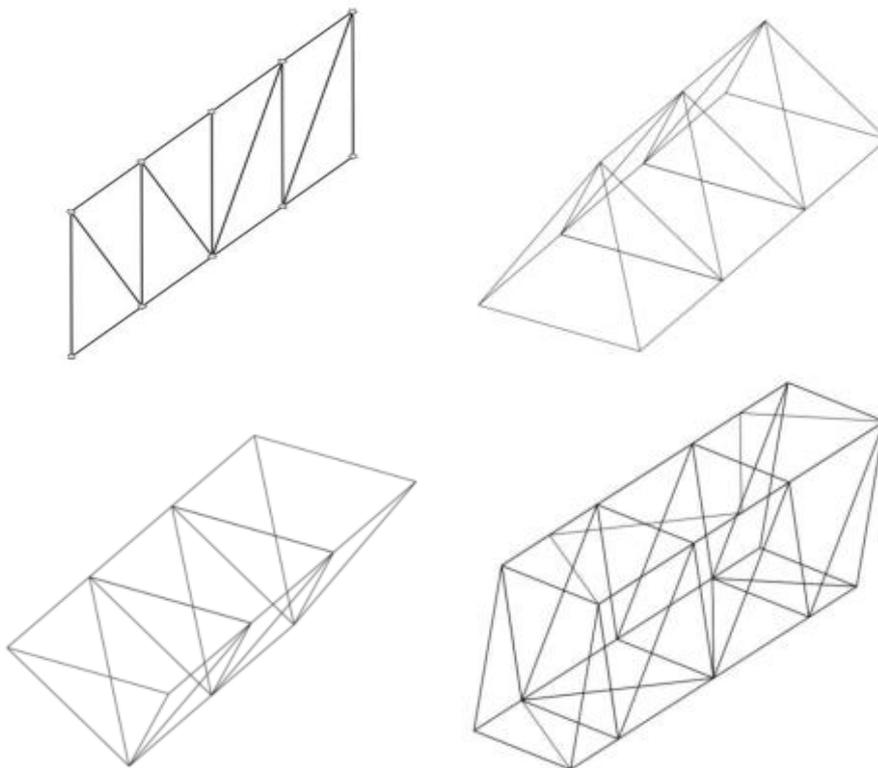


Abbildung 3: Räumlicher Fachwerkträger in Anlehnung an [KUF13]

2.2 Beanspruchung und Gestaltung des Knotenpunktes

Fachwerkträger werden für verschiedene Arten von Bauwerken genutzt. Dabei geht es oft darum große stützenfreie Flächen schnell und kostengünstig zu überdachen. Die Anwendungsbeispiele sind mannigfaltig, die Tragwerke werden für Industrie, und Fertigungshallen, Infrastrukturprojekte wie Messehallen und Bahnhöfe, oder Sport- und Freizeiteinrichtungen genutzt. [HAS06]

Um einen möglichst realitätsnahen Fall untersuchen zu können, wurde die Rudolstädter Systembau GmbH (RSB) als Branchen erfahrenes und überregional tätiges Unternehmen gebeten ein geplantes und real existierendes Tragwerk zur Verfügung zu stellen (Abbildung 4). Die RSB hat den in Abbildung 4 zu sehenden Ausschnitt des Tragwerkes als Zeichnung zur Verfügung gestellt. Aus dieser Zeichnung wurde ein Knotenpunkt ausgewählt an dem sich der Obergurt, zwei Diagonalstäbe und zwei Vertikalstäbe treffen. Die CAD-Daten und Lastzustände wurden in Abschnitt 0 genutzt um realitätsnahe Spannungen als Referenzwert für die Optimierung unter Aspekten der Bionik (Abschnitt 5) ermitteln zu können.

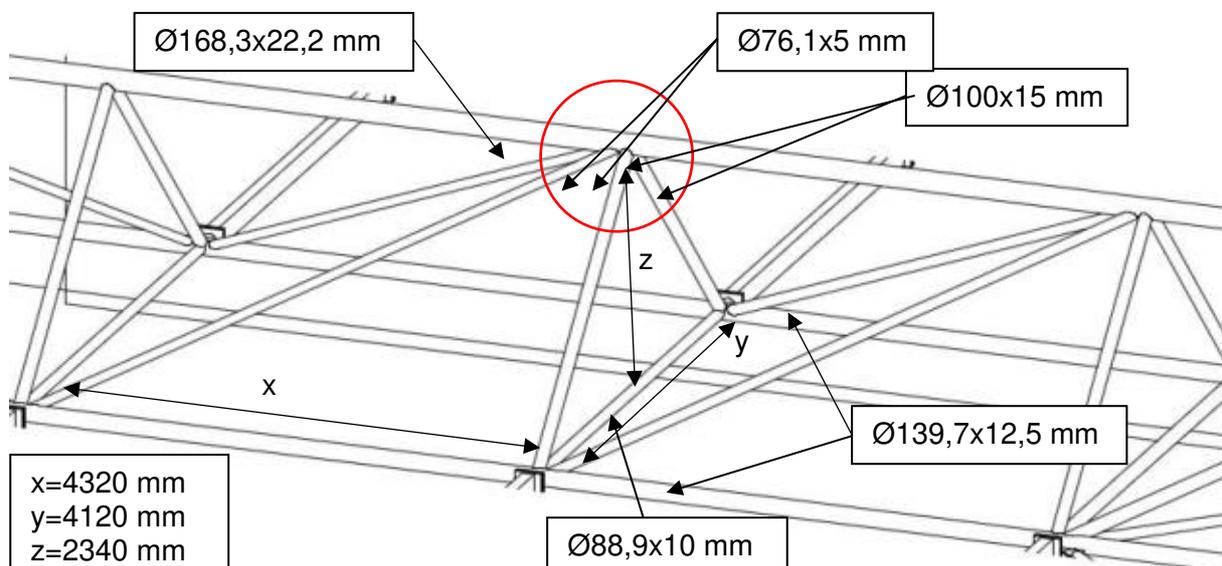


Abbildung 4: Rechteckiger Fachwerkträger mit doppeltem Untergurt; ausgewählter Knoten rot dargestellt [RUD02]

2.3 Anwendungsbeispiele von Tragwerken und bionischen Strukturen

Der Stahlknoten aus Abschnitt 2.2 soll in den nächsten Arbeitspaketen zur Simulation des Last-Verformungsverhaltens, Herstellungsprozesses und zur Optimierung unter den Aspekten der Bionik genutzt werden. Die thermische Simulation des Schweißprozesses, der Spannungen und des Verzugs sollen mit der Simulationssoftware Simufact Welding durchgeführt werden. Die statischen und dynamischen Lastfälle, sowie die Optimierung unter bionischen Aspekten in Anbetracht der Lasten wird mit dem Programm ANSYS Workbench realisiert. Es sind drei verschiedene Varianten zur Optimierung des Knotenpunkts unter Einbeziehung der Bionik geplant. Variante eins besteht darin, die vorhandenen Rundhohlprofile der Knotengeometrie zu nutzen und diese strukturell zu optimieren. In der zweiten Variante hingegen soll von einem Block Vollmaterial anstelle des Knotens ausgegangen werden, wobei unter Verwendung der vorhandenen Schnittstellen und Winkel eine vollständig neue Knotengeometrie erstellt werden soll. Dabei symbolisieren die erste

Variante des Vorgehens im klassischen Maschinenbau. Die zweite Variante hingegen stellt den grundlegenden Ansatz der Topologieoptimierung dar.

2.4 Anforderungsprofil und Wirtschaftlichkeit

Das Anforderungsprofil ergibt sich aus den mechanischen Ansprüchen an das Tragwerk, dafür muss ein Standsicherheitsnachweis erbracht werden, wobei die Einwirkungen auf das Tragwerk kleiner sein müssen als die Beanspruchbarkeit des Tragwerks. Diese sind in Abschnitt 0 für das beispielhafte Tragwerk aufgetragen. Ein weiterer wichtiger Aspekt der Anforderungen ist die Auswahl des Materials zur Herstellung der Knotenstrukturen, dieses muss entsprechend dem Eurocode 3, (Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten), im speziellen nach DIN EN 1993-1-1 (Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau) für das Tragwerksmaterial sowie dessen Bemessung und DIN EN 1993-1-8 (Bemessung von Anschlüssen) für den Schweißzusatzwerkstoff, ausgewählt werden. [DIN10a], [DIN10b]

Die Wirtschaftlichkeit wurde über die Stückkosten zu Herstellung eines komplexen Tragwerksknotens auf Basis gängiger konventioneller Herstellungsverfahren ermittelt. In Abbildung 5 ist dieser komplexe Knoten zu sehen. Grundsätzlich können Tragwerksknoten entweder als Schweißkonstruktion oder als Gussteil ausgeführt werden. Da dieser Knoten die Zugänglichkeit stark einschränkt ist es nicht möglich ihn konventionell als Schweißkonstruktion herzustellen. Daher wurden Angebote für Gussbauteile eingeholt. Allerdings wurden viele aufgrund der Mindermengen in Verbindung mit der Materialgüte für Baustahl abgelehnt. Daher wurde das Bauteil erneut in einem hochlegierten Stahl (1.4404), in Aluminium (AlMg3) und Titan (Ti6Al4V) angefragt, um den Kostenfaktor für die additive Fertigung bestimmen zu können.

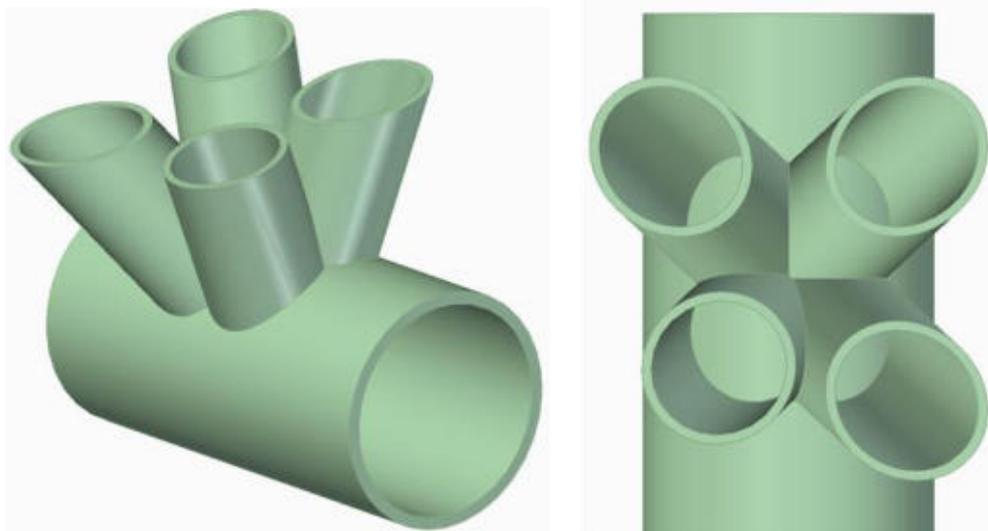


Abbildung 5: Darstellung des Tragwerksknotens als Anwendungsbeispiel für das Kalkulationswerkzeug

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung additiver und konventioneller Fertigungsverfahren hat ergeben, dass das SLS derzeit noch sehr hohe Materialkosten sowie sehr niedrige Aufbauraten aufweist, die zu hohen Herstellungskosten führen. Allerdings haben nicht alle AM-Systeme im Vergleich zu SM-Systemen hohe Kosten in der Herstellung. Besonders drahtbasierte Verfahren haben aufgrund ihrer hohen Aufbauraten und niedrigen Materialkosten einen erheblichen Kostenvorteil gegenüber SM- und anderen AM-Systemen. Trotz der hohen Maschinenstundensätze bei AM-Systemen gegenüber SM liegen die Fertigungskosten bei DBA-Verfahren unter denen des Fräsens.

Wie bereits bei dem Stand der Technik deutlich wurde, teilen sich die Fertigungssysteme in additive, subtraktive und formative Fertigungsverfahren, z. B. Gießen auf. Um für eine umfassendere Wirtschaftlichkeitsbetrachtung formative Fertigungsverfahren einbeziehen zu können, wurden die Fertigungskosten für das Gießen ermittelt. Es wurden ausgewählte Unternehmen zu den Kostenaufwendungen befragt, wobei die Annahme getroffen wurde, dass 50 Tragwerksknoten mithilfe des Gießens und des SLM, WAAM gefertigt werden sollen. In Abbildung 43 können die Kosten während der Herstellung für die Werkstoffe 316L, AlMg3, Ti6Al4V sowie G4Si1 eingesehen werden.

Herstellungskosten von insgesamt 50 Tragwerksknoten				Herstellungskosten von einem Tragwerksknoten		
Verfahren	Additive Fertigung		Formative Fertigung	Additive Fertigung		
	SLM	WAAM	Gießen	Verfahren	SLM	WAAM
316L	183.826	49.516	62.832	316L	4.972	1.392
	133.280		30.364		2.998	
	245.233		35.120		5.272	
Mittelwert	187.446	49.516	42.772	Mittelwert	4.627	1.392
AlMg3	141.132 (AlSi10Mg)	44.756	56.882	AlMg3	3.231 (AlSi10Mg)	1.297
	85.382 (AlSi10Mg)		13.506		2.020 (AlSi10Mg)	
	117.604 (AlSi10Mg)		16.795 (AlSi9Cu3)		2.476 (AlSi10Mg)	
	189.507 (AlSi10Mg)		11.615 (AlMg5(Si))		1.618 (AlSi10Mg)	
	157.791 (AlSi10Mg)				3.220 (AlSi10Mg)	
Mittelwert	138.283	44.756	24.700	Mittelwert	2.513	1.297
Ti6Al4V	294.350	Es liegen keine Angebote vor	30.362	Ti6Al4V	6.809	Es liegen keine Angebote vor
	371.565		35.714		6.813	
Mittelwert	332.958		33.038	Mittelwert	8.256	
G4Si1		44.280		G4Si1		1.285
Mittelwert		44.280		Mittelwert		1.285

Abbildung 43: Angefragte Fertigungskosten additiver und formativer Fertigungserzeugnisse von Unternehmen

Bei hohen Stückzahlen kann aus den Ergebnissen erkannt werden, dass die Fertigungskosten bei SLM im Vergleich für die Legierung 316L 77%, für AlMg3 82% und für Ti6Al4V 90% höher liegen als beim Gießen. Auch das WAAM-lichtbogenbasierte Verfahren weist höhere Herstellungskosten als das Gießen auf. Für 316L liegen die Fertigungskosten 14% und für AlMg3 45% höher.

3 Werkstoffauswahl

3.1 Recherche zu den Werkstoffen: Relevante Stähle im Bauwesen

Die Gliederung nach der Norm DIN EN ISO 10025 vergibt ein „S“ für structural steel für Baustähle, diese werden über eine nachfolgende Zahl benannt, welche die charakteristische Streckgrenze angibt. In den Normenteilen 2 bis 5 der Norm DIN EN ISO 10025 werden die Baustähle S235, S275, S355, S420 und S460 erwähnt. Die Stahlsorten S235 und S355 finden im Stahlbau am häufigsten Verwendung. [BAU12] Daher ist es wichtig einen für Baustähle geeigneten Schweißzusatzwerkstoff auszuwählen um kompatibel zu den genannten Werkstoffen zu sein. In Tabelle 1 und Tabelle 2 sind ausgewählte Schweißzusatzwerkstoffe aufgeführt.

Tabelle 1: Gegenüberstellung ausgewählter, unlegierter Schweißzusatzwerkstoffe [WES12], [BÖH13], [EWM18], [SCH18]

Norm	DIN EN ISO 14 341		DIN EN ISO 17632			
	G3Si1	G4Si1	T 46 4 P M 1 H5	T 46 4 P M 1 H10	T 46 6 M M 1 H5	T 46 6 B M 3 H5
Drahtart	Massiv- draht, unlegiert Ø = 1 mm	Massiv- draht, unlegiert Ø = 1 mm	Fülldraht, unlegiert rutiler Typ Ø = 1,2 mm	Fülldraht, unlegiert rutiler Typ Ø = 1,2 mm	Fülldraht, unlegiert, Metallpulv ertyp Ø = 1,2 mm	Fülldraht, unlegiert, basischer Typ Ø = 1,2 mm
Preis [€/kg] exkl. MwSt	ca. 2,70	ca. 2,80	ca. 3,70	ca. 4,30	ca. 3,60	ca. 4,10
Streckgrenz e Re [MPa]	440	480	500	500	500	480
Zugfestigkei t Rm [MPa]	560	620	600	580	620	600
geeignet bis Streckgrenz e [MPa]	420	460	460	460	460	460

Tabelle 2: Gegenüberstellung ausgewählter, unlegierter Schweißzusatzwerkstoffe [WES12], [BÖH13], [EWM18], [SCH18]

Norm	DIN EN ISO 14 341		DIN EN ISO 17632			
	G3Si1	G4Si1	T 46 4 P M 1 H5	T 46 4 P M 1 H10	T 46 6 M M 1 H5	T 46 6 B M 3 H5
Spritzerbildung	minimale Spritzerbildung	minimale Spritzerbildung	geringe Spritzverluste	k.A.	k.A.	geringe Spritzverluste
Zwangslage neigung	k.A.	sehr gut geeignet [KAZ12] [KAZ12]	ausgezeichnete Eignung	gut geeignet	k.A.	k.A.
Besonderheiten	hohe Strombelastbarkeit beste Förder Eigenschaften bei hohen Drahtvorschüben speziell für automatisierte Schweißungen	hohe Strombelastbarkeit beste Förder Eigenschaften bei hohen Drahtvorschüben speziell für automatisierte Schweißungen	gute Schlackenentfernbarkeit hervorragende Modellierbarkeit rasch erstarrende Schlacke	gute Schlackenentfernbarkeit glatte, feingezeichnete Nahtoberfläche hohe Röntgensicherheit kerbfreie Nahtübergänge	für Roboterschweißungen geeignet gute Zünd- und Wiederzündungseigenschaften sehr gute Spaltüberbrückbarkeit.	rissichere Schweißverbindungen hohe mechanische Güterwerte bei tiefen Temperaturen

Niedrig- und unlegierte Stähle, sowie Feinkornbaustähle bis zu einer Streckgrenze von 460 MPa können mit dem unlegierten Schweißzusatzwerkstoff DIN EN ISO 14341-A G4Si1 verbunden werden. Bei dieser Elektrode handelt es sich um eine günstige, universell einsetzbare Massivdrahtelektrode. Diese weist unter Mischgasen einen weitgehend spritzerfreien Werkstoffübergang auf. Die höchsten Festigkeiten werden im unbehandelten Schweißzustand unter Argon mit 15% bis 20% Kohlenstoffdioxidanteil erhalten. [DIN11], [BÖH13]

Der Schweißzusatzwerkstoff DIN EN ISO 14341-A G4Si1 weist gute mechanische Eigenschaften ähnlich denen von den Baustählen auf. Der Aufbau komplexer Geometrien erfordert die Herstellung von Überhängen während der additiven Fertigung. In [KAZ12] ist beschrieben, wie dies mit dem Schweißzusatzwerkstoff ER70S-6 (G4Si1) realisiert worden ist. Dort konnten Zwangslagenschweißungen bis zu 15° durchgeführt und ein liegender Halbzylinder hergestellt werden, siehe Abbildung 6. Damit eignet er sich grundsätzlich für die additive Fertigung komplexer Strukturen. An der TU Ilmenau wurden Zwangslagenschweißungen bis zu einem Winkel von 30° (Abbildung 7) mit dem Schweißzusatzwerkstoff G25 20 Mn untersucht, dabei wurden auch Bauteile mit Verjüngungen (nur möglich durch Zwangslagenschweißung) hergestellt, siehe Abbildung 8. [HAR14b]

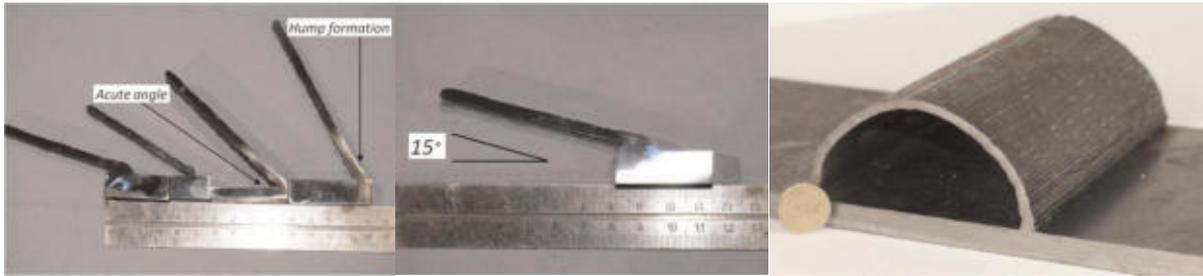


Abbildung 6: Zwangslagenschweißung [KAZ12]

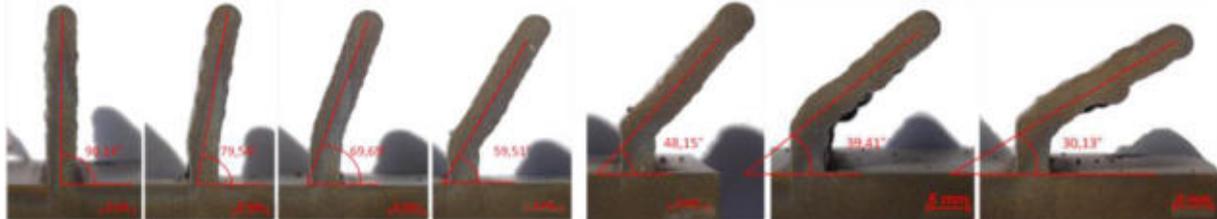


Abbildung 7: Realisierte Winkelgeometrie bei der additiven Fertigung (G25 20 Mn) [HAR14a]



Abbildung 8: additive Herstellung einer Rohrverjüngung mittels MSG-Prozess (G25 20 Mn) [HAR14a]

Für die weiteren Arbeitspakete werden zwei Schweißzusatzwerkstoffe ausgewählt. Zum einen soll die Massivdrahtelektrode G4Si1 vor allem aufgrund der guten Schweißbarkeit in Zwangslagen, seiner minimalen Spritzerbildung und der für Verwendbarkeit für Baustähle genutzt werden. Zum anderen soll die unlegierte Fülldrahtelektrode T 46 6 MM 1 H5 verwendet werden, da diese eine besonders rasch erstarrende Schmelze erzeugt, was wiederum gut für das Schweißen von Zwangslagen ist. Zusätzlich weist der Schweißzusatzwerkstoff T 46 6 MM 1 H5 geringe Spritzverluste auf und kann wie der Schweißzusatzwerkstoff G4Si1 für Stähle bis zu einer Streckgrenze von 460 MPa genutzt werden. Beide Schweißzusatzwerkstoffe eignen sich außerdem für dieselben Stahlsorten. Der Schweißzusatzwerkstoff T 46 6 MM 1 H5 weist eine leicht höhere Streckgrenze, bei gleicher Zugfestigkeit auf.

3.2 Charakterisierung der Zusatzwerkstoffe

3.2.1 Allgemeines Vorgehen

1. Vorversuche:

Zunächst wurde in Vorversuchen geeignete Prozessparameter für das MSG-Schweißen mit einem niedriglegierten Stahl ermittelt werden. Dazu wird der Stahl mittels geregelter energiereduzierter Kurzlichtbogen aufgeschmolzen. Ziel ist dabei das Erreichen eines stabilen Schweißprozesses. Dabei sollen gleichmäßige und geradlinige Schweißnähte resultieren, welche eine sehr geringe Oberflächenwelligkeit aufweisen. Diese stellen die Grundlage für den Aufbau mehrerer Schichten dar. Es soll eine Optimierung der Prozessparameter für die Verbesserung des Aufbaus der Schweißnähte erfolgen.

2. Hauptversuche:

Mithilfe des aus den Vorversuchen gewonnenen Prozessverständnisses erfolgt danach die Erzeugung von mehrschichtigen Wandstrukturen. Die aus den Vorversuchen gewonnenen Erkenntnisse zu den Prozessparametern bestimmen somit den Inhalt der Hauptversuche. Bei der Generierung der Wandstrukturen wird stets eine gleichbleibende Zwischenlagentemperatur eingehalten. Außerdem erfolgt die Messung der $t_{8/5}$ -Zeit (Abkühlzeit von 800°C auf 500°C), um Wirkzusammenhänge zu den mechanisch-technologischen Eigenschaften herzustellen. Ziel ist die Generierung sowohl einreihiger als auch mehrreihiger Wandstrukturen, die einen gleichmäßigen Schichtaufbau aufweisen.

Der Umfang der Untersuchungen wird schließlich im Wesentlichen auch durch den Aufwand zur Herstellung einzelner Proben bestimmt.

3.2.2 Werkstoffe

3.2.2.1 Grundwerkstoff

Die Grundplatten liegen in den Abmessungen 330 mm x 150 mm x 20 mm vor und bestehen aus dem Baustahl S355J2+N, welcher häufig im Bauwesen Anwendung findet. Dieser Stahl ist wie der verwendete Schweißzusatzwerkstoff ebenfalls niedriglegiert. Dabei ist er kostengünstig. Im Verlauf der Generierung und Bearbeitung der Proben aus den Versuchen wird die Grundplatte zunächst nur zum Einspannen genutzt und später abgetrennt. Die Dicke der Grundplatte wurde mit 20 mm gewählt, um eine gute Wärmeabfuhr über die Grundplatte zu gewährleisten und den Verzug durch den teilweise hohen Wärmeeintrag zu minimieren.

3.2.2.2 Schweißzusatzwerkstoff

Als Schweißzusatzwerkstoff werden die niedriglegierte Massivdrahtelektrode, DIN EN ISO 14341-A G4Si1, und die niedriglegierte Metallpulverfülldrahtelektrode EN ISO 17632-A T 46 6 MM 1 H5 mit einem Drahtdurchmesser von 1,2 mm verwendet. Beide Schweißzusätze finden Anwendung im Stahlbau, im Metallrahmenbau, im Industriemaschinenbau, in der chemischen Industrie, in der Kesselindustrie, in der Rohrherstellung und im Rahmen- und Anlagenbau und bieten somit ein breites Einsatzfeld. In Tabelle 3 sind die chemische Zusammensetzung und die mechanischen Eigenschaften für den G4Si1, entnommen aus dem Datenblatt des Herstellers Westfälische Drahtindustrie GmbH, kurz WDI (vgl. Anhang 1) aufgeführt. Tabelle 4 zeigt die chemische Zusammensetzung und die mechanischen Eigenschaften für den RD100.

Tabelle 3: Eigenschaften Schweißzusatzwerkstoff G4Si1 [WES19]

chemische Zusammensetzung			
Kohlenstoff (C)	Silizium (Si)	Mangan (Mn)	
0,07%	1,05%	1,75%	
mechanische Eigenschaften			
Streckgrenze [N/mm ²]	Zugfestigkeit [N/mm ²]	Dehnung (L0=5d ₀) [%]	Kerbschlagarbeit ISO-V [J]
460	560	27	100

Tabelle 4: Eigenschaften Schweißzusatzwerkstoff RD100

chemische Zusammensetzung				
Kohlenstoff (C)	Silizium (Si)	Mangan (Mn)	Molybdän (Mo)	Kupfer (Cu)
0,06%	0,60%	2,00%	0,20%	0,30%
mechanische Eigenschaften				
Streckgrenze [N/mm ²]	Zugfestigkeit [N/mm ²]	Dehnung (L0=5d ₀) [%]	Kerbschlagarbeit ISO-V [J]	
>420	500-640	>20	-	

3.2.2.3 Schutzgas

Während der Vor- und Hauptversuche wurde das in der Tabelle 5 aufgeführte Schutzgas verwendet. 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, abgelesen und die Durchflussmenge eingestellt. Die empfohlene Durchflussmenge beträgt nach [EWM09] bei einem Drahtdurchmesser von 1,2 mm zwischen 12 und 14,4 l/min. Diese wurde in den Vorversuchen zunächst eingestellt. Im Ergebnis der Vorversuche zeigte eine Erhöhung der Durchflussmenge auf ca. 17,5 l/min vorteilhafte Eigenschaften in Hinsicht auf die Stabilität des Schweißprozesses.

Tabelle 5: Eigenschaften Schutzgas

Bezeichnung	Gasart	Bezeichnung nach EN 439 (DIN 32526)	Argon	Kohlenstoffdioxid
Stargon C2	Argon-Kohlenstoffdioxid Gemische	M12	98%	2%

3.2.3 Versuchsaufbau

Dieses Kapitel beschreibt die Versuchsanlage und deren Aufbau. Weiterhin wird auf die jeweilige Funktionsweise und Zielstellung eingegangen. Es folgt die Beschreibung des Aufbaus und der Funktionsweise der MSG-Schweißanlage sowie der zugrundeliegenden Methoden der Prozessbewertung.

3.2.3.1 Versuchsaufbau Vor- und Hauptversuche

Sowohl für die Vorversuche als auch für die Hauptversuche wurde der gleiche Versuchsstand verwendet und mit gleichartigen Bedingungen betrieben, um reproduzierbare Ergebnisse zu erreichen.

Die Baugruppen und die Funktion des Versuchsaufbaus sind in Abbildung 9 dargestellt:

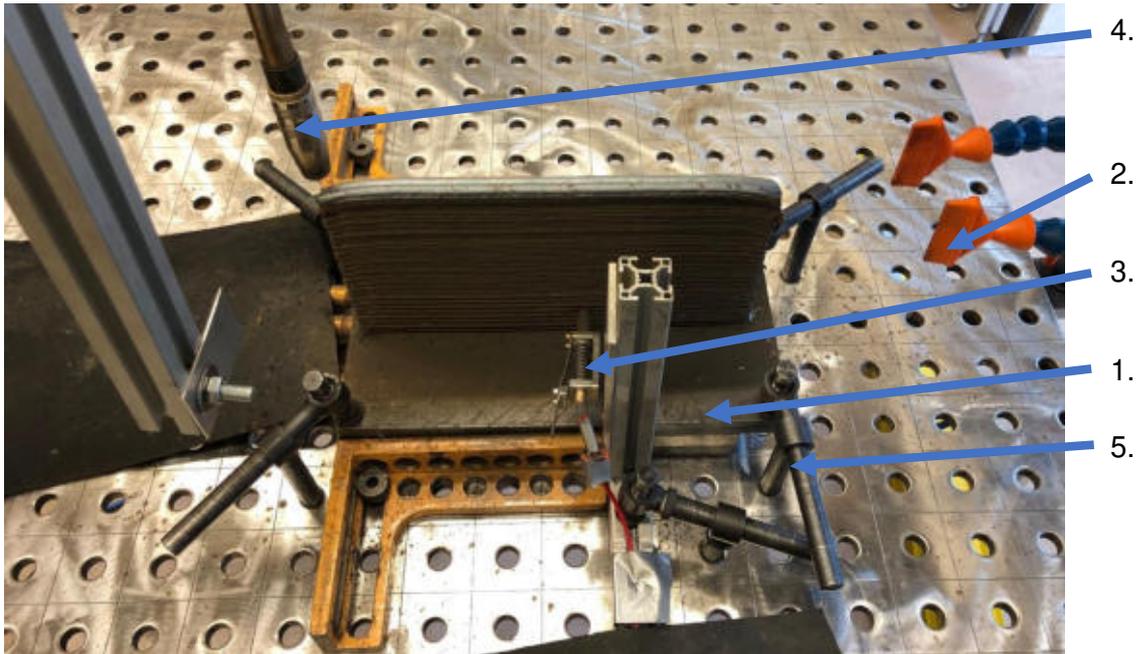


Abbildung 9: Versuchsaufbau Vor- und Hauptversuche

Der Versuchsaufbau besteht aus fünf Baugruppen:

1. Unterlage mit Grundplatte
2. Kühlvorrichtungen
3. Temperaturmessung
4. MSG- Schweißbrenner an Industrieroboter
5. Spannhilfen

Die erste Baugruppe stellt die Unterlage mit Grundplatte dar. Die Grundplatte wird mittels Spannhilfen auf der Unterlage und somit auf dem Schweißtisch fixiert. Dies geschieht, um stets dieselbe Position einzuhalten und dem Schweißverzug der Grundplatte entgegenzuwirken.

Die zweite Baugruppe bilden die Kühlvorrichtungen. Sie bestehen aus einer Druckluftkühlung und einer wassergekühlten Unterlage. Die wassergekühlte Unterlage, auf der die Grundplatte fixiert ist, dient der schnelleren Wärmeabfuhr in den unteren Schichten während der Generierung. Zusätzlich wird eine Druckluftkühlung eingesetzt, welche die Wärme durch Umströmung der Wandstruktur ableitet. Die Kombination aus beiden Kühlmethoden sorgt für geringere Abkühlzeiten speziell in den mittleren bis oberen Schichten und somit für eine kürzere Prozesszeit.

Im Rahmen der Temperaturmessung wurden die Zwischenlagentemperatur gemessen und die Abkühltemperaturkurve zur Ermittlung der $t_{8/5}$ -Zeit aufgenommen. Die Messungen erfolgten mittels Thermoelementen.

Ein Thermoelement ist ein Sensor zur Temperaturmessung. Die Sensoren bestehen aus zwei Drähten aus unterschiedlichen Metallen, die an einer Seite miteinander verbunden sind. An der anderen Seite sind die Thermoelementdrähte an ein Messgerät angeschlossen, welches das Signal des Thermoelements verarbeiten kann. Das zugrundeliegende Messprinzip, welches auf dem Seebeck-Effekt basiert, besagt, wenn zwei Drähte aus unterschiedlichen Metallen an beiden Seiten miteinander verbunden werden und eine Seite erwärmt wird, fließt in diesem thermoelektrischen Kreis ein Strom. Wird dieser Stromkreis unterbrochen, ist die anliegende thermoelektrische Spannung eine Funktion der Temperatur an der Übergangsstelle zwischen beiden Metallen. Wenn die Verbindungsstelle der beiden Metalle, welche die Messspitze bildet, erhitzt oder abgekühlt wird, entsteht eine Spannung, die zur Temperatur in Beziehung steht.

Zur Messung der Zwischenlagentemperatur kam ein Thermoelement Typ K mit dem Anzeigegerät MCR-4TC der Firma T&D zum Einsatz, dabei befand sich der Messpunkt auf der Schweißnahtoberfläche. Die Messung erfolgte in den Vor- und Hauptversuchen gleichartig unter gleichen Bedingungen an jeder Schweißlage. Die Aufnahme der Abkühltemperaturkurve erfasste ein Thermoelement des Typ C in der Mitte der Schweißnähte. Dieses war über eine Schnittstelle an das DAQ Messsystem DEWE PCI-16 der Firma Dewetron angeschlossen, welches über die Software Dewesoft nicht nur den Zeit-Temperatur-Verlauf aufnimmt, sondern auch die Strom- und Spannungswerte während des Aufbauprozesses erfasst. Das Thermoelement wird während des Schweißprozesses über eine Einschussvorrichtung in das Schweißbad eingeschossen. Der Winkel für den Einschuss ist bei allen Versuchen gleichbleibend mit $\alpha = 15$ Grad konstant festgelegt worden (vgl. Abbildung 10). Die Höhe der Einschussvorrichtung wurde für jeden Versuch so eingestellt, dass der Einschuss stets in die 10. Lage erfolgte, da in dieser Höhe bereits bei allen Versuchen die festgelegte Zwischenlagentemperatur erreicht wurde.

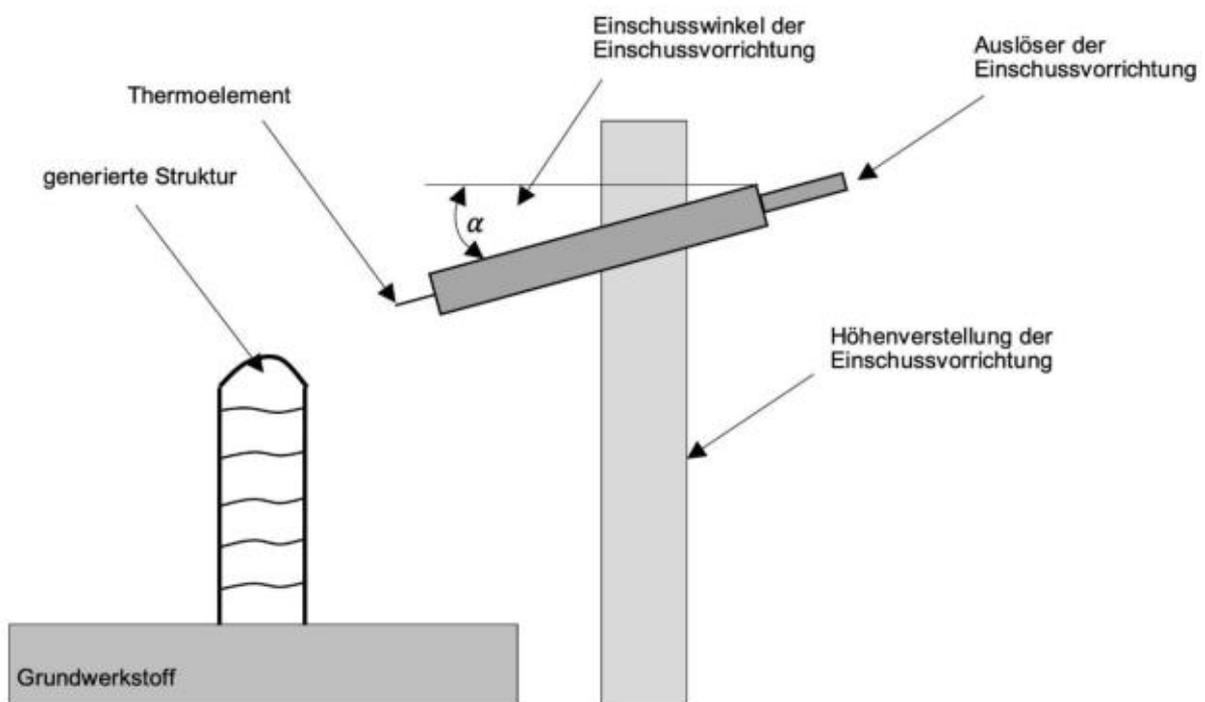


Abbildung 10: Schema der Einschussvorrichtung für das Thermoelement

Die vierte Baugruppe stellt den MSG-Schweißbrenner, welcher an einen Industrieroboter gekoppelt ist, dar. Der verwendete sechs Achsen Knickarmroboter KR 150-2 der Firma KUKA realisiert die Relativbewegung zwischen dem Schweißbrenner und der Grundplatte während der Schichtgenerierung. An dem Roboter ist eine Adapterplatte montiert, an die der MSG-Schweißbrenner befestigt ist.

Die Komponenten der MSG-Schweißanlage und deren Funktionsweise werden im folgenden Kapitel näher beleuchtet.

3.2.3.2 MSG-Schweißanlage

Die verwendete MSG-Schweißanlage besteht aus den folgenden Komponenten:

- Schweißstromquelle: EWM Alpha Q 552 Puls,
- Drahtvorschubeinheit: EWM F drive Rob 3 LI,
- MSG-Schweißbrenner: EWM.

Die verwendete Schweißstromquelle Alpha Q 552 Puls der Firma EWM ist eine elektronisch gesteuerte Inverterstromquelle. Hierfür werden der Schweißstrom und die Schweißspannung im μs -Bereich gemessen und mit einer voreingestellten Kennlinie verglichen. Bei einer Abweichung wird intern der Schweißstrom nachgeregelt. Viele dieser Kennlinien sind für verschiedene Anwendungsfälle in der Schweißstromquelle hinterlegt. Bei der Firma EWM ist dies durch eine Job-Liste realisiert. Die Jobs enthalten alle notwendigen Schweißparameter. Aufgrund der folgenden Parameter kann der Benutzer, angepasst auf seinen Anwendungsfall, einen geeigneten Job aus der Job-Liste entnehmen:

- Werkstoffübergang
- Schutzgasart
- Schweißzusatzwerkstoff
- Durchmesser Schweißzusatzwerkstoff.

Die Eingabe des Jobs erfolgt in der Software PC300.net von EWM und wird anschließend über eine Schnittstelle vom PC an die Schweißstromquelle übermittelt. Im Rahmen dieser Arbeit wird der energiereduzierte geregelte Kurzlichtbogen verwendet. Für die Schweißversuche ist der coldArc-Job 194 für den niedriglegierten Stahl G4Si1 mit einem Drahtdurchmesser von 1,2 mm ausgewählt worden.

Durch die Drahtvorschubeinheit wird der Draht mit dem Durchmesser von 1,2 mm vom Drahtkoffer über das Drahtvorschubgerät bis zum MSG-Schweißbrenner gefördert. Der Draht, aufgewickelt auf einer Korbspule, wird in den Drahtkoffer eingelegt. Das Drahtvorschubgerät F drive Rob 3 LI der Firma EWM fördert den Draht über Drahtvorschubrollen mit einer einstellbaren Vorschubgeschwindigkeit zum MSG-Schweißbrenner. Die erforderliche Steuerung erfolgt über die Schweißstromquelle. Das verwendete Drahtvorschubgerät verfügt über einen Antrieb mit vier Rollen. Die Vorschubrollen weisen eine V-Nut auf, wobei die Gegendruckrollen keine Nut aufweisen. Der Anpressdruck wurde auf der angebrachten Skala (von 1-6) mit 3 eingestellt.

Das Schlauchpaket führt dem Schweißbrenner den Schweißzusatzwerkstoff und das Schutzgas zu. Dabei erfolgt die Führung des Zusatzwerkstoffes über eine Seele. Das Schutzgas wird durch das Schlauchpaket zum Schweißbrenner geleitet.

Durch die Stromkontaktdüse aus Zirkonium-Kupfer (CuCrZr), mit dem Durchmesser 1,2 mm, wird der Zusatzwerkstoff im Schweißbrenner kontaktiert und die Schutzgasdüse sorgt für eine einheitliche Ummantelung des Lichtbogens mit Gas.

3.2.3.3 Methoden der Prozessbewertung

a) Schweißspannung und Schweißstrom

Um eine Beurteilung der Prozessstabilität und des Werkstoffübergangs während des Schweißprozesses durchführen zu können, wurden die Strom- und Spannungskennlinien aufgenommen. Über die gewonnenen Messwerte können außerdem Aussagen zur Energieeinbringung während des MSG-Schweißprozesses getroffen werden.

Die Aufnahme der Messwerte erfolgt über einen Mehrkanal-Transienten-Rekorder des Typs Dewe-5000 der Firma Dewetron. An diesen wurden sowohl die Strom- als auch die Spannungsausgabe aus der Schweißanlage angeschlossen. Die Werte konnten anschließend über die Software Dewesoft separat ausgelesen, aufgenommen und gespeichert werden. Durch Mittelwertbildung von Schweißspannung U_s und Schweißstromstärke I_s erfolgte später die Berechnung der Leistung P und der Streckenenergie E nach den folgenden Gleichungen:

$$E_s = \frac{P}{v} \left[\frac{kJ}{cm} \right] \quad \text{mit} \quad P = \int_0^t \frac{U * I}{dt} [W] \quad (1)$$

b) Schichthöhenmessung und -einstellung

Die Schichthöhenmessung erfolgt mittels Messschieber an drei Punkten über die Nahtlänge hinweg. Der Mittelwert dient als Grundlage für die z-Zustellung (Höhenverstellung) des Schweißbrenners bei der Schichtgenerierung. Dies ist wichtig, um stets einen gleichbleibenden Abstand zwischen Stromkontaktrohr und der Schweißbraupe (Stickout) einzuhalten. Die Schichthöhe unterscheidet sich in Abhängigkeit von den verschiedenen, eingestellten Parametern und musste somit während der Vorversuche stets angepasst werden. Während der Hauptversuche dienten die in den Vorversuchen zuvor gesammelten Werte als Referenz, sodass die Anpassung der z-Zustellung während des Prozesses nicht notwendig war. Die Einstellung der Zustellbewegung des Roboters erfolgt über das Bedienpanel des Schweißroboters.

c) Messung der Zwischenlagentemperatur T_z

Die Temperaturmessung zur Einhaltung der Zwischenlagentemperatur T_z während des Aufbauprozesses erfolgte, wie bereits in Kapitel 4.3.1. erwähnt, mit dem Messgerät MCR-4TC der Firma T&D mittels eines Thermoelements Typ K. Dieses Thermoelement ist für einen Temperaturbereich von -270°C bis $+1300^\circ\text{C}$ geeignet. Nach dem Abschluss des Schweißvorgangs einer Lage ist die Temperatur in der Mitte der Schweißbraupe gemessen worden. Hierfür wurde die Oberfläche der Schweißbraupe mit der Messspitze berührt. Der Messfehler des Messgerätes liegt laut Hersteller bei 2 K.

d) Aufnahme der Abkühltemperaturkurve

Die Aufnahme der Abkühlzeit des Schweißbades während des Schweißprozesses erfolgte im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls über den Mehrkanal-Transienten-Rekorder des Typs Dewe-5000 der Firma Dewetron mittels der Software Dewesoft. Durch eine Schnittstelle am Dewetron sind Thermoelemente des Typs C angeschlossen, welche die Temperatur nach Einschuss ins Schweißbad über den gesamten Schweißprozess hinweg an einer festen Stelle messen. Thermoelemente des Typs C sind für einen Temperaturbereich zwischen 0°C bis 2315°C geeignet. Der Messfehler des Messmoduls im Dewetron liegt bei 0,5 K.

3.2.4 Vorversuche

Die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Vorversuche dienen der Ermittlung stabiler und reproduzierbarer Prozessparameter. Hierfür werden zunächst Blindnähte erzeugt. Aufbauend darauf werden Versuche zur Schichtgenerierung mit diesen Parametern angestellt, welche die Grundlage für die Hauptversuche darstellen.

3.2.4.1 Versuchsparameter und Durchführung

Vor dem Beginn der Untersuchungen ist die Grundplatte auf dem Schweißtisch positioniert worden. Anschließend folgte die Einstellung des Abstands zwischen der Grundplatte und der Schutzgasdüse, welcher als Stickout bezeichnet wird. Für alle Versuche wurde der Stickout mit 12 mm festgelegt und eingestellt.

Für die spätere Schichtgenerierung ist eine Umkehr der Schweißrichtung nach jeder Schicht vorgesehen, weshalb eine neutrale Brennerposition gewählt wurde.

Die in den Schweißversuchen angefertigten Blindnähte werden mit einer Länge von 100 mm in x-Richtung geschweißt. Zwischen den Schweißvorgängen der Blindnähte wurde eine Abkühlzeit vorgesehen, damit die Grundplatte gleichbleibende Temperaturverhältnisse ($T < 50^\circ\text{C}$) aufweist. Es erfolgte eine zusätzliche Kühlung über die wassergekühlte Unterlage der Grundplatte, um kürzere Abkühlzeiten zu realisieren.

Über die Steuerung des Roboters sind sowohl die Schweißgeschwindigkeit v_s als auch der Job festgelegt worden. Die Einstellung der Schweißstromquelle und somit auch die Einstellung der Parameter für den zuvor ausgewählten Job ist über die Software PC300.net erfolgt. Es sind sowohl die Drahtvorschubgeschwindigkeit, die Spannung und die Gasvor- und Gasnachströmzeit definiert und über eine Schnittstelle vom PC an die Schweißstromquelle übermittelt worden. Die folgende Tabelle 6 führt die Parameter und die Bereiche, in denen diese verändert wurden, auf.

Tabelle 6: Schweißparameter für Vorversuche

Schweißparameter	Versuchsparameter	
	Grenzwert Minimum	Grenzwert Maximum
Drahtvorschub [m/min]	3	6
Spannung [V]	18	24
Schweißgeschwindigkeit v_s [m/min]	0,2	0,7
Schutzgasmenge [l/min]	15	20
Brennerposition	neutral	
Stickout [mm]	12	
Gasvor-/nachströmzeit [s]	0,5 / 2,0	

Zum Beginn des Schweißprozesses werden über die Steuerung des Roboters die digitalen Ausgänge geschaltet, woraufhin der Prozess startet. Die Linearbewegung wird durch einen Roboter der Firma Kuka gewährleistet und beginnt zum Zeitpunkt der Zündung des Lichtbogens auf der Werkstückoberfläche. Die Schweißbewegung erfolgt in x-Richtung und mit der zuvor festgelegten Schweißgeschwindigkeit v_s . Erreicht der Brenner die Endposition, werden der Brenner und der Roboterantrieb abgeschaltet. Im Anschluss regelt die Schweißstromquelle die Nachströmzeit des Schutzgases entsprechend der Eingabe und der Schweißprozess ist beendet. Das Ergebnis ist eine Blindnaht.

Aufbauend auf dem Prinzip der Herstellung der Blindraupen erfolgt die Schichtgenerierung (vgl. Abbildung 11). Die Erzeugung der ersten Lage entspricht der Erzeugung einer Blindnaht wie oben beschrieben. Aufgrund der neutralen Brennerposition kann die Schweißrichtung umgekehrt werden, wodurch die Endposition in x-Richtung der ersten Lage die Anfangsposition der zweiten Lage darstellt. Dies dient einem gleichmäßigen Aufbau der Lagen, da aufgrund prozesstechnischer Einflüsse die erzeugten Schweißnähte zum Ende hin eine geringfügig niedrigere Höhe aufweisen. Der bereits für die erste Lage eingestellte Stickout (h_0) bleibt während des gesamten Prozesses der Schichtgenerierung konstant. Um dies zu gewährleisten und die korrekte Höhe für die Erzeugung der zweiten Lage zu definieren, wird an drei Stellen der ersten Lage die Höhe mittels Messschieber ermittelt und der Mittelwert (h_1) aus diesen drei Werten gebildet. Der Roboter bewegt den Schweißbrenner um genau diesen Wert in z-Richtung nach oben. Die neue Position stellt nun die Anfangsposition für die Erzeugung der zweiten Lage dar.

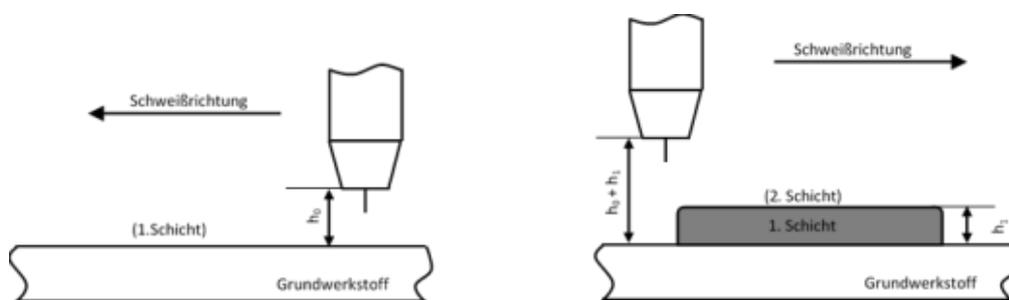


Abbildung 11: Schematische Darstellung linienförmige Schichtgenerierung

Um die festgelegte Zwischenlagentemperatur T_z nicht zu überschreiten, werden nach der Erzeugung jeder Lage die Temperatur der Naht gemessen und Abkühlzeiten eingehalten. Nach zehn Lagen ist die Erzeugung der Wandstruktur abgeschlossen und die Höhe der Schichten wird nochmals an drei Stellen gemessen, um einen Mittelwert zu bilden. Dieser Mittelwert in Verbindung mit der Anzahl der Schichten stellt das Maß für die Zustellung des Roboters in z-Richtung für jede einzelne Lage dar.

Mehrreihige Schichtgenerierung

Als Grundlage für Versuche zur linienförmigen Generierung mehrraihiger Strukturen dienen die Erkenntnisse zur Schichtgenerierung der einreihigen Schichten wie oben beschrieben.

Dabei wird zunächst ebenfalls eine Blindnaht erzeugt und anschließend deren Breite an drei Stellen über die Naht hinweg gemessen. Der Mittelwert dient als Grundlage für die Zustellung des Roboters in y-Richtung. Wichtig für die Verbindung der Blindnaht mit einer weiteren Schweißnaht welche, angrenzend geschweißt wird, ist die Überlappung zwischen beiden Nähten. Um die Gefahr von Bindefehlern zu minimieren, werden unterschiedliche Überlappungen der Nähte vorgenommen.

Anschließend wird, wie bei der Generierung einreihiger Schichten, die Höhe der entstandenen Schweißbraupe an drei Stellen gemessen, um einen Mittelwert für die Zustellung des Roboters in z-Richtung zu erhalten. Aufbauend auf diesem Prinzip werden Versuche zur Generierung mehrerer Schichten und mehrerer Reihen durchgeführt. Außerdem wird die Aufbaustrategie für mehrraihige Strukturen untersucht.

3.2.4.2 Versuchsstrategie der Vorversuche

Mithilfe der Vorversuche sollen stabile und reproduzierbare Prozessparameter für die Erzeugung von Blindnähten mittels energiereduzierter, geregelter Kurzlichtbogentechnik (coldArc®) ermittelt werden, welche später die Grundlage für die linienförmige Schichtgenerierung darstellen.

Die folgende Versuchsstrategie kam zur Anwendung:

1. Entsprechend der Job-Liste des Schweißgerätes der Firma EWM wurde für den niedriglegierten Zusatzwerkstoff (G4Si1) mit dem Durchmesser 1,2 mm der Job 194 ausgewählt. Bei diesem kommt die energiereduzierte, geregelte Kurzlichtbogentechnik (coldArc®) zum Einsatz. Es galt, mithilfe von in der Schweißstromquelle hinterlegten Parametern ein erstes Prozessverständnis zu erlangen. Durch die einzelne Variation der Parameter Schweißgeschwindigkeit, Schweißspannung und Drahtvorschubgeschwindigkeit wurde der Einfluss dieser Größen auf die Nahtgeometrie und die Gleichmäßigkeit der Blindnähte untersucht. Die Bewertung dieser Merkmale und der Stabilität des gesamten Schweißprozesses diente der ersten Eingrenzung der verwendbaren Schweißparameter.
2. Um später generelle Aussagen über die Ergebnisse der verwendeten Schweißparameter treffen zu können, werden diese durch die eingebrachte Streckenenergie E_s ausgedrückt. In diese gehen die Schweißspannung und der Schweißstrom in Abhängigkeit von der Schweißgeschwindigkeit ein. Für die in Schritt 1 eingegrenzten Parameter wurden die Schweißspannung und der Schweißstrom aufgenommen. Anschließend erfolgte eine weitere Eingrenzung der verwendeten Parameter anhand der eingebrachten Streckenenergie. Es wurden drei Streckenenergien (4, 6 und 8 kJ/cm) für die weiteren Versuche ausgewählt.
3. Um eine geeignete Aufbaustrategie für die späteren Hauptversuche zu entwickeln, wurden aufgrund der bislang eingegrenzten Parameter einige Grundlagenversuche zur Schichtgenerierung vorgenommen. Dafür wurden zunächst linienförmig und einreihig 10 Lagen übereinander (z-Richtung) aufgebaut, um ein Grundverständnis zu erlangen. Anschließend erfolgte der Aufbau linienförmiger, in y-Richtung mehrreihiger Lagen übereinander (z-Richtung). Dies diente der Ermittlung der geeigneten Überlappung der Schweißnähte in y-Richtung und dem Erarbeiten einer geeigneten Aufbaustrategie für derartige Strukturen.
4. Anhand der drei Streckenenergien und der damit verknüpften Parameter (Schweißspannung, Drahtvorschubgeschwindigkeit und Schweißgeschwindigkeit) wurde außerdem der Einfluss der Zwischenlagentemperatur, der Schutzgasdüsengeometrie und der eingesetzten Schutzgasmenge auf die Porosität der Schweißproben untersucht. Es wurden die besten Parameter in Bezug auf die Porosität ausgewählt.

3.2.5 Auswertung Vorversuche

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sind Vorversuche durchgeführt worden. Hierbei galt es zunächst, stabile Prozessparameter für den verwendeten Schweißzusatzwerkstoff und die Schweißanlage zu ermitteln, mit denen Versuche zur Schichtgenerierung einreihiger und mehrreihiger Wandstrukturen erfolgen können.

3.2.5.1 Untersuchungen zur eingebrachten Streckenenergie

Beginnend mit der Eingrenzung eines Prozessfensters für die Größen Schweißspannung, Drahtvorschubgeschwindigkeit und Schweißgeschwindigkeit wurden Blindnähte erzeugt und diese anschließend optisch bewertet. Bewertungsgrundlage stellte die Nahtgeometrie, insbesondere die Gleichmäßigkeit und Geradlinigkeit dieser dar. Die zugeführte Schutzgasmenge von 15 l/min, der Stickout von 12 mm, die Gasvor- und Gasnachströmzeit von 0,5 Sekunden und 2,0 Sekunden sowie die Zwischenlagentemperatur in Höhe von $T_z = 100^\circ\text{C}$ wurden konstant gehalten. Es ergaben sich mehrere Parameter für die Schweißspannung, Drahtvorschubgeschwindigkeit und die Schweißgeschwindigkeit in einem Prozessfenster, welches in Tabelle 7 dargestellt ist.

Tabelle 7: Prozessfenster der Vorversuche

Größe	Parameter
Schweißspannung	18 – 24 V
Drahtvorschubgeschwindigkeit	3 – 6 m/min
Schweißgeschwindigkeit	0,2 – 0,7 m/min

Weiterhin wurden Untersuchungen zur Porosität anhand der Parameter des in Tabelle 5.1 dargestellten Prozessfensters vorgenommen. Dies erfolgte mittels der Software ImageJ. Die Analysen ergaben verschiedene Werte zur Porosität, von denen lediglich die Parameter für spätere Versuche ausgewählt wurden, die eine Porosität kleiner ein Prozent aufwiesen. Die Bewertung erfolgte in Anlehnung an die in DIN EN ISO 5817, welche die Unregelmäßigkeiten für Schweißverbindungen beschreibt, für die zugrundeliegenden Grenzwerte der Bewertungsgruppe B. Der Bewertungsgruppe B können Schweißnähte zugeordnet werden, die zum Beispiel im Brückenbau oder Schienenbau Anwendung finden.

Es folgte die Aufnahme der Stromstärke I_s und Spannung U_s der ausgewählten Parameter, um ausgehend von der sich daraus ergebenden Leistung P die Streckenenergien E zu berechnen (vgl. Formel 1). Die Berechnung erfolgte anhand der Mittelwerte aus den aufgenommenen Stromstärken und Spannungen, sowie den sich daraus ergebenden Leistungen mittels der in Punkt 3.2.3.3. beschriebenen Berechnungsgrundlage.

Die sich später anschließenden Hauptversuche sollten anhand von 3 verschiedenen Streckenenergien und den sich daraus ergebenden Schweißparameter generiert werden. Hierfür wurden anhand der Messdaten die in Tabelle 8 dargestellten Parameter ausgewählt, weil deren resultierende Streckenenergien einen repräsentativen Abstand zueinander darstellen.

Tabelle 8: Prozessparameter in Abhängigkeit von Schweißleistung und Streckenenergie

Nr.	Schweißparameter		Mittelwert Schweißleistung	Streckenenergie (gerundet)
1.	Drahtvorschub	4 m/min	2643,14 W	4 kJ/cm
	Schweißgeschwindigkeit	0,4 m/min		
	Spannung	20,1 V		
2.	Drahtvorschub	3 m/min	2018,37 W	6 kJ/cm
	Schweißgeschwindigkeit	0,2 m/min		
	Spannung	19 V		
3.	Drahtvorschub	4 m/min	2671,3 W	8 kJ/cm
	Schweißgeschwindigkeit	0,2 m/min		
	Spannung	20,1 V		

Die ermittelten Prozessparameter (vgl. Tabelle 8) wurden somit für weitere Versuche festgelegt und konstant gehalten.

3.2.5.2 Untersuchungen zur Aufbaustrategie

Analog zu den Untersuchungen, welche die Auswirkung der Prozessparameter auf die Porosität prüfen, wurden Versuche mit den festgelegten Prozessparametern, die Aufbaustrategie mehrreihiger Wandstrukturen betreffend, angestellt.

Dabei wurden drei Aspekte genauer betrachtet und untersucht: die Anbindung der Reihen aneinander und die Geradlinigkeit sowie die Gleichmäßigkeit der generierten mehrreihigen Wandstruktur. Die betrachteten Aspekte zur Aufbaustrategie stellen neben den oben beschriebenen Schweißparametern einen wesentlichen Teil zur Findung von stabilen Prozessparametern dar.

Überlappung

Für eine Anbindung der Reihen aneinander ist u.a. die Überlappung dieser von Bedeutung. Es folgten Versuche im Bereich zwischen 40% bis 60%. Bei zu geringen Werten treten Bindefehler auf, wie in Abbildung 12 und Abbildung 13 erkennbar. Es zeigte sich, dass eine Überlappung von 50% ausreicht, um Bindefehler zu vermeiden und die Nahtgeometrie nicht negativ zu beeinflussen.

Schweißabfolge

Über dies wurden Versuche zur Schweißabfolge in Bezug auf die Anbindung der Reihen aneinander angestellt. So zeigte sich, dass es sinnvoll ist, bei einem zweireihigen Aufbau die Generierung der zweiten Reihe ohne größere Verweilzeit/ Abkühlzeit direkt an die Generierung der ersten Reihe folgen zu lassen. Auch bei einem dreireihigen Aufbau ist diese Abfolge von Vorteil für die Anbindung der Reihen aneinander. Die Generierung der zweiten Reihe erfolgt direkt im Anschluss an die der ersten Reihe und die Generierung der dritten Reihe direkt nach der zweiten Reihe. Die festgelegte Zwischenlagentemperatur zwischen der Generierung mehrerer Schichten wurde dabei kontrolliert und eingehalten. Über die Anbindung der Reihen aneinander hinaus, wurde die Geradlinigkeit und Gleichmäßigkeit der mehrreihig generierten Wandstrukturen in den Vorversuchen betrachtet. Dabei fanden Untersuchungen zu zwei Aspekten statt: zum einen der Aufbau der untersten Lage (Anbindung zum Grundwerkstoff) und der Reihenfolge der Generierung der Reihen bei einem dreireihigen Aufbau.

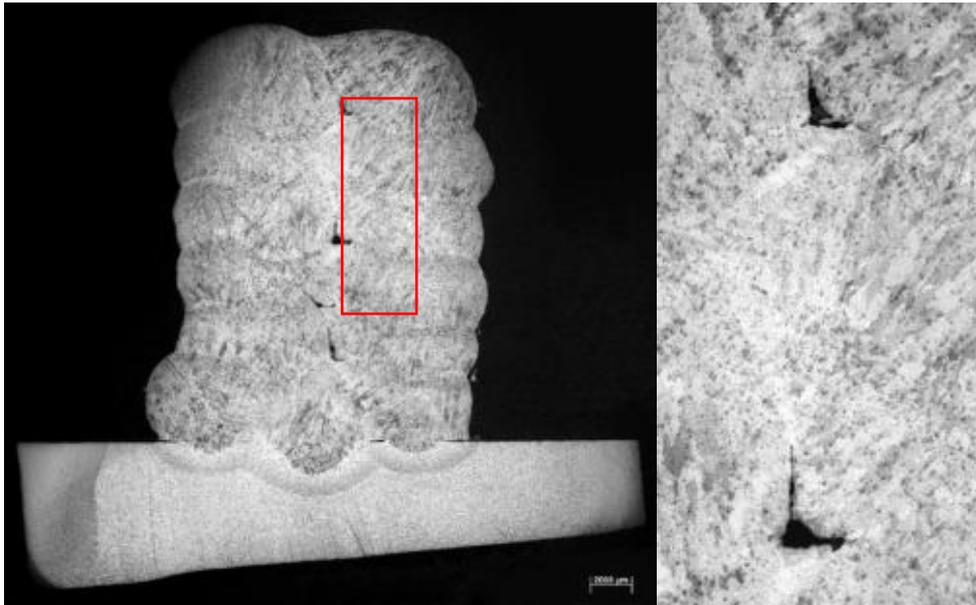


Abbildung 12: Anbindung der Reihen mehrreihig generierter Wandstrukturen (40% Überlapp)

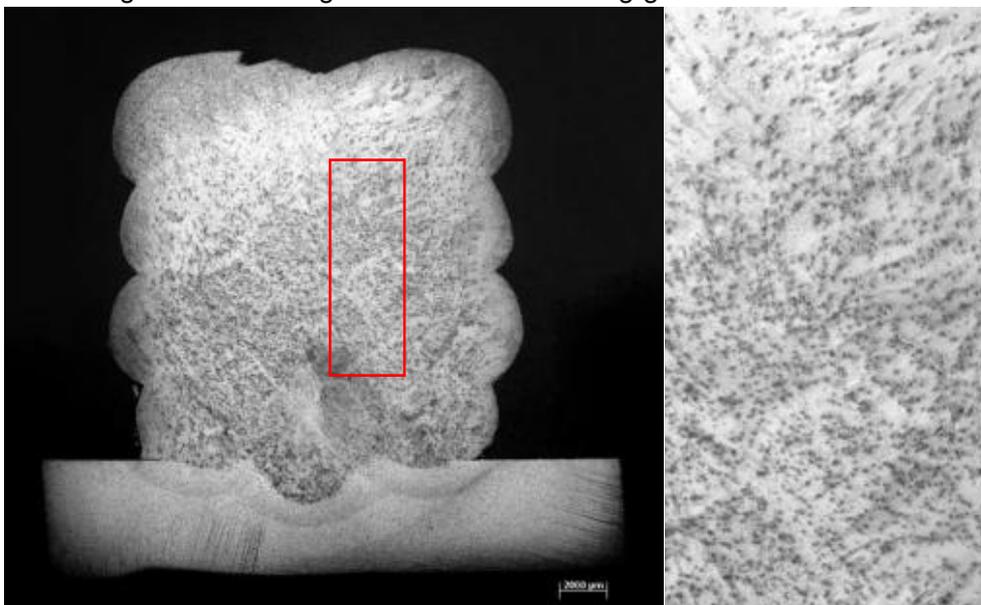


Abbildung 13: Anbindung der Reihen mehrreihig generierter Wandstrukturen (50% Überlapp)

Anbindung zum Grundwerkstoff

Es zeigte sich, dass sich zweireihige und dreireihige Wandstrukturen bei mehrlagigem Aufbau, bedingt durch die unterschiedlichen Aufbauhöhen der ersten und zweiten Schweißraupe, neigen können, was sich in höheren Lagen negativ auf den Schweißprozess und somit auf die Stabilität des Generierungsprozesses auswirken kann. Um dies zu umgehen, wurden Versuche die erste Lage (Anbindung zum Grundwerkstoff) betreffend angestellt. Hierbei zeigte sich, dass man ein Kippen in höheren Lagen minimieren kann, wenn die erste Lage aus einer zusätzlichen Reihe besteht. Das bedeutet, dass bei einem zweireihigen Aufbau die erste Lage aus drei Reihen und bei einem dreireihigen Aufbau aus vier Reihen besteht. Auf diese folgt dann mittig die Generierung weiterer Schichten. Dadurch wird die Tendenz zum Kippen bereits am Anfang des Schweißprozesses minimiert und die Wandstruktur erweist sich als gleichmäßiger.

Schweißreihenfolge

Über dies hinaus spielt u.a. die Schweißreihenfolge für eine Lage mit mehrreihigem Aufbau, insbesondere bei einer ungleichmäßigen Anzahl an Reihen, eine wichtige Rolle für die Geradlinigkeit und Gleichmäßigkeit der generierten Wandstruktur. Bei einer Reihenfolge von Außen – Mitte – Außen bei dreireihigem Aufbau zeigte sich, dass die Geradlinigkeit und Gleichmäßigkeit stark beeinflusst und damit beeinträchtigt wird. Die gesammelten Erkenntnisse aus den Vorversuchen zeigten, dass eine Schweißabfolge Mitte – Außen – Außen, beginnend mit der mittleren Reihe, bei dreireihigem Schichtaufbau empfehlenswert ist (Abbildung 14).



Abbildung 14: Schweißreihenfolge bei mehrreihigem Aufbau (links: Mitte – Außen – Außen; rechts: Außen – Mitte – Außen)

3.2.5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Vorversuchen

Resultierend aus den Untersuchungen zur Stabilität des Schweißprozesses bei mehrreihiger Schichtgenerierung wurden für die Hauptversuche folgende Parameter festgelegt:

- Der Aufbau der einreihigen und mehrreihigen Wandstrukturen findet mit den Streckenenergien 4, 6 und 8 kJ/cm statt.
- Die Zwischenlagentemperatur T_z wird generell mit $T_z = 100^\circ\text{C}$ festgelegt. Es erfolgt die Generierung einer Wandstruktur anhand der Streckenenergie von 6 kJ/cm mit einer Zwischenlagentemperatur von $T_z = 200^\circ\text{C}$, um die Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften näher zu betrachten.
- Für den Auslass der Schutzgasdüse wird ein Durchmesser von 15 mm gewählt.
- Die bei der Generierung der Wandstrukturen in den Hauptversuchen einzustellende Schutzgasmenge beträgt 17,5 l/min.
- Der Wert für die Überlappung der Reihen wird einheitlich mit 50% festgelegt.
- Die Reihen werden ohne Verweilzeiten während der Erzeugung einer Schicht geschweißt, damit ein Auftreten von Bindefehlern minimiert wird.
- Um die Nahtgeometrie, im Speziellen deren Geradlinigkeit und Gleichmäßigkeit, nicht negativ zu beeinflussen, wird bei mehrreihigem Aufbau die erste Lage (Anbindung zum Grundwerkstoff) mit $n+1$ Reihen geschweißt. Dabei stellt n die Anzahl der Reihen dar, welche für den eigentlichen Generierungsprozess ausgewählt wurden.
- Darüber hinaus wird bei einem Aufbau mit einer ungeraden Anzahl an Reihen (z.B. dreireihiger Aufbau) zuerst die mittlere Reihe und anschließend die jeweils äußeren Reihen geschweißt.

3.2.6 Hauptversuche

Die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Hauptversuche dienen der Herstellung von Proben und der anschließenden Untersuchung der mechanischen Eigenschaften mehrreihiger additiv gefertigter Schweißlagen sowie der Ermittlung der Auswirkungen der Prozessparameter auf die metallografischen Eigenschaften. Weiterhin soll eine geeignete Aufbaustrategie entwickelt werden, die eine Schichtgenerierung von mehrreihigen Wandstrukturen gewährleistet. Als Grundlage für die Hauptversuche finden die aus den Vorversuchen gesammelten Erkenntnisse Anwendung.

3.2.6.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Zunächst wurde die Grundplatte auf dem Schweiß Tisch positioniert und eingespannt. Im Rahmen der Hauptversuche kamen Grundplatten mit den Abmaßen 330 mm x 150 mm x 20 mm zum Einsatz. Anschließend wurde der Stickout analog zur Vorgehensweise in den Vorversuchen mit 12 mm eingestellt.

Weiterhin erfolgte die Einstellung der Höhe der Auslösevorrichtung für die Aufnahme der Abkühltemperaturkurve sowie die Anpassung der Auslösevorrichtung. Diese soll stets in Lage 10 ein Thermoelement des Typs C in das Schweißbad einschließen, um die Abkühlkurve der Schmelze aufzunehmen, aus der später die $t_{8/5}$ -Zeit ermittelt wird.

Nach der Programmierung der Roboterbahn über das Bedienpanel des Roboters und der Eingabe der Schweißparameter über die Software PC300.net beginnt die Generierung der Lagen.

Dazu startet der Roboter an einer vorher definierten festen Home-Position und fährt mittels einer Punkt-zu-Punkt Bewegung zum Startpunkt der ersten Schweißnaht. Dort angekommen und mit Zünden des Lichtbogens fährt der Roboter 300 mm in x-Richtung relativ zur Grundplatte bis zum Endpunkt der Schweißnaht. Dort wartet der Roboter die voreingestellte Nachströmzeit des Schutzgases ab, ehe er um den je nach Parameter eingestellten Wert für die Schichthöhe in z-Richtung nach oben verfährt und wartet auf die Eingabe des Benutzers. Nach jeder generierten Lage ist die Zwischenlagentemperatur an der Oberfläche der Schweißnaht mittels eines Thermoelements zu messen. Bei überschrittener Zwischenlagentemperatur wird eine Druckluftkühlung zugeschaltet, um kürzere Abkühlzeiten zu realisieren. Ist die Zwischenlagentemperatur erreicht, wird die Druckluftkühlung ausgeschaltet und die Generierung der nächsten Lage am Bedienpanel des Roboters manuell gestartet.

Während der Erzeugung der Lage 10 wird wie bereits beschrieben ein Thermoelement mittels Auslösevorrichtung in das Schweißbad eingeschossen.

Der Roboter arbeitet das vorgegebene Programm Lage für Lage ab. Ist die Endhöhe der erzeugten Struktur von ca. 180 mm erreicht, fährt der Roboter durch eine Punkt-zu-Punkt Bewegung zurück in seine Home-Position und die Generierung ist abgeschlossen.

Bei der Generierung mehrreihiger Strukturen erfolgt der Aufbau der Lagen analog zu dem der einreihigen Strukturen. Es wird jedoch die Zustellung in y-Richtung im durch den Roboter abzuarbeitenden Programm vorgesehen. Eine erzeugte Lage besteht dann nicht aus einer Schweißnaht, sondern aus zwei beziehungsweise drei parallelen Schweißnähten in y-Richtung nebeneinander. Die Druckluftkühlung erfolgt dann nach jeder Lage und nicht nach jeder Schweißnaht.

Zur Veranschaulichung einer in den Hauptversuchen additiv hergestellten Wandstruktur dient die Abbildung 15. Eine bildliche Darstellung aller in den Hauptversuchen generierten Wandstrukturen wurde in den Anhang 24 bis Anhang 31 zusammengestellt.



Abbildung 15: Beispiel einer additiv hergestellten Wandstruktur

3.2.6.2 Versuchsstrategie der Hauptversuche

1. Im ersten Schritt erfolgt die Erzeugung der einreihigen, linienförmigen Lagen mit den aus den Vorversuchen gewonnenen Erkenntnissen und festgelegten Parametern. Dabei werden die Strukturen mit den in den Vorversuchen ausgewählten Streckenenergien mit einer Zwischenlagentemperatur von 100°C erzeugt. Für die mittlere Streckenenergie wurde zusätzlich noch eine Struktur mit 200°C Zwischenlagentemperatur generiert, um einen weiteren Parameterwert für die spätere Auswertung zu erhalten.
2. Anschließend erfolgt die Generierung der mehrreihigen, linienförmigen Lagen mit zwei beziehungsweise drei Schweißnähten in y-Richtung. Die Erzeugung erfolgt mit einer Zwischenlagentemperatur von 100°C.

3.2.7 Bewertung der Schweißergebnisse

3.2.7.1 Visuelle Prüfung

Die visuelle Prüfung der Schweißnähte dient der Bewertung der äußeren Erscheinungsform und gibt somit Auskunft über die Beschaffenheit hinsichtlich oberflächlich sichtbarer Unregelmäßigkeiten und damit über die Güte der Schweißnaht.

Aufgrund der Gleichmäßigkeit und der Welligkeit der Schweißnaht kann man Rückschlüsse auf die Stabilität des Schweißprozesses ziehen. Bei der Schichtgenerierung spielt die Stabilität des gesamten Prozesses, ausgehend von den Prozessparametern, eine große Rolle für die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Aus diesem Grund sollte die Schweißnaht über die gesamte Länge eine geringe Welligkeit aufweisen. Ist die Welligkeit zu groß, treten viele Unregelmäßigkeiten über die Länge der Schweißnaht auf, welche sich dann bei der Generierung mehrerer Lagen übereinander stetig vermehren und so den Schweißprozess weiter destabilisieren. Die Folge wäre eine Schweißung von niedriger Güte. Die Welligkeit wird qualitativ bewertet. Während der Vorversuche erfolgt eine Bewertung in geeignet und ungeeignet für die Verwendung der Schichtgenerierung (vgl. Abbildung 16).

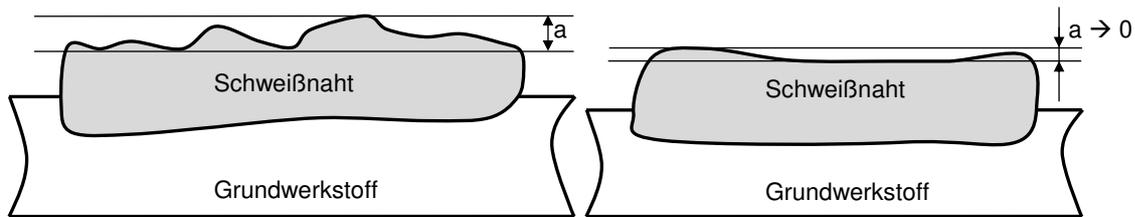


Abbildung 16: qualitative Schweißnahtbewertung: große Welligkeit (links); geringe Welligkeit (rechts)

3.2.7.2 Prozesszeiten

Die Schweißzeiten, Abkühlzeit und die sich ergebenden Aufbauzeiten für die additiv gefertigten, Wandstrukturen sind in Abbildung 16 dargestellt.

Grundsätzlich feststellbar ist im Wesentlichen eine Zunahme der Prozesszeiten mit steigender Streckenenergie.

Die Darstellung zeigt einen Abfall der Schweißzeiten für die Wände mit 8 kJ/cm eingebrachter Streckenenergie gegenüber den hergestellten Wänden mit 6 kJ/cm Streckenenergie sowohl bei einreihig als auch zweireihig generierten Proben. Dies ist auf den höheren Masseauftrag (höhere Drahtvorschubgeschwindigkeit) bei 8 kJ/cm Streckenenergie und gleicher Schweißgeschwindigkeit gegenüber der mit 6 kJ/cm Streckenenergie generierten Wände zurückzuführen. Dabei sorgt der höhere Masseauftrag nicht nur für eine Verbreiterung der Schweißnähte, sondern auch für eine Größere Lagenhöhe, wodurch weniger Schweißlagen zum Erreichen einer bestimmten Höhe benötigt werden.

Die Gesamtaufbauzeit verringert sich nur bei den einreihigen Wänden von 6 kJ/cm Streckenenergie zu 8 kJ/cm Streckenenergie.

Diese mit der Schweißzeit einhergehende Tendenz ließ sich anhand der zweireihig generierten Wände so nicht feststellen (Anhang 22). Hieraus können sich Ansatzpunkte für künftige Untersuchungen ableiten, wenn es darum geht, Prozesszeiten zu optimieren.

Vorliegend sollten zunächst grundlegende Untersuchungen zu prinzipiellen Möglichkeiten mehrreihiger Strukturen untersucht werden.

Die Ergebnisse für Schweißzeit und Gesamtaufbauzeit in Abhängigkeit von der Zwischenlagentemperatur T_z sind in Anhang 20 dargestellt.

Aus den ermittelten Werten geht hervor, dass die Schweißzeiten infolge der gleichen Schweißgeschwindigkeiten von ca. 0,2 m/min bei beiden Zwischenlagentemperaturen $T_z = 100^\circ\text{C}$ mit 123 Minuten und $T_z = 200^\circ\text{C}$ mit 121 Minuten im Wesentlichen als gleich angesehen werden können.

Der Rückgang der Gesamtaufbauzeit von 220 Minuten bei einer Zwischenlagentemperatur von $T_z = 100^\circ\text{C}$ auf eine Gesamtaufbauzeit von 190 Minuten bei einer Zwischenlagentemperatur $T_z = 200^\circ\text{C}$ begründet sich dadurch, dass bei einer höheren Zwischenlagentemperatur die Abkühlzeit bis 200°C geringer ausfällt, als dies bei einer Abkühlung auf 100°C der Fall ist.

Die ermittelten Schweißzeiten und Gesamtaufbauzeiten in Abhängigkeit von der Reihenanzahl sind in Anhang 21 enthalten. Die Darstellungen zeigen ein Anwachsen der Prozesszeiten mit Zunahme der Reihenanzahl bei gleichen Streckenenergien für alle drei Streckenenergien.

Im Vergleich von den Prozesszeiten für zwei- und dreireihig additiv gefertigten Wänden mittels MSG-Verfahren bei 4 kJ/cm Streckenenergie sind mit 34 Minuten Unterschied für die Schweißzeit und 39 Minuten Unterschied für die Gesamtaufbauzeit zwar längere Zeiten festzustellen, diese spielen jedoch bei ca. 6 Stunden Gesamtaufbauzeit eine relativ geringe

Rolle, vor allem, wenn man die besseren mechanischen Eigenschaften betrachtet (Abschnitt 7.1.1).

Die Ergebnisse zu diesem Aspekt sind der Anhang 22 zu entnehmen. Für die ca. 12 mm dicken Wände zeigen sich in etwa gleiche Schweiß- und Gesamtaufbauzeiten für die mit 4 kJ/cm Streckenenergie dreireihig und die mit 8 kJ/cm Streckenenergie zweireihig generierten Proben.

Angesichts der in Abschnitt 7.1.1. festgestellten besseren mechanischen Eigenschaften der dreireihigen Proben ist das Aufwand-Nutzen-Verhältnis abzuwägen.

Die Beurteilung insbesondere der Gesamtaufbauzeit der mit ca. 9 mm additiv gefertigten Wände zeigt für gleiche Wandstärken zwischen zweireihig mit 4 kJ/cm Streckenenergie generierten Proben und einreihig mit 8 kJ/cm Streckenenergie hergestellten Proben, dass die Gesamtprozesszeiten für die zweireihigen Proben etwa doppelt so hoch ausfallen. Während dessen weichen die Schweißzeiten mit 13 Minuten nicht wesentlich ab.

Insgesamt sind insbesondere bei mehrreihiger Fertigung erheblich höhere Gesamtprozesszeiten feststellbar.

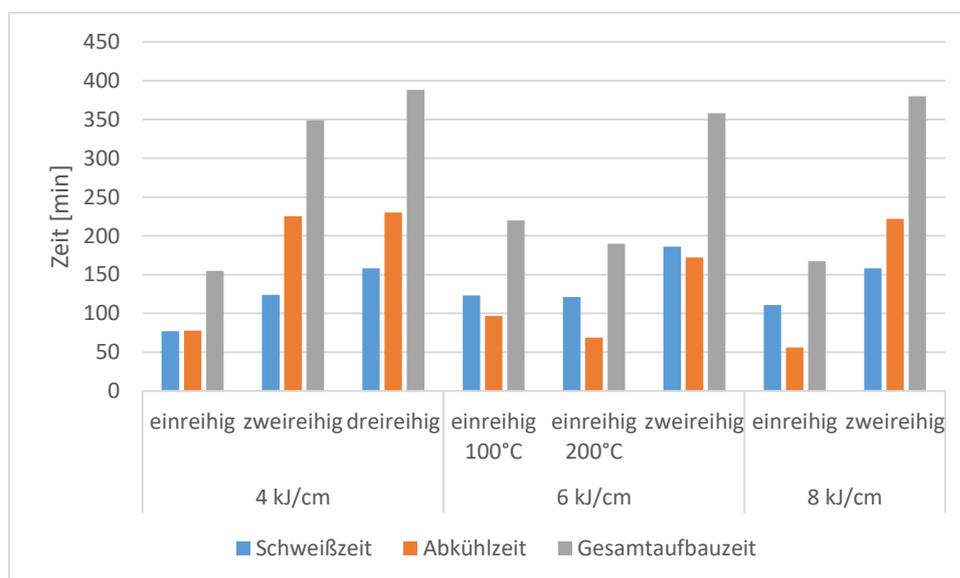


Abbildung 17: Aufbauzeiten bei Variation der Prozessparameter

3.2.7.3 Ermittlung der $t_{8/5}$ -Zeit

Die mechanischen Eigenschaften des Schweißgutes werden primär bestimmt durch dessen chemische Zusammensetzung und die Geschwindigkeit, mit der die Abkühlung aus der flüssigen Phase erfolgt. Schweißtemperaturzyklen werden im Allgemeinen über die benötigte Zeit, zum Durchlaufen eines bestimmten Temperaturintervalls gekennzeichnet. Die Abkühlzeit von 800°C auf 500°C ($t_{8/5}$ -Zeit) hat sich in der Schweißtechnik bewährt um die mechanisch-technologischen Eigenschaften des Schweißgutes zu charakterisieren. [STA17]

Bei der Betrachtung der $t_{8/5}$ -Zeit in Abhängigkeit von der Zwischenlagentemperatur $T_Z = 100^\circ\text{C}$ und $T_Z = 200^\circ\text{C}$ bei einer Streckenenergie von 6 kJ/cm anhand einreihig generierter Proben zeigt sich, dass für die beiden eingestellten Zwischenlagentemperaturen die gleichen Abkühlzeiten mit jeweils 24 Sekunden gemessen wurden. Das heißt, die Zwischenlagentemperatur hat keinen ersichtlichen Einfluss auf die Abkühlzeit (Anhang 20).

Aus den Darstellungen geht hervor, dass die $t_{8/5}$ -Zeiten für G4Si1 (Abbildung 18) und RD100 (Abbildung 19) mit zunehmender Streckenenergie ansteigen. Weiterhin zeigt sich, dass die $t_{8/5}$ -Zeiten mit zunehmender Reihenanzahl abnehmen.

Um die Bewertung der additiven Fertigung mittels MSG-Verfahren für mehrreihig generierte Proben vornehmen zu können, erfolgt die Betrachtung der Abkühlzeit ($t_{8/5}$ -Zeit) für die verschiedenen Reihenanzahlen.

In Abbildung 18 und Abbildung 19 ist ersichtlich, dass die $t_{8/5}$ -Zeit mit zunehmender Reihenanzahl sinkt und sich im Vergleich von einreihig generierten Proben zu dreireihig generierten Proben bei einer Streckenenergie von 4 kJ/cm halbiert. Die Verringerung der $t_{8/5}$ -Zeit zeigt sich für beide Werkstoffe und alle verwendeten Streckenenergien.

Die schnellste Abkühlzeit ($t_{8/5}$ -Zeit) wurde bei 4 kJ/cm Streckenenergie und dreireihiger Aufbauweise mit 8 s gemessen. Die langsamste Abkühlzeit ($t_{8/5}$ -Zeit) war bei 8 kJ/cm Streckenenergie und einreihiger Generierung der Wand zu verzeichnen.

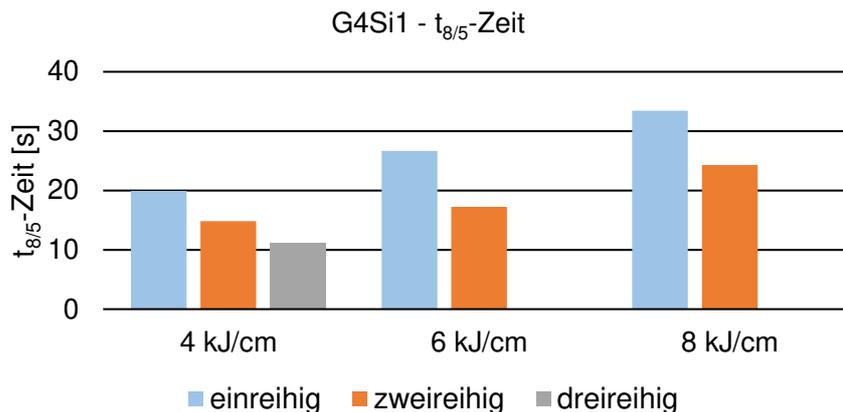


Abbildung 18: Messung der $t_{8/5}$ -Zeit bei der Herstellung von Wandstrukturen aus G4Si1

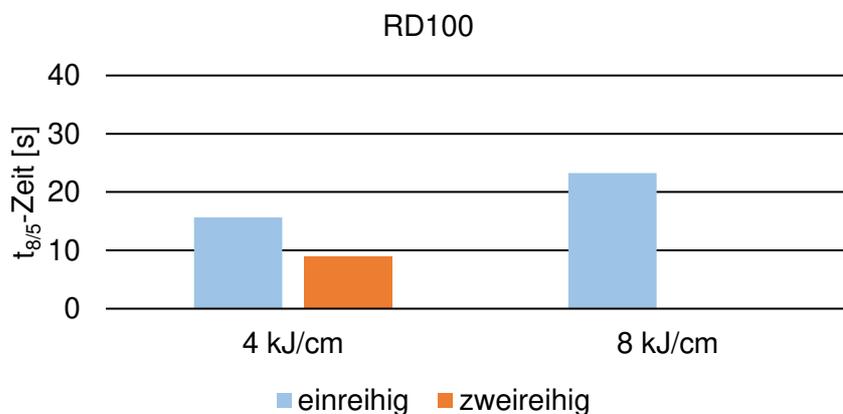


Abbildung 19: Messung der $t_{8/5}$ -Zeit bei der Herstellung von Wandstrukturen aus RD100

Während des Schweißens weiterer Lagen oberhalb der Messlage wird der $t_{8/5}$ -Temperaturbereich mehrfach durchlaufen für die Auswertung der die $t_{8/5}$ -Zeiten wurde immer der letzte $t_{8/5}$ -Durchgang ausgewertet. In Abbildung 20 ist dargestellt, wie sich die $t_{8/5}$ -Zeiten über den ersten und letzten $t_{8/5}$ -Durchgang und über die Aufbauhöhe ändert. Dabei zeigt sich, dass die Abkühlzeit zwischen dem ersten und letztem $t_{8/5}$ -Durchgang leicht ansteigt. Weiterhin ist zusehen, dass die $t_{8/5}$ -Zeit mit zunehmender Aufbauhöhe deutlich zunimmt, die ist auf einen Wärmestau im Bauteil und einen geringeren Einfluss der Wärmeabfuhr über die Grundplatte bei steigender Aufbauhöhe zurückzuführen.

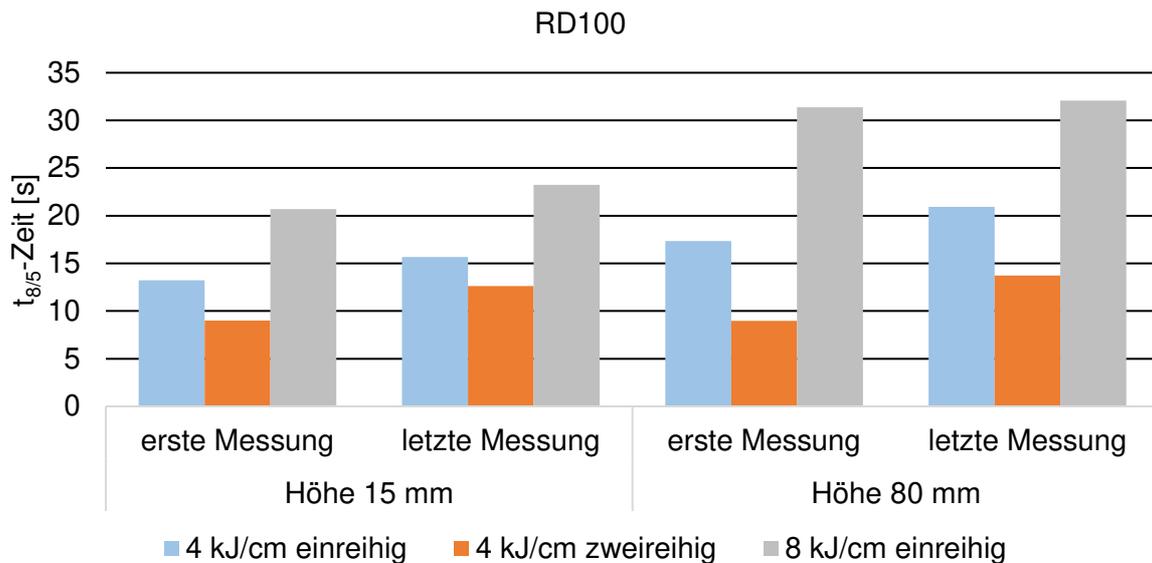


Abbildung 20: Messung der $t_{8/5}$ -Zeit bei der Herstellung von Wandstrukturen aus RD100 in Abhängigkeit der Messposition

Die Messungen der Abkühlzeit ($t_{8/5}$ -Zeit) in Abhängigkeit von der Wandstärke sind in Abbildung 21 für Wandstärken von 9 mm und 12 mm bei unterschiedlichen Streckenenergien gegenübergestellt. Der Vergleich der $t_{8/5}$ -Zeiten zwischen einreihig bei 8 kJ/cm Streckenenergie generierten Proben und zweireihig bei 4 kJ/cm Streckenenergie aufgebauten Proben zeigt bei etwa gleicher Wandstärke von 9 mm eine Verringerung von 30 s auf 14 s, wodurch sich die Abkühlzeit ($t_{8/5}$ -Zeit) mehr als halbiert.

Die ca. 12 mm dicken Wände zeigen einen ähnlichen Effekt, wenn man die zweireihig bei 8 kJ/cm Streckenenergie hergestellten mit den dreireihig bei 4 kJ/cm Streckenenergie generierten Proben vergleicht.

Betrachtet man die absoluten Werte aller gemessenen Abkühlzeiten ($t_{8/5}$ -Zeiten) so ist feststellbar, dass die dreireihige Generierung bei 4 kJ/cm Streckenenergie die geringste $t_{8/5}$ -Zeit mit 8 s aufweist. Damit ergibt sich ein direkter Zusammenhang zwischen Abkühlzeit ($t_{8/5}$ -Zeit) und Wandstärke in Verbindung mit der eingebrachten Streckenenergie.

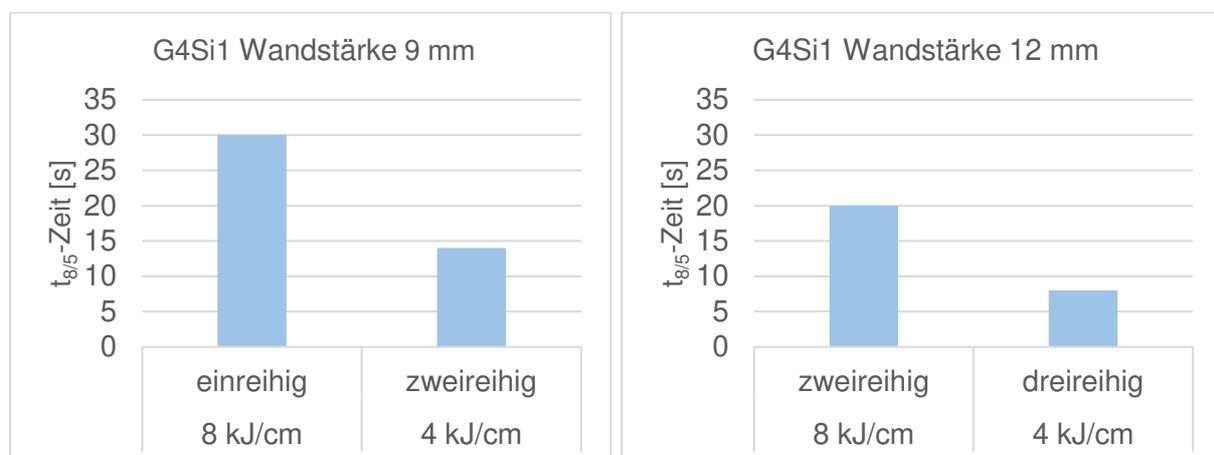


Abbildung 21: Messung der $t_{8/5}$ -Zeit in Abhängigkeit der Wandstärke (links 9 mm Wandstärke; rechts: 12 mm Wandstärke)

3.2.7.4 Metallografische Untersuchung

Die Analyse der Nahtgeometrie und Gefügeeigenschaften erfolgte mithilfe von Schliffproben aus den Wandstrukturen. Dafür ist nach der visuellen Prüfung eine Probe aus der Mitte der Struktur entnommen worden. In Abbildung 22 ist die Lage der Proben exemplarisch für die Vor- und Hauptversuche anhand der Hauptversuche dargestellt.

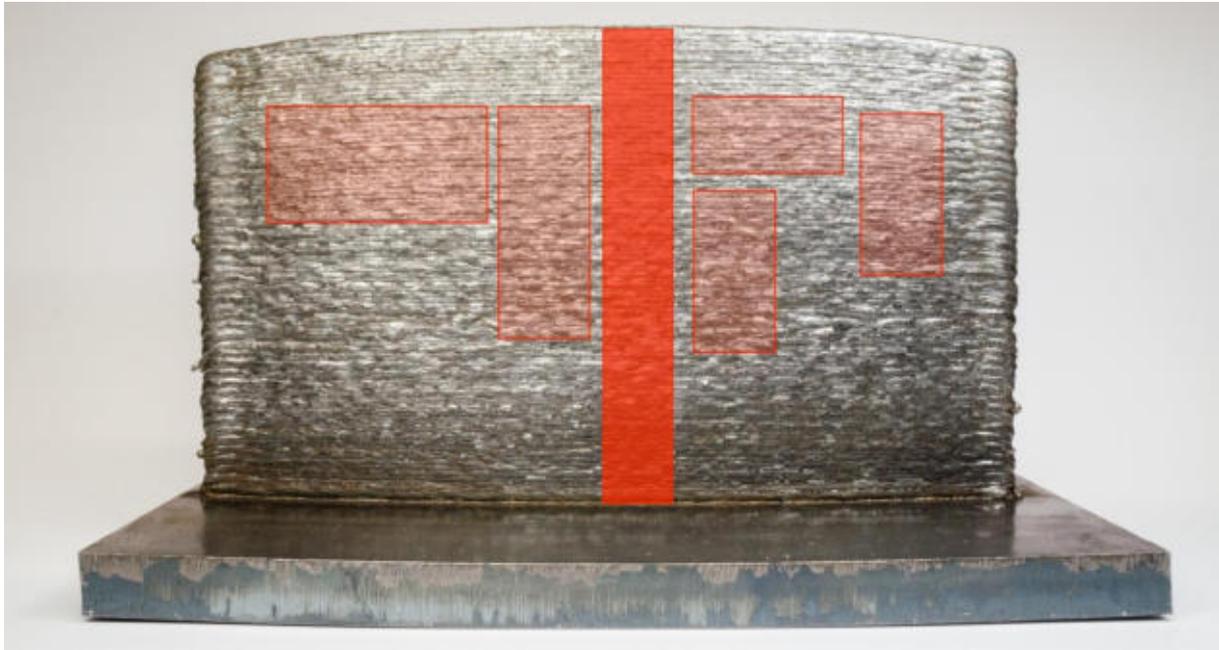


Abbildung 22: Position Metallografieprobe (hervorgehoben)

Die jeweilige Probenentnahme erfolgte mittels Bandsäge. Im Anschluss wurden die Proben aus den Vorversuchen mit einem Wärmeinbettmittel (WEM EPOXY der Firma Buehler) bei 180°C und 200 bar sechs Minuten einbettet. Auf eine Einbettung der Proben aus den Hauptversuchen wurde aufgrund der Abmessungen verzichtet.

Die Präparation der Schliffproben erfolgte mittels der Schleif- und Poliermaschine Phoenix 400 der Firma Buehler mit anschließender Reinigung und Ätzung. Die Vorgehensweise ist in Tabelle 9 stufenweise aufgeführt.

Tabelle 9: Präparation der Querschliffe

Schleifstufen
1. Schleifstufe (P80) bei 250 U/min, mit Wasser reinigen trocknen
2. Schleifstufe (P180) bei 250 U/min, mit Wasser reinigen trocknen
3. Schleifstufe (P320) bei 250 U/min, mit Wasser reinigen trocknen
4. Schleifstufe (P600) bei 250 U/min, mit Wasser reinigen trocknen
5. Schleifstufe (P1200) bei 250 U/min, mit Wasser reinigen trocknen
6. Schleifstufe (P2500) bei 250 U/min, mit Wasser reinigen trocknen
Polierstufen mit Diamantsuspension
Polieren (6 μ m) bei 150 U/min, 3 min, Reinigung im Ultraschallbad (Isopropanol), trocknen
Polieren (3 μ m) bei 150 U/min, 3 min, Reinigung im Ultraschallbad (Isopropanol), trocknen
Polierstufen mit Feinpoliersuspension
Polieren (OPS) bei 150 U/min, 3 min, Reinigung im Ultraschallbad (Isopropanol), trocknen, Reinigung mit Isopropanol
Ätzen mit Ätzmittel Nital
Tauchätzung: 1 min, sofortiges Abspülen mit Wasser
Reinigung
Reinigung im Ultraschallbad (Isopropanol), Reinigung mit Isopropanol

Anschließend an die Präparation erfolgte die Aufnahme der Schliffbilder mittels Lichtmikroskop der Firma Carl Zeiss (Axio Scope A1). Danach sind die Schliffbilder mithilfe der Software AxioVision Rel. 4.9.1 der Firma Carl Zeiss abgelegt und ausgewertet worden.

Gefügeeigenschaften

Vor dem Ätzen der Schliffbilder erfolgte die Analyse der Poren. Hierbei kamen zwei Analysemethoden zum Einsatz. Zum einen die Porenanalyse mittels Schliffbild. Hierzu wurden Bilder mit dem oben genannten Lichtmikroskop von allen Schliffproben in den gleichen Bereichen im monochromen Farbraum aufgenommen. Hierbei wurde darauf geachtet, dass sich die Belichtung der Proben untereinander nicht veränderte, um gleichbleibende Grauwerte zu gewährleisten. Anschließend wurden die aufgenommenen Bilder mittels der Software ImageJ ausgewertet. Diese Software analysiert jeden Pixel des Bildes und gibt den jeweiligen Schwarzwert aus. Die Ausgabe der Analyse erfolgte in Form einer Tabelle, mit welcher anschließend die Prozentzahl an Poren ermittelt wurde.

Zum anderen wurde die Porosität der Proben aus den Hauptversuchen mittels einer Durchstrahlprüfung bestimmt. Hierbei kam die Anlage X-Cube Compact der Firma GE Sensing & Inspection Technologies zum Einsatz. In dieser ist die Röntgenröhre ISOVOLT 225 KV verbaut. Als Bildempfänger dient eine CCD-Kamera mit Bildverstärkungssystem. Die digitale

Bildauswertung erfolgte über das System VistaPlus V. Die aufgenommenen Bilder der Proben wurden analysiert und die Werte für die Porosität ebenfalls in Form einer Tabelle gesammelt. Um eine Gefügebeurteilung durchzuführen, wurden die Schliiffproben nach dem Polieren mit dem mikroskopischen Ätzmittel Nital geätzt. Nach dem Ätzen konnte die Zusammensetzung des Gefüges, z.B. in Abhängigkeit der eingebrachten Streckenenergien, betrachtet werden. Hierzu wurden Bilder unter dem bereits genannten Lichtmikroskop mit verschiedenen Vergrößerungen aufgenommen und diskutiert.

3.2.7.5 Ermittlung der Porosität

Die erzielten Messergebnisse der Ermittlung der Porosität wurden Schliiffbildauswertung und Röntgenuntersuchungen an den gleichen Proben gegenübergestellt. Die prozentualen Werte der Porosität sind Abbildung 23 und Tabelle 10 dargestellt. Die ermittelte Porosität lag sowohl für die Analyse der Schliiffbilder, als auch in der Röntgendurchstrahlprüfung stets unter einem Prozent. Daher lassen sich die additiv gefertigten Wandstrukturen in Anlehnung an die DIN EN ISO 5817 in Bewertungsgruppe B einordnen, welche in der im Bereich des Verbindungsschweißens höchsten Ansprüchen genügt. Es lässt sich allerdings kein konkreter Zusammenhang von der Streckenenergie, Reihenanzahl und Strukturbreite mit der Porosität erkennen. Die Porosität steigt allerdings bei Zunahme der Zwischenlagentemperatur. Dieser Anstieg ist in der Analyse des Schliiffbilds nur sehr gering ausgeprägt, aber in der Röntgenanalyse deutlicher zu erkennen. Das Ergebnis ist aufgrund der hohen Schwankungen nicht eindeutig. Insgesamt lassen sich große Schwankungen zwischen der Röntgendurchstrahlprüfung und der Schliiffanalyse erkennen. Diese sind im Wesentlichen auf zwei Faktoren zurück zu führen. Zum einen ist die Auflösung des Röntgengeräts geringer als die Auflösung des Messmikroskops, daher können sehr kleine Poren ($<100\ \mu\text{m}$) in der Röntgenprüfung nicht erkannt werden und damit falsch kleinere Werte ermittelt werden. Zum anderen wurde die Porosität am Schliiffbild mithilfe mehrerer Messstellen auf derselben Schliiffebene ermittelt, wodurch nicht die gesamte Probe überprüft werden konnte. Dadurch können die Werte sowohl höher als auch niedriger als der Realwert liegen.

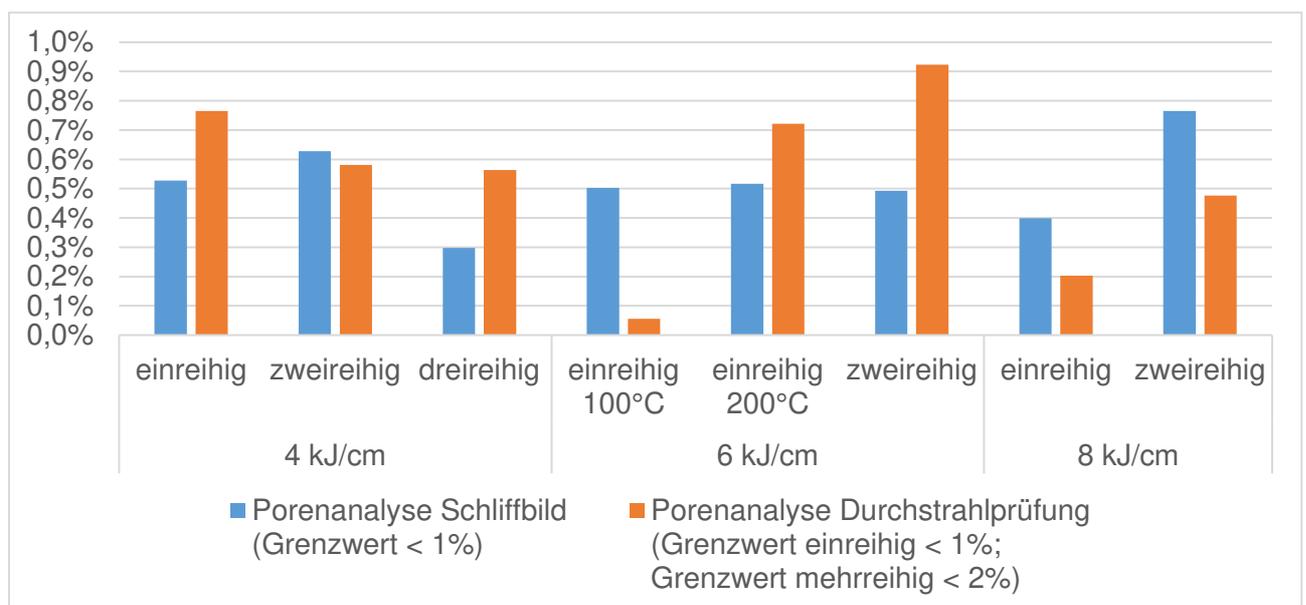


Abbildung 23: Porositätsermittlung mittels Schliiffbildanalyse und Röntgendurchstrahlprüfung

Tabelle 10: Streckenenergie in Abhängigkeit zur Porenanalyse

		Schliffbild	Durchstrahlprüfung
4 kJ/cm	einreihig	0,527%	0,766%
	zweireihig	0,628%	0,581%
	dreireihig	0,298%	0,563%
6 kJ/cm	einreihig 100°C	0,502%	0,055%
	einreihig 200°C	0,517%	0,722%
	zweireihig	0,493%	0,923%
8 kJ/cm	einreihig	0,399%	0,203%
	zweireihig	0,765%	0,476%

3.2.7.6 Auswertung der Gefügebilder

Anhand der gemessenen $t_{8/5}$ – Zeiten wurde unter Verwendung eines Schweiß-ZTU-Schaubildes die zu erwartende Gefügezusammensetzung ermittelt. Da für den verwendeten Schweißzusatzwerkstoff vom Hersteller kein Schaubild zur Verfügung steht, wurde ein Schweiß-ZTU-Schaubild von einem Stahl mit einer möglichst ähnlichen chemischen Zusammensetzung aus der Literatur verwendet. Das ausgewählte Schaubild ist in Abbildung 24 mit der dazugehörigen Zusammensetzung dargestellt. Da es sich bei dem verwendeten Schweißzusatzwerkstoff um einen untereutektoiden Stahl mit einem sehr geringen Kohlenstoffgehalt von $C < 0,07 \%$ handelt, bildet sich kaum Perlit aus. Das Gefüge setzt sich hauptsächlich aus unterschiedlichen Anteilen von Zwischenstufengefüge, auch als Bainit bezeichnet und Ferrit zusammen. In Abbildung 25 ist ein Gefügebild mit den Phasenbestandteilen dargestellt. Bei sehr hohen Abkühlgeschwindigkeiten, wie z.B. in der ersten Schweißbraupe, kann sich das Abschreckgefüge Martensit.

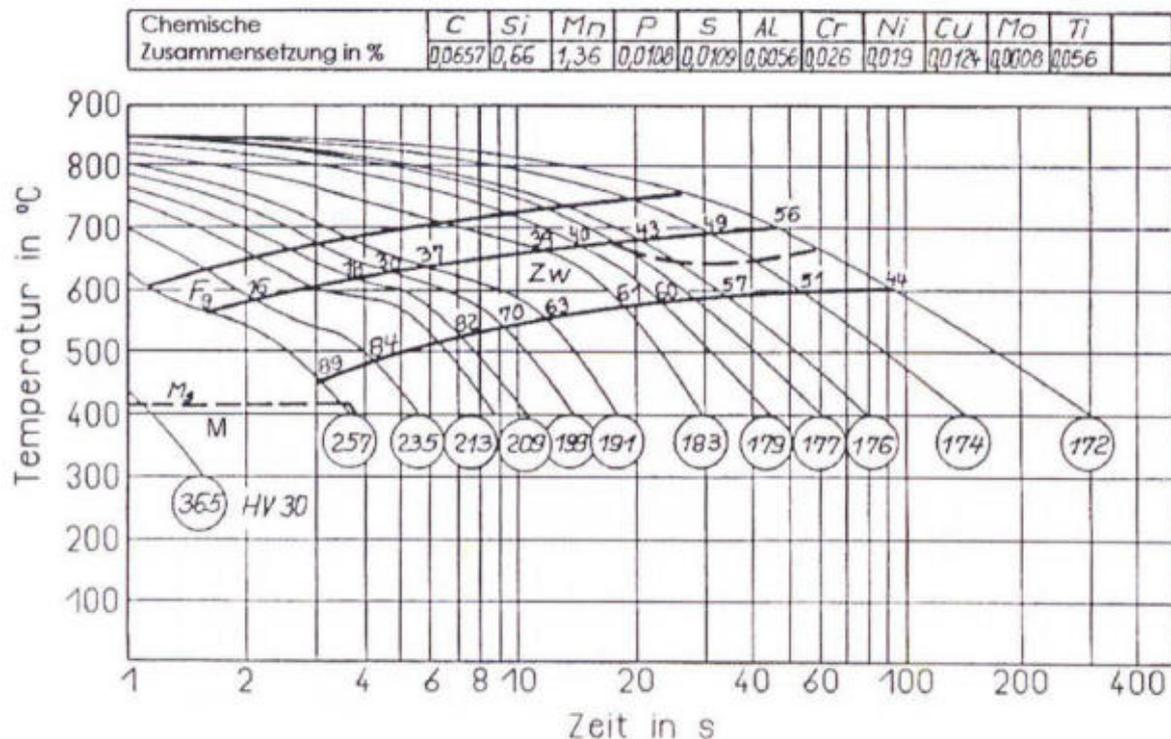


Abbildung 24: Schweiß-ZTU-Schaubild eines Schweißzusatzwerkstoffes SG36 mit der angegebenen chemischen Zusammensetzung [SEY18]

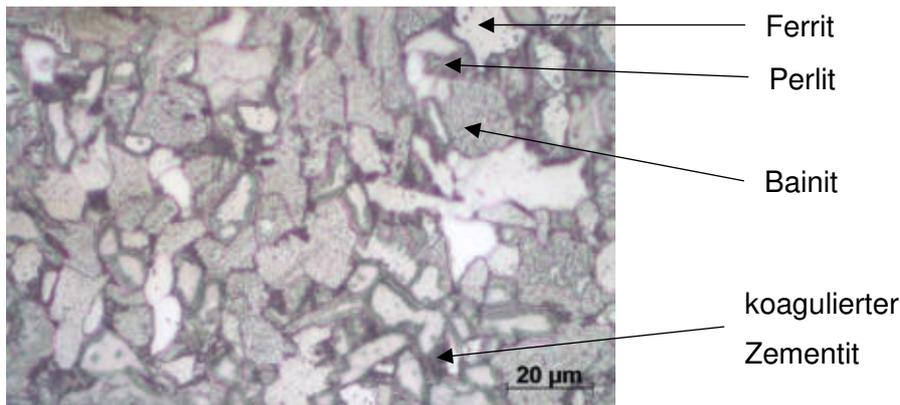


Abbildung 25: Gefügebild mit Phasenbestandteilen in 1000facher Vergrößerung

Die ermittelten $t_{8/5}$ -Zeiten während der additiven Fertigung liegen für G4Si1 im Bereich von ca. 11 s bis 33 s. Daher ergibt sich laut Schweiß-ZTU-Diagramm eine Phasenzusammensetzung von 69% bis 59% Bainit bzw. 31% bis 41% Ferrit. Damit sollten sich die Härtewerte im Bereich von 199 bis 177 HV30 liegen, in Abschnitt 7.1.3 sind Härtemessung mit HV1 dargestellt. Die Gefügebilder der Untersuchten Parametersätze befinden sich in Anhang 47 bis Anhang 54.

Im Folgenden wird eine Strukturbewertung anhand der Prozessparameter diskutiert:

a) Einfluss der Streckenenergie

Aus den vorgenommenen Untersuchungen ist ersichtlich, dass die 4 kJ/cm Proben einen höheren Anteil dunkler Bereiche, woraus sich schließen lässt, dass ein höherer Anteil an Bainit in der Probe enthalten ist. Die Proben mit 6 kJ/cm und 8 kJ/cm unterscheiden sich nur geringfügig. Die Strukturen zeigten über die Aufbauhöhe nur Unterschiede untereinander. (Anhang 47, Anhang 48 und Anhang 50).

b) Einfluss der Zwischenlagentemperatur

Anhand der Gefügebilder lässt sich kein Einfluss der Zwischenlagentemperatur auf das entstehende Gefüge erkennen. Aufgrund der unveränderten der $t_{8/5}$ -Zeit war zu erwarten, dass sich dieselbe Gefügestruktur bei den beiden eingestellten Zwischenlagentemperaturen von $T_z = 100^\circ\text{C}$ und $T_z = 200^\circ\text{C}$ ausbildet.

c) Einfluss der Reihenanzahl der bei 4 kJ/cm Streckenenergie generierten Proben

Die Untersuchungen der Schliffbilder mit Blick auf den Einfluss der Reihenanzahl der bei 4 kJ/cm Streckenenergie generierten Proben zeigten für die einreihig hergestellten Proben von unten nach oben gleichmäßige Strukturen.

Für die zwei- und dreireihig generierten Wände zeigen sich über die Aufbauhöhe nach oben hin eine größere Zahl heller Bereiche, was auf einen höheren Ferritanteile schließen lässt. Einreihig und mehrreihig hergestellten Proben unterscheiden sich dahingehend, dass die zwei- und dreireihigen Proben mehr Grau- und Schwarztöne aufweisen, was auf einen höheren Bainitanteil schließen lässt (Abbildung 26). Aufgrund der geringeren $t_{8/5}$ -Zeiten der mehrreihig hergestellten Proben lässt sich dies in Verbindung mit dem Schweiß-ZTU-Diagramm aus Abbildung 24 bestätigen.

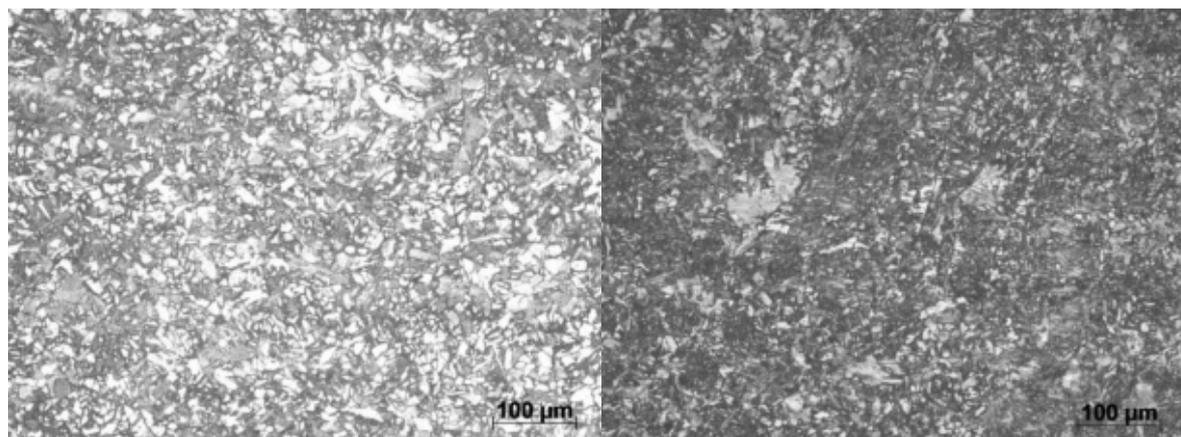


Abbildung 26: Gefügebilder in 200facher Vergrößerung (links: 4 kJ/cm einreihig mitte; rechts: 4 kJ/cm zweireihig mitte)

4 Simulationsmodelle

4.1 Materialmodelle

Zur Schweißstruktursimulation des additiven Fertigungsprozesses in Simufact Welding der Firma MSC-Software fanden zwei Materialmodelle Anwendung. Zum einen wurde ein Mehrphasenmodell für den S355 für die Substratplatte verwendet (Abbildung 27 bis Abbildung 29). Zum anderen wurde ein Schweißgut-Mehrphasenmodell, SG1-JMP-MPM, für die Knotenstruktur und die erzeugten Schweißlagen verwendet, welches dem von G4Si1 am meisten ähnelt (Abbildung 30 bis Abbildung 32).

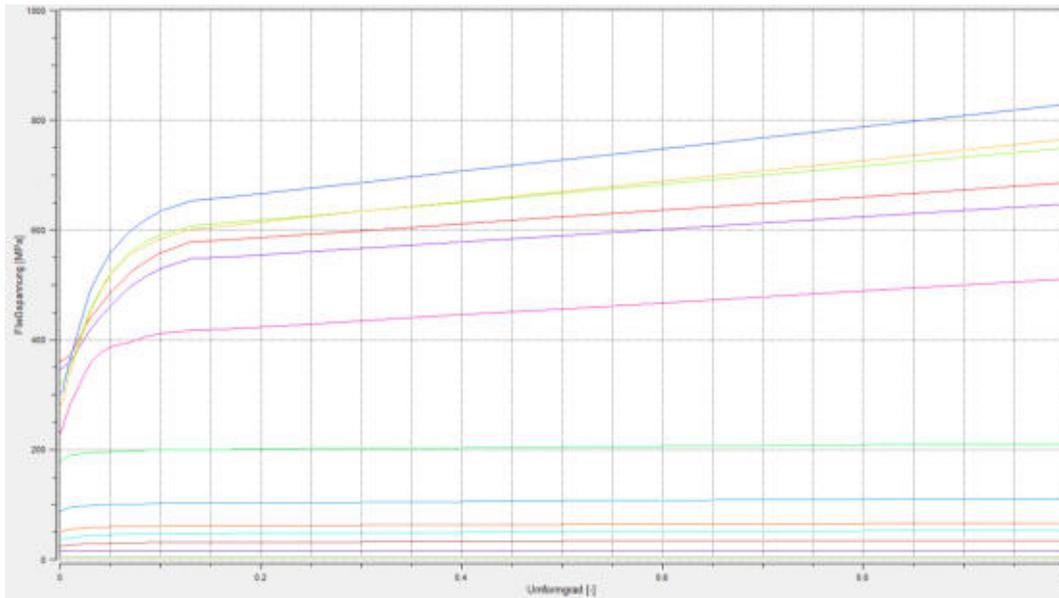


Abbildung 27: Fließkurve S355J2

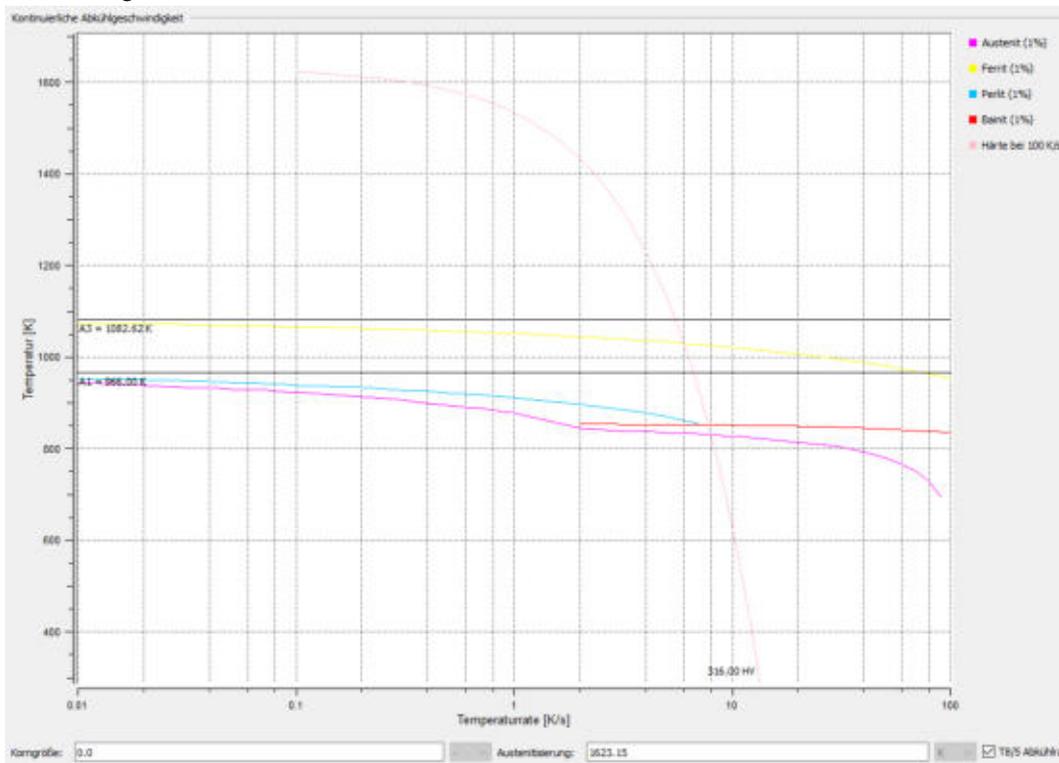


Abbildung 28: Kontinuierliches ZTU-Diagramm S355J2

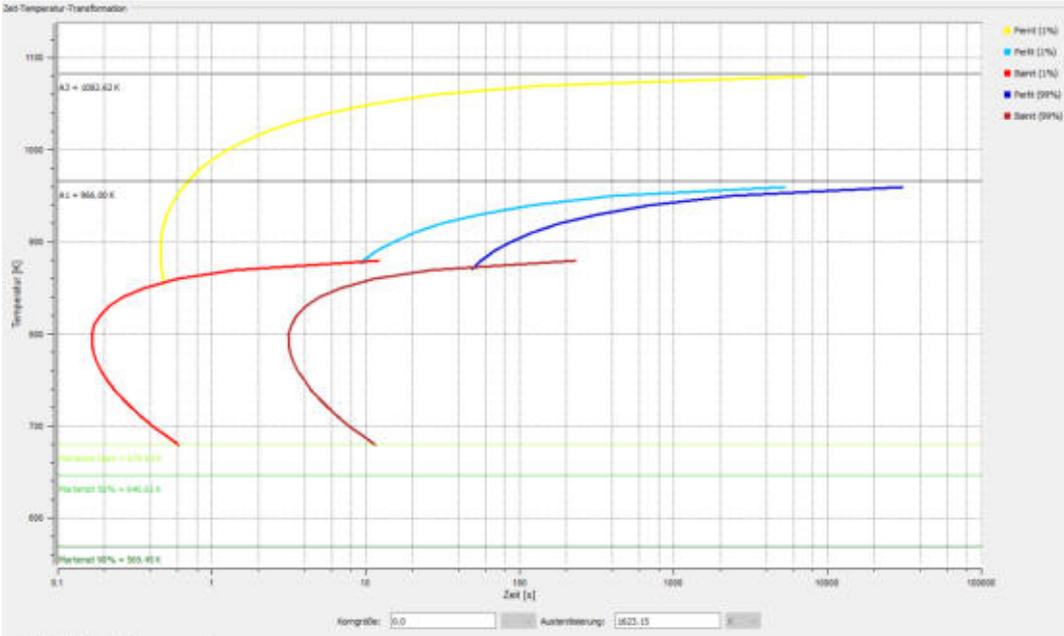


Abbildung 29: Isothermes ZTU-Diagramm S355J2

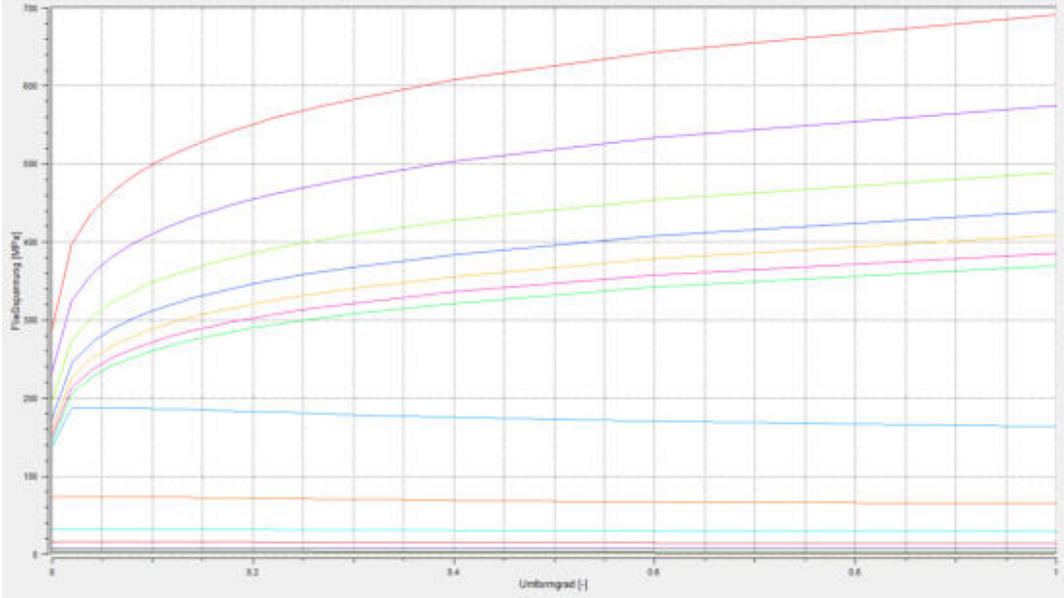


Abbildung 30: Fließkurve SG1-JMP-MPM

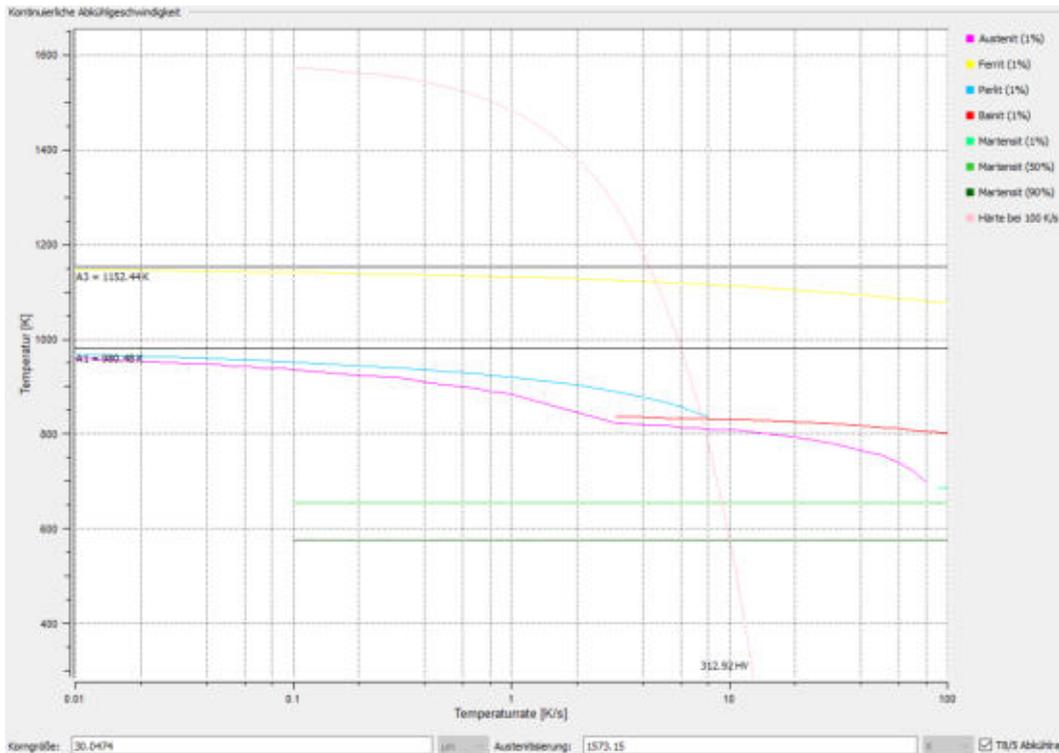


Abbildung 31: Kontinuierliches ZTU-Diagramm SG1-JMP-MPM

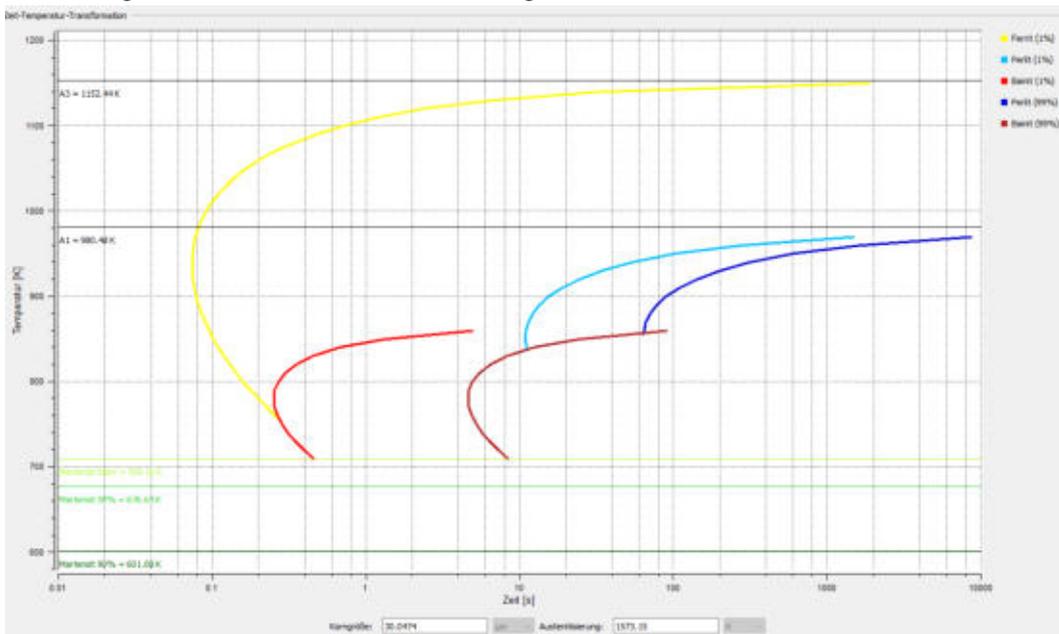


Abbildung 32: Isothermes ZTU-Diagramm SG1-JMP-MPM

4.2 Geometriemodell

Das CAD-Modell eines einzelnen Tragwerkknottens (Abbildung 33 und Abbildung 34) wurde zusammen mit den Konstruktionsunterlagen des Hallenaufbaus (Abbildung 35) von der Firma Rudolstädter Systembau GmbH (RSB) zur Verfügung gestellt. Da die Unterlagen für den Dachaufbau nicht zur Verfügung gestellt werden konnten, wurde ein Flachdachaufbau angenommen. Es wurde ein komplettes Tragwerk (Abbildung 36) nachmodelliert, um die im System vorherrschenden Spannungen ermitteln zu können um diese als Vergleichsgröße für spätere Berechnungen nutzen zu können. Zusätzlich wurde eine Abstrahierung der

Knotengeometrie auf vier Testgeometrien zur Topologieoptimierung durchgeführt, da es nicht möglich war die Topologieoptimierung anhand des gesamten Tragwerks durchzuführen. Hierbei wurden für Abschnitt 5 Optimierung unter Aspekten der Bionik der T-Stoß, zwei Schrägstöße (30° und 45°), sowie ein K-Knoten mit 30° Grad Anschlüssen untersucht (Abbildung 37). In Abschnitt 5 wird weiterhin erläutert, warum nicht das Gesamte Tragwerk zur Optimierung verwendet wurde.

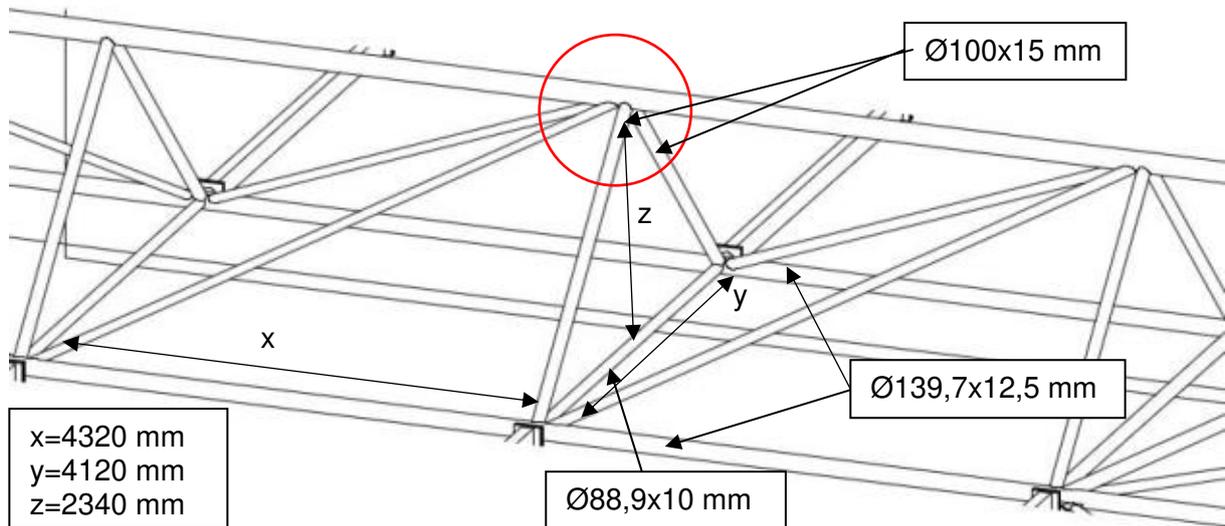


Abbildung 33: Rechteckiger Fachwerkträger mit doppeltem Untergurt; ausgewählter Knoten rot dargestellt [RUD02]



Abbildung 34: CAD-Modell des Obergurtnotens des Tragwerks [RUD02]

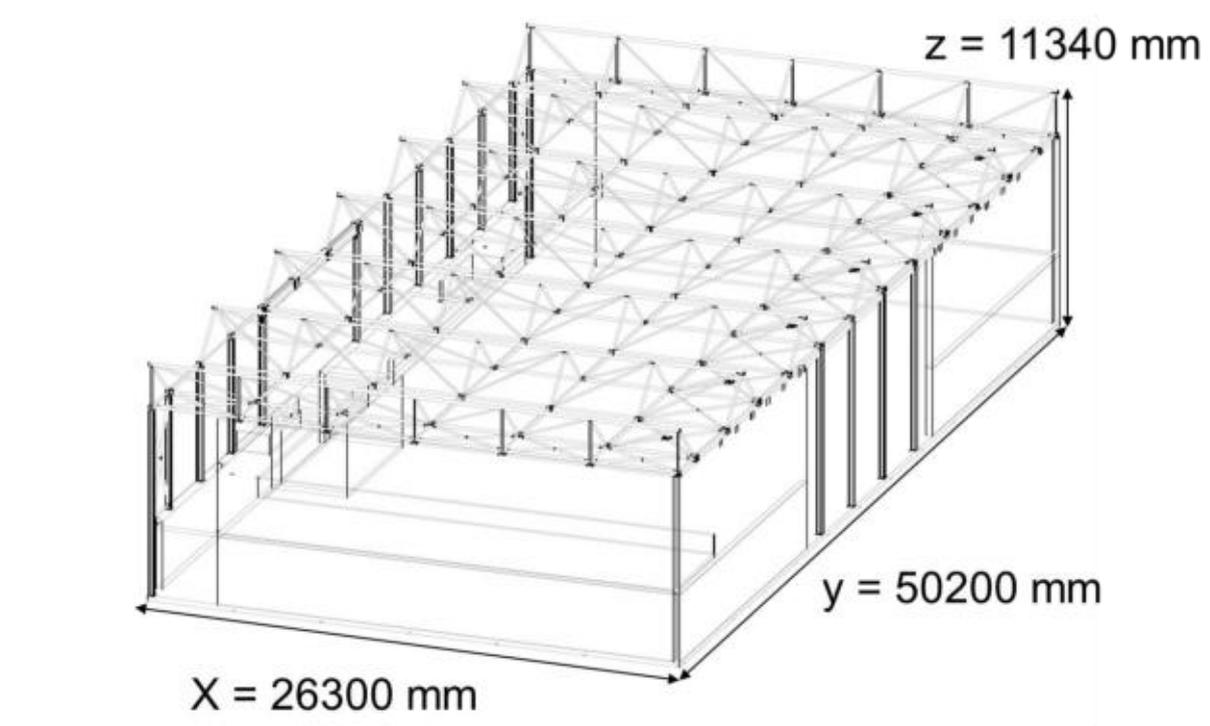


Abbildung 35: Tragwerk [RUD02]

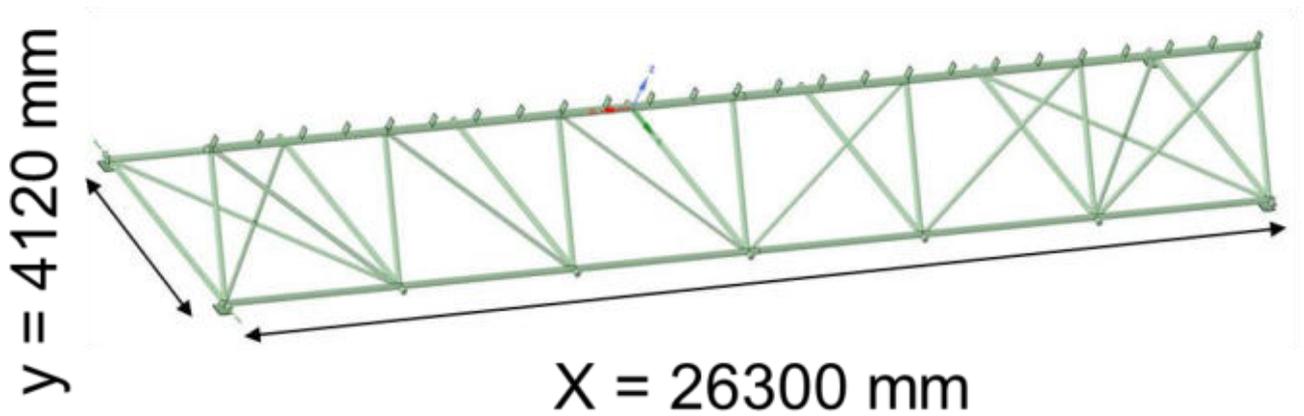


Abbildung 36: CAD-Modell des mittleren Raumtragwerks

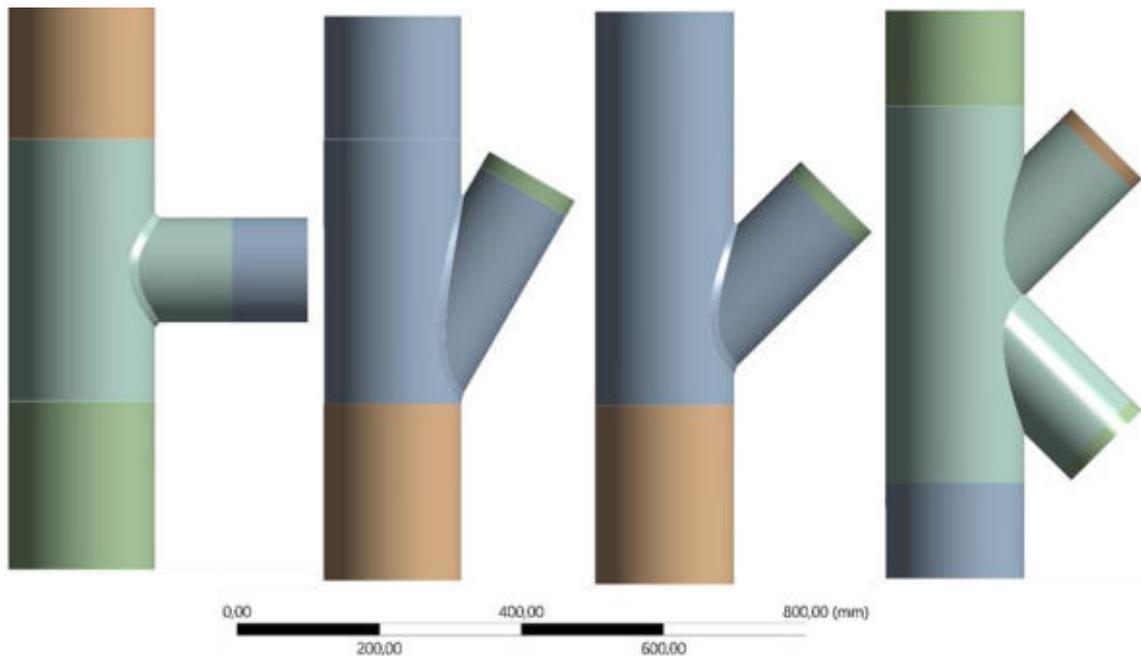


Abbildung 37: Abstrahierte Knotengeometrien

4.3 Abbildung des Herstellungsprozesses

4.3.1 Ansys Workbench

Der Herstellungsprozess wurde im ersten Schritt mittels des Additive Manufacturing Systems (AM Systems) der Simulationssoftware Ansys Workbench 18.2a als zweistufige Analyse abgebildet. Dabei wurde zuerst eine thermisch-transiente Simulation des Wärmefeldes mit anschließender statisch-mechanischer Simulation unter Verwendung der thermischen Last durchgeführt. Die Simulation stützt sich dabei nicht auf ein klassisches tetragonales oder hexagonales FEM-Netz, sondern nutzt ein Voxelnetz, welches das Bauteil in würfelförmige Elemente zerlegt.

Der zur additiven Herstellung ausgewählte Demonstrator aus Abschnitt 8.2 wurde zum Abgleich der Simulation mit den realen Begebenheiten für die Abbildung des Herstellungsprozesses ausgewählt.

Die thermisch-transiente Simulation des Bauteils wurde mit 772 Lastschritten, wobei die Anzahl der Lastschritte zum einen durch die Lagenanzahl definiert wurde. Dabei wird pro Schweißlage ein Lastschritt für die Erwärmung und einer für die Abkühlung durchgeführt und konnte damit bis zur letzten Schweißlage erfolgreich ausgeführt werden. Die letzte Schweißlage wurde dabei im Lastschritt 750 aufgebracht. In Abbildung 38 links zeigt sich, dass die thermische Beeinflussung des Bauteils mit Temperaturen von über 127°C bis ca. zur halben Bauteilhöhe reichen. Die statisch-mechanische Analyse konnte aufgrund einer zu hohen Deformation nur bis zum Lastschritt 294 ausgeführt werden. In der thermischen Analyse des Lastschritts (Abbildung 38 rechts) zeigt sich, dass die thermische Beeinflussung eine geringere Höhenausdehnung aufweist, dies legt den Schluss nahe, dass sich in den oberen Lagen ein Wärmestau ausbildet. Die Analyse der Gesamtverformung, Abbildung 39, zeigt eine sehr starke Verformung des Bauteils, die größte tritt dabei am Anschlusspunkt des Schrägstoßes auf, wo sich das topologieoptimierte Bauteil aufteilt. Die von-Mises-Vergleichsspannung (Abbildung 40) zeigt extrem hohe Spannungen im gesamten Bauteil, diese liegen bei ca. 12513 MPa. Dieser Wert liegt deutlich über der Zugfestigkeit des Bauteils.

Dies lässt den Schluss zu, dass die Ergebnisse der statisch-mechanischen Analyse des additiven Fertigungsprozesses nicht zuverlässig verwendet werden können.

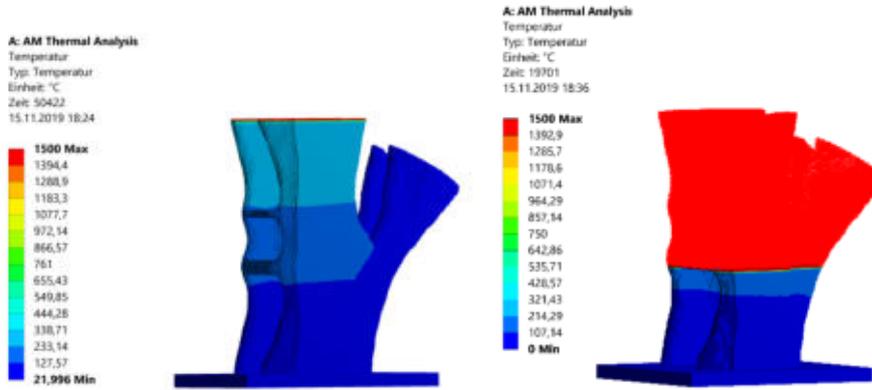


Abbildung 38: Ansys AM Systems, thermisch-transient, links: Lastschritt 750, rechts: Lastschritt 294

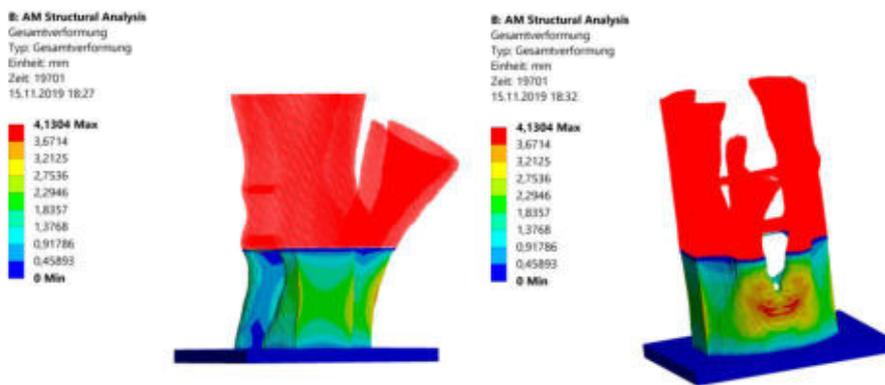


Abbildung 39: Ansys AM Systems, statisch-mechanisch, Lastschritt 294, Gesamtverformung

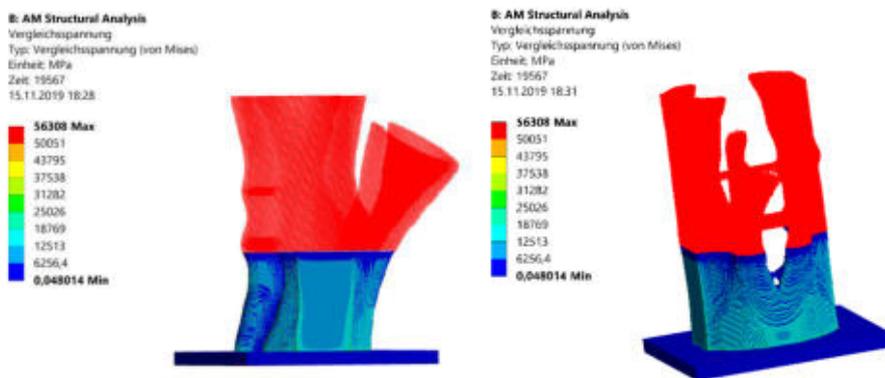


Abbildung 40: Ansys AM Systems, statisch-mechanisch, Lastschritt 294, von-Mises-Vergleichsspannung

4.3.2 Simufact Welding

Der Herstellungsprozess wurde im zweiten Schritt mittels des Simufact Welding der Firma MCS-Software als eine thermisch-transiente Simulation des Wärmefeldes durchgeführt. Die Simulation stützt sich dabei auf ein klassisches hexagonales FEM-Netz.

Zur Erstellung der Simulation wurde der gleiche Demonstrator wie in Abschnitt 4.3.1 verwendet um diesen mit den realen Begebenheiten für die Abbildung des Herstellungsprozesses.

Um die Abbildung des Herstellungsprozesses in Simufact zu realisieren musste das Bauteil in mehreren Teilstücken modelliert werden. Dabei waren der additiv zu fertigende Teil (die obersten 5 Schweißlagen) zwei Bauteile, eins pro Seite, der bereits bestehende Teil des additiv zu fertigenden Bauteils und die Grundplatte einzelne Bauteile. In Abbildung 41 ist der Aufbau des Programms zu erkennen. Die Schweißtrajektorien wurden anhand eines G-Codes der Bahnplanung des Bauteils importiert. Diesem G-Code wurde die Geometrie des noch zu schweißenden Bereichs zugewiesen. Der Unterschied zum realen Bauteil liegt dabei in der Art der Füllung, der Slicer für den Roboter ist nicht in der Lage einen G-Code zu exportieren, daher musste ein anderer Slicer verwendet werden. Dieser ermöglicht es jedoch nicht die Startpunkte identisch zum realen Fall zu setzen und kann nur mäanderförmige Füllungen generieren, im Gegensatz zur Konturparallelen Füllung beim Realbauteil. Danach wurde dieser mittels der Funktion „Create Set“ in einzelne Schichten zerlegt. Diese Schichten werden im Simulationsprozess anhand der Trajektorien bei einer Temperatur oberhalb von 1511°C aktiviert, wodurch das Bauteil lagenweise gefertigt wird. Diese lagenweise Fertigung anhand der Trajektorien ist in Abbildung 42 zu sehen. Dabei wird immer auf einer Bauteilseite zuerst die Außenkontur und anschließend die Füllung hergestellt, danach folgt die andere Seite. Sind beide Seiten gefertigt werden die nächsten Schweißlagen nach dem gleichen Schema gefertigt, bis der Prozess abgeschlossen ist.

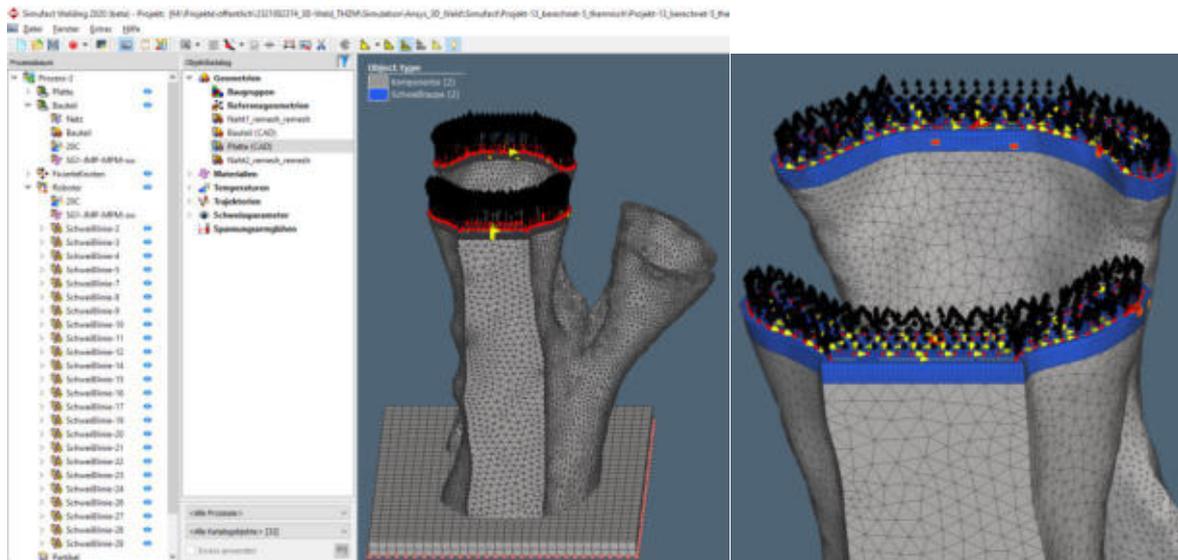


Abbildung 41: Abbildung des Herstellungsprozess

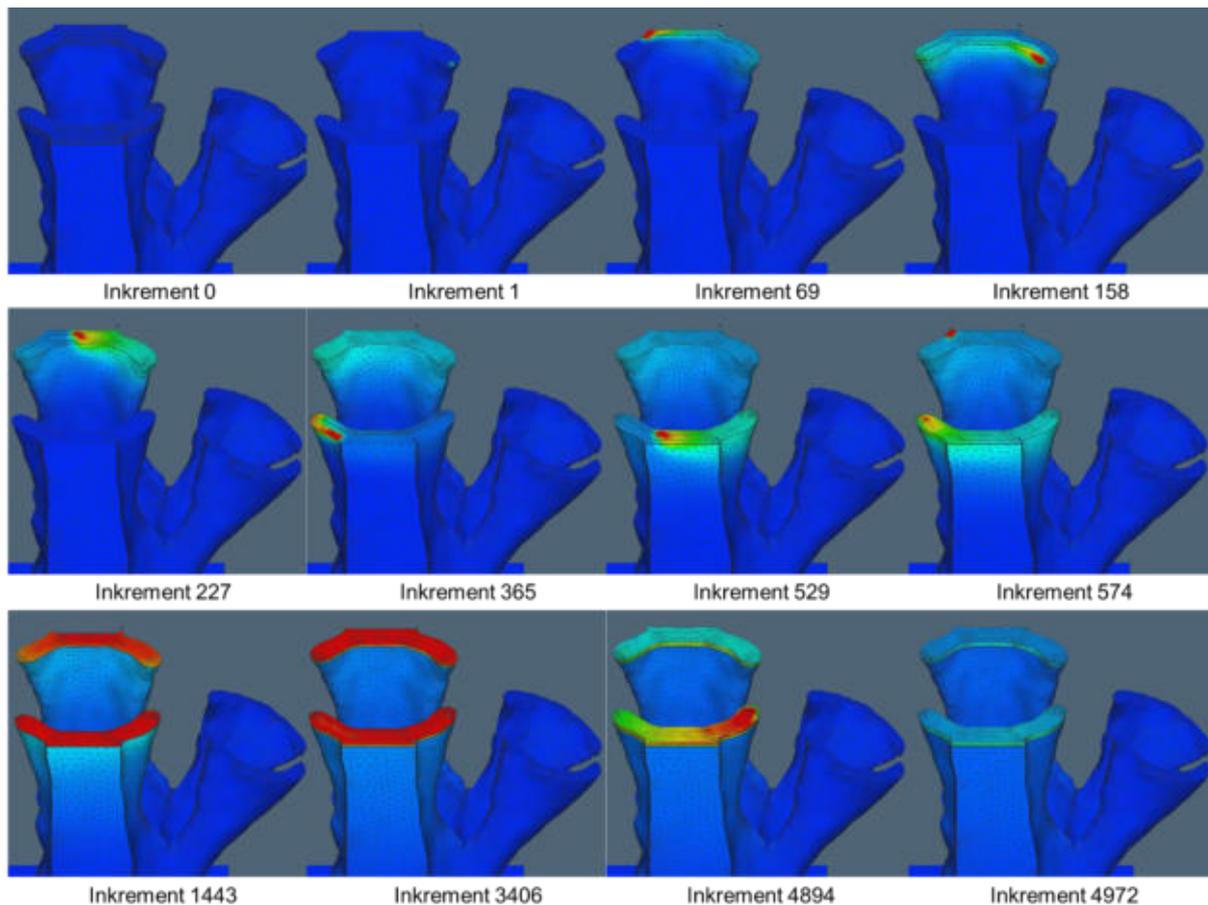


Abbildung 42: Simulationsschritte der Herstellung

4.4 Parameteridentifikation

Die Ergebnisse Abschnitt 3.2.7.3 (Ermittlung der $t_{8/5}$ -Zeit) und 7.1.1 (Zugversuch) zeigen, dass die relevante Größe für den Erhalt guter mechanisch-technologischer Eigenschaften die $t_{8/5}$ -Zeit ist. Dabei sollte diese möglichst gering sein, um gute Festigkeitswerte zu erhalten, dies deckt sich auch mit den Aussagen des $t_{8/5}$ -Konzepts, welches in der Schweißtechnik Anwendung für niedriglegierte Stähle findet. [STA17]

Die $t_{8/5}$ -Zeit lässt sich vorwiegend über die eingebrachte Streckenergie und die Strukturbreite beeinflussen. Letztere lässt sich nur bedingt beeinflussen, da sie von der zu fertigenden Struktur abhängig ist, aber es hat sich gezeigt, dass die Strukturbreite möglichst mit einer geringen Streckenergie und mehreren Schweißraupen erzeugt werden sollte, um gute mechanisch-technologischer Eigenschaften zu erzeugen. Die Streckenergie ergibt sich aus der Schweißgeschwindigkeit und der Lichtbogenleistung. Bei einer gegebenen Geschwindigkeit sollte also mit einer geringen Schweißleistung gearbeitet werden um die mechanischen Eigenschaften positiv zu beeinflussen. Es müssten weitere Grundlagenuntersuchungen durchgeführt werden, ob es besser wäre eine hohe Schweißleistung mit einer sehr hohen Schweißgeschwindigkeit zu nutzen, oder ob es weitere Limiten für den Prozess gibt. Grundsätzlich ist allerdings zu sagen, dass die Schmelze bei zunehmender Schweißleistung eine geringere Viskosität aufweist und somit zu sehr breiten und flachen Schweißnähten führt. Daher ist anzunehmen, dass Lichtbogenarten mit einer sehr hohen Energie nicht unbedingt für die additive Fertigung geeignet sind.

4.5 Mechanische Untersuchungen

Die mechanische Untersuchung wurde mittels Ansys Workbench 19.2 durchgeführt. Folgende Lastannahmen (Tabelle 11 bis Tabelle 14) und Lastfallkombinationen (Tabelle 15) wurden für den angenommenen Flachdachaufbau angesetzt. Zusätzlich sind in Tabelle 15 die Auflagerkräfte für die verschiedenen Lastfallkombinationen enthalten. Die mechanischen Untersuchungen sind anfangs ausschließlich am Obergurtnoten durchgeführt worden. Dabei wurden die Bewegungen an den Enden der Kreishohlprofile (KHP) gesperrt, wobei nur die Bewegung in axialer Richtung zulässig war. Da aber die Kräfte und Momente auch über das Ende eines jeden KHP aufgebracht werden musste kam es zu einer Verschiebung der Diagonalstäbe (Abbildung 43). Dies bildet die realen Verhältnisse unzureichend ab, da der Untergurt die Bewegung des Diagonalstabs behindern würde. Aus diesem Grund wurde für weitere mechanische Untersuchungen das gesamte Tragwerk verwendet (Abbildung 44). Dabei wurde die Krafteinleitung in das Tragwerk über am Obergurt befestigte Pfetten realisiert. Es ist außerdem zu erkennen, dass sich in der Berechnung deutlich unterschiedliche Werte für die maximale Vergleichsspannung ergeben. In Abbildung 43 liegt diese bei 386 MPa und in Abbildung 44 bei 216 MPa. Die Werte wurden jeweils für den Grenzzustand der Tragfähigkeit der Lastfallkombination 2 aus Tabelle 15: Lastfallkombinationen (LFK) ermittelt. Das Netz wurde für beide Berechnungen mit derselben Elementgröße durchgeführt. Die Spannungsspitzen am Einzelknoten treten an den Anschlusspunkten der Vertikal und Diagonalstäbe auf. Bei der Berechnung des gesamten Tragwerks finden sich die Spannungsspitzen an den äußeren Diagonalstäben. Die Berechnung des gesamten Tragwerks verspricht genauere Vergleichsspannungswerte, welche für die Topologieoptimierung der Tragwerksknoten genutzt werden soll. Weiterhin bildet die Berechnung des gesamten Tragwerks die realen Gegebenheiten deutlich besser ab.

Tabelle 11: Eigenlast Dach

	Eigenlast g
Solar	$g = 0,3000 \text{ kN/m}^2$
Trapezprofil (Wetterschale)	$g = 0,0716 \text{ kN/m}^2$
Dämmung d= 16cm	$g = 0,1600 \text{ kN/m}^2$
Dampfsperre	$g = 0,0700 \text{ kN/m}^2$
Trapezprofil (Tragschale)	$g = 0,2420 \text{ kN/m}^2$
Eigenlast Gesamt g	$g = 0,8440 \text{ kN/m}^2$

Tabelle 12: Ausbaulast

	Ausbaulast g_a
Beleuchtung 10kg/Stück=0,1kN	$g_a = 0,010 \text{ kN/m}^2$
Heizpaneele 30kg/m ² =0,3kN/m ²	$g_a = 0,300 \text{ kN/m}^2$
Ausbaulast Gesamt g_a	$g_a = 0,310 \text{ kN/m}^2$

Tabelle 13: Windlast

WLZ 2 Binnenland 10 m < h < 18 m q=0,8kN/m ²	Windlast w
$w = q \cdot c_{pe10}$	
$w = 0,8 \cdot (-0,7)$	$-0,56 \text{ kN/m}^2$

Tabelle 14: Schneelast

SLZ2 A=113m	Schneelast s
$S_k=0,25+1,91*\left(\frac{A+140}{760}\right)$	0,88583 kN/m ²
$S_d=\mu*S_k$	0,70866 kN/m ²

Tabelle 15: Lastfallkombinationen (LFK)

LFK	Lastfälle mit Teilsicherheits- und Abminderungsbeiwerten	Einwirkung	Summe der Auflagerkräfte
1	1,35*G	1,558 kN/m ²	337,62 kN
2	1,35*G+1,5*S	2,621 kN/m ²	567,98 kN
3	1,35*G+1,5*S+1,5*0,6*W	2,117 kN/m ²	458,76 kN
4	1,35*G+1,5*0,5*S+1,5*W	1,249 kN/m ²	270,76 kN
5	1*G+1,5*W	0,314 kN/m ²	68,05 kN

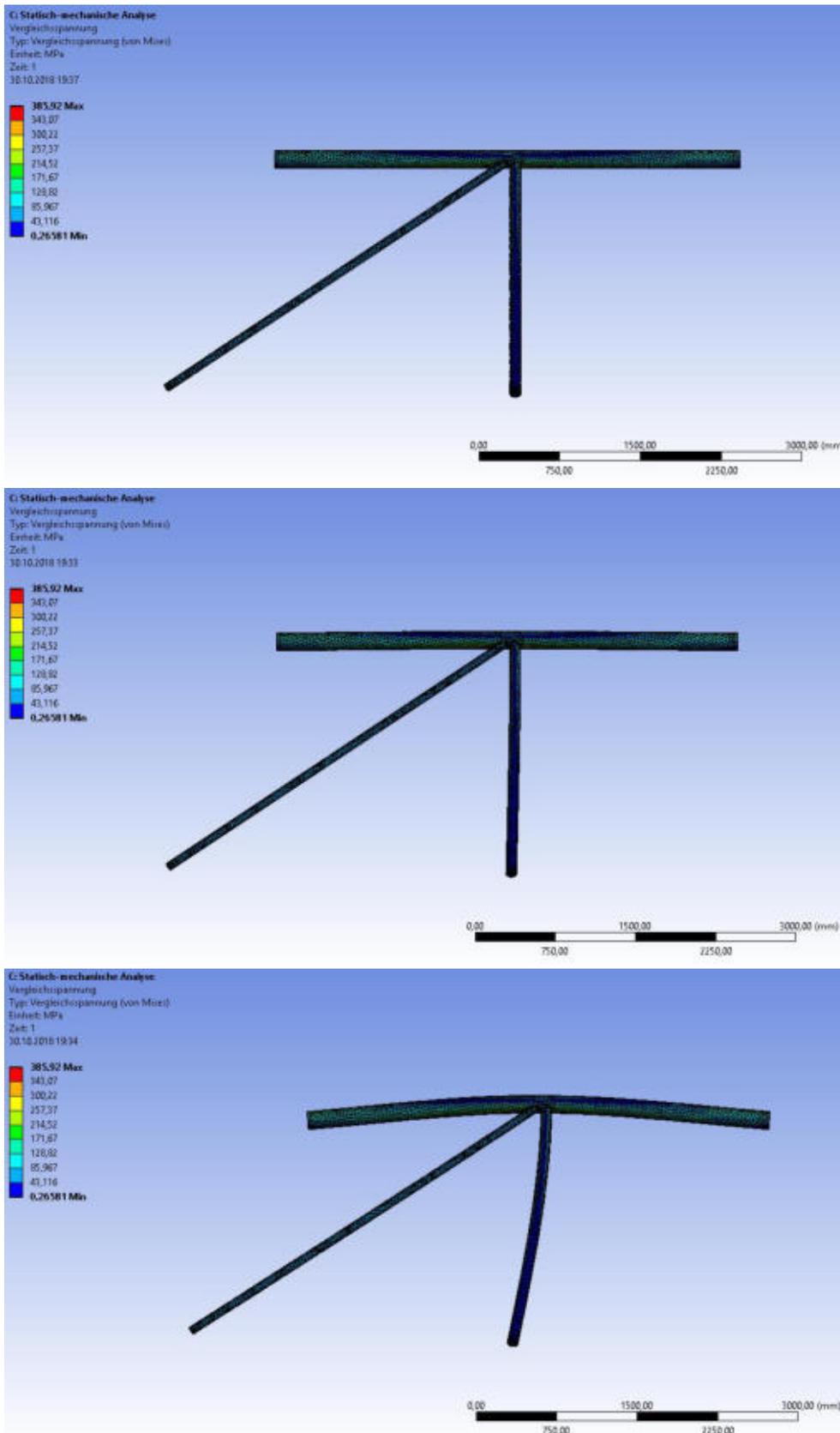


Abbildung 43: mechanische Untersuchung Obergurtknoten, von Mises Vergleichsspannung (oben: unverformt; mitte: Verformung maßstabsgerecht; unten: Verformung 8,5-fach überhöht dargestellt)

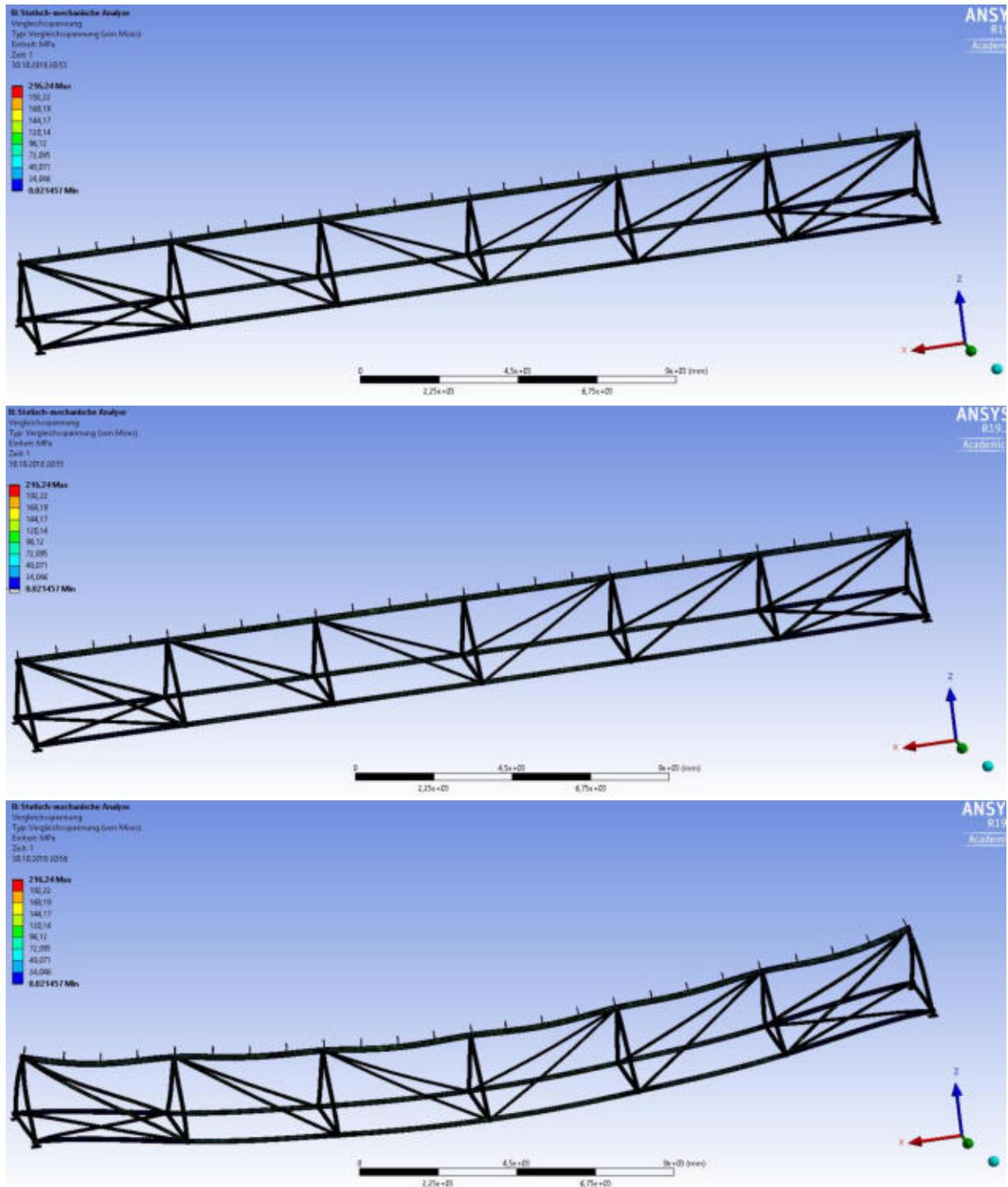


Abbildung 44: mechanische Untersuchung Tragwerk, von Mises Vergleichsspannung (oben: unverformt; mitte: Verformung maßstabsgerecht; unten: Verformung 23-fach überhöht dargestellt)

4.6 Validierung und Verifizierung

4.6.1 Ansys Workbench

Die thermischen Begebenheiten bei der additiven Fertigung des Demonstratorbauteils wurden mit Thermografieaufnahmen während des Herstellungsprozesses verglichen. In Abbildung 45 ist der Vergleich der Temperaturfelder aus der Simulation mit Ansys AM Systems und der aufnahmen mittels Thermografiekamera zu sehen. Dabei zeigt sich, dass die Temperaturverteilung im Thermogramm deutlich inhomogener ist als in der Simulation. Dies ist darauf zurück zu führen, dass in der Simulation die gesamte Lage gleichzeitig mit Energie beaufschlagt wird und in der Realität die Wärmequelle über die Kontur geführt wird. Außerdem zeigt sich, dass die Temperaturen von $>200^{\circ}\text{C}$ in einem deutlich kleineren Bereich wirken, als in der Simulation. Dadurch kann gesagt werden, dass es nicht zielführend ist die Simulation mit Ansys AM Systems durchzuführen.

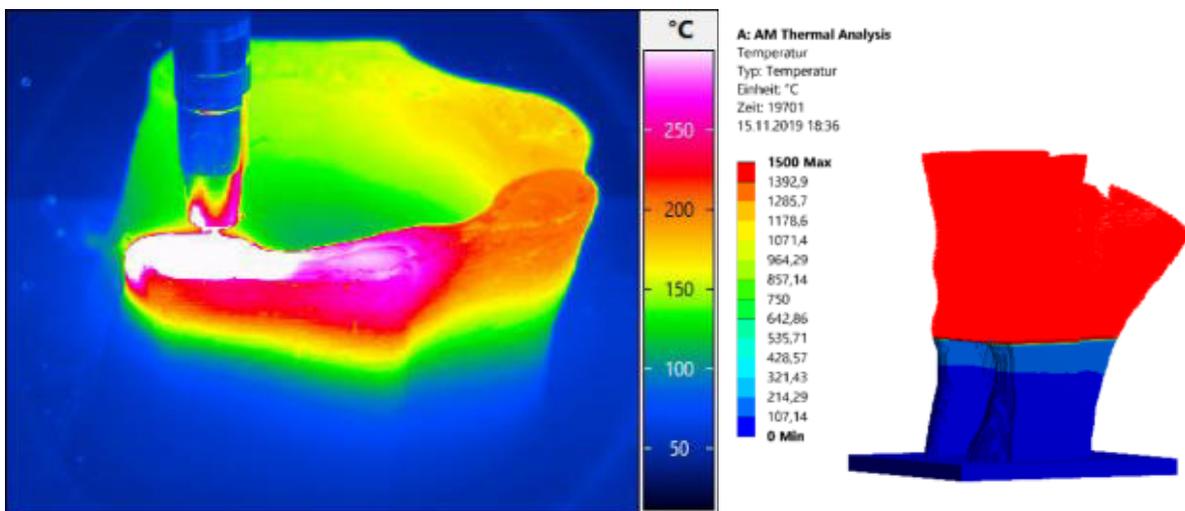


Abbildung 45: Vergleich der Temperaturfelder bei der additiven Fertigung (links: Thermogramm des additiv gefertigten Bauteils (Höhe: $z=100,8$ mm, $10-300^{\circ}\text{C}$); rechts: Ansys AM Systems, thermisch-transient, Lastschritt 294)

4.6.2 Simufact Welding

Abbildung 46 zeigt das Thermogramm während des Aufbaus des realen Bauteils im Vergleich zum Wärmefeld der Simulation. Die Skalen beider Bilder sind in einem Temperaturbereich von 200°C - 600°C auf einer ähnlichen Bauteilhöhe aufgenommen. Das Thermogramm wurde bei $366,4$ mm erstellt und die Lage in der Schweißsimulation liegt auf einer Höhe von 366 mm. Es ist trotz der unterschiedlichen Startpunkte, wie in Abschnitt 4.3.2 beschrieben, zu erkennen, dass sich die Temperaturfelder sehr stark ähneln und die Ausdehnung des Bereichs $>200^{\circ}\text{C}$ eine ähnliche Größe aufweist. Daher kann man sagen, dass die Temperaturfelder von Simulation und Thermogramm sich stark ähneln und damit die Abbildung des Herstellungsprozesses bezogen auf die thermisch-transiente Simulation mittels Simufact realitätsnahe Ergebnisse liefern kann.

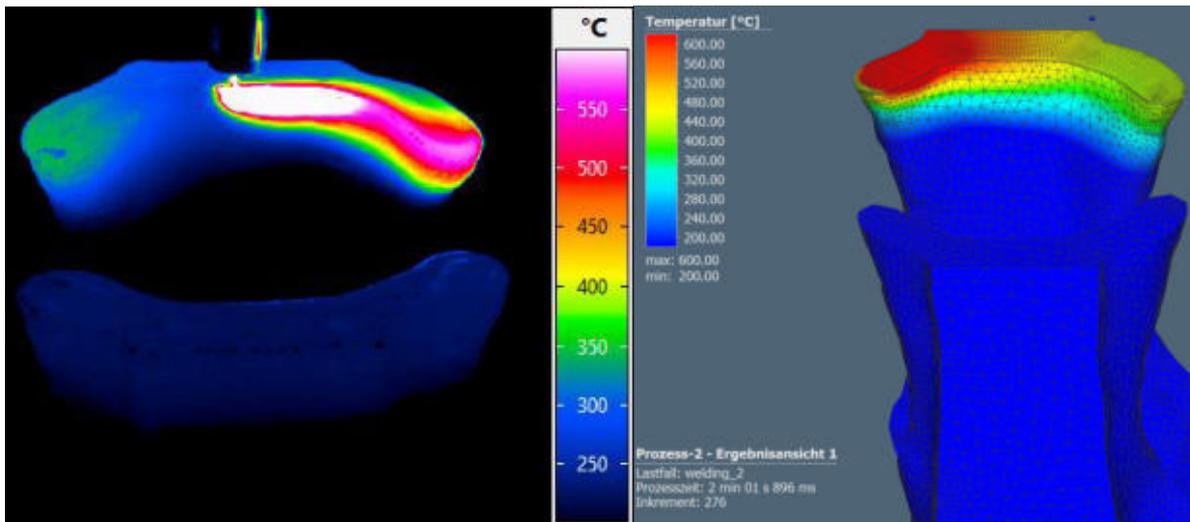


Abbildung 46: Vergleich der Temperaturfelder bei der additiven Fertigung (links: Thermogramm des additiv gefertigten Bauteils (Höhe: z=366,4 mm, 200-600°C); rechts: Simufact Welding, thermisch-transient, Inkrement 276, Höhe: z= 366 mm, 200°C-600°C)

Die Ergebnisse der letzten berechneten Schweißlage weichen allerdings deutlich von denen des Thermogramms ab. In Abbildung 47 ist der Vergleich des Thermogramms und der Simulation zu sehen. Dabei zeigt sich, dass es einen deutlichen Wärmestau im Bereich der Schweißlagen gibt, welcher durch eine nicht vorhandene Wärmeleitung in die Struktur auftritt. Voraussichtlich ist dies auf ein Kontaktproblem der unterschiedlichen FEM-Netze zurückzuführen. Dieses Problem tritt voraussichtlich nicht auf, wenn die gesamte Struktur in der Simulation aufgebaut wird. Dies erfordert allerdings viel Rechenleistung und Hauptspeicher auf dem Simulationscomputer in der Größenordnung von ca. 500 GB-800 GB RAM.

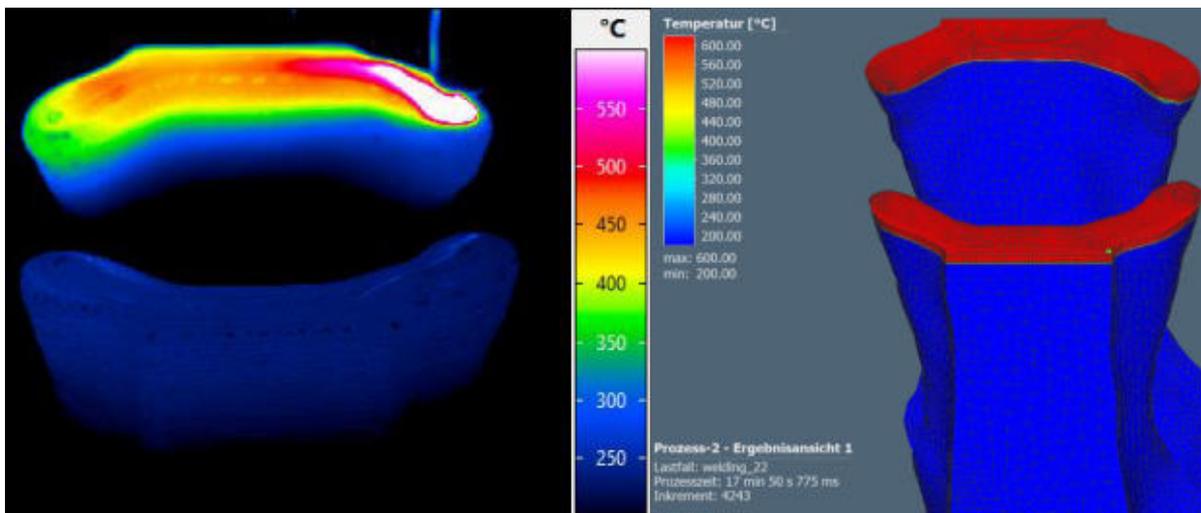


Abbildung 47: Vergleich der Temperaturfelder bei der additiven Fertigung (links: Thermogramm des additiv gefertigten Bauteils (Höhe: z=373,6 mm, 200-600°C); rechts: Simufact Welding, thermisch-transient, Inkrement 276, Höhe: z= 373,2 mm, 200°C-600°C)

5 Optimierung unter Aspekten der Bionik

Festigkeits- und steifigkeitsangepasste Tragstrukturen aus Metall gewinnen zunehmend an Bedeutung. Neben möglicher zu realisierender ikonenhafter Architektur und individueller Ästhetik ist die Realisierung von beanspruchungsoptimierten Strukturen in Anlehnung an die Natur (Bionik) von großem Interesse. Die Motivation einer leichten Knotenstruktur mit maximaler Stabilität ist häufig mit dem Wunsch eines minimalen und angepassten Materialeinsatzes sowie geringen Herstellungskosten gepaart.

Die Topologieoptimierung hat sich über die letzten Jahrzehnte in verschiedenen Ingenieursdisziplinen als ein robustes Werkzeug zur Optimierung der Materialverteilung innerhalb eines vorgegebenen Designraums etabliert. [ABD19], [BIK16], [HIN18], [SUK18], [TSA19] Das Verfahren lässt sich in drei grundlegende Schritte unterteilen: Definition des maximalen Designraums, der Optimierungsziele und der Randbedingungen. Daraus wird ein optimales Design für die gegebene Zielfunktion errechnet. Durch eine Topologieoptimierung entstehen in der Regel komplexe und abstrakte Strukturen mit Hinterschneidungen und Hohlräumen. Diese lassen sich nicht oder nur eingeschränkt mit konventionellen Fertigungsverfahren herstellen. Daher wird eine Herstellungstechnologie für tragende Strukturen aus metallischen Werkstoffen benötigt, mit welcher diese topologieoptimierten Strukturen hergestellt werden können. Additive Fertigungsverfahren bieten die benötigte Designfreiheit um hochkomplexe Bauteile herzustellen.

Die additive Fertigung (engl.: Additive Manufacturing AM) beschreibt den schichtweisen Aufbau dreidimensionaler Objekte durch das gezielte Aufbringen oder Verbinden von draht-, pulver- oder folienförmigem Werkstoff aus Metall oder Kunststoff [VDI14]. Dadurch wird es möglich komplexe Geometrien ab einer Losgröße von 1 mit einem ressourceneffizienten Materialauftrag herzustellen.

Die Herstellung komplexer metallischer 3D-Bauteile wird bislang vordergründig mittels laserbasierter Verfahren realisiert. Die dazu verwendeten Verfahren, wie das Laser-Auftrag-Schweißen (LENS) und das Selective Laser Sintering (SLS), sind durch die erzielbaren Schichtdicken von wenigen zehntel Millimetern und einer geringen Aufbaurate von ca. 1 – 10 cm³/h in der Produktivität für größere Bauteile stark eingeschränkt. Zusätzlich ist der Bauraum vor allem bei Pulverbett basierten Verfahren in der Regel gering. Daher müssen lange Herstellungszeiten und begrenzte Bauteilabmessungen in Kauf genommen werden. [BDI16], [BER16], [PET15]

In Galjaard et al. wurde eine Topologieoptimierung eines einen ausschließlich auf Zug beanspruchten Tragwerkknötens für ein Tensegrity-Tragwerk durchgeführt. Dieser wurde im Anschluss additiv mittels SLS hergestellt. [GAL14] Wobei die Fertigung aus Gründen der Produktionszeit und –kosten in einer auf 40 % der Originalgröße skalierten Version hergestellt wurden. Die Autoren schätzen, dass die Herstellung in Originalgröße mit den heutigen Mitteln etwa 15 Tage in Anspruch genommen hätte, wodurch sich das Bauteil, in Verbindung mit den hohen Pulverkosten, nicht wirtschaftlich herstellen lässt. [GAL14]

5.1 Topologieoptimierung

Im Rahmen der Topologieoptimierungen wurde das Simulationsprogramm ANSYS Workbench 2019R1 für Windows und Centos genutzt. Die Rückführung und Bearbeitung der topologieoptimierten Geometrien erfolgte mittels ANSYS SpaceClaim Design Modeler 2019R1.

5.1.1 Vorversuche zur Topologieoptimierung

Die Zielfunktion der Topologieoptimierung war die Minimierung der Nachgiebigkeit, d.h. die Maximierung der Steifigkeit. Die Simulation wurde mit den Ergebnissen der mechanischen Berechnung durchgeführt. Die minimale Strukturgröße (Wanddicke) wurde auf 5 mm festgelegt, da dies ca. der geringsten herstellbaren Strukturgröße mittels MSG-Verfahren und 1,2 mm Drahtdurchmesser entspricht. In Abbildung 44 ist beispielsweise die Topologieoptimierung des Obergurtknotens dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass nur Bereiche der Mantelfläche entfernt werden und der eigentliche Knotenbereich aufgrund der dort vorherrschenden erhöhten Spannungen nicht geändert wird. Daher wurde der Designbereich kugelförmig um den eigentlichen Obergurtknoten erweitert und die Topologieoptimierung erneut durchgeführt. Dadurch entsteht eine dem ursprünglichen Knoten ähnliche Form, allerdings sind dadurch die Anschlussbereiche deutlich verrundet worden (Abbildung 49). In weiteren Versuchen zeigte sich, dass der Knoten teilweise keine Verbindung mehr zu den Vertikal- und Diagonalstäben aufwies (Abbildung 50). Daher wurde die Optimierungsgeometrie abstrahiert (Abschnitt 5.1.2 und Abschnitt 5.1.3), um die Topologieoptimierung durchführen zu können.

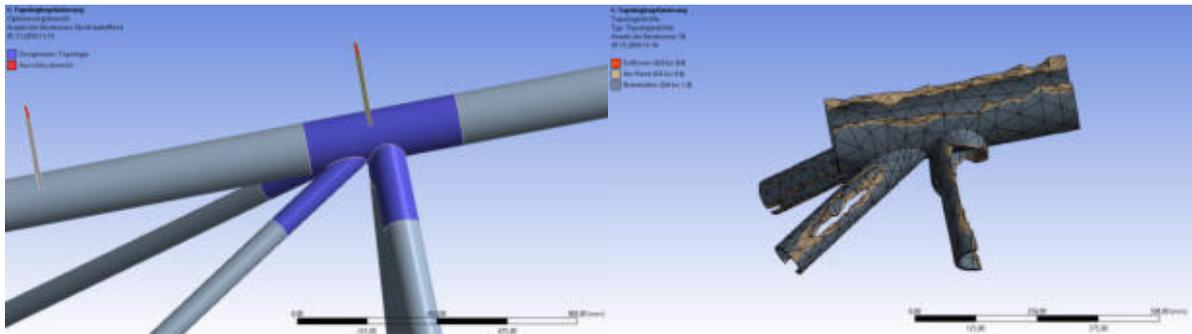


Abbildung 48: Topologieoptimierung Obergurtknoten

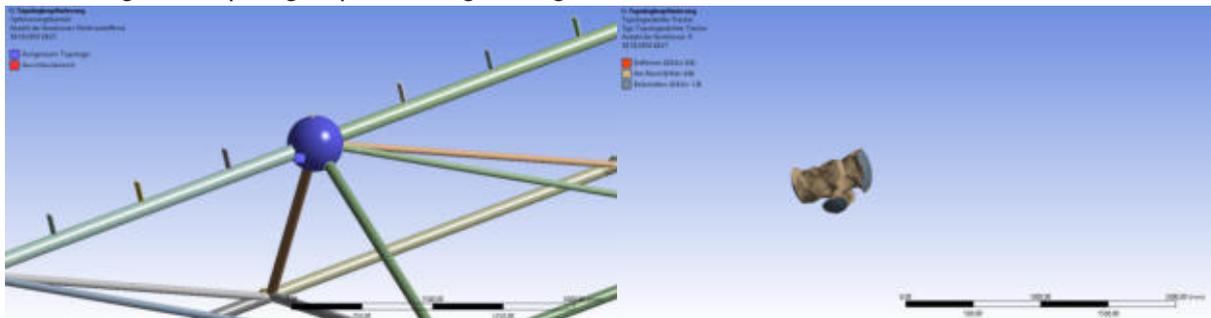


Abbildung 49: Topologieoptimierung Tragwerk mit vergrößertem Designbereich

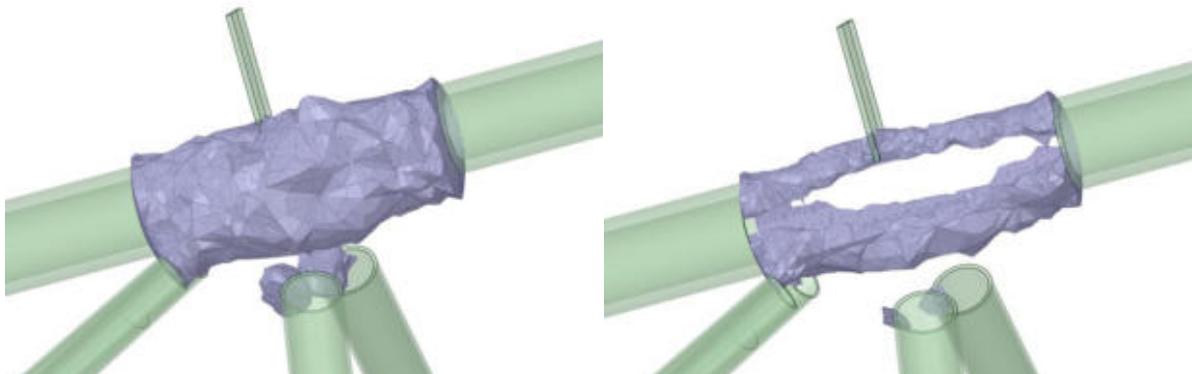


Abbildung 50: Topologieoptimierung Tragwerk mit vergrößertem Designbereich

5.1.2 Topologieoptimierung am T-Stoß

Zielfunktion und Randbedingungen

Die Topologieoptimierung wurde anhand eines T-Stoßes mit Kreishohlprofile des Typs KHP193,7x10 und KHP139,7x10 durchgeführt, diese haben einen Durchmesser von 193,7 mm bzw. 139,7 mm und eine Wandstärke von 10 mm.

Zuerst wurden statisch-mechanische Berechnungen durchgeführt, um als Grundlage für die nachfolgende Topologieoptimierung zu dienen. Dafür wurden die in Abbildung 51 zu erkennenden Kräften gewählt. Die Einspannung des Knotens wurde über eine gesperrte Verschiebung in x-, y- und z-Richtung an der unteren Stirnfläche des vertikalen Kreishohlprofils realisiert.

Anschließend wurde die Topologieoptimierung mit dem Optimierungsziel der Minimierung der Nachgiebigkeit, also der Maximierung der Steifigkeit der Knotenstruktur durchgeführt.

Im Weiteren wurden folgende Randbedingungen gewählt:

- Antwortbeschränkung Spannung: 320 MPa
- Fertigungsbeschränkung Strukturgröße: 5 mm
- Antwortbeschränkung Masse: 10 % - 90 % von der Masse des Designraums (in 10 % Schritten)
- Designraum: x=300 mm; y=200 mm; z=350 mm

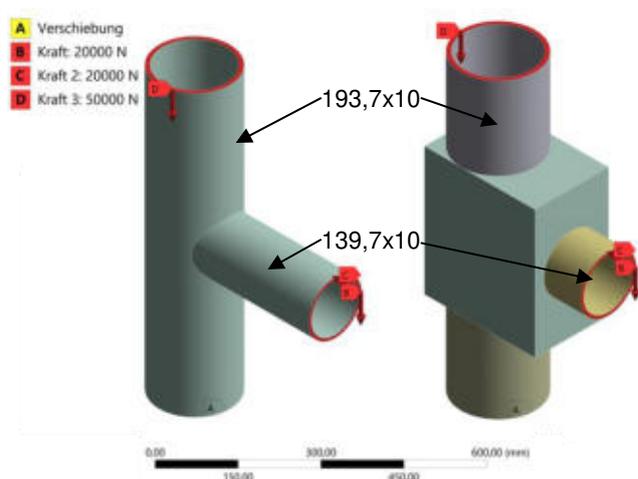


Abbildung 51: Statisch-mechanische Analyse am T-Stoß (links: T-Stoß; rechts: mit Designbereich)

Es wurden Optimierungen für verschiedene Restmasseanteile erstellt, um einen Tragwerksknoten mit einer möglichst hohen Steifigkeit bei einer gegebenen Masse zu erhalten.

Abschließend wurde mit den topologieoptimierten Geometrien weitere statisch-mechanische Berechnungen durchgeführt, um eine Gegenüberstellung der unterschiedlichen Designs mit dem originalen T-Stoß hinsichtlich der von Mises-Vergleichsspannung und der Gesamtverformung bewertet.

Ergebnisse der Topologieoptimierung

Der Verlauf der von Mises-Vergleichsspannung in Abbildung 52 zeigt deutlich, dass die im Bauteil herrschenden Spannungen durch eine Änderung der Topologie deutlich verringert werden können. Dabei ist zu erkennen, dass der ursprüngliche T-Stoß die höchste Vergleichsspannung, mit 173,7 MPa, aufweist. Mit jedem dieser Designs lässt sich die Steifigkeit des Knotenpunkts erhöhen, aber nur das Design mit 10% Masserestriktion erreicht eine geringere Masse als der originale T-Stoß. Wie in Abbildung 52 und Abbildung 53 zu erkennen ist, verringert sich die maximale von Mises-Vergleichsspannung nur von 173,7 MPa auf 153,6 MPa, aber die Gesamtverformung nimmt deutlich ab. Das Design mit 20 % Masserestriktion weist hier schon deutlich geringere Mises-Vergleichsspannungen von 32 MPa auf. Weiterhin zeigt sich eine Grenzwertbildung bei einer Masserestriktion von 30 %. Dies zeigt sich auch in der Gesamtverformung des Knotenbereichs (Abbildung 53) Die Verformung konnte mithilfe der Topologieoptimierung von ca. 2,34 mm auf 0,027 mm ab einer Restmasse von 30% gesenkt werden. Das bedeutet, dass ab einer Masserestriktion von 30 % eine Verbesserung der Steifigkeit mehr eintritt, sondern nur noch eine Erhöhung der Masse im Knotenpunkt. Da allerdings die höchste Steifigkeit gesucht war wird auf Grund der Grenzwertbildung, im weiteren die Geometrie mit 30 % Masserestriktion betrachtet.

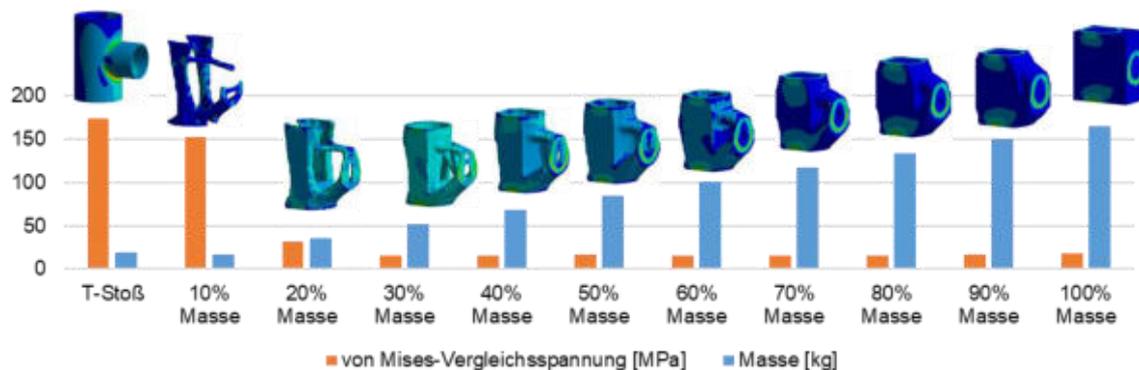


Abbildung 52: von Mises-Vergleichsspannung in Relation zum Restmasseanteil nach der Topologieoptimierung

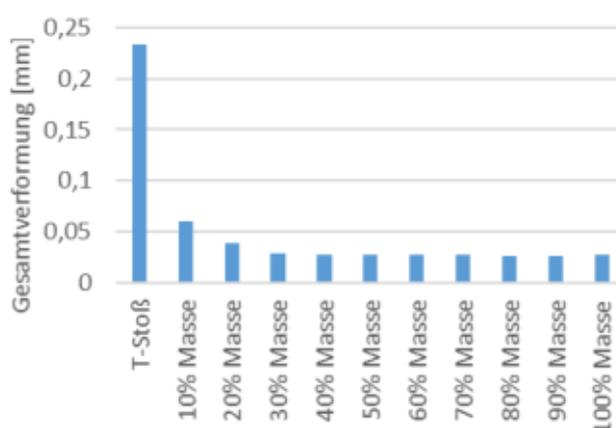


Abbildung 53: Gesamtverformung in Relation zum Restmasseanteil nach der Topologieoptimierung

In Abbildung 54 ist die von Mises-Vergleichsspannungsverteilungen des T-Stoßes. Aus der Spannungsverteilung ist deutlich zu erkennen, dass die höchsten Spannungen an der Verbindungsstelle beider Kreishohl-profile zu finden ist, wobei quer zur Krafrichtung nur geringe Spannungen vorhanden sind. Außerdem weist vor allem die Seite der Anschlussstelle höhere Spannungen auf, die Rückseite hingegen ist kaum belastet.

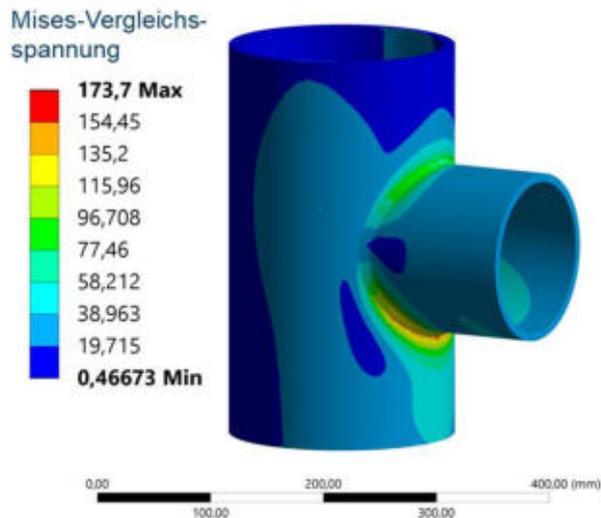


Abbildung 54: von Mises-Vergleichsspannung des original T-Stoß

In Abbildung 55 ist zu erkennen, dass die Topologieoptimierung zu einem bionischen Design des Tragwerksknotens geführt hat. Die abgeflachten Seitenbereiche sind die Begrenzungen des Designraums. Der Knoten weist im Gegensatz zum originalen T-Stoß eine homogene Spannungsverteilung über den gesamten Knotenpunkt auf. Weiterhin ist gut zu erkennen, dass der Anschlussbereich deutlich verstärkt ausgebildet ist. Außerdem zeigt sich im topologieoptimierten Knoten, dass die wenig belastete Rückseite entfernt wurde. Die höchsten Spannungen im Knoten treten hier an der Verbindungsstelle des Knotens mit dem angeschlossenen Kreishohlprofil auf, diese sind allerdings um Faktor 11 geringer also im originalen T-Stoß.

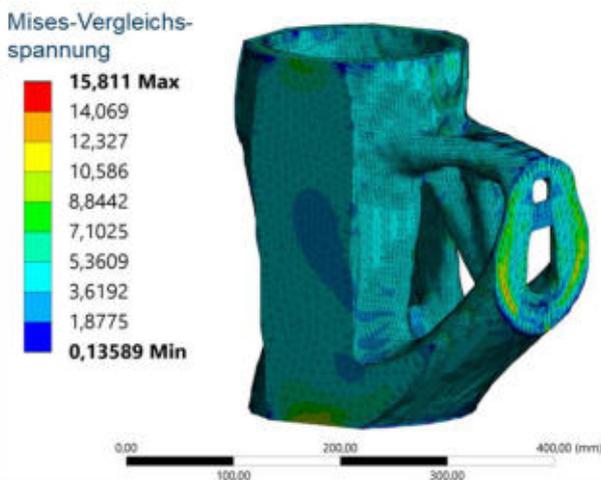


Abbildung 55: von Mises-Vergleichsspannung der Knotenstruktur mit 30% Masserestriktion

5.1.3 Topologieoptimierung anhand unterschiedlicher Rohrknotten

Zielfunktion und Randbedingungen

Die Untersuchungen zur Topologieoptimierung unterschiedlicher Rohrknotten wurde analog der Untersuchungen am T-Stoß aus Abschnitt 5.1.2 durchgeführt. Dabei kamen auch Kreishohlprofile des Typs KHP193,7x10 und KHP139,7x10 zum Einsatz. Zuerst wurden statisch-mechanische Berechnungen durchgeführt, um als Grundlage für die nachfolgende Topologieoptimierung zu dienen. Dafür wurden die in Abbildung 56 bis Abbildung 59 zu erkennenden Kräfte gewählt. Die Einspannung des Knotens wurde an der oberen unteren Stirnfläche des vertikalen Kreishohlprofils über eine gesperrte Verschiebung in x-, y- und z-Richtung realisiert. Anschließend wurde die Topologieoptimierung mit dem Optimierungsziel der Minimierung der Nachgiebigkeit, also der Maximierung der Steifigkeit der Knotenstruktur durchgeführt. Die verwendeten Kräfte wurden anhand der Kölner Stahlbautabellen ausgewählt. Dabei wurde die halbe Beanspruchbarkeit für die Kraft für das KHP193,7x10, ein Fünftel der Beanspruchbarkeit für KHP139,7x10 und das halbe maximale Moment für KHP139,7x10 gewählt.

Im Weiteren wurden folgende Randbedingungen gewählt:

- Antwortbeschränkung Spannung: 415 MPa
- Fertigungsbeschränkung Strukturgröße: 5 mm
- Antwortbeschränkung Masse: 10 % - 90 % von der Masse des Designraums (in 10 % Schritten)
- Designraum T-Stoß: x=300 mm; y=200 mm; z=350 mm
- Designraum 30° Schrägstoß: x=375 mm; y=200 mm; z=375 mm
- Designraum 45° Schrägstoß: x=400 mm; y=200 mm; z=350 mm
- Designraum K-Knoten: x=365 mm; y=200 mm; z=530 mm

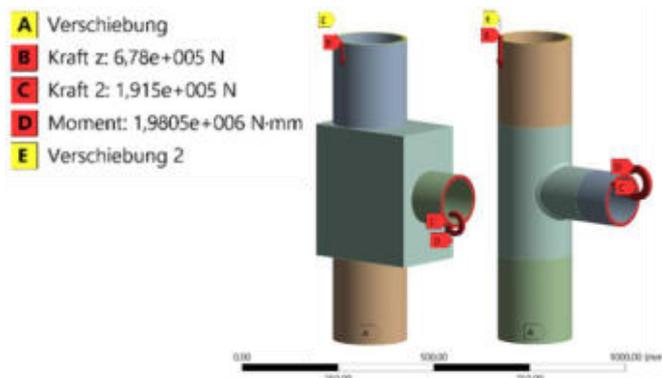


Abbildung 56: Randbedingungen T-Stoß

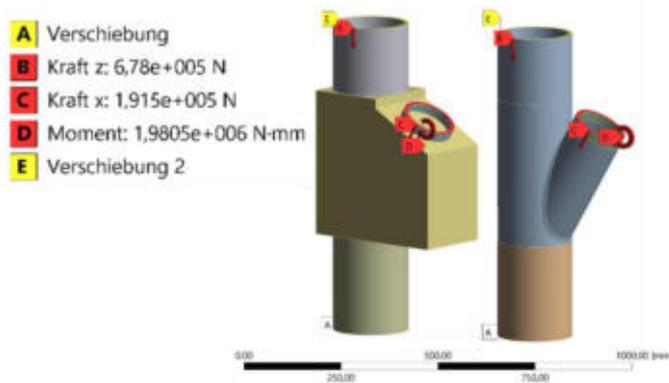


Abbildung 57: Randbedingungen 30° Schrägstoß

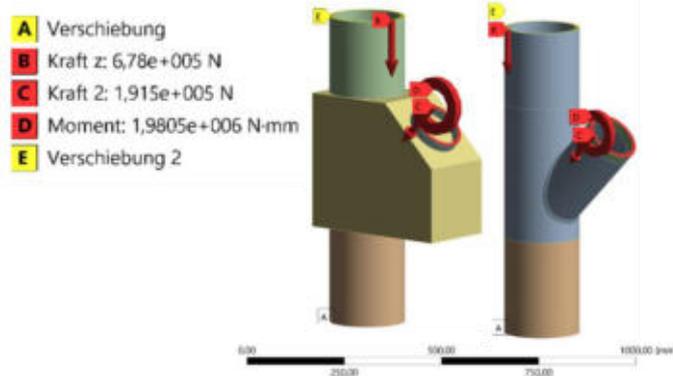


Abbildung 58: Randbedingungen 45° Schrägstoß

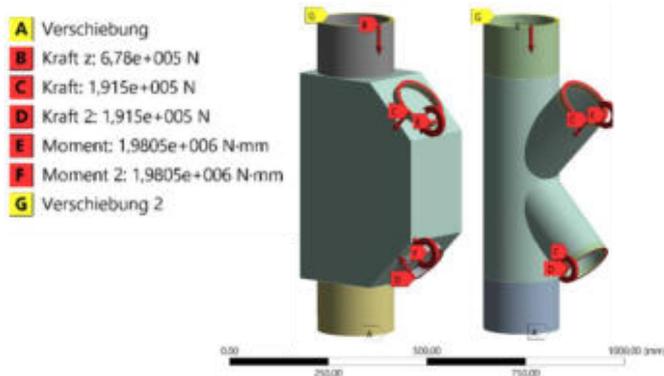


Abbildung 59: Randbedingungen K-Knoten

Ergebnisse der Topologieoptimierung

Der Verlauf der berechneten von Mises-Vergleichsspannung in Abbildung 60 bis Abbildung 63 zeigt deutlich, dass die im Bauteil herrschenden Spannungen durch eine Änderung der Topologie auch bei deutlich höheren Lasten als in Abschnitt 5.1.2 verringert werden können. Dabei ist zu erkennen, dass auch hier nur die topologieoptimierten Bauteile mit 10% Restmasse eine geringere Masse aufweisen, als der ursprüngliche Knoten. Der 45° Schrägstoß bildet hier eine Ausnahme, dort ist auch bei 10% Restmasse noch eine größere Masse vorhanden, als bei ursprünglichen Schrägstoß.

Der T-Stoß und der 45°-Schrägstoß konnten mithilfe der Topologieoptimierung bei einer Restmasse 10% zu geringeren maximalen Spannungen bei einer geringeren Masse als der Originalknoten optimiert werden. Dabei lagen die Spannungen bei diesen Knoten unterhalb von 460 MPa, der Streckgrenze des Schweißzusatzwerkstoffs. Für den K-Knoten und den 30°-Schrägstoß konnten nur bis 20% Masserestriktion von Mises-Spannungen unterhalb von 460 MPa erhalten werden. Die beiden Bauteile mit 10% Masserestriktion weisen deutliche

Spannungsspitzen auf, welche durch zu geringe Querschnitte hervorgerufen werden können. Insgesamt zeigt sich außerdem, die optimierten Knoten eine homogenere Spannungsverteilung aufweisen.

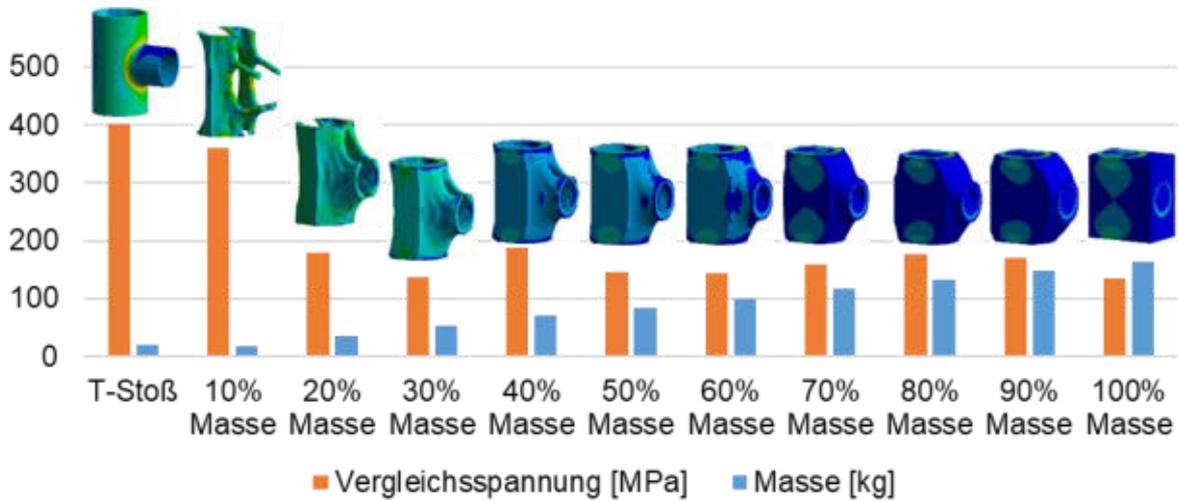


Abbildung 60: T-Stoß: von Mises-Vergleichsspannung in Relation zum Restmasseanteil nach der Topologieoptimierung

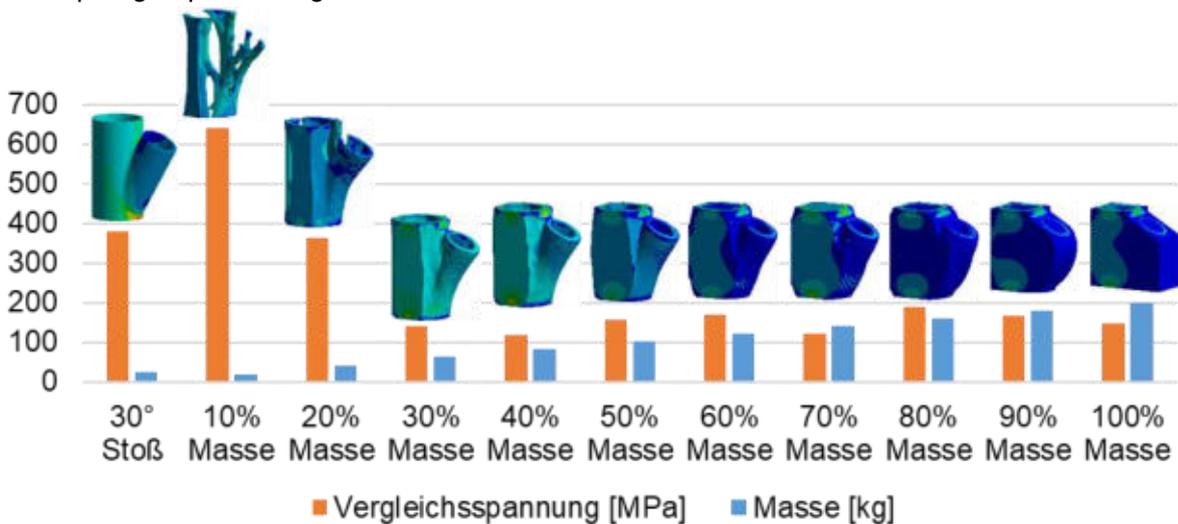


Abbildung 61: 30° Schrägstoß: von Mises-Vergleichsspannung in Relation zum Restmasseanteil nach der Topologieoptimierung

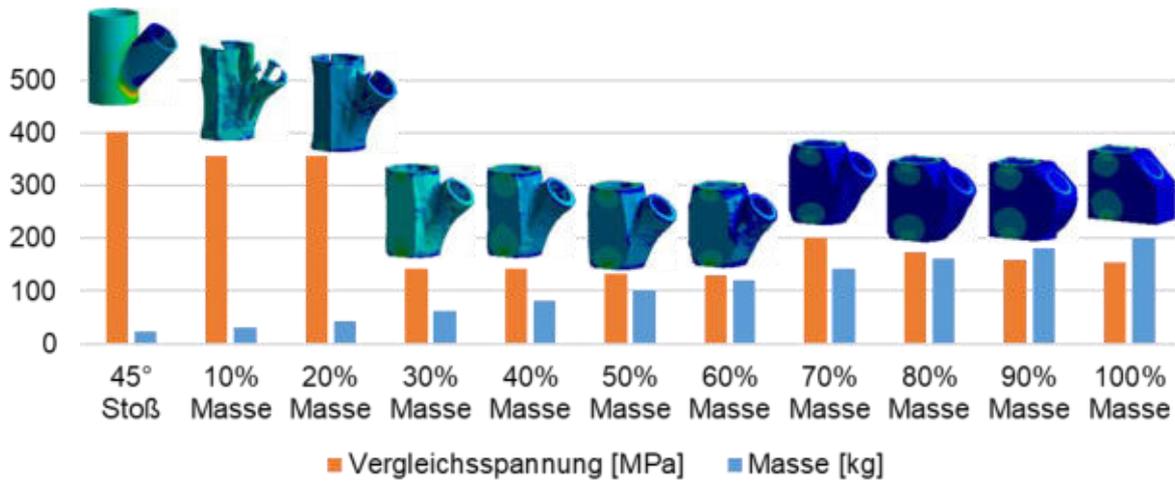


Abbildung 62: 45° Schrägstoß: von Mises-Vergleichsspannung in Relation zum Restmasseanteil nach der Topologieoptimierung

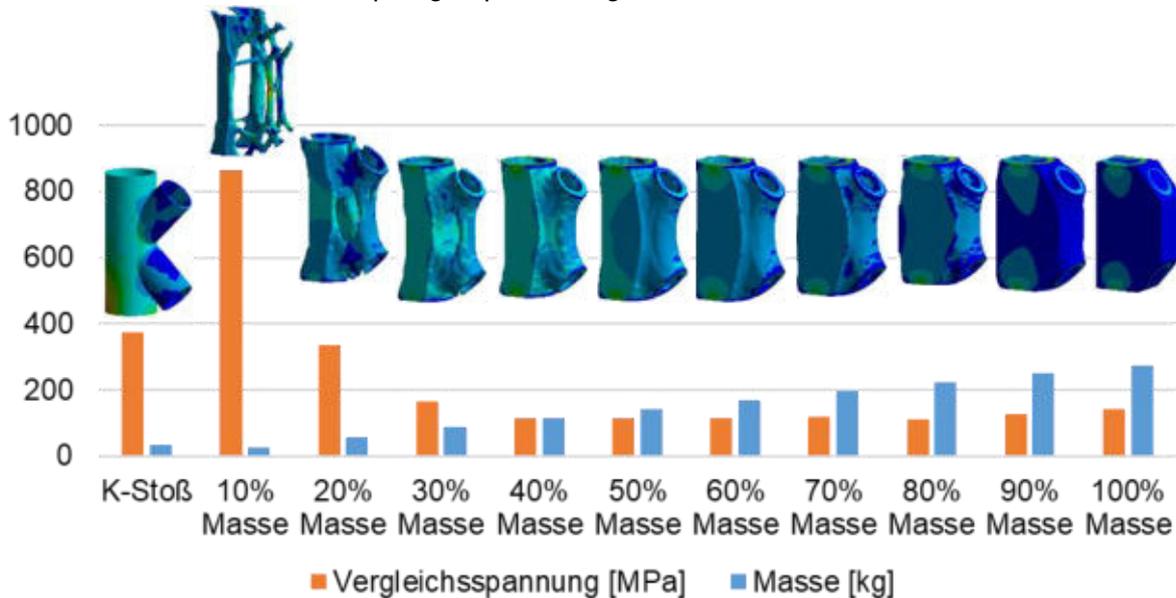


Abbildung 63: K-Knoten: von Mises-Vergleichsspannung in Relation zum Restmasseanteil nach der Topologieoptimierung

5.2 Formoptimierung

Formoptimierung bedeutet Modifikation der Oberfläche eines Bauteils unter Beibehaltung der Bauteiltopologie. Das Ziel der Formoptimierung im Rahmen ist die Minimierung von Spannungsschwankungen im Bauteil. Bei der Verformung von Bauteilen treten die höchsten Spannungen an der Bauteiloberfläche auf und dort meist an Einbuchtungen in Form der Kerbspannungen. Damit beschränken sich die Veränderungen des Bauteils durch die Formoptimierung automatisch auf die Bauteiloberfläche. Am Beispiel des nicht optimierten T-Stoßes gezeigt werden, wie Übergänge durch Fasen bzw. einen Radius Spannungsspitzen reduziert werden können. In Abbildung 64 und Abbildung 65 zeigt sich, dass eine 45° Fase bei einer Breite von 32 mm die Vergleichsspannung um ca. 22% senkt, ein Radius gleicher Größe reduziert die Spannung um ca. 23%. Die Vergleichsdehnung (Abbildung 66) zeigt ein ähnliches Verhalten. Allerdings ist die Gesamtverformung an einem Radius größer als an einer 45° Fase, wie in Abbildung 67 zu erkennen ist. Hierbei können zwei Mechanismen eine Rolle

spielen, zum einen wird die kann die geringere Spannung aus dem Hinzufügen von Material resultieren, zum kann auch die Winkeländerung und damit die Änderung des Kraftflusses zur Reduktion der Spannung führen. In Abbildung 68 zeigt sich in Verbindung mit Abbildung 65, dass das zusätzliche Material nur geringfügig zur Spannungsreduktion beiträgt, da die 32 mm Fase und der 32 mm Radius ähnliche Spannungen aufweisen, aber der angefügte Radius eine deutlich geringere Masse aufweist.

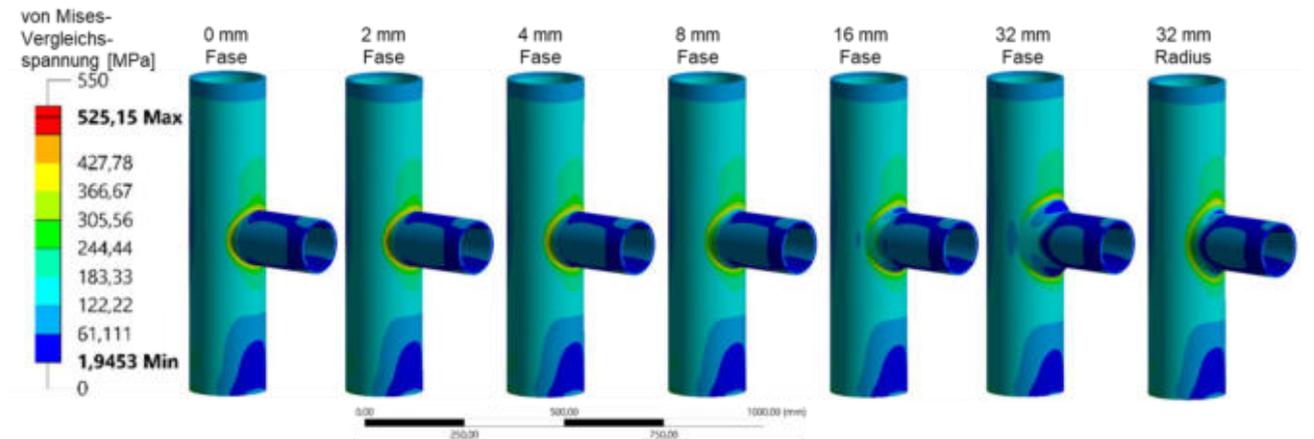


Abbildung 64: von Mises-Vergleichsspannung Formoptimierung

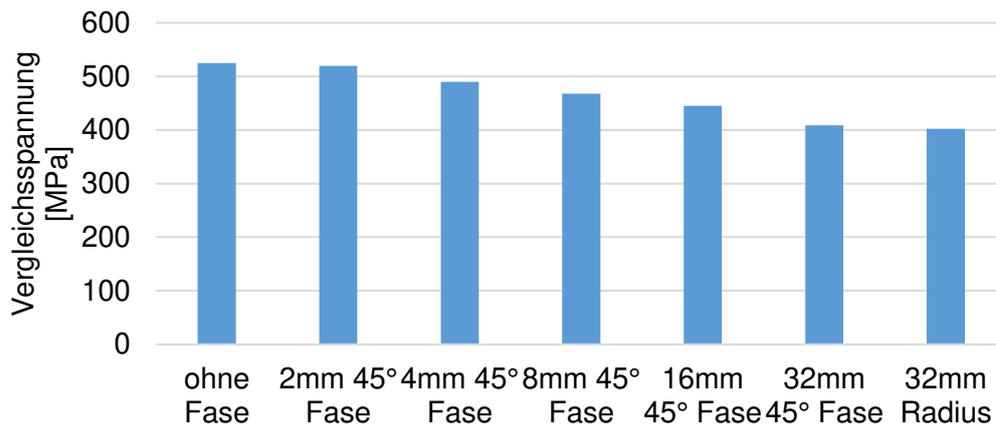


Abbildung 65: von Mises-Vergleichsspannung Formoptimierung

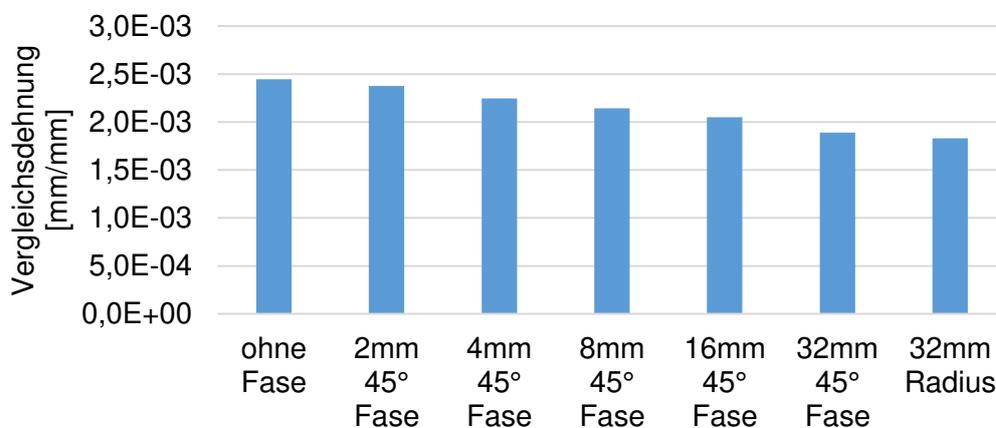


Abbildung 66: Vergleichsdehnung Formoptimierung

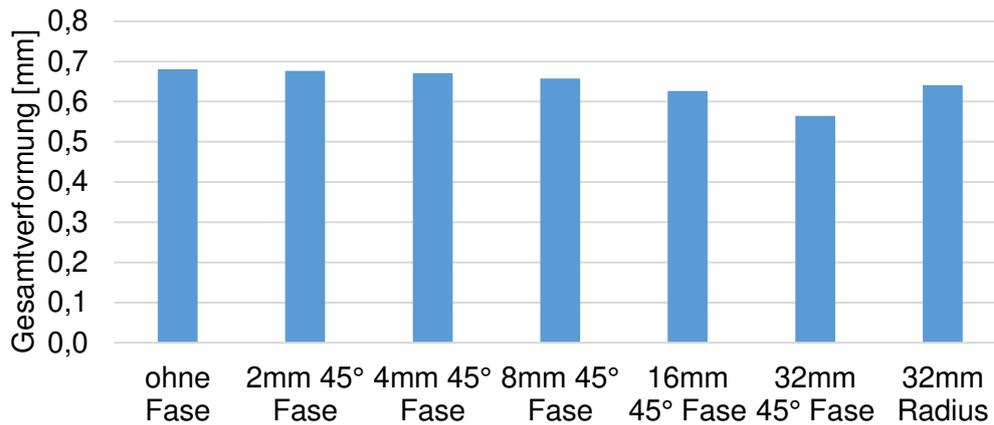


Abbildung 67: Gesamtverformung Formoptimierung

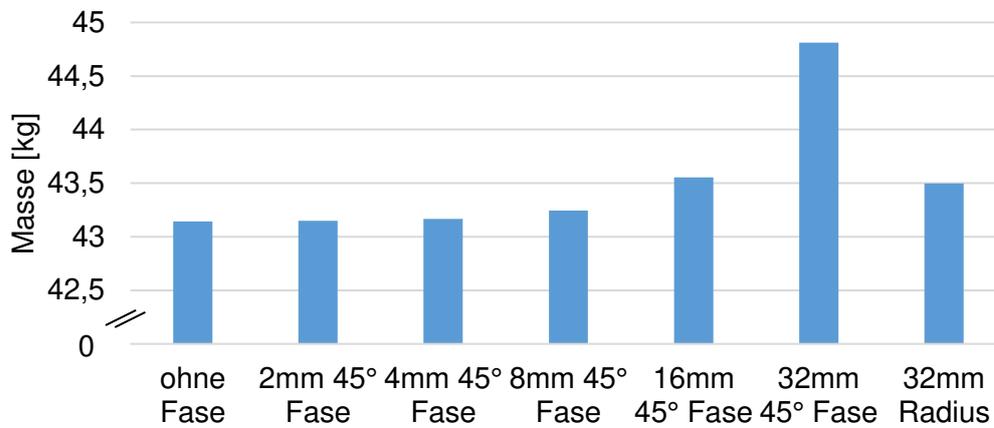


Abbildung 68: Masse Formoptimierung

5.3 Materialoptimierung

Die Materialoptimierung im Kontext der Optimierung unter den Aspekten der Bionik bedeutet, dass die Möglichkeiten der Topologieoptimierung unter Veränderung der materialspezifischen Randbedingungen angepasst wird. Dabei können für die Auslegung der Knotenstrukturen höherfeste Stähle verwendet werden, wodurch sich die maximal zulässigen Spannungen für das Bauteil erhöhen. In diesem Forschungsvorhaben wird der Vergleich unter Verwendung der Zielfunktion „Masseminimierung“ anhand des K-Knotens für die hochfesten Feinkornbaustahlschweißzusatzwerkstoffe DIN EN ISO 16834 Mn3Ni1Mo (äquivalent zu einem S690) und DIN EN ISO 16834 Mn4Ni2CrMo (äquivalent zu einem S890) im Vergleich zum Werkstoff G4Si1 durchgeführt.

Dabei zeigte sich, dass bei der Optimierung auch der minimalen Masse für den Schweißzusatz G4Si1 als einziges eine herstellbare Struktur berechnet werden konnte (Abbildung 69 links). Die Knotengeometrien der Berechnung für die anderen beiden Schweißzusatzwerkstoffe ergab Strukturen, welche keine Verbindung mehr zwischen den Diagonalstäben und dem Gurt aufwiesen (Abbildung 69 Mitte und rechts). Daher ist es offenbar nicht zielführend nur die maximal zulässige Spannung anzupassen.

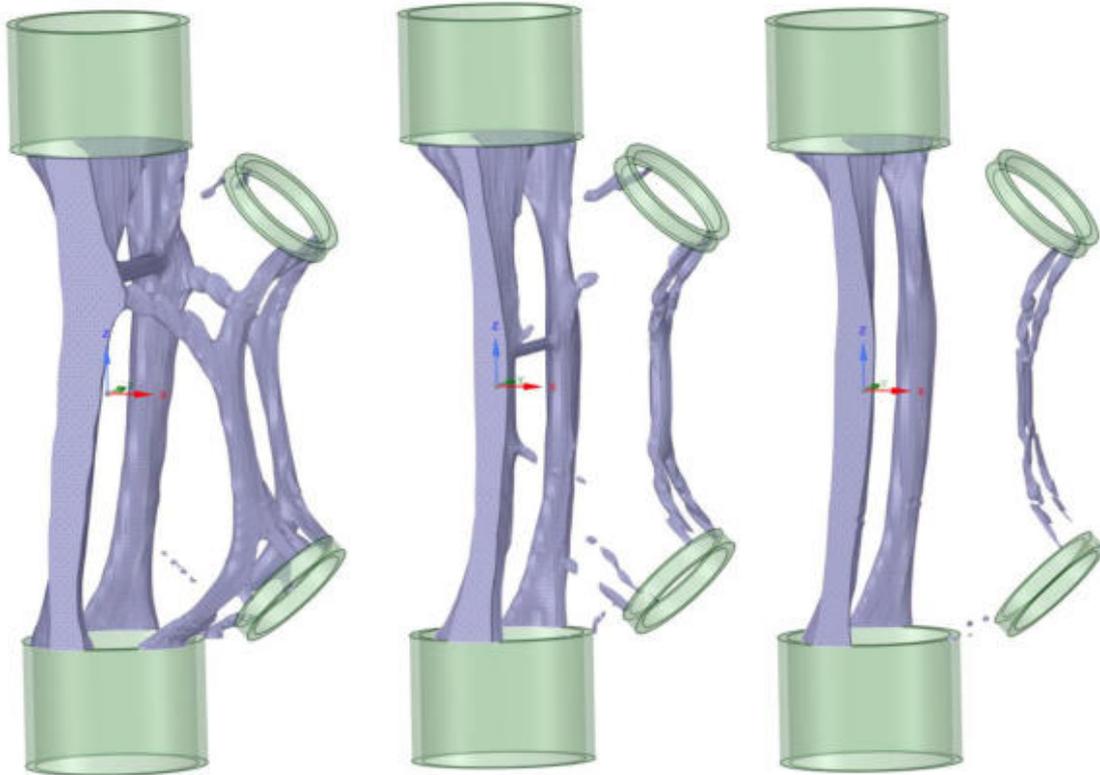


Abbildung 69: minimale Masse (links: G4Si1; Mitte: Mn3Ni1Mo; rechts: Mn4Ni2CrMo)

Grundlegend ist es aber auch möglich die bereits erstellten Ergebnisse der Optimierung für den G4Si1 zu verwenden und das Material auf eine höherfeste alternative zu wechseln, falls die mechanische Analyse eine zu hohe von-Mises-Vergleichsspannung bei dem gegebenen Design ergibt. Das wäre eine Möglichkeit um das in Abschnitt 5.1.3 erstellte Design mit 10% Masserestriktion für den 30° Schrägstoß und den K-Knoten in der Praxis zu verwenden. Dazu müsste ein Schweißzusatzwerkstoff mit einer Streckgrenze von 690 MPa für den 30° Schrägstoß und mit 890 MPa für den K-Knoten gewählt werden.

6 Herstellung additiv gefertigter 3D-Knotenlösungen mittels Lichtbogentechnik

6.1 Prozessparameter

Die Wahl des Zusatzwerkstoffs für die additive Fertigung von Knotenlösungen fiel nach der Charakterisierung der Zusatzwerkstoffe (Abschnitt 3.2) und der experimentellen Analyse der mechanischen Eigenschaften (Abschnitt 7.1) auf den Werkstoff G4Si1. Diese Wahl wurde aufgrund folgender Faktoren getroffen:

- ähnliche resultierende mechanische Eigenschaften der beiden Werkstoffe
- geringere Richtungsabhängigkeit der mechanischen Kennwerte
- Standardweißzusatzwerkstoff im Bauwesen für das Verbindungsschweißen
- Geringere Materialkosten

Es wurden zwei unterschiedliche nicht topologieoptimierte Knotenlösungen aus G4Si1 hergestellt, um die in Abschnitt 3 ermittelten Prozessparameter anhand von Rohr- bzw. Knotengeometrien testen zu können. Einer davon entspricht dem im Raumtragwerk der Firma RSB verwendeten Obergurtnoten, welcher in Abbildung 70 zu sehen ist. Dieser ist zu Anschauungs- und Testzwecken herunterskaliert worden. Die Wandstärke wurde für diesen Versuch auf eine Schweißlagenbreite (ca. 6,5 mm) beschränkt. Die Durchmesser der Kreishohlprofile wurden auf ca. die Hälfte des Nenndurchmesser skaliert. Der erste Demonstrator wurde in mehreren Schritten hergestellt. Zusätzlich wurde ein zweiter Demonstrator (Abbildung 71) mit zueinander verschnittenen Kreishohlprofilen auf einem fertigen KHP mit 100 mm Durchmesser. Dieser zweite Knotenpunkt wurde in einem einzigen Schritt aufgebaut. Die hergestellten 3D Knotenlösungen zeigen, dass der Schweißparameter mit 4 kJ/cm Streckenenergie nicht nur die besten mechanisch-technologischen Eigenschaften bietet, sondern sich auch gut eignet komplexe dreidimensionale Strukturen herzustellen.



Abbildung 70: additiv hergestellter Obergurtnoten mit Vertikal- und Diagonalstäben



Abbildung 71: additiv hergestellte Knotengeometrie aus gegeneinander verschnittenen Rohren

6.2 Zerstörungsfreie Prüfung

Weiterhin wurden drei Kreishohlprofile (Abbildung 72) additiv hergestellt, um diese mithilfe einer dreidimensionalen Vermessung auf Imperfektionen während des Herstellprozesses hin zu überprüfen.

Dabei zeigte sich für die ermittelten Fitting-Zylinder nur eine sehr geringe Formabweichung von $< \pm 1$ mm. Diese Abweichung befindet sich in der gleichen Größenordnung wie die prozessbedingte Welligkeit der additiv gefertigten Rohrgeometrie, welche bei einer etwaigen Nachbearbeitung einer Rohrgeometrie bzw. eines Rohrknottes mit entfernt werden würde. Die größte Abweichung zeigt sich nach einer Kollision des Schweißbrenners mit dem Bauteil, welche durch einen fehlerhaften Vektor beim Slicing entstanden ist. Da diese Imperfektion auch eine Abweichung $< \pm 1$ mm aufweist ist diese als unkritisch zu erachten und zeigt, dass der Schweißprozess sehr stabil ist. (Abbildung 73)

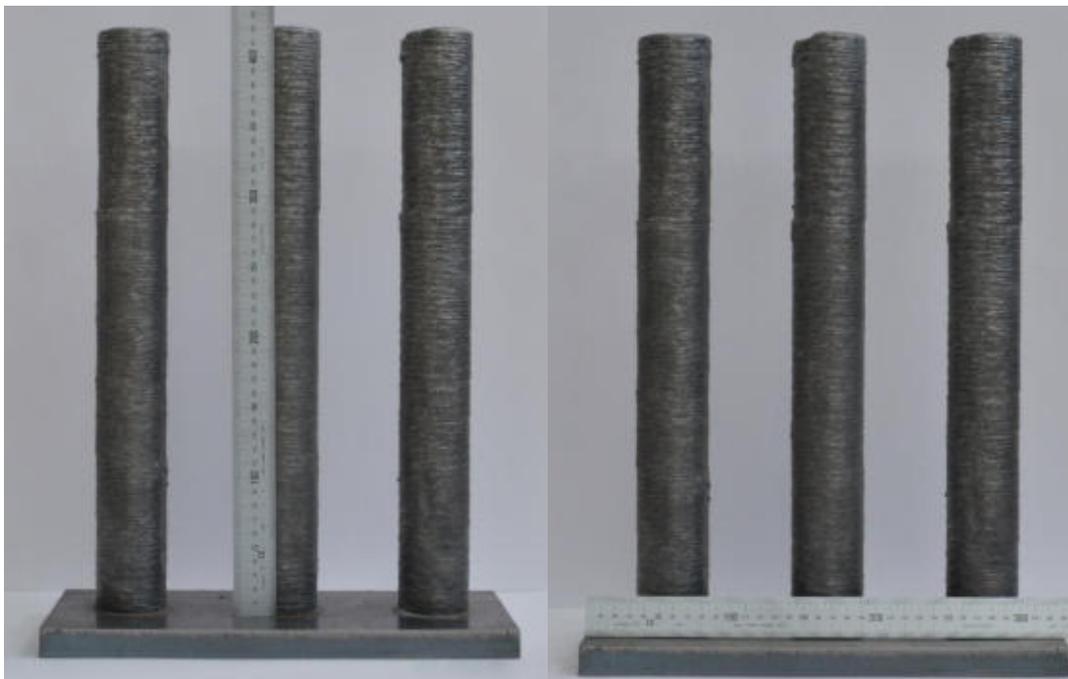


Abbildung 72: additiv hergestellte Kreishohlprofile

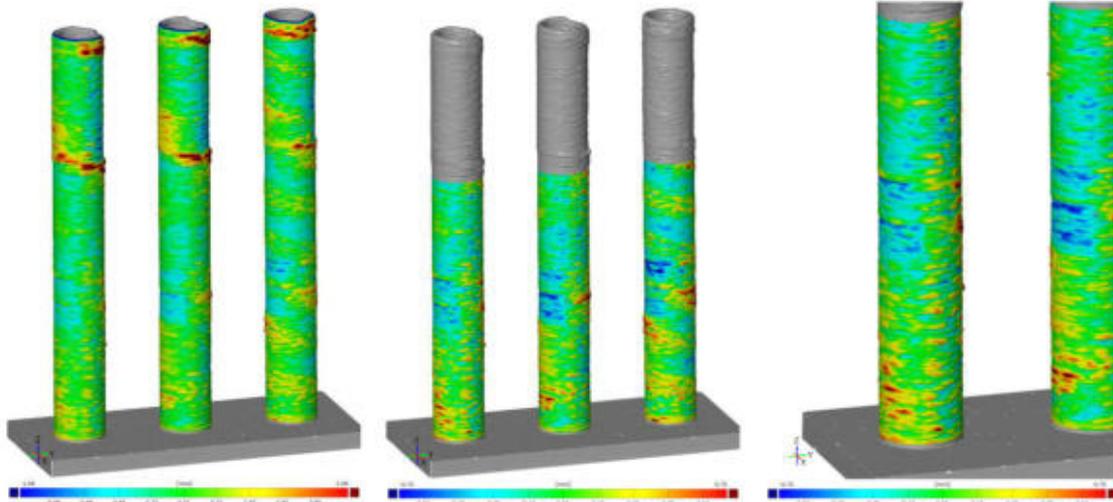


Abbildung 73: 3D-Scan und Abweichung zu Fittingzylindern

In Abbildung 74 ist die Abweichung der realen, additiv gefertigten Geometrie zu verwendeten CAD-Datei aufgezeigt. Die Abweichung der Zylindermantelfläche liegt dabei zwischen -0,75 mm und -2,25 mm, das bedeuten, dass der Durchmesser der hergestellten Rohrgeometrie etwas kleiner als der geplante ist. Daher ist ein größeres Aufmaß notwendig um einen Zylinder mit dem gewünschten Durchmesser herzustellen. Die größte Abweisung in Aufbaurichtung beträgt an der zuletzt hergestellten Schweißnaht zwischen 0 mm und 2,5 mm. Damit ist das Rohr etwas länger als im CAD geplant, wodurch eine Endbearbeitung der Stirnfläche erleichtert wird, das die geplante Länge überschritten wurde. Die Aufnahmen mittels des GOM Atos 3D-Scan-Systems zeigen somit, dass es möglich ist Bauteile mit relativ geringen Formabweichungen herzustellen, welche sich zudem innerhalb der Prozesstoleranzen bezüglich der Welligkeit befinden.

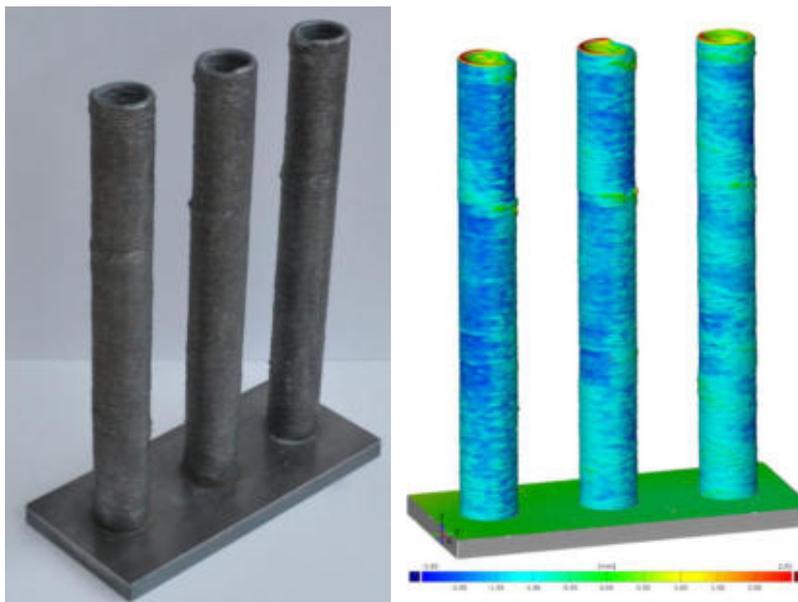


Abbildung 74: additiv hergestellte Kreishohlprofile (links: nach CAD Hergestelltes Bauteil; rechts: 3D-Scan und Fitting auf CAD-Daten)

7 Experimentelle Analysen

7.1 Mechanische Untersuchungen

Die Festigkeiten als bestimmende Kenngrößen eines Werkstoffes bzw. Bauteils sind eine entscheidende Grundlage für den späteren Einsatz eines daraus gefertigten Produktes. Die Werkstoffauswahl wurde ebenso wie die vorgesehenen Untersuchungsmethoden für die additiv gefertigten Proben in den vorherigen Abschnitten beschrieben.

Die mit Hilfe des additiven Fertigungsverfahrens mittels MSG-Verfahren generierten Proben erfordern eine Beurteilung der mechanischen Eigenschaften, um mögliche Einflüsse, die aus der Fertigung resultieren, auf die späteren Werkstoff- und damit Produkteigenschaften einordnen und einstellen zu können.

Nachdem in den Vorversuchen die prinzipiell grundsätzlichen Arbeitsparameter für die additive Fertigung mittels des MSG-Verfahrens hergeleitet und festgelegt wurden, erfolgte mit den gewonnenen Erkenntnissen die Durchführung der Hauptversuche.

Im Folgenden werden die für die Fertigung festgelegten Prozessgrößen den Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften gegenübergestellt und hinsichtlich möglicher Zusammenhänge diskutiert.

7.1.1 Zugversuch

Der Zugversuch gibt Auskunft über die Streckgrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung von Werkstoffen und zählt zu den zerstörenden Prüfverfahren. Die ermittelten Kennwerte sind unabdingbar für die Vergleichbarkeit verschiedener Werkstoffe untereinander.

Während des Zugversuchs werden standardisierte Proben mit einer definierten Querschnittsfläche bis zum Bruch gedehnt. Der Weg wird dabei gleichmäßig, stoßfrei und mit geringer Geschwindigkeit gesteigert. Dabei wird die Kraft F an der Probe und die Längenänderung ΔL in der Messstrecke der Probe kontinuierlich gemessen. Aus der Kraft F und der Querschnittsfläche der undeformierten Probe S_0 wird die Nennspannung σ_n berechnet:

$$\sigma_n = \frac{F}{S_0} \quad (2)$$

Aus der Längenänderung ΔL wird die Totaldehnung ε_t mit Bezug auf die Ausgangslänge L_0 bestimmt:

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3)$$

Das Ergebnis ist ein Nennspannungs-/ Totaldehnungs-Diagramm, aus dem die technischen Werkstoffkenngrößen abgelesen werden können (vgl. Abbildung 75).

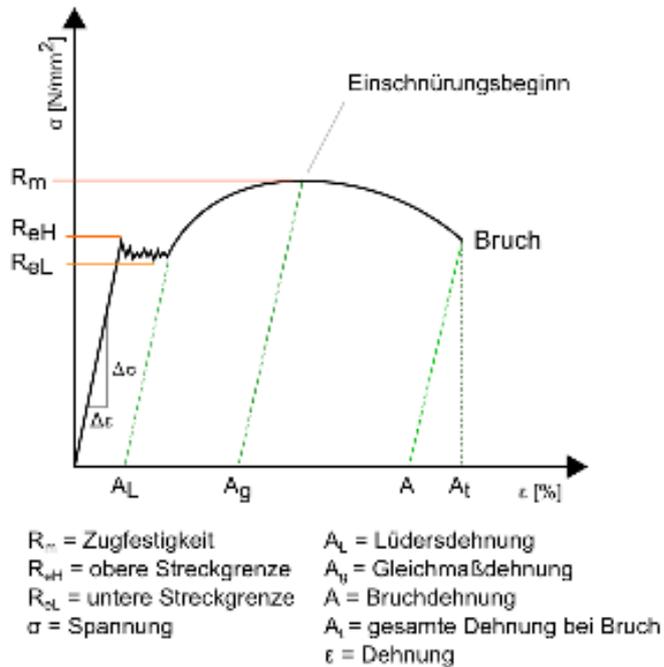


Abbildung 75: Spannungs-Dehnungs-Diagramm [MAS]

Um diese Werkstoffkennwerte für die in den Hauptversuchen generierten Wandstrukturen zu erhalten, müssen aus diesen standardisierten Zugproben herausgearbeitet werden. Hierfür bedarf es einer Festlegung der Probengeometrie und deren Abmessungen nach DIN 50125. Aufgrund der Geometrie der Wandstruktur wurde nach DIN 50125 die Probengeometrie der Form E gewählt. Um die Anordnung der Zugproben innerhalb der Wandstruktur möglichst effizient zu gestalten, wurden die Abmessungen, wie in Tabelle 16 sichtbar, nach Berechnungsvorschriften der DIN 50125 festgelegt.

Tabelle 16: Abmessungen Zugproben in mm

	a_0	b_0	L_0	B min.	r min.	h min.	L_c min.	L_t min.
Zugprobe (Beispiel) DIN 50125 – E 3 x 8 x 30	3	8	30	12	12	26	38	104
Verwendete Zugproben	3	5	21,9	9	13	20	28	81,86

Die Herstellung der Zugproben erfolgt durch Abräsen und anschließendem Schleifen der Wandstruktur bis auf die gewünschte Probendicke a_0 . Anschließend wird die Probengeometrie mittels Drahterosion herausgearbeitet. Hierfür kommt das Gerät Robofil 240 (2,5D) der Firma Charmilles zum Einsatz. In Abbildung 22 (links) ist die Lage der Zugproben innerhalb der Wandstruktur dargestellt. Es werden sowohl quer (horizontal) als auch längs (vertikal) angeordnete Zugproben der Form E entnommen.

Der Zugversuch wird im Rahmen dieses Forschungsvorhabens mit einer Universalprüfmaschine der Firma Zwick 1455 mit einer maximalen Zug- und Druckkraft von 20 kN durchgeführt (Anhang 10). Dafür werden die angefertigten Zugproben an ihren Enden

in die Prüfmaschine eingespannt, anschließend belastet und bis zum Bruch gedehnt. Die dabei entstandenen Prüfberichte sind in Anhang 26 bis Anhang 41 enthalten.

Auswertung der Zugfestigkeit und Streckgrenze

Abgeleitet von der Aufgabenstellung zur Betrachtung der mechanischen Eigenschaften, wurden die längs und quer zur Aufbaurichtung generierten Proben unter dem Gesichtspunkt möglicher Abhängigkeiten betrachtet.

Die folgende Abbildung 76 zeigt die Zugfestigkeit und die Streckgrenze für G4Si1 in Abhängigkeit der Probenorientierung bei einer Probenanzahl von $n=3$. Dort zeigen sich nur sehr geringe Abweichungen der Zugfestigkeit und Streckgrenze für unterschiedliche Probenorientierungen. Die Einzelbetrachtung der jeweiligen Prüfergebnisse für die Zugfestigkeit (Anhang 11 und Anhang 18) lassen im Hinblick auf eine Anisotropie bei den längs und quer zur Aufbaurichtung generierten Proben keine signifikanten Abweichungen erkennen. Insofern lassen die vorliegenden Untersuchungsergebnisse keinen Rückschluss auf unterschiedliche mechanische Eigenschaften in den betrachteten unterschiedlichen Richtungen zu.

Der RD100 zeigt für die Zugfestigkeit ein ähnliches Verhalten, wie der G4Si1, die Streckgrenze weicht in vertikaler und horizontaler Richtung stärker voneinander ab und zeigt somit eine höhere Richtungsabhängigkeit beim Strukturaufbau als der G4Si1.

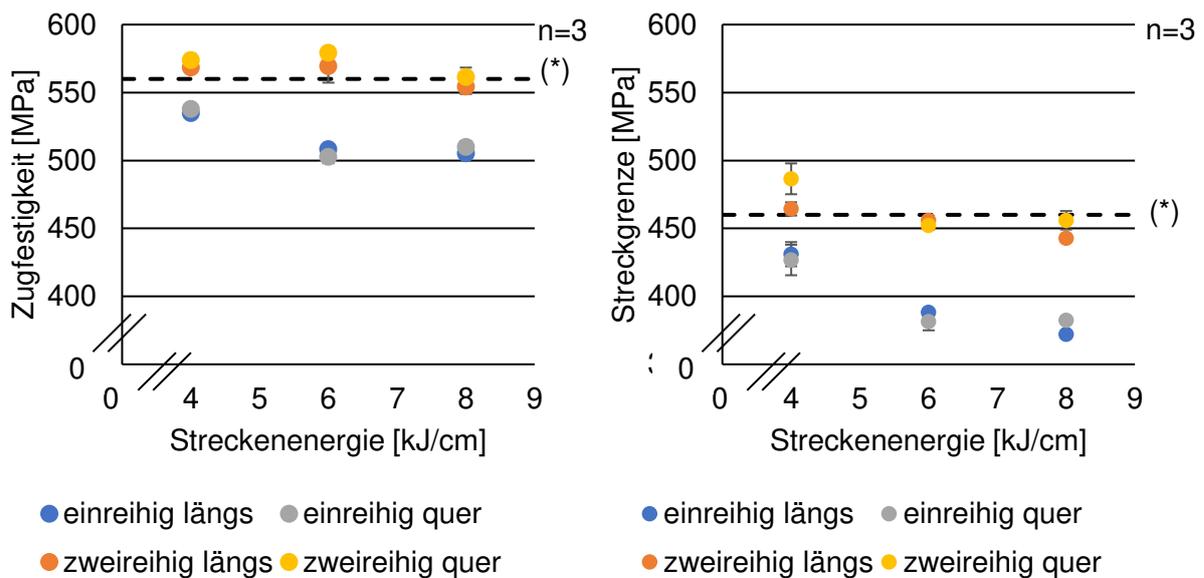


Abbildung 76: Zugversuch: mechanische Eigenschaften G4Si1 in Abhängigkeit der Probenorientierung (*) Herstellerangabe Schweißgut

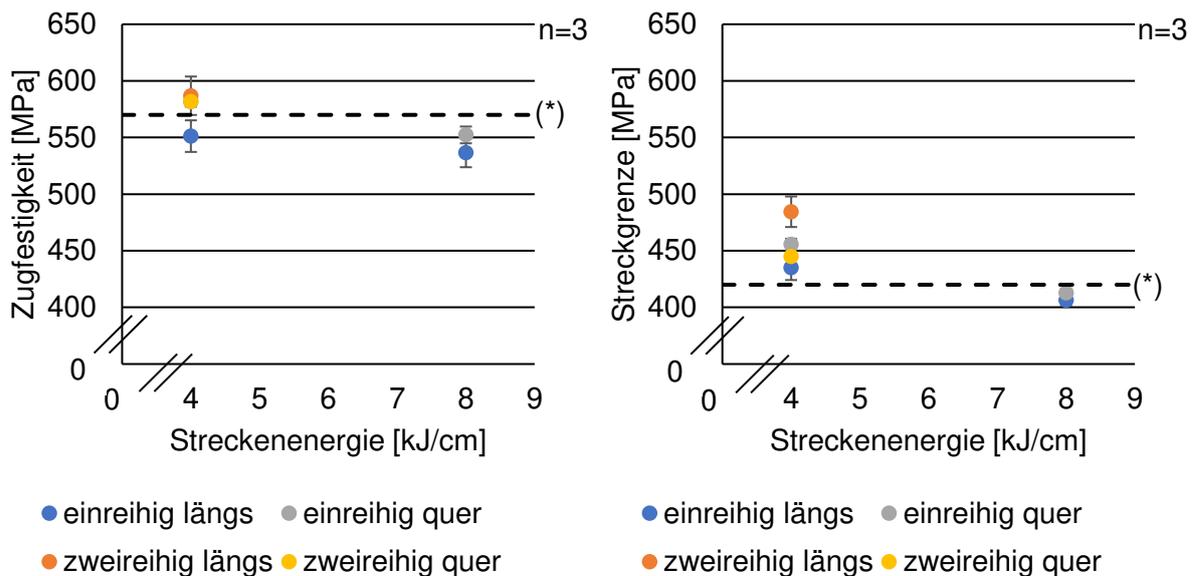


Abbildung 77: Zugversuch: mechanische Eigenschaften RD100 in Abhängigkeit der Probenorientierung (*) Herstellerangabe Schweißgut

Weiterhin zeigt sich, dass eine geringere Streckenenergie und eine höhere Reihenanzahl zu besseren mechanischen Eigenschaften, also einer höheren Festigkeit führen. Dies ist auf die geringeren $t_{8/5}$ -Zeiten für geringere Streckenenergien und eine höhere Reihenanzahl zurückzuführen. Dies ist in Abbildung 78 deutlich anhand einer Wandstärke von 9 mm für G4Si1 bzw. 10 mm für RD100 zu erkennen. Ein Strukturaufbau zeigt für gleiche Wandstärken bessere mechanisch-technologische Eigenschaften, wenn eine geringe Streckenenergie bei einem mehrreihigen Aufbau genutzt wird.

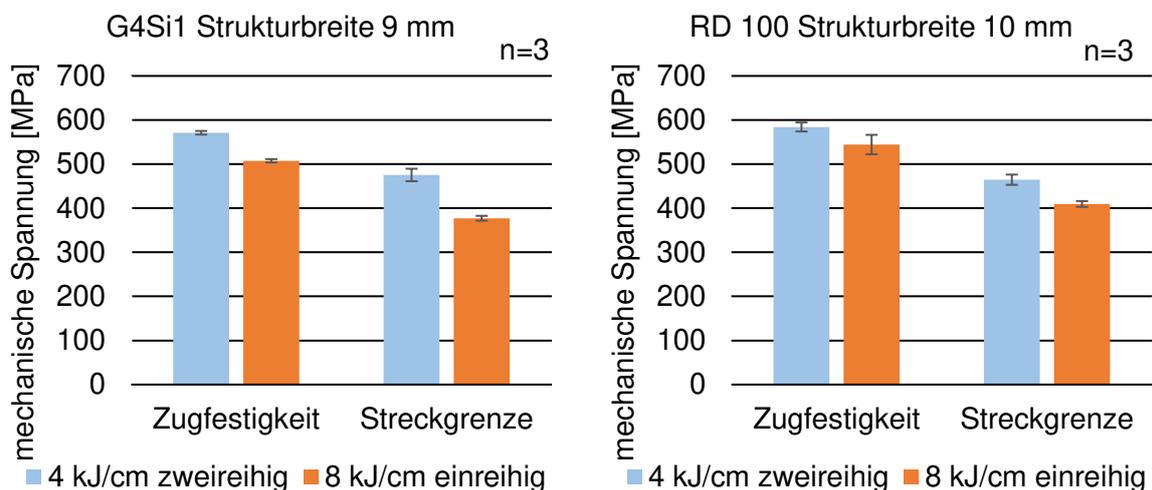


Abbildung 78: Zugversuch: mechanische Eigenschaften Abhängigkeit der Wandstärke (links: G4Si1; rechts: RD100)

Die Betrachtung der Mittelwerte für die Streckgrenze in Abbildung 5.7 für einreihig generierte Proben lässt zunächst eine Abweichung zwischen den Ergebnissen bei 4 kJ/cm gegenüber den Ergebnissen bei 6 kJ/cm und 8 kJ/cm erkennen. Mit 428,9 N/mm² für 4 kJ/cm ergibt sich ein prozentualer Unterschied von ca. 11,4 % bei den Mittelwerten gegenüber dem Wert von

384,9 N/mm² für 6 kJ/cm Streckenenergie. Diese Tendenz ließe vermuten, dass die Einstellung von 4 kJ/cm Streckenenergie bei den einreihig generierten Proben eine bessere Elastizität hervorbrachte. Hier ergeben sich u.a. Ansätze für spätere Untersuchungen.

Aus der Abbildung 5.8 sind die Streckgrenzen in Abhängigkeit von der eingebrachten Streckenenergie für zweireihig generierte Proben zu entnehmen. Dabei zeigen sich ähnliche Tendenzen hinsichtlich der Streckgrenzen bei 4 kJ/cm und 6 kJ/cm Streckenenergie. Die Mittelwerte der Streckgrenze bei 4 kJ/cm Streckenenergie weisen in diesem Falle mit 475,4 N/mm² um ca. 4,7 % höhere Festigkeiten auf, als dies bei den 6 kJ/cm Streckenenergie der Fall ist. Betrachtet man die Streckgrenzen für die Streckenenergie von 6 kJ/cm und 8 kJ/cm sowohl bei den einreihig als auch bei den zweireihig generierten Proben, so liegen diese jeweils in ähnlichen Größenordnungen. Insofern lassen sich zumindest aus den Eigenschaften der Proben für 6 kJ/cm und 8 kJ/cm keine Abhängigkeiten auf die mechanischen Eigenschaften herleiten.

Auswertung der Bruchdehnung

In Abbildung 79 und Abbildung 80 sind die Bruchdehnungen der Schweißzusatzwerkstoffe G4Si1 und RD100 für die einreihig und zweireihig generierten Proben in Abhängigkeit von der eingebrachten Streckenenergie dargestellt.

Die Betrachtung auch dieser Ergebnisse lässt infolge der vorgefundenen gleichen Größenordnungen, mit Blick auf die Standardabweichungen, keine signifikanten Zusammenhänge offenbaren. Alle Werte der Bruchdehnung liegen deutlich über den im Eurocode 3 verlangten Wert von mindestens 15%. [DIN10a]

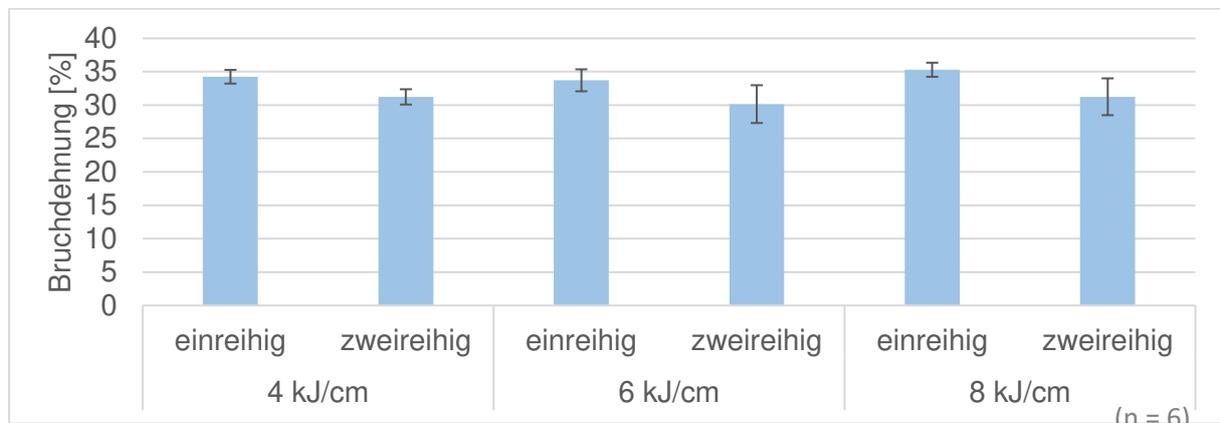


Abbildung 79: Bruchdehnung G4Si1

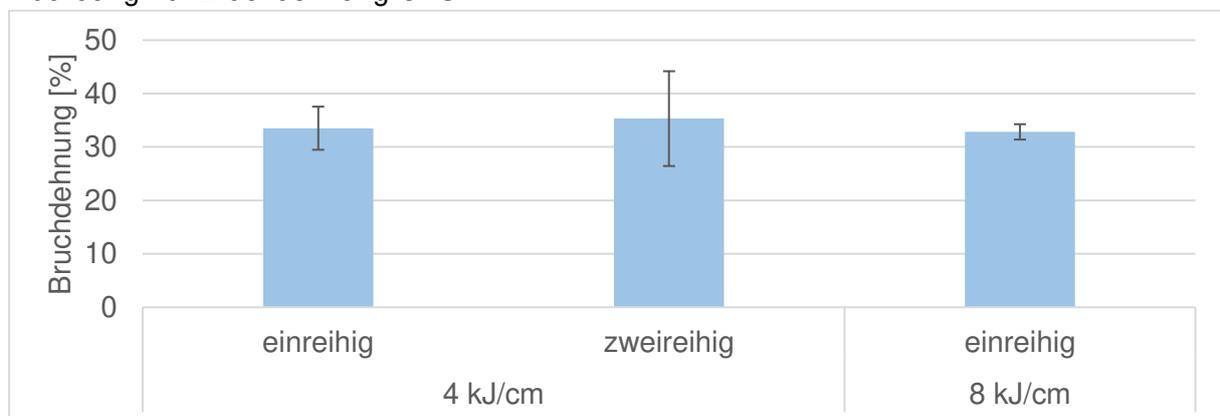


Abbildung 80: Bruchdehnung RD100

7.1.2 Kerbschlagbiegeprüfung

b) Kerbschlagbiegeversuch

Der Kerbschlagbiegeversuch gibt Auskunft über die Zähigkeitseigenschaften von Werkstoffen und im Speziellen über die Kerbschlagzähigkeit. Diese stellt ein Maß für die Widerstandsfähigkeit eines Werkstoffs gegen eine schlagartige (dynamische) Belastung dar. Es handelt sich hierbei ebenfalls um ein zerstörendes Prüfverfahren, welches schematisch in Abbildung 81 (rechts) dargestellt wird. Bei dem Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy wird das Verhalten eines länglichen Quaders, der einseitig gekerbt (V- oder U-Kerbe) und temperiert (gekühlt oder erwärmt) ist, bei hoher Verformungsgeschwindigkeit untersucht.

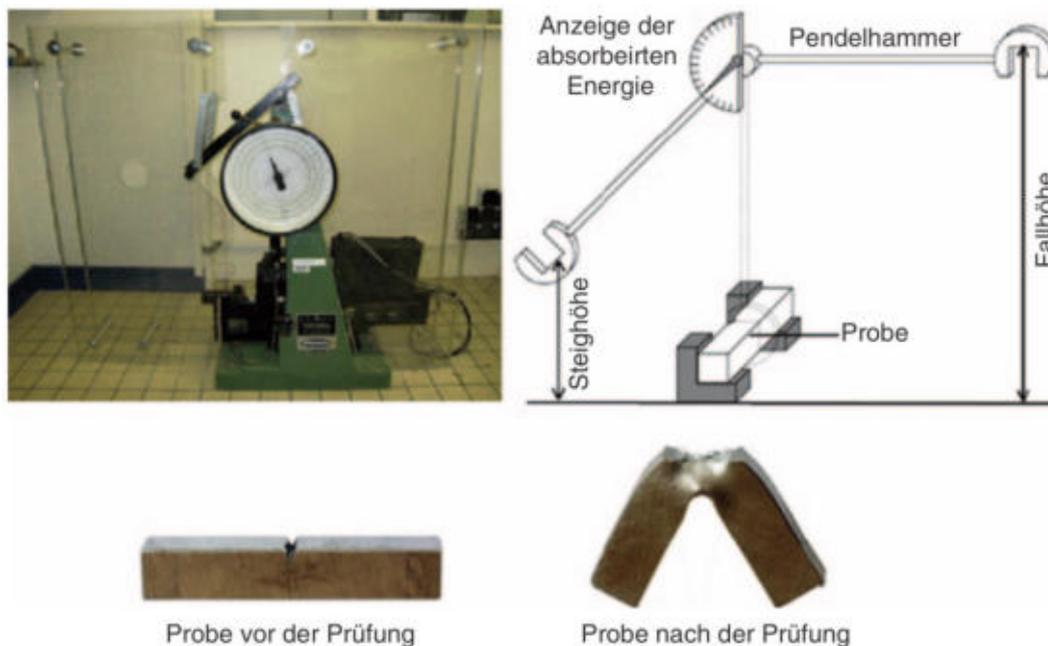


Abbildung 81: Kerbschlagbiegeversuch (Charpy): Maschine, Prinzip, Proben [URB15]

Ein Pendelhammer, mit einer definierten Masse (m), wird bis zu einer gewissen Fallhöhe (h_1) ausgelenkt, anschließend entriegelt und durch die Erdbeschleunigung (g) mit rund $9,81 \text{ m/s}^2$ beschleunigt. Mit einer bestimmten kinetischen Energie trifft der Hammer auf die ungekerbte Rückseite der Probe, diese wird zerschlagen oder durch das Widerlager gezogen. Im Moment des Aufschlagens auf die Probe wird ein Teil der kinetischen Energie des Pendelhammers in der Probe durch Verformungsprozesse absorbiert. Je nach Material und Temperatur der Probe ist der Betrag dieser Energie unterschiedlich. Der Hammer durchschlägt die Probe und schwingt auf der anderen Seite entsprechend der verbleibenden Energie weniger hoch bis auf die Steighöhe (h_2). Durch den Kerbschlagbiegeversuch wird die Kerbschlagarbeit W_{Kerb} für einen bestimmten Werkstoff bei einer bestimmten Temperatur ermittelt.

Die Kerbschlagarbeit setzt sich wie folgt zusammen:

$$W_{\text{Kerb}} = m * g * (h_1 - h_2) \quad (4)$$

Aufgrund der Breite der vorliegenden Wandstrukturen müssen Untermaßproben für den Kerbschlagbiegeversuch verwendet werden. Hierbei ist es wichtig, dass alle Proben Untermaßproben sind, damit sie untereinander verglichen werden können. Für die Kerbform

in den Proben wurde die V-Kerbe ausgewählt. Die Abmessungen der Proben wurden der DIN EN ISO 148-1 entnommen und für alle Proben, wie in Abbildung 82 dargestellt, ausgewählt:

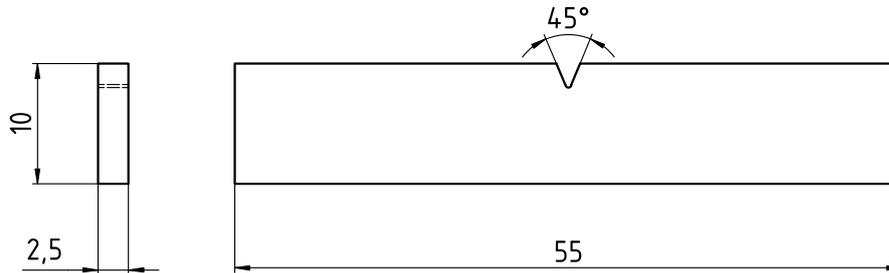


Abbildung 82: Abmessungen Kerbschlagprobe

Damit aus den Wandstrukturen die gewünschten Kerbschlagproben erodiert werden konnten, wurden diese zunächst abgefräst und geschliffen. Anschließend wurde die Geometrie der Kerbschlagproben herausgerodiert. In Abbildung 22 rechts ist die Lage der Proben innerhalb der Wandstruktur dargestellt. Ähnlich wie bei den Zugproben wurden sowohl quer als auch längs angeordnete Proben entnommen. Die längs angeordneten Proben unterscheiden sich in Proben, bei denen die Kerbe zwischen den Schweißlagen liegt und in Proben, bei denen die Kerbe exakt in der Schweißlage liegt.

Der Kerbschlagbiegeversuch wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens mit einem Pendelschlagwerk PSd 300/150 der Firma WPM durchgeführt (Anhang 10). Die gekerbte Probe wurde in das Widerlager eines Pendelschlagwerks eingespannt. Ein ausgelenkter Pendelhammer wurde dann in einer bestimmten Höhe losgelassen und traf im untersten Punkt auf die kerbabgewandte Seite der Probe. Dabei wurde die Probe zerschlagen und ein Teil der kinetischen Energie des Pendelhammers absorbiert. Die Verformungsenergie und die damit erreichte Endhöhe nach dem Durchschlagen der Probe ist abhängig von der Zähigkeit der Probe.

Mit der ermittelten Verformungsenergie lassen sich qualitative Aussagen über das Energieabsorptionsvermögen der Proben treffen. Die Messergebnisse aus dem Kerbschlagbiegeversuch sind in einer Tabelle in Anhang 25 festgehalten.

Auswertung der Kerbschlagbiegeprüfung

Um mögliche Auswirkungen des Schichtenaufbaues im Zuge der additiven Fertigung der Proben mittels MSG-Verfahren auf die Festigkeit zu beurteilen, erfolgte die Bestimmung der Kerbschlagzähigkeit an den längs generierten Proben an verschiedenen Stellen. Dazu wurden die Proben im Zuge der Präparation im Vorfeld der Versuchsdurchführung jeweils in der Lage und zwischen der Lage eingekerbt. Ziel war es, damit eine Aussage in Hinblick auf Homogenität und mechanische Eigenschaften anhand der Kerbschlagzähigkeit zu erhalten. Die Ergebnisse sind in Anhang 13 und Anhang 18 enthalten.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen für G4Si1 ein gleichbleibendes Niveau der Kerbschlagarbeit für alle Proben längs mit dem Kerb in der Lage und mit dem Kerb zwischen den Lagen. Das lässt darauf schließen, dass der Übergang zwischen zwei Lagen keine metallurgische Kerbwirkung zeigt. Die quer zur Aufbaurichtung erzeugten Kerbschlagproben weisen eine um ca. 8% geringere Kerbschlagarbeit auf, diese Änderung liegt allerdings im Streubereich. Dadurch lässt sich sagen, dass die Schwankungen zwischen den Werten der

Kerbschlagarbeit eine Überlagerung mit den Standardabweichungen der Messreihen sowohl bei Proben längs als auch bei Proben quer zur Aufbaurichtung erfahren und somit richtungsunabhängige Eigenschaften erzeugt werden können. Abbildung 84 zeigt außerdem, dass die Proben duktil versagen und somit keine übermäßige Versprödung bei der additiven Fertigung auftritt.

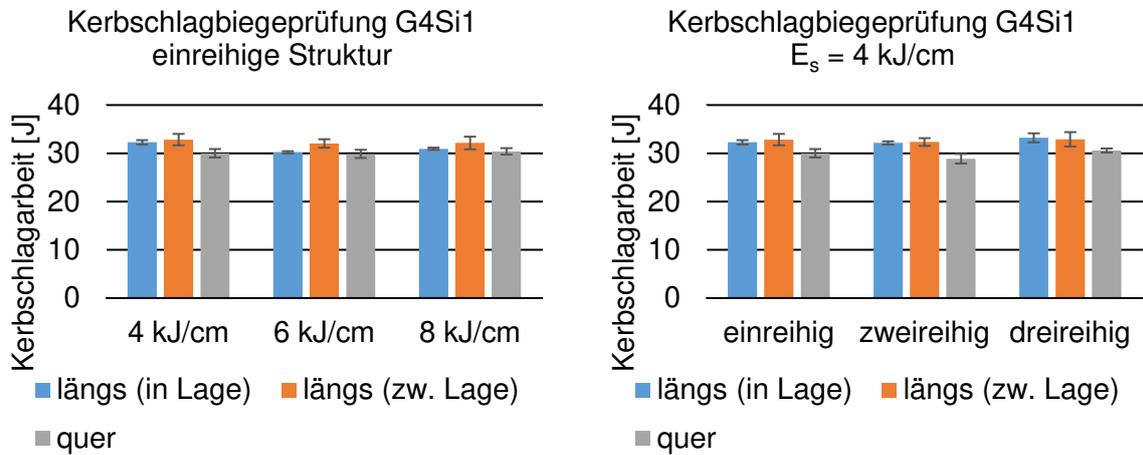


Abbildung 83: Kerbschlagbiegeprüfung G4Si1

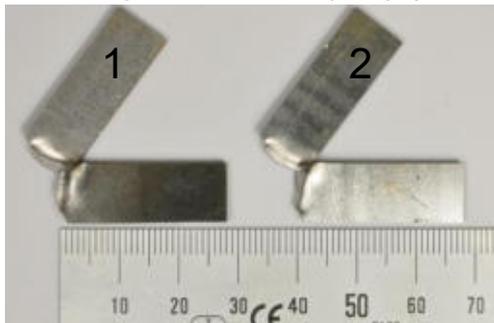


Abbildung 84: Kerbschlagproben G4Si1 4 kJ/cm (einreihig) 1: längs (in Lage); 2: quer

Die Ergebnisse der Kerbschlagbiegeprüfung für den RD100 weisen ähnliche Ergebnisse wie der G4Si1-Massivdraht auf, allerdings befinden sich die Kerbschlagwerte insgesamt auf einem deutlich niedrigerem Niveau als die G4Si1 Proben. Zusätzlich haben sich in Proben mit der Streckenergie von 8 kJ/cm Schweißnahtunregelmäßigkeiten in der Nähe des Kerbs gezeigt, wodurch die Werte der Kerbschlagarbeit negativ beeinflusst wurden.

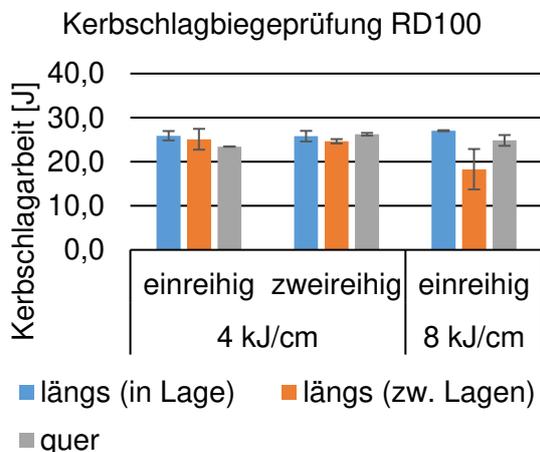


Abbildung 85: Kerbschlagbiegeprüfung RD100

7.1.3 Härtemessung

Die Härtemessung gibt Auskunft über den mechanischen Widerstand den ein Werkstoff der mechanischen Eindringung eines anderen Körpers entgegensetzt und stellt einen wesentlichen Werkstoffkennwert dar.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens kommt die Härtemessung nach Vickers zum Einsatz. Hierbei wird ein Eindringkörper in die Werkstückoberfläche gedrückt. Als Eindringkörper wird eine vierseitige Diamantpyramide mit einem Spitzenwinkel von 136° genutzt. Diese Pyramide wird dann mit steigender Kraft in die Werkstückoberfläche gedrückt und bei Erreichen der festgelegten Prüfkraft für etwa 10 bis 15 Sekunden aufrechterhalten. Das Verhältnis von Prüfkraft $F_{Vickers}$ und Eindruckoberfläche $A_{Vickers}$ dient hierbei als Härtewert, welcher wie folgt ermittelt wird:

$$HV = \frac{0,102 * F_{Vickers}}{A_{Vickers}} \quad (5)$$

Die Eindruckoberfläche wird anhand der Diagonalen des hinterlassenen Eindrucks ermittelt. Die Eindruckdiagonale $d_{Vickers}$ bestimmt sich über den Mittelwert der beiden rechtwinklig zueinanderstehenden Diagonalen d_1 und d_2 wie folgt:

$$d_{Vickers} = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (6)$$

Mit der Eindruckdiagonalen $d_{Vickers}$ und der verwendeten Prüfkraft $F_{Vickers}$ lässt sich die Vickershärte wie folgt ermitteln:

$$HV = \frac{0,1891 * F_{Vickers}}{d_{Vickers}^2} \quad (7)$$

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde die Härte über die gesamte Wandhöhe an mehreren Messpunkten, mit dem Abstand von einem Millimeter zueinander, untersucht, um herauszufinden, ob sich der Härtewert über die Höhe der Wandstruktur ändert und ob die Einbringung verschiedener Streckenenergien einen Einfluss auf die Härte darstellt.

Die hierfür benötigten Proben wurden aus den Wandstrukturen der Hauptversuche gesägt und anschließend mittels Schleifen und Polieren, wie unter Abschnitt 3.2.7.4 beschrieben, für die Messung vorbereitet. Die Messung erfolgte mit dem Messgerät Durascan 70 der Firma Struers mit einer konstanten Prüfkraft von 9,807 N (Anhang 10).

Um die Vergleichbarkeit der Messwerte unter den verschiedenen Versuchsproben zu gewährleisten, wurden die Messungen stets an den gleichen eingemessenen Referenzstellen durchgeführt. Die entstandenen Eindrücke der Pyramiden sind anschließend unter dem eingebauten Lichtmikroskop mit 10-facher Vergrößerung aufgenommen worden. Das Ausmessen der Diagonalen d_1 und d_2 des Eindrucks der Pyramide ist daraufhin mit der Software Ecos Workflow erfolgt.

Auswertung der Härtemessung

Die gemessenen Härtewerte über die Aufbauhöhe sind in Anhang 42 bis Anhang 46 veranschaulicht. Dabei zeigt sich, dass die Härtewerte über die gesamte Aufbauhöhe sehr homogen sind, im Bereich des Grundwerkstoffs bzw. der Aufmischung der ersten Schweißbrause zeigen sich höhere Härtewerte, als in der restlichen Wandstruktur. Dies kann auf die sehr hohe Abkühlgeschwindigkeit in der untersten Lage zurückgeführt werden.

Die Mittelwerte der Härtemessungen (Abbildung 86) zeigen sowohl für den G4Si1, als auch für den RD100 eine Erhöhung der mittleren Härtewerte für geringere Streckenergien und mehrreihigen Aufbau, also eine höhere Härte bei kürzeren $t_{8/5}$ -Zeiten. Außerdem weist der RD100 Schweißzusatzwerkstoff insgesamt eine höhere Härte auf.

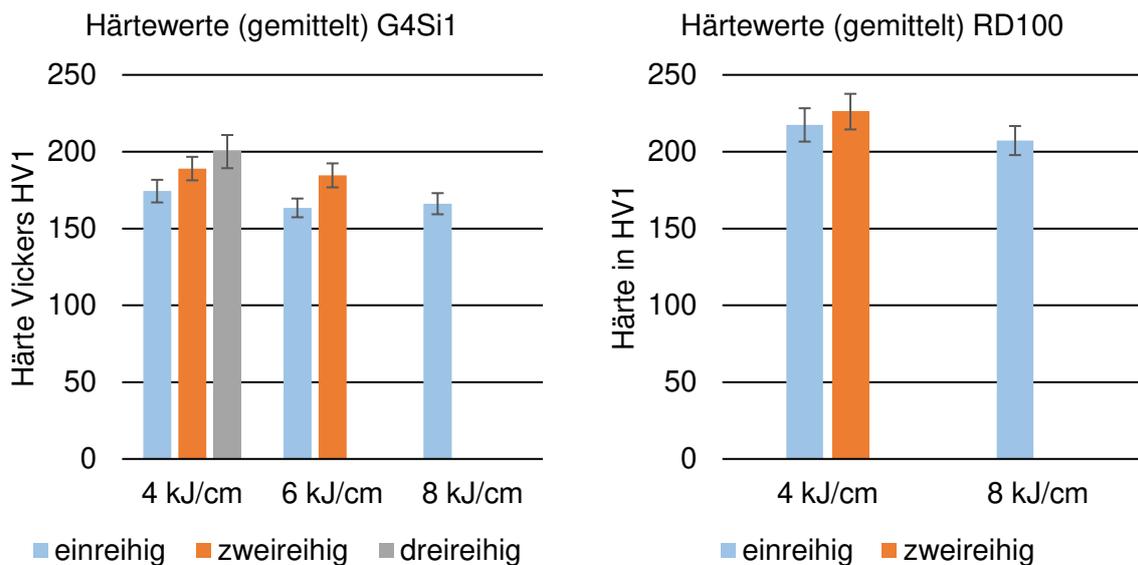


Abbildung 86: mittlere Härte für G4Si1 und RD100

7.1.4 Fazit

Vergleich der Untersuchungsergebnisse der mechanischen Eigenschaften mit den Angaben zum Ausgangswerkstoff

In Tabelle 17 und Tabelle 18 sind die gemessenen Mittelwerte den mechanischen Eigenschaften denen der Datenblätter gegenüber gestellt. Die mit * versehenen Werte wurden anhand der gemessenen Werte für die Kerbschlagzähigkeit berechnet, da die Ermittlung an Untermaßproben erfolgte und diese nicht direkt mit Vollmaßproben verglichen werden können. Der Vergleich mit dem Datenblatt zeigt, dass die mittels MSG-Verfahren additiv gefertigten, mehrreihigen Proben Werte in den ähnlichen Größenordnungen hervorbringen, wie diese im Datenblatt für den Schweißzusatzwerkstoff ausgewiesen sind. Die Betrachtung der Zugfestigkeiten und Streckgrenzen der einreihig generierten Proben liefert Werte unterhalb der Angaben im Datenblatt für das zutreffende Mischgas M2. Diese Abweichung nach unten für die einreihigen Proben treten bei Streckenenergien von 6 kJ/cm für G4Si1 und 8kJ/cm für beide Zusatzwerkstoffe für die Zugfestigkeit und für die Streckgrenze deutlicher zu Tage, als dass bei den mit 4 kJ/cm Streckenenergie hergestellten Proben der Fall ist.

Abweichungen zwischen den Bereichen im Datenblatt und den Messwerten können z.B. auch auf prüfmethodische Unterschiede zurück zu führen sein. Genauere Angaben zur Art der Werteermittlung des Schweißzusatzwerkstoffes im Datenblatt lagen nicht vor.

Speziell die nach oben hin feststellbaren Abweichungen der berechneten Kerbschlagzähigkeit von den Werten im Datenblatt könnten auf die Untermaßproben zurück zu führen sein.

Inwieweit die Abweichungen nach oben und unten von den im Datenblatt angegebenen Bereichen aus dem Herstellungsverfahren der additiven Fertigung mittels MSG-Verfahren herrühren, kann bei zukünftigen Untersuchungen Betrachtung finden bzw. Ansätze für künftige Untersuchungen liefern.

Tabelle 17: G4Si1 Vergleich Untersuchungsergebnisse der mechanischen Eigenschaften mit den Angaben zum Ausgangswerkstoff

Mechanische Kenngrößen	Datenblatt	Streckenenergie						
		4 kJ/cm			6 kJ/cm		8 kJ/cm	
		1-reihig	2-reihig	3-reihig	1-reihig	2-reihig	1-reihig	2-reihig
Streckgrenze [MPa]	460	429± 10,06	475± 8,11	503± 6,83	385± 4,26	454± 3,21	377± 1,29	449± 4,74
Zugfestigkeit [MPa]	560	536± 1,95	571± 2,49	591± 4,92	505± 3,02	574± 7,93	507± 2,26	558± 6,14
Dehnung [%]	27	34± 1,02	31± 1,14	31± 0,84	33± 1,64	30± 2,83	35± 1,06	31± 2,76
Kerbschlagarbeit gemessen [J]	-	31± 0,84	31± 0,71	32± 0,95	30± 0,66	29± 1,07	31± 0,74	31± 0,53
Kerbschlagarbeit [J] *(berechnet)	100	124± 3,35	124± 2,85	128± 3,80	120± 2,63	116± 4,27	124± 2,94	124± 2,10

Tabelle 18: RD100 Vergleich Untersuchungsergebnisse der mechanischen Eigenschaften mit den Angaben zum Ausgangswerkstoff

Mechanische Kenngrößen	Datenblatt	Streckenenergie		
		4 kJ/cm		8 kJ/cm
		1-reihig	2-reihig	1-reihig
Streckgrenze [MPa]	>420	445± 7,99	465± 7,52	410± 5,66
Zugfestigkeit [MPa]	500- 640	567± 9,25	584± 9,36	544± 10,10
Dehnung [%]	>20	34± 4,04	35± 8,87	33± 1,43
Kerbschlagarbeit gemessen [J]	-	25± 1,16	26± 0,67	23± 1,98
Kerbschlagarbeit [J] *(berechnet)	-	100± 5,16	104± 4,67	94± 5,98

Zusammenfassung der Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften

Um die mechanischen Eigenschaften der additiv mittels MSG-Verfahren gefertigten Wände zu evaluieren, erfolgten in den Versuchen Prüfungen der Zugfestigkeit, der Streckgrenze, der Bruchdehnung, der Kerbschlagzähigkeit und der Vickershärte.

Die ermittelten Werte wurden diskutiert und bestimmten, festgelegten Prozessgrößen hinsichtlich deren Auswirkungen gegenübergestellt. Dabei erfolgte, ausgehend von einreihig generierten Proben, die Beurteilung mehrreihig additiv hergestellter Wände anhand von zweireihig und dreireihig gefertigten Proben.

Die Betrachtungen zeigten im Einzelnen, dass die eingestellten Prozessparameter sich auch die $t_{8/5}$ -Zeit, und damit auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Bauteile auswirken. Dabei führt eine geringere $t_{8/5}$ -Zeit zu besseren mechanischen Kennwerten für die Zugfestigkeit, Streckgrenze, Kerbschlagzähigkeit, die Bruchdehnung und die Härte.

Die Unterschiede zwischen den mechanisch-technologischen Eigenschaften der beiden verwendeten Schweißzusatzwerkstoffe sind über die untersuchten Parameter hinweg als gering zu bewerten, daher wird für die Demonstratoren der kostengünstigere Schweißzusatzwerkstoff G4Si verwendet.

Aus fertigungstechnischer Sicht ist besonders interessant, dass sich mit einreihiger Generierung bei 8 kJ/cm Streckenenergie zwar etwa gleiche Wandstärken von ca. 9 mm generieren ließen, wie dies mit zweireihiger Generierung mit 4 kJ/cm Streckenenergie erzielt wurde. Allerdings steht dem mit Blick auf die festgestellten Zugfestigkeiten und Streckgrenzen eine höhere Festigkeit bei mehrreihig generierten Proben gegenüber. Aus diesem Grund wird der Parameter mit der niedrigsten Streckenenergie verwendet, um die Demonstratoren herzustellen.

7.2 Untersuchung der Zuverlässigkeit, Sicherheit und Resttragfähigkeit der 3D-gedruckten Knotenstruktur

Die Evaluation der Sicherheit und Resttragfähigkeit wurde mittels eines Vergleichs zwischen der numerisch ermittelten von Mises-Spannung der topologieoptimierten Bauteile aus Abschnitt 5.1 und den experimentell ermittelten Streckgrenzen aus Abschnitt 7.1.1. Die Streckgrenze wurde als Vergleichsgröße herangezogen, da keinerlei plastische Verformungen im Tragwerk auftreten sollen. Zur Bewertung wurde das Verhältnis zu im Knotenbereich vorherrschender Spannung und ermittelter Streckgrenze (G4Si1/RD100: Parameter 4 kJ/cm, zweireihig) gebildet. Die Werte der Streckgrenze liegen für den G4Si1 bei 475,4 MPa und für den RD100 bei 464,7 MPa. Dabei zeigt sich in Abbildung 87 und Abbildung 88, dass die berechneten Verhältnisse für die beiden Schweißzusatzwerkstoffe für alle bis auf zwei Optimierungsvarianten (30° Stoß und K-Knoten 10% Masserestriktion) unterhalb von 1 liegt. Das zeigt an, dass die Strukturen eine Resttragfähigkeit für die relevanten Masserestriktionen (bis 20%) eine Resttragfähigkeit von bis zu 60% aufweisen können. Im Vergleich dazu liegen die Originalen Knotengeometrien bei einer Resttragfähigkeit zwischen 10% und 20%.

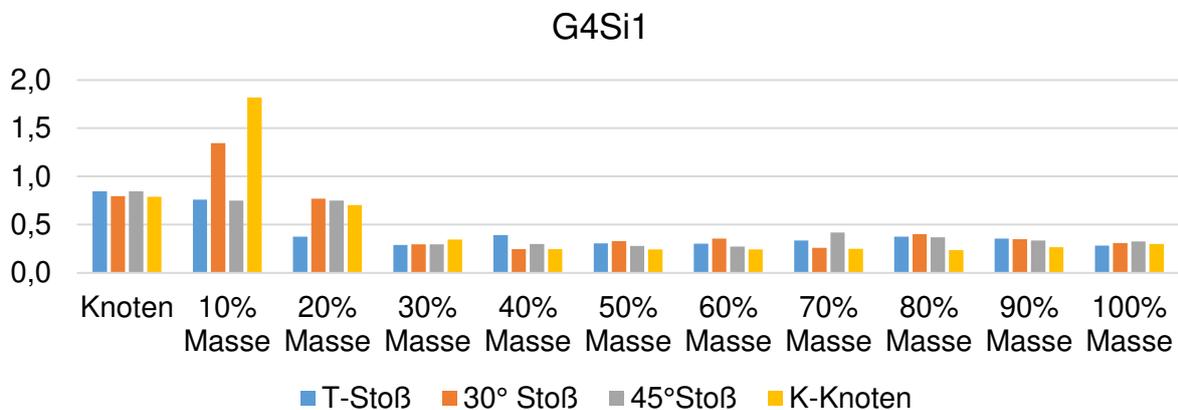


Abbildung 87: Resttragfähigkeit G4Si1

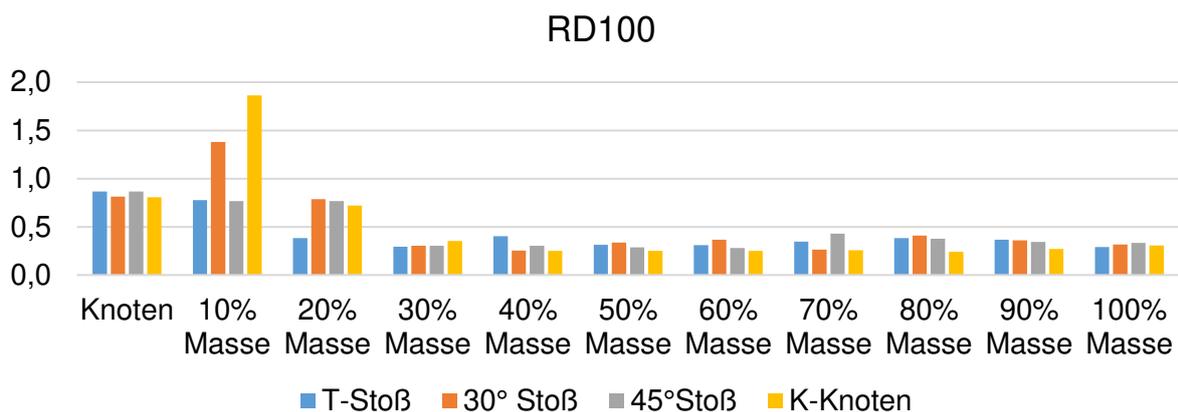


Abbildung 88: Resttragfähigkeit RD100

Laut Eurocode 3 gilt für Schweißnähte ein Sicherheitsfaktor von 1,1 für die Bemessung von Stahlbaukonstruktionen. [DIN10a], [DIN10b] Die angegebene Norm gilt allerdings nur für Schweißnähte und bezieht sich nicht auf die additive Fertigung im Bauwesen, da es hierzu keine bestehende Norm gibt wird der Eurocode 3 für die Bemessung herangezogen. In Abbildung 89 ist der berechnete Sicherheitsfaktor für die topologieoptimierten Konstruktionen in Abhängigkeit der in den Datenblättern angegebenen Streckgrenze von 460 MPa aufgeführt. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass alle Sicherheitsfaktoren, außer für den 30° Stoß und K-Knoten bei 10% Masserestriktion, oberhalb von 1,1 liegen. Damit kann in Anlehnung an den Eurocode 3 der Knoten mit dem Datenblattwert der Streckgrenze bemessen werden. Die Sicherheitsfaktoren zeigen außerdem deutlich, dass der eigentliche Knotenbereich sehr nah am minimalen Sicherheitsfaktor liegt und mittels der Topologieoptimierung auch eine Verbesserung des Sicherheitsfaktors möglich wird.



Abbildung 89: Sicherheitsfaktor bezogen auf Streckgrenze von 460 MPa

8 Demonstrator

8.1 Aufbau

Skalierter Demonstrator

Die Herstellung einer komplexen Struktur mittels WAAM macht oftmals eine Nachbearbeitung im CAD erforderlich, da es im 3-achsigen, lagenweisen Aufbau nur begrenzt möglich ist horizontale Überhänge oder Strukturen mit mehr als 40° Abweichung zur Vertikalen zu fertigen. Dies ist dadurch bedingt, dass im WAAM-Verfahren im Gegensatz zu anderen additiven Fertigungsverfahren keine Stützstrukturen verwendet werden. Daher wurde die Geometrie im ANSYS SpaceClaim Design Modeler nachbearbeitet, um die Herstellbarkeit zu verbessern. In Abbildung 90 a ist die Ursprungsgeometrie zu erkennen. Die drei rotmarkierten Bereiche mussten angepasst werden um eine Herstellbarkeit gewährleisten zu können. Abbildung 90 b zeigt das Bauteil nach den Verbesserungen im CAD. Die Anschlussplatte ist vollständig ausgefüllt worden, um die beiden horizontalen Überhänge zu vermeiden. Außerdem wurde im Inneren des Bauteils eine konische Stützgeometrie erzeugt um wiederum horizontale Überhänge zu vermeiden. Der untere Bereich wurde vergrößert, um einen Winkel von 40° zur Vertikalen zu erreichen.

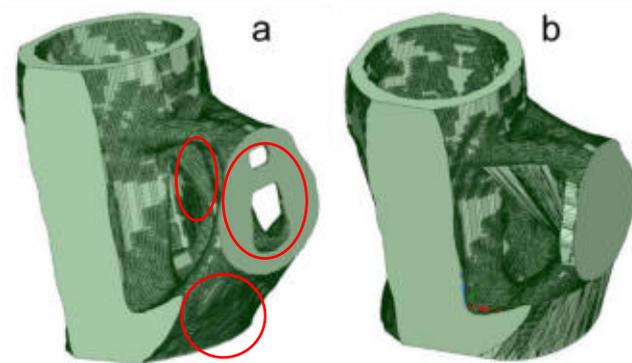


Abbildung 90: a) topologieoptimiertes Bauteils; b) Bauteil mit verbesserter Herstellbarkeit

Der Rohrknottedemonstrator wurde auf 30 % der Originalgröße skaliert um den Materialeinsatz und die Prozesszeit für das erste Testobjekt zu minimieren. Die skalierte Geometrie wurde in eine step-Datei konvertiert und danach im Programm DCAM weiterverarbeitet.

In den Vorversuchen wurde ein Schweißparameter mit einer Lagenhöhe von 1,8 mm und einer Lagenbreite von 7 mm ausgewählt um das topologieoptimierte Bauteil herzustellen. Daher wurden 58 Schichten á 1,8 mm für das Bauteil mit einer resultierenden Bauhöhe von ca. 104 mm erstellt. Das Sclicing des Bauteils ist in Abbildung 91 dargestellt. Dazu ist zu sagen, dass für den größten Teil des Knotens nur die Außenkonturen hergestellt wurden, da die Wandstärke aufgrund der Skalierung ca. 10 mm betrug, wodurch sie mit der inneren und äußeren Kontur vollständig hergestellt werden konnte. Die beiden in Abbildung 91 rotmarkierten Bereiche wurden mit einer Konturparallelen Füllung versehen, um ein massives Bauteil fertigen zu können.

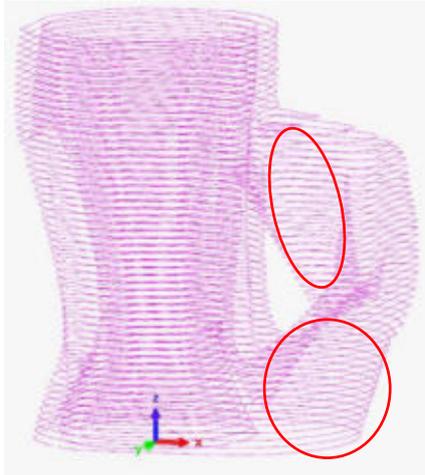


Abbildung 91: Bauteilslicing

Das Bauteil wurde mittels des MSG-Schweißprozesses auf einer Substratplatte hergestellt (Abbildung 92). Dabei wurde der Aufbau lagenweise und Einhaltung der Zwischenlagentemperatur von 100°C realisiert. Die Einhaltung der Zwischenlagentemperatur war notwendig, um einen Prozessabbruch durch Herabfließen der Schmelze aufgrund eines zu hohen Wärmestaus zu vermeiden.

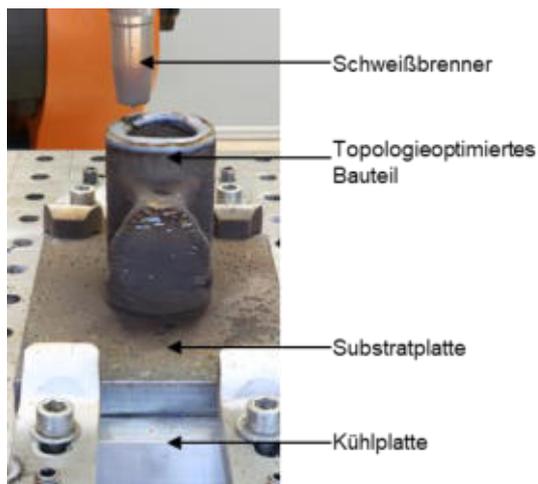


Abbildung 92: Versuchsaufbau der Herstellung des topologieoptimierten Bauteils

In Abbildung 93 ist das additiv gefertigte, topologieoptimierte Bauteil zu sehen. Es wurde zunächst nur gereinigt und auf der Substratplatte belassen. Auf der rechten Seite ist die Aussparung auf der Rückseite des Knotens gut zu sehen.

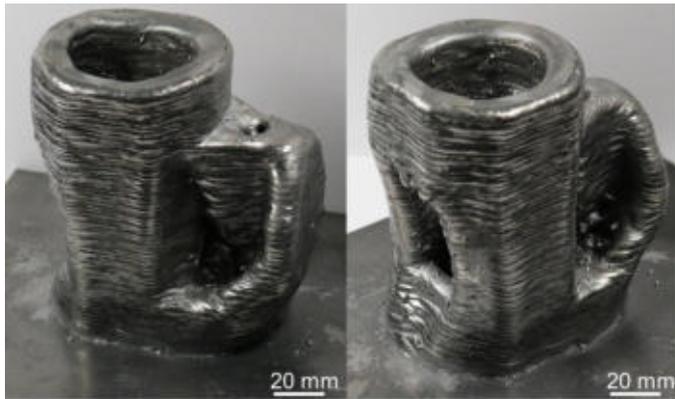


Abbildung 93: additiv gefertigtes, topologieoptimiertes Bauteil

Abschließend wurden zwei der drei Anschlussflächen für die Kreishohlprofile spanend nachbearbeitet und die Grundplatte verkleinert, dies ist in Abbildung 94 zu erkennen. Dies verdeutlicht die unterschiedlichen Anschlussmöglichkeiten. An der Anschlussstelle 1 kann das Kreishohlprofil beispielsweise mittels HV-Naht im Vollanschluss gefügt werden. Außerdem ist es möglich an der Anschlussstelle 2 eine umlaufende Kehlnaht zu schweißen. Auch der Anschluss über eine Anschlussplatte ist möglich, diese wäre an Anschlussstelle 3 durch die Substratplatte bereits gegeben.



Abbildung 94: additiv gefertigtes, topologieoptimiertes Bauteil mit bearbeiteten Anschlussflächen

8.2 Validierung und Optimierung

Es konnte gezeigt werden, dass die Topologieoptimierung eine bionische Form für den Tragwerksknoten mit einer deutlich erhöhten Steifigkeit erzeugt. Dadurch konnte eine Verringerung der vorherrschenden Spannungen und der Gesamtverformung des Knotens erreicht werden. Dabei bleibt die ursprüngliche Funktion als Tragwerksknoten erhalten.

Während der Untersuchung hat sich gezeigt, dass neben den Randbedingungen auch die Größe des Designraums eine große Auswirkung auf das resultierende Design hat.

Im hier genutzten Beispiel wurde mit verhältnismäßig kleinen Kräften gerechnet und der Demonstrator wurde auf 30% der Originalgröße herunter skaliert. Daher wurde eine weitere topologieoptimierte Geometrie, welche unter Verwendung höherer Lasten optimiert wurde, für die additive Fertigung als Demonstrator ausgewählt. Es handelt sich dabei um den Schrägstoß unter einem Winkel von 30° bei einer Masserestriktion von 15%. Dieser konnte mit geringen geometrischen Anpassungen für die Fertigung vorbereitet werden.

Abschließend wurde mithilfe der weiteren Topologieoptimierung mit höheren Lasten ein finaler Demonstrator hergestellt. Dieser Demonstrator basiert auf dem 30° Schrägstoß bei einer Masserestriktion von 20%. Das Bauteil wurde nach der Topologieoptimierung im CAD nachbearbeitet um dessen Herstellbarkeit zu verbessern (Abbildung 95). Dabei wurden Überhänge mit mehr als 35° zur Vertikalen und horizontale Überhänge entfernt.

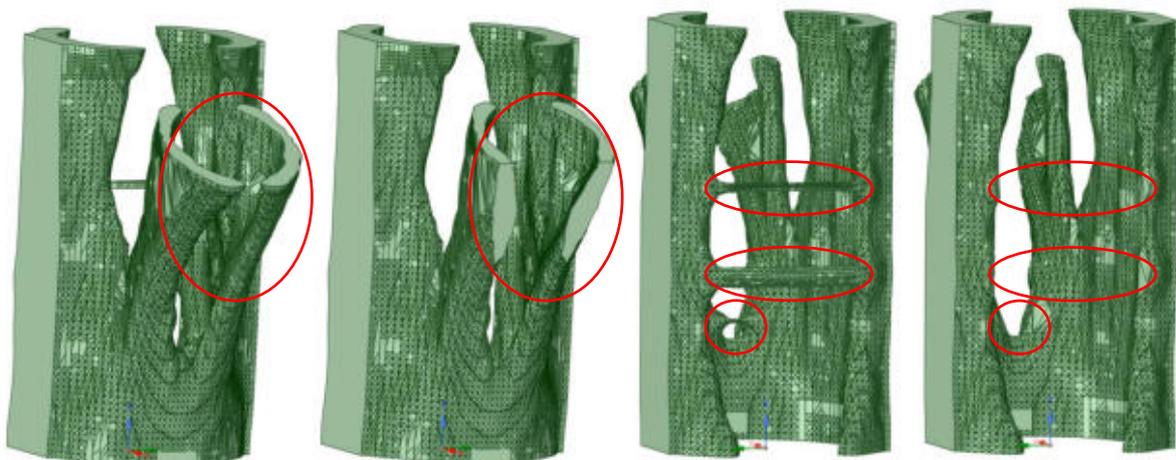


Abbildung 95: Verbesserung der Herstellbarkeit des 30° Schrägstoßes

Das Bauteil wurde mithilfe des CAD/CAM Programms DCAM der Firma SKM gesliced, eine Bahnplanung erstellt und abschließend im Postprozessor in Kuka-Programm umgewandelt. Dabei wurde die Strategie verfolgt zuerst die Bauteilaußenkontur zu fertigen und danach Konturparallel die Füllung von außen nach innen herzustellen (Abbildung 96).

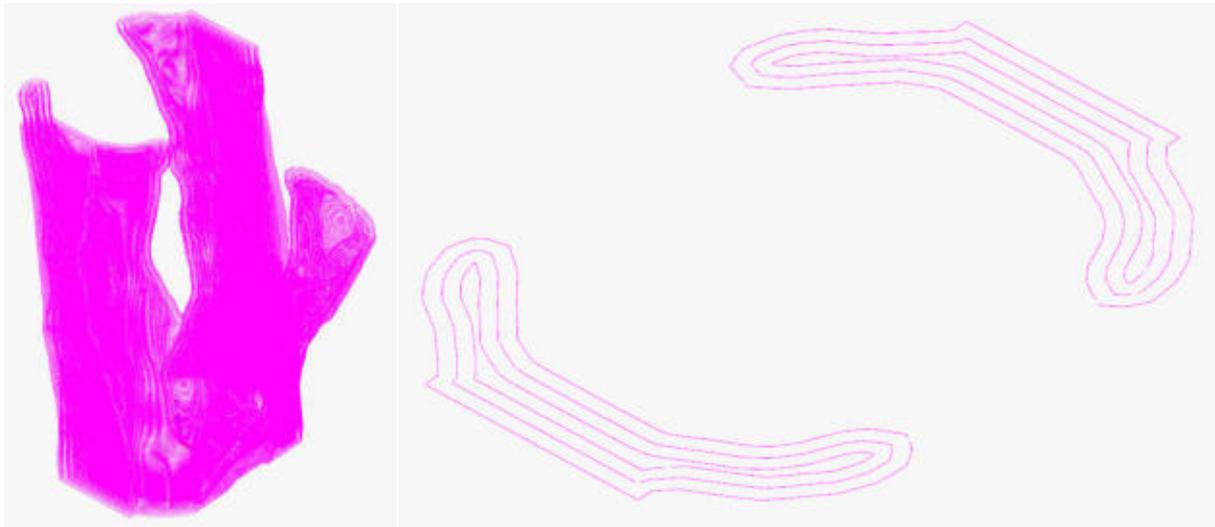


Abbildung 96: Bahnplanung (links: gesamtes Bauteil; rechts: oberste Schweißlage)

Es wurden zwei Demonstratoren wurde in der Originalgröße von 375 mm mit einer Masse von jeweils ca. 28 kg gefertigt. Die Gesamtfertigungszeit für beide Demonstratoren betrug ca. 68 h. In Abbildung 97 ist der gereinigte, additiv gefertigte, topologieoptimierte 30° Schrägstoß abgebildet.



Abbildung 97: additiv gefertigter, topologieoptimierter 30° Schrägstoß

8.3 Tests, Auswertung, Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Der topologieoptimierte Demonstrator wurde hinsichtlich seiner Formabweichung zur CAD-Geometrie mittels des GOM Atos 3D-Scansystems. Dabei zeigte sich, dass der Demonstrator die größte Formabweichung in den Bereichen der höchsten Winkelabweichung von der Vertikalen aufweist, da durch die hohen Temperaturen und das unzureichend gestützte Schmelzbad die Schmelze am Bauteil herabgeflossen ist. Die unzureichende Abstützung des Schmelzbads resultiert dabei in einem zu hohen x-, y-Versatz der Schweißweißbraupe, wodurch die untere Schweißlage nicht mehr genügend Auflagefläche bieten kann. Diese Schweißfehler können durch zwei unterschiedliche Herangehensweisen vermieden werden.

Zum einen ist es möglich bei der Nachbearbeitung alle Winkel $>30^\circ$ zur Vertikalen aus dem Modell zu entfernen oder mit zusätzlichem Material abzustützen, wie es in Abschnitt 8.1 anhand des herunterskalierten T-Stoßes gezeigt wurde. Zum anderen kann ein Drehkipptisch während des Aufbaus verwendet werden um das Bauteil so zu positionieren, dass die neue Schweißlage immer auf eine ausreichende Abstützung durch vorausgegangene Schweißlagen trifft.

Abbildung 98 verdeutlicht die Abweichungen der realen, topologieoptimierten Knotengeometrie in Relation zur CAD-Datei inklusive der Verbesserung der Herstellbarkeit der topologieoptimierten Struktur. Es ist zu erkennen, dass der größte Teil des Bauteils ein Aufmaß von ca. 2 mm-4 mm aufweist, wodurch es möglich wird den Knoten, falls nötig, spanend nachzubearbeiten. Im Bereich des 30° Anschlusses ist eine deutlich größere Abweichung von ca. 8 mm zu verzeichnen. Diese ist entstanden, da der Knotenwinkel an der Grenze des herstellbaren lag und dort die Schmelze etwas abgesackt ist. Dieses Problem lässt sich unter Verwendung eines Drehkipptisches vermeiden, da immer in PA-Lage geschweißt werden kann. Als kritisch sind die blau dargestellten Bereiche zu sehen, da der Knoten dort ein Untermaß aufweist, wodurch die Formabweichung auch doch eine Nachbearbeitung nicht mehr korrigiert werden kann. Der hier gefertigte Knoten wurde absichtlich ohne zusätzliches Aufmaß gefertigt, um zu sehen ob es genügt das Prozessbedingte Aufmaß auszunutzen oder nicht. Daher ist es ratsam ein Aufmaß auf die berechnete Topologie zu addieren, damit es nicht zu untermaßigen Bauteilen kommt. Dabei ist auffällig, dass die Abweichung nur in z-Richtung aufgetreten ist, daher kann das Problem auch durch eine zusätzliche Schweißlage gelöst werden.

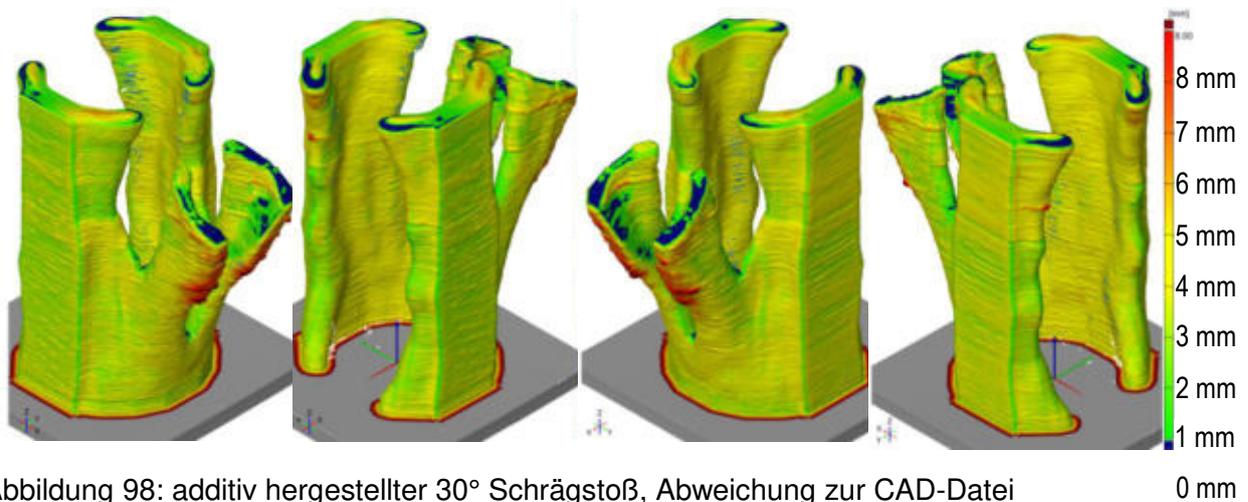


Abbildung 98: additiv hergestellter 30° Schrägstoß, Abweichung zur CAD-Datei

0 mm

Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Zieht man nun zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit des topologieoptimierten Demonstrators die gleichen Maschinenstundensätze und Materialkosten wie in Abschnitt 2.4 heran, dann würde der Demonstrator in der Stückzahl 2 inklusive der Vorbereitung und der Materialkosten bei einer Fertigungszeit von ca. 34 h pro Tragwerksknoten ca. 1470,38 € kosten, wenn ein Bediener den Prozess permanent beaufsichtigen müsste, bzw. 805,63 € wenn der Prozess automatisiert abläuft und der Bediener nur Rüsten muss. Verglichen mit den Materialkosten von 62,40 €/m für Kreishohlprofile mit 139,7x10,0 mm und für 83,40 €/m für Kreishohlprofile mit 193,7x10,0 mm ist die additive Fertigung mittels WAAM deutlich teurer als ein nicht optimierter Schrägstoß. Allerdings ist der topologieoptimierte Knoten nur schwierig konventionell herstellbar, außer im Gussverfahren.

8.4 Planungsgrundlagen

Trotz der hohen Designfreiheit bei der additiven Fertigung hat sich bei der Herstellung des Knotens deutlich gezeigt, dass eine Nacharbeit des Designs zwingend erforderlich ist, da die heutigen Randbedingungen für die Topologieoptimierung keine Möglichkeit bieten im Vorhinein Grenzwinkel zu definieren oder horizontale Überhänge zu vermeiden. Eine Möglichkeit dem entgegenzuwirken ist die Nutzung einer 5-achsigem Bearbeitungsstrategie, bei der der Schweißbrenner in x-, y- und z-Richtung bewegt werden kann und das Bauteil mithilfe eines Dreh-Kipp-Tisches unter dem Schweißbrenner positioniert werden kann. Dadurch lassen sich Zwangslagen vermeiden und beliebige Winkellagen und sogar Überhänge erzeugen, da der Schweißbrenner selbst in neutraler Position steht und ausschließlich in z-Richtung aufgebaut wird. Nachfolgend sind die notwendigen Schritte und Planungsgrundlagen zur Herstellung topologieoptimierter Knotenstrukturen aufgeführt:

- 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
- Empfehlung: Zielfunktion „Minimierung der Nachgiebigkeit“ für bessere Geometriemodelle
- CAD-Nachbearbeitung des Modells zur Glättung
- Überprüfung der Simulationsergebnisse
- Aufbereitung des CAD-Modells für Herstellung notwendig
- Ohne Dreh-Kipptisch: Überhänge mit einem Winkel von 30° zur Vertikalen vermeiden
- Bauteilslicing mittels CAD/CAM-Programm
- Mit Dreh-Kipptisch: Zugänglichkeit über Simulation der Bahnplanung überprüfen
- Ermittlung geeigneter Schweißparameter für den zu verwendenden Zusatzwerkstoff
- Herstellung des Bauteils

Zur Berechnung und Herstellung eines topologieoptimierten Knotens wird folgendes benötigt:

- CAD-Workstation
- Simulationssoftware für Topologieoptimierung
- CAD/CAM-Software zur Bahnplanung
- Handlingsystem
- Schweißstromquelle inkl. Schweißbrenner und Zubehör

9 Entwicklung und Spezifikation weiterer Anwendungsfelder

9.1 Parameteranalyse

Die Parameteranalyse stützt sich auf die Ergebnisse der Charakterisierung der Zusatzwerkstoffe (Abschnitt 3.2), der mechanischen Untersuchungen (Abschnitt 7.1) und auf die Parameteridentifikation (Abschnitt 4.4). Dabei zeigt sich, dass die Verwendung des $t_{8/5}$ -Konzepts auch in der additiven Fertigung zur Beurteilung der mechanischen Eigenschaften von Baustählen eignet. Dabei wird die $t_{8/5}$ -Zeit vor allem von der Streckenergie, also der eingebrachten Energie beeinflusst. Außerdem zeigt sich, dass die Strukturbreite einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf Abkühlzeit hat, dies ist in der Änderung der Wärmeleitung begründet. Daraus lässt sich ableiten, dass die Wärmezufuhr und die Wärmeabfuhr ausschlaggebend für die Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften sind. Daher ist davon auszugehen, dass eine Beeinflussung der Abkühlrate durch eine zusätzliche aktive, prozessparallele Kühlung der Struktur die mechanischen Eigenschaften positiv beeinflusst werden könnten.

9.2 Untersuchung zur Gestaltung

Die Gestaltung der additiv hergestellten Knotengeometrie richtet sich nach zwei ausschlaggebenden Punkten. Zum einen ist die Art der Belastung in Verbindung mit der Wahl des Designraums während der Optimierung unter den Aspekten der Bionik (Abschnitt 5) für die Topologie und Form des Bauteils relevant. Zum anderen richtet sich die Strukturgröße der Herstellbaren Strukturen nach der Wahl der Prozessparameter in Verbindung mit dem Werkstoff. Daher müssen die geometrischen Abmessungen der erzeugbaren Schweißraupen für einzelne Blindnähte, den Aufbau in z-Richtung und den Aufbau breiterer Strukturen aus mehreren nebeneinanderliegenden Nähten im Vorfeld ermittelt werden. Aus diesen können dann minimale Strukturbreiten ermittelt werden.

Die Wahl der Anlagentechnik bestimmt in Verbindung mit den Restriktionen des WAAM-Verfahrens außerdem welche Strukturen unter welchen Umständen herstellbar sind. Wenn die Anlagentechnik keinen Drehkipptisch und keinen schwenkbaren Schweißbrenner beinhaltet ist es erforderlich Überhänge und Winkellagen mit mehr als 30° Abweichung zur Vertikeln zu vermeiden. Sind nicht herstellbar, da im WAAM-Verfahren keine Stützstrukturen genutzt werden. Ist ein schwenkbarer Schweißbrenner im Aufbau integriert, ist es möglich größere Winkellagen zu fertigen, dabei ist allerdings darauf zu achten, dass die Prozessparameter in einer möglichst geringen Streckenergie resultieren, da ansonsten die Schmelze schwerkraftbedingt herabfließen kann. Zusätzlich ist der Schwenkwinkel des Brenners in Abhängigkeit des zu fertigenden Überhangs zu wählen. Die größte Designfreiheit besteht allerdings, wenn die Anlagentechnik zumindest aus x-, y- und z-Achse in Verbindung mit einem Drehkipptisch besteht. Dieser ermöglicht es das Bauteil zu drehen und zu schwenken, um jede erforderliche Schweißlage mit dem Brenner in neutraler Position zu fertigen. Dadurch können beliebige Überhänge und Winkellagen hergestellt werden. Es ist wie in Abschnitt 8.4 erwähnt zu empfehlen für komplexe Bauteile, wie topologieoptimierte Rohrknotten einen Drehkipptisch in die Anlage zu integrieren.

9.3 Untersuchung zur Variation des Materials

Die Untersuchung zur Variation des Materials wurde anhand von zwei Varianten durchgeführt. Zum einen wurde anhand der Herstellung eines Rohrknotendemonstrators aus Aluminium untersucht, ob es trotz der geringen Schmelztemperatur möglich ist Anschlüsse auf diesem Material additiv herzustellen. Abbildung 99 zeigt anhand des gefertigten Knotens, dass es

auch möglich ist Knotenstrukturen aus Aluminium ($AlMg3$) herzustellen. Da es sich hierbei allerdings um einen Werkstoff mit deutlich unterschiedlichen Eigenschaften zu Stahl handelt sind für die Verwendung dieses Materials Grundlagenuntersuchungen zu den mechanischen-technologischen Eigenschaften und deren Relation zu den Prozessparametern notwendig.

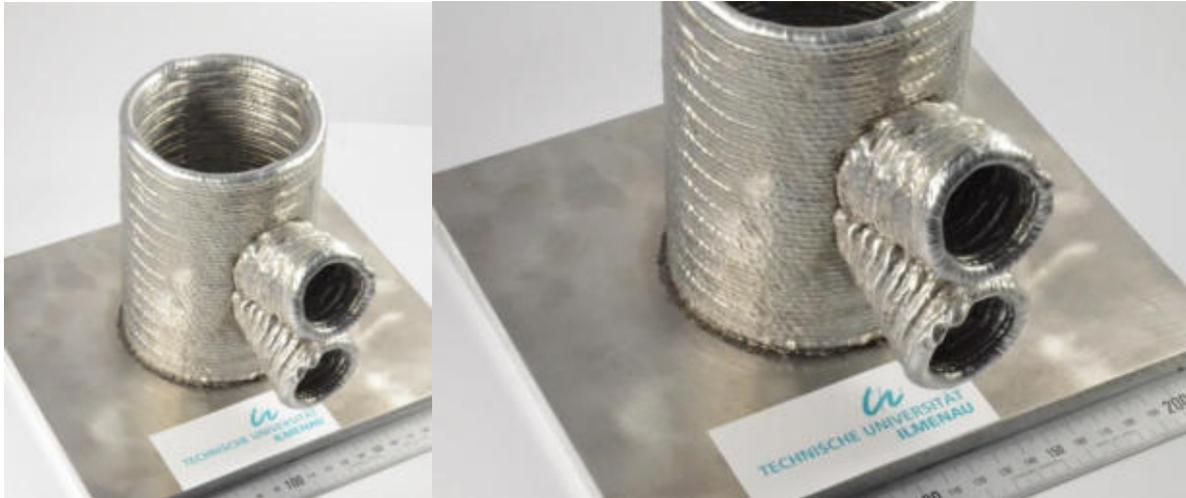


Abbildung 99: Aluminiumrohrknoten

Im Weiteren wurde die grundsätzliche Nutzbarkeit eines hochfesten Feinkornbaustahls (DIN EN ISO 16834 Mn4Ni2CrMo) anhand der Ermittlung der mechanischen-technologischen Eigenschaften im Zugversuch überprüft. Dieser Werkstoff entspricht einem S890 in der Festigkeit. Hierzu wurden zwei unterschiedliche Schweißprozessparametersätze nach dem gleichen Schema wie in Abschnitt 7.1.1 untersucht. Es hat sich gezeigt, dass Zugfestigkeitswerte von 872 MPa bis 895 MPa erreicht werden konnten. Die Zugfestigkeit dieses Schweißzusatzwerkstoffs liegt laut Herstellerangaben bei 940 MPa. Die ermittelten Werte sind nur wenig geringer als die Herstellerangaben, daher ist zu erwarten, dass auch hochfeste Schweißzusatzwerkstoffe für die additive Fertigung im Bauwesen Anwendung finden können.

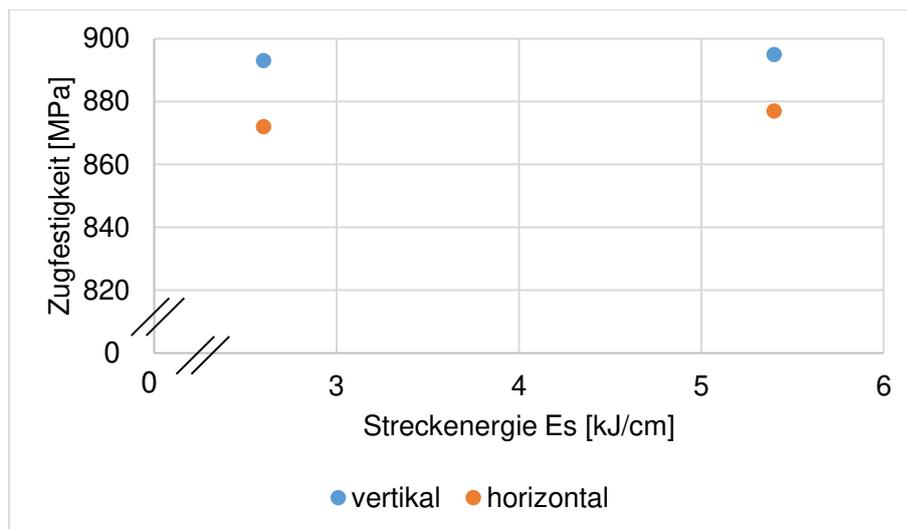


Abbildung 100: Zugfestigkeit Mn4Ni2CrMo

10 Weitere Anwendungsmöglichkeiten

Die Anwendungsmöglichkeiten des WAAM-Verfahrens in Verbindung mit der Topologieoptimierung sind an sich mannigfaltig, da komplexe, großvolumige Bauteile mit hohen Aufbauraten hergestellt werden können und eine Vielzahl an Schweißzusatzwerkstoffen aus der konventionellen Schweißtechnik zur Verfügung stehen. Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens lassen sich für eine große Anzahl von Anwendungen adaptieren. Die Topologieoptimierung beispielsweise kann nicht nur im Bereich des Tragwerksbaus Anwendung finden, sondern kann unter anderem in folgenden Bereichen eingesetzt werden:

- Luft- und Raumfahrt
- Fahrzeugbau
- Kranbau
- Anlagenbau (vor allem für Schwingungsoptimierte Konstruktionen)
- Fassadenbau

Dabei ist es außerdem möglich die optimierten metallischen Bauteile direkt additiv mittels des WAAM-Verfahrens zu fertigen.

Weitere Anwendungen des WAAM-Verfahrens können sich im Druckbehälter und Dampfkesselbau für, hochfeste Feinkornbaustähle, aber auch im Bereich von tragenden Aluminiumkonstruktionen, bzw. im Aluminiumfassadenbau finden. Weiterhin können sich auch Bereiche in denen eine hybride Bauweise erforderlich ist einen Vorteil aus der additiven Fertigung ziehen, da es unter anderem möglich ist Verschleißschutzschichten, unter Verwendung eines zweiten Brennersystems, direkt zu integrieren um ein Bauteil mit funktionalisierten Oberflächen zu erzeugen. Das kann vor allem für den Tagebau von Interesse sein. Die Funktionalisierung ist aber nicht nur auf den Verschleißschutz begrenzt, da eine Vielzahl von Schweißzusätzen verwendet werden kann ist auch ein Schutz gegen oxidierende oder reduzierende Umgebungen möglich, ohne das gesamte Bauteil aus einem vergleichsweise teuren Stahl herzustellen. Dies kann für den Chemie-, Petrochemie- und Lebensmittelanlagenbau neue Möglichkeiten eröffnen.

Weitere Anwendungsfelder können sich auf unterschiedlichste Werkstoffe und Geometrien beziehen, dabei kann nicht nur Erzeugung neuer Strukturen, sondern auch Reparatur bestehender Werkzeuge, Bauteile und Bauwerke ein relevantes Anwendungsfeld sein. So könnten mit Hilfe des WAAM beschädigte Stahltragwerke und -bauten über einen 3D-Scan des Schadens und mittels Rekonstruktion im CAD lokal instandgesetzt werden, indem man den beschädigten Teil mittels der additiven Fertigung neu aufbaut.

11 Zusammenfassung und Ausblick

Die Entwicklung neuer Produkte und Herstellungsprozesse besitzt eine enge Bindung an die Kenntnis der Produkteigenschaften. Diese werden regelmäßig wesentlich durch die Art der Fertigung bestimmt. Die Entwicklung und Weiterentwicklung neuartiger Methoden zur effektiven Herstellung von Halbzeugen bis hin zu Endprodukten eröffnet zunehmenden Raum, neue Wege zu beschreiten.

In diesem Forschungsvorhaben wurden die mechanisch-technologischen Eigenschaften zweier niedriglegierter Stähle im Zusammenhang mit der additiven Fertigung mittels MSG-Verfahren zu untersuchen. Es wurde eine dementsprechende Aufbaustrategie entwickelt, die im Zuge der Abarbeitung einer systematischen Bewertung unterlag.

Nach vorheriger Grundlagenermittlung und Auswertung galt es, mit der vorhandenen Anlagentechnik eine Versuchsapparatur zusammenzustellen, mit deren Hilfe systematische Untersuchungen und Bewertungen der Prozessparameter möglich waren.

Ziel war es, einerseits stabile Prozessgrößen einzustellen, die eine additive Fertigung mit dem Verfahrensprinzip des Metall-Schutzgas-Schweißens ermöglichen, sowie andererseits Einflüsse der Prozessparameter in den Arbeitsgrenzen technologischer Art auf die damit zu erzielenden mechanischen Eigenschaften von dem einzusetzenden, niedriglegierten Stahl zu ermitteln und zu diskutieren.

Dazu erfolgte in den Vorversuchen die Untersuchung solcher Parameter wie Schweißspannung, Drahtvorschubgeschwindigkeit und Schweißgeschwindigkeit. Diese anlagentechnischen Parameter brachten unterschiedliche Streckenenergien hervor, deren Einfluss in den Grenzen 4 kJ/cm, 6 kJ/cm und 8 kJ/cm als Prozessgröße festgelegt und diskutiert wurden. Die Untersuchungen der Zwischenlagentemperatur, der Schutzgasdüsengeometrie und der Schutzgasmenge zeigten deren Einfluss auf die Güte der additiv gefertigten Proben. Darauf aufbauend galt es, die Möglichkeiten der mehrreihigen Generierung additiv herzustellender Proben auf der Basis einreihig additiv gefertigter Wände prinzipiell auszuloten. Die ermittelte und festgelegte Aufbaustrategie führte zur Generierung mehrreihiger Wandstrukturen mit reproduzierbaren Fertigungsabläufen.

Mit den aus den Vorversuchen gewonnenen Erkenntnissen im Hinblick auf die prinzipiellen Fertigungsmöglichkeiten leiteten sich Untersuchungen des Einflusses einzelner Prozessparameter innerhalb der Hauptversuche ab. Dabei wurden festgelegte Prozessparameter wie die Streckenenergie, die Zwischenlagentemperatur und die Anzahl der parallel zueinander verlaufenden Reihen (Reihenanzahl) in den erzeugten Wandstrukturen hinsichtlich ihrer möglichen Auswirkungen auf die resultierenden mechanischen Eigenschaften und Gefügemerkmale betrachtet. Die mechanischen Eigenschaften wurden mit Hilfe standardisierter Prüfmethode für die Kenngrößen Zugfestigkeit, Streckgrenze (obere Streckgrenze), Bruchdehnung, Kerbschlagzähigkeit und Vickershärte ermittelt.

Die in den Untersuchungen erzielten Ergebnisse in gleichen Größenordnungen - ohne wesentliche Abweichungen der Kennwerte untereinander in Abhängigkeit der festgelegten Prozessparameter - sprachen für eine Verfahrensstabilität der eingestellten Arbeitsbereiche im Resultat des additiven Fertigungsverfahrens mittels MSG-Verfahren.

In den festgelegten Arbeitsbereichen konnten einreihige, zweireihige und dreireihige Wände prinzipiell generiert werden. Die Bewertung der mechanischen Eigenschaften dieser Proben zeigte im Hinblick auf Zugfestigkeit (teilweise), Streckgrenze und Härte (mit Varianzen) Tendenzen auf, die Änderungen dieser Eigenschaften in den Systemgrenzen hervorbrachten. Untersuchungen zur Isotropie ließen keine Abhängigkeiten erkennen.

Keine direkten Auswirkungen der Prozessparameter offenbarten sich hinsichtlich der Kerbschlagzähigkeit und Bruchdehnung.

Der Vergleich der ermittelten mechanischen Eigenschaften mit dem Datenblatt des Herstellers für den Ausgangswerkstoff brachte im Ergebnis gleiche Größenordnungen der Kennwerte. Somit schlussfolgert sich, dass negative Auswirkungen aus der additiven Fertigung auf die mechanischen Eigenschaften der so generierten Proben nicht zu verzeichnen sind. Hinsichtlich der Bewertung mehrreihiger Systeme zeigen sich insbesondere in den Ergebnissen der Streckgrenze die Vorteile der zwei- und dreireihig generierten Wände.

Ähnliche Trends lieferten Betrachtungen zur Auswirkung der eingestellten Streckenenergie zwischen 4 kJ/cm, 6 kJ/cm und 8 kJ/cm.

Im Ergebnis der Untersuchungen lagen für 9 mm und 12 mm dicke Wände, gefertigt mit unterschiedlichen Streckenenergien, Aussagen vor, die aufzeigten, dass die Wandstärken, erzeugt mit unterschiedlichen Streckenenergien die so resultierenden mechanischen Eigenschaften der Streckgrenze und der Härte beeinflussen.

Die Untersuchungen der Porosität in den Vorversuchen waren ein wichtiges Kriterium für die Festlegung der Prozessparameter für die Hauptversuche. Die Betrachtungen der Schlibbilder und Porosität im Laufe der späteren Hauptversuche ließen analog den Ergebnissen der mechanischen Eigenschaften keine negativen Auswirkungen der additiven Fertigungsmethode zu Tage treten. Die ermittelte Porosität bewegte sich zwischen 0,2% bis 0,9% und lag größtenteils bei ca. 0,5%, es ließ sich kein Zusammenhang zwischen der Porosität und den Prozessparametern erkennen.

Eine qualitative Gefügebetrachtung offenbart keine negativen Einflüsse der Prozessparameter der additiv hergestellten Proben mittels MSG-Verfahren. Die im unteren und mittleren Wandbereich sichtbaren, feineren, dunkleren Gefügestrukturen mehrreihig gefertigter Proben sprechen nicht gegen eine zwei- und dreireihige additive Fertigung mit den eingestellten Systemparametern.

Die Betrachtung der Abkühlzeit im Bereich zwischen 800°C und 500°C ($t_{8/5}$ -Zeit) zeigte eindeutige Tendenzen der mehrreihigen Generierung mit einer Abnahme der $t_{8/5}$ -Zeiten bei zunehmender Reihenanzahl.

Die Darlegungen zu den Schweißzeiten und Gesamtaufbauzeiten dokumentieren den fertigungstechnischen Aufwand. Auf eine grundsätzliche Bewertung dessen wird vor dem Hintergrund, dass es sich um eine Grundlagenforschung handelt, an dieser Stelle verzichtet. Die Untersuchungsergebnisse der vorliegenden Arbeiten beantworten die Fragestellung, inwieweit sich mit den additiv gefertigten Stahlwänden mittels MSG-Verfahren aus niedriglegiertem Stahl (G4Si1) vorteilhafte mechanische Eigenschaften und Gefügestrukturen erzeugen lassen, positiv. Abgeleitet von der einreihigen additiven Fertigung ist die Generierung mehrreihiger Strukturen möglich, ohne dass durch die erhöhte Reihenanzahl negative Werkstoffeigenschaften resultierten.

Außerdem konnte in diesem Forschungsvorhaben gezeigt werden, dass die Topologieoptimierung eine bionische Form für unterschiedliche Tragwerksknoten mit einer deutlich erhöhten Steifigkeit erzeugt. Dadurch konnte eine Verringerung der vorherrschenden Spannungen und der Gesamtverformung des Knotens erreicht werden. Dabei bleibt die ursprüngliche Funktion als Tragwerksknoten erhalten.

Während der Untersuchung hat sich gezeigt, dass neben den Randbedingungen auch die Größe des Designraums eine große Auswirkung auf das resultierende Design hat.

Die hier genutzten Beispiele konnten zeigen, dass sowohl mit verhältnismäßig kleinen Kräften, als auch mit höheren Lasen bionische Bauteilstrukturen entstehen, um die vorherrschenden Belastungen aufzunehmen. Es können beispielsweise hochfeste Schweißzusatzwerkstoffe

verwendet werden um hohen Belastungen im Knotenbereich entgegenzuwirken. Wobei allerdings zu beachten ist, dass die Topologieoptimierung dadurch unter Umständen zu dünnwandigen Strukturen entstehen, wodurch die Spannungen im Bauteil deutlich zunehmen. Daher ist immer bei der Nachbearbeitung darauf zu achten, ob die Mindestwandstärke im Bauteil eingehalten wird.

Trotz der hohen Designfreiheit bei der additiven Fertigung hat sich bei der Herstellung des Knotens deutlich gezeigt, dass eine Nacharbeit des Designs zwingend erforderlich ist, da die aktuell erstellbaren Randbedingungen für die Topologieoptimierung keine Möglichkeit bieten im Vorhinein Grenzwinkel zu definieren oder horizontale Überhänge zu vermeiden. Eine Möglichkeit dem entgegenzuwirken ist die Nutzung einer 5-achsigem Bearbeitungsstrategie, bei der der Schweißbrenner in x-, y- und z-Richtung bewegt werden kann und das Bauteil mithilfe eines Dreh-Kipp-Tisches unter dem Schweißbrenner positioniert werden kann. Dadurch lassen sich Zwangslagen vermeiden und beliebige Winkellagen und sogar Überhänge erzeugen, da der Schweißbrenner selbst immer neutral steht und ausschließlich in z-Richtung aufgebaut wird.

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 komplexere Strukturen mit vielen unterschiedlichen Lastfällen
- Entwicklung genauerer Vorhersagemodelle für den Zeit-Temperaturverlauf, die Schweißspannungen, den Schweißverzug und die mechanischen Eigenschaften mittels der Schweißstruktursimulation.

Ergebnispräsentationen

Im Rahmen der ZukunftBau Projekttag am 17. November 2017 in Bonn wurden die ersten Forschungsergebnisse präsentiert. Am 07. März 2019 wurde das Forschungsprojekt „3D-Weld“ beim Thüringer Werkstofftag in Ilmenau bei der Posterpräsentation vorgestellt. Im Rahmen der ZukunftBau Projekttag am 04. Juni 2019 in Bonn wurde der Zwischenstand des Projektes präsentiert. Im August 2019 wurde das Projekt durch einen Artikel in der Ausgabe 3/2019 der Zeitschrift „Ingenieurspiegel“ vorgestellt. Das Projekt wurde am 24. September 2019 mit dem Thüringer Staatspreis in der Kategorie Nachwuchs prämiert, in diesem Rahmen wurde das Projekt mittels eines Kurzfilms und eines Vortrags vorgestellt. Am 24. Oktober 2019 wurden die Ergebnisse des Forschungsprojektes beim der „1st International Conference on Advanced Joining Processes“ in Ponta Delgada (Azoren) im Rahmen der Posterpräsentation vorgestellt. Das Projekt wurde außerdem im Rahmen eines Vortrages und der Veröffentlichung eines Manuskripts im Tagungsband der „1. Fachtagung Additive Manufacturing“ vorgestellt. Eine weitere Präsentation erfolgte im Rahmen des Tranfertages der TU Ilmenau am 27.11.2019. Weitere Veröffentlichungen sind geplant.

Bachelor- und Projektarbeiten

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde im Jahr 2019 eine Bachelorarbeit mit dem Thema „Additive Fertigung – Untersuchung mechanischer Eigenschaften an niedriglegiertem Stahl“ fertiggestellt.

Weitere Themen wurden mit Studenten in verschiedenen Projekten bearbeitet.

12 Literaturverzeichnis

- [ABD19] Abdelwahab, M.; Tsavdaridis, K. D.: Optimised 3D-Printed Metallic Node-Connections for Reticulated Structures, 2019.
- [ABE14] Abele, E.: Einordnung und Ausblick von Additiven Fertigungsverfahren aus produktionstechnischer Sicht, Hanau, 2014.
- [AGH12] Aghasibeig, M.; Fredriksson, H.: Laser cladding of a featureless iron-based alloy. In Surface and Coatings Technology, 2012, 209; S. 32–37.
- [BAL13] Baldrige, T.; Poling, G.; Foroozmehr, E.; Kovacevic, R.; Metz, T.; Kadekar, V.; Gupta, M. C.: Laser cladding of Inconel 690 on Inconel 600 superalloy for corrosion protection in nuclear applications. In Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51; S. 180–184.
- [BAU12] Bauforumstahl: Stahlherstellung und Werkstoffe für den Stahlbau. <https://www.bauforumstahl.de/upload/documents/Arbeitshilfe1.1.pdf>.
- [BDI16] BDI - Bundesverband der Deutschen Industrie: Implikationen des 3D-Drucks für die Rohstoffsicherung der deutschen Industrie. Positionspapier Sicherheit und Rohstoffe, 2016.
- [BER16] Berger, R.: Additive Manufacturing - next generation Amnx. Studie, 2016.
- [BIK16] Bikas, H.; Stavridis, J.; Stavropoulos, P.; Chryssolouris, G.: A Design Framework to Replace Conventional Manufacturing Processes with Additive Manufacturing for Structural Components. A Formula Student Case Study. In Procedia CIRP, 2016, 57; S. 710–715.
- [BÖH13] Böhler welding by voestalpine: Böhler Wissenswertes für den Schweißer. voestalpine Böhler Welding Austria GmbH, 2013.
- [DIN10a] DIN Deutsches Institut für Normung e. V: DIN EN 1993-1-1. 2010-12, Eurocode_3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten_- Teil_1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN_1993-1-1:2005_+ AC:2009. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010.
- [DIN10b] DIN Deutsches Institut für Normung e. V: DIN EN 1993-1-8. 2010-12, Eurocode_3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten_- Teil_1-8: Bemessung von Anschlüssen; Deutsche Fassung EN_1993-1-8:2005_+ AC:2009. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010.
- [DIN11] DIN Deutsches Institut für Normung e. V: Schweißzusätze – Drahtelektroden und Schweißgut zum Metall-Schutzgasschweißen von unlegierten Stählen und

- Feinkornstählen – Einteilung (ISO 14341:2010); Deutsche Fassung EN ISO 14341:2011, 2011.
- [EWM09] EWM Hightec Welding GmbH: EWM-Schweißlexikon. Die EWM MIG/MAG-Fibel, 2009.
- [EWM18] EWM: SCHWEISSZUSATZWERKSTOFFE MIG/MAG. <https://www.ewm-group.com/de/shop/mig-mag-7318/181/1/products.html>, 23.02.2018.
- [GAL14] Galjaard, S.; Hofman, S.; & Ren, S.: New Opportunities to Optimize Structural Designs in Metal by Using Additive Manufacturing. In *Advances in Architectural Geometry*, 2014.
- [GIE13] Gieseke, M.: *Additive Fertigung: Neue Wege in der Medizintechnik*, Hamburg, 2013.
- [HAR14a] Hartke, M.; Günther, K.; Ali, Y.; Bergmann, J. P.: Schweißtechnische Herstellung komplexer 3D-Freiformflächen mittels geregelter MSG-Kurzlichtbogentechnik. In (GSI Hrsg.): 4. Fachtagung: Verarbeitung von Stählen im Kraftwerksbau, Duisburg, 2014.
- [HAR14b] Hartke, M.; Günther, K.; Bergmann, J. P.: Untersuchung zur geregelten, energiereduzierten Kurzlichtbogentechnik als generatives Fertigungsverfahren. In (DVS Hrsg.): Große Schweißtechnische Tagung, Berlin, 2014; S. 98–102.
- [HAS06] Haslinger Stahlbau GmbH: Haslinger: Der Hallenbauer. In *Stahlbau Rundschau*, 2006, 2006; S. 24–27.
- [HIN18] Hintereder, J.; Sattler, S.; Gunzert, U.: Entwicklung einer disruptiven Leichtbausattelzugmaschine. In *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 2018, 120; S. 104–111.
- [HOF98] Hoffmann, E.: *Herstellung metallischer Bauteile durch Laserstrahlgenerieren*. Dissertation, Aachen, 1998.
- [KAZ12] Kazanas, P.; Deherkar, P.; Almeida, P.; Lockett, H.; Williams, S.: Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2012, 226; S. 1042–1051.
- [KUF13] Kuff, P.; Schwalbenhofer, K.; Strohm, A.: *Tragwerke. Als Elemente der Gebäude- und Innenraumgestaltung*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013.

- [MAS] Maschinenbau-Wissen.de: Spannungs-Dehnungs-Diagramm.
<http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/metall/25-spannungs-dehnungs-diagramm>, 05.01.2019.
- [MUD07] Mudge, R. P.; Wald, N. R.: Laser engineered net shaping advances additive manufacturing and repair, 2007, 86; S. 44–48.
- [PET15] Peters, S.: Additive Fertigung – Der Weg zur individuellen Produktion. In Hessen-Nanotech, Band 25, 2015.
- [RAY14] Ray, A.; Arora, K. S.; Lester, S.; Shome, M.: Laser cladding of continuous caster lateral rolls. Microstructure, wear and corrosion characterisation and on-field performance evaluation. In Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214; S. 1566–1575.
- [RUD02] Rudolstädter Systembau GmbH Rudolstädter Systembau GmbH: Sporthalle, 2002.
- [SCH18] Schweiß-Shop.de: Böehler Ti 52 T-FD Fülldraht. Schweißdraht (Ø 1,2 mm).
<https://www.schweiss-shop.de/boehler/boehler-ti-52-t-fd-fuelldraht-schweissdraht-o-12-mm/1596FUS0004>, 23.02.2018.
- [SEY18] Seyffarth, P.; Meyer, B.; Scharff, A.: Großer Atlas Schweiß-ZTU-Schaubilder. DVS Media GmbH, Düsseldorf, 2018.
- [STA17] Stahlinstitut VDEh: Schweißgeeignete un- und niedriglegierte Stähle - Empfehlungen für die Verarbeitung, besonders für das Schmelzschweißen. Beuth Verlag GmbH, Stahlinstitut VDEh, 2017-10-00.
- [SUK18] Suksuwan, A.; Spence, S. M.J.: Performance-based multi-hazard topology optimization of wind and seismically excited structural systems. In Engineering Structures, 2018, 172; S. 573–588.
- [TSA19] Tsavdaridis, K. D.; Efthymiou, E.; Adugu, A.; Hughes, J. A.; Grekavicius, L.: Application of structural topology optimisation in aluminium cross-sectional design. In Thin-Walled Structures, 2019, 139; S. 372–388.
- [URB15] Urban, K.: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. Ein Ritt auf der Rasierklinge. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [VDI14] VDI - Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Additive Fertigungsverfahren, Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen. VDI Gesellschaft Produktion und Logistik, Düsseldorf, 2014.

- [WES12] Westfälische Drahtindustrie GmbH: Schweißtechnik. Technisches Handbuch. Westfälische Drahtindustrie GmbH, Hamm, 2012.
- [WES19] Westfälische Drahtindustrie GmbH: Westfälische Drahtindustrie GmbH. Technisches Handbuch. https://www.wdi.de/fileadmin/user_upload/WDI_SFHandbuch_3_Edition_screen.pdf, 14.11.2019.
- [XU14] Xu, P.; Lin, C.; Zhou, C.; Yi, X.: Wear and corrosion resistance of laser cladding AISI 304 stainless steel/Al₂O₃ composite coatings. In Surface and Coatings Technology, 2014, 238; S. 9–14.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Typen von Fachwerkträgern in Anlehnung an [KUF13].....	7
Abbildung 2: Fachbegriffe für Fachwerkträgern [KUF13]	8
Abbildung 3: Räumlicher Fachwerkträger in Anlehnung an [KUF13].....	8
Abbildung 4: Rechteckiger Fachwerkträger mit doppeltem Untergurt; ausgewählter Knoten rot dargestellt [RUD02]	9
Abbildung 5: Darstellung des Tragwerksknotens als Anwendungsbeispiel für das Kalkulationswerkzeug.....	10
Abbildung 6: Zwangslagenschweißung [KAZ12]	14
Abbildung 7: Realisierte Winkelgeometrie bei der additiven Fertigung (G25 20 Mn) [HAR14a]	14
Abbildung 8: additive Herstellung einer Rohrverjüngung mittels MSG-Prozess (G25 20 Mn) [HAR14a].....	14
Abbildung 9: Versuchsaufbau Vor- und Hauptversuche.....	17
Abbildung 10: Schema der Einschussvorrichtung für das Thermoelement	18
Abbildung 11: Schematische Darstellung linienförmige Schichtgenerierung	22
Abbildung 12: Anbindung der Reihen mehrreihig generierter Wandstrukturen (40% Überlapp)	26
Abbildung 13: Anbindung der Reihen mehrreihig generierter Wandstrukturen (50% Überlapp)	26
Abbildung 14: Schweißreihenfolge bei mehrreihigem Aufbau (links: Mitte – Außen – Außen;	27
Abbildung 15: Beispiel einer additiv hergestellten Wandstruktur	29
Abbildung 16: qualitative Schweißnahtbewertung: große Welligkeit (links); geringe Welligkeit (rechts)	30
Abbildung 17: Aufbauzeiten bei Variation der Prozessparameter	31
Abbildung 18: Messung der $t_{8/5}$ -Zeit bei der Herstellung von Wandstrukturen aus G4Si1	32
Abbildung 19: Messung der $t_{8/5}$ -Zeit bei der Herstellung von Wandstrukturen aus RD100	32
Abbildung 20: Messung der $t_{8/5}$ -Zeit bei der Herstellung von Wandstrukturen aus RD100 in Abhängigkeit der Messposition	33
Abbildung 21: Messung der $t_{8/5}$ -Zeit in Abhängigkeit der Wandstärke (links 9 mm Wandstärke; rechts: 12 mm Wandstärke)	33
Abbildung 22: Position Metallografieprobe (hervorgehoben)	34
Abbildung 23: Porositätsmittlung mittels Schliffbildanalyse und Röntgendurchstrahlprüfung	36
Abbildung 24: Schweiß-ZTU-Schaubild eines Schweißzusatzwerkstoffes SG36 mit der angegebenen chemischen Zusammensetzung [SEY18].....	37

Abbildung 25: Gefügebild mit Phasenbestandteilen in 1000facher Vergrößerung.....	38
Abbildung 26: Gefügebilder in 200facher Vergrößerung (links: 4 kJ/cm einreihig mitte; rechts: 4 kJ/cm zweireihig mitte)	39
Abbildung 27: Fließkurve S355J2.....	41
Abbildung 28: Kontinuierliches ZTU-Diagramm S355J2	41
Abbildung 29: Isothermes ZTU-Diagramm S355J2.....	42
Abbildung 30: Fließkurve SG1-JMP-MPM	42
Abbildung 31: Kontinuierliches ZTU-Diagramm SG1-JMP-MPM	43
Abbildung 32: Isothermes ZTU-Diagramm SG1-JMP-MPM.....	43
Abbildung 33: Rechteckiger Fachwerkträger mit doppeltem Untergurt; ausgewählter Knoten rot dargestellt [RUD02].....	44
Abbildung 34: CAD-Modell des Obergurtknotens des Tragwerks [RUD02].....	44
Abbildung 35: Tragwerk [RUD02]	45
Abbildung 36: CAD-Modell des mittleren Raumtragwerks	45
Abbildung 37: Abstrahierte Knotengeometrien	46
Abbildung 38: Ansys AM Systems, thermisch-transient, links: Lastschritt 750, rechts: Lastschritt 294.....	47
Abbildung 39: Ansys AM Systems, statisch-mechanisch, Lastschritt 294, Gesamtverformung	47
Abbildung 40: Ansys AM Systems, statisch-mechanisch, Lastschritt 294, von-Mises- Vergleichsspannung.....	47
Abbildung 41: Abbildung des Herstellungsprozess	48
Abbildung 42: Simulationsschritte der Herstellung.....	49
Abbildung 43: mechanische Untersuchung Obergurtknoten, von Miseses Vergleichsspannung (oben: unverformt; mitte: Verformung maßstabsgerecht; unten: Verformung 8,5-fach überhöht dargestellt)	52
Abbildung 44: mechanische Untersuchung Tragwerk, von Miseses Vergleichsspannung (oben: unverformt; mitte: Verformung maßstabsgerecht; unten: Verformung 23-fach überhöht dargestellt)	53
Abbildung 45: Vergleich der Temperaturfelder bei der additiven Fertigung (links: Thermogramm des additiv gefertigten Bauteils (Höhe: z=100,8 mm, 10-300°C); rechts: Ansys AM Systems, thermisch-transient, Lastschritt 294)	54
Abbildung 46: Vergleich der Temperaturfelder bei der additiven Fertigung (links: Thermogramm des additiv gefertigten Bauteils (Höhe: z=366,4 mm, 200-600°C); rechts: Simufact Welding, thermisch-transient, Inkrement 276, Höhe: z= 366 mm, 200°C-600°C) ...	55

Abbildung 47: Vergleich der Temperaturfelder bei der additiven Fertigung (links: Thermogramm des additiv gefertigten Bauteils (Höhe: $z=373,6$ mm, $200-600^{\circ}\text{C}$); rechts: Simufact Welding, thermisch-transient, Inkrement 276, Höhe: $z= 373,2$ mm, $200^{\circ}\text{C}-600^{\circ}\text{C}$)	55
Abbildung 48: Topologieoptimierung Obergurtnoten.....	57
Abbildung 49: Topologieoptimierung Tragwerk mit vergrößertem Designbereich	57
Abbildung 50: Topologieoptimierung Tragwerk mit vergrößertem Designbereich	57
Abbildung 51: Statisch-mechanische Analyse am T-Stoß (links: T-Stoß; rechts: mit Designbereich)	58
Abbildung 52: von Mises-Vergleichsspannung in Relation zum Restmasseanteil nach der Topologieoptimierung	59
Abbildung 53: Gesamtverformung in Relation zum Restmasseanteil nach der Topologieoptimierung	59
Abbildung 54: von Mises-Vergleichsspannung des original T-Stoß	60
Abbildung 55: von Mises-Vergleichsspannung der Knotenstruktur mit 30% Masserestriktion	60
Abbildung 56: Randbedingungen T-Stoß.....	61
Abbildung 57: Randbedingungen 30° Schrägstoß	62
Abbildung 58: Randbedingungen 45° Schrägstoß	62
Abbildung 59: Randbedingungen K-Knoten.....	62
Abbildung 60: T-Stoß: von Mises-Vergleichsspannung in Relation zum Restmasseanteil nach der Topologieoptimierung	63
Abbildung 61: 30° Schrägstoß: von Mises-Vergleichsspannung in Relation zum Restmasseanteil nach der Topologieoptimierung	63
Abbildung 62: 45° Schrägstoß: von Mises-Vergleichsspannung in Relation zum Restmasseanteil nach der Topologieoptimierung	64
Abbildung 63: K-Knoten: von Mises-Vergleichsspannung in Relation zum Restmasseanteil nach der Topologieoptimierung	64
Abbildung 64: von Mises-Vergleichsspannung Formoptimierung.....	65
Abbildung 65: von Mises-Vergleichsspannung Formoptimierung.....	65
Abbildung 66: Vergleichsdehnung Formoptimierung	65
Abbildung 67: Gesamtverformung Formoptimierung	66
Abbildung 68: Masse Formoptimierung	66
Abbildung 69: minimale Masse (links: G4Si1 ; Mitte: Mn3Ni1Mo ; rechts: Mn4Ni2CrMo)	67
Abbildung 70: additiv hergestellter Obergurtnoten mit Vertikal- und Diagonalstäben	68
Abbildung 71: additiv hergestellte Knotengeometrie aus gegeneinander verschnittenen Rohren	69
Abbildung 72: additiv hergestellte Kreishohlprofile.....	69

Abbildung 73: 3D-Scan und Abweichung zu Fittingzylindern	70
Abbildung 74: additiv hergestellte Kreishohlprofile (links: nach CAD Hergestelltes Bauteil; rechts: 3D-Scan und Fitting auf CAD-Daten)	70
Abbildung 75: Spannungs-Dehnungs-Diagramm [MAS]	72
Abbildung 76: Zugversuch: mechanische Eigenschaften G4Si1 in Abhängigkeit der Probenorientierung (*) Herstellerangabe Schweißgut	73
Abbildung 77: Zugversuch: mechanische Eigenschaften RD100 in Abhängigkeit der Probenorientierung (*) Herstellerangabe Schweißgut	74
Abbildung 78: Zugversuch: mechanische Eigenschaften Abhängigkeit der Wandstärke (links: G4Si1; rechts: RD100)	74
Abbildung 79: Bruchdehnung G4Si1	75
Abbildung 80: Bruchdehnung RD100	75
Abbildung 81: Kerbschlagbiegeversuch (Charpy): Maschine, Prinzip, Proben [URB15]	76
Abbildung 82: Abmessungen Kerbschlagprobe	77
Abbildung 83: Kerbschlagbiegeprüfung G4Si1	78
Abbildung 84: Kerbschlagproben G4Si1 4 kJ/cm (einreihig) 1: längs (in Lage); 2: quer	78
Abbildung 85: Kerbschlagbiegeprüfung RD100	78
Abbildung 86: mittlere Härte für G4Si1 und RD100	80
Abbildung 87: Resttragfähigkeit G4Si1	83
Abbildung 88: Resttragfähigkeit RD100	83
Abbildung 89: Sicherheitsfaktor bezogen auf Streckgrenze von 460 MPa	84
Abbildung 90: a) topologieoptimiertes Bauteils; b) Bauteil mit verbesserter Herstellbarkeit ..	85
Abbildung 91: Bauteilslicing	86
Abbildung 92: Versuchsaufbau der Herstellung des topologieoptimierten Bauteils	86
Abbildung 93: additiv gefertigtes, topologieoptimiertes Bauteil	87
Abbildung 94: additiv gefertigtes, topologieoptimiertes Bauteil mit bearbeiteten Anschlussflächen	87
Abbildung 95: Verbesserung der Herstellbarkeit des 30° Schrägstoßes	88
Abbildung 96: Bahnplanung (links: gesamtes Bauteil; rechts: oberste Schweißlage)	89
Abbildung 97: additiv gefertigter, topologieoptimierter 30° Schrägstoß	89
Abbildung 98: additiv hergestellter 30° Schrägstoß, Abweichung zur CAD-Datei	90
Abbildung 99: Aluminiumrohrknoten	93
Abbildung 100: Zugfestigkeit Mn4Ni2CrMo	93

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gegenüberstellung ausgewählter, unlegierter Schweißzusatzwerkstoffe [WES12], [BÖH13], [EWM18], [SCH18].....	12
Tabelle 2: Gegenüberstellung ausgewählter, unlegierter Schweißzusatzwerkstoffe [WES12], [BÖH13], [EWM18], [SCH18].....	13
Tabelle 3: Eigenschaften Schweißzusatzwerkstoff G4Si1 [WES19].....	16
Tabelle 4: Eigenschaften Schweißzusatzwerkstoff RD100	16
Tabelle 5: Eigenschaften Schutzgas.....	16
Tabelle 6: Schweißparameter für Vorversuche	21
Tabelle 7: Prozessfenster der Vorversuche	24
Tabelle 8: Prozessparameter in Abhängigkeit von Schweißleistung und Streckenenergie....	25
Tabelle 9: Präparation der Querschliffe	35
Tabelle 10: Streckenenergie in Abhängigkeit zur Porenanalyse	37
Tabelle 11: Eigenlast Dach.....	50
Tabelle 12: Ausbaulast.....	50
Tabelle 13: Windlast.....	50
Tabelle 14: Schneelast.....	51
Tabelle 15: Lastfallkombinationen (LFK)	51
Tabelle 16: Abmessungen Zugproben in mm	72
Tabelle 17: G4Si1 Vergleich Untersuchungsergebnisse der mechanischen Eigenschaften mit den Angaben zum Ausgangswerkstoff	81
Tabelle 18: RD100 Vergleich Untersuchungsergebnisse der mechanischen Eigenschaften mit den Angaben zum Ausgangswerkstoff	82

A Anhang

Anhang 1: Datenblatt Schweißzusatzwerkstoff (G4Si1).....	110
Anhang 2: Bilder Wandstruktur 4 kJ/cm Streckenenergie einreihig G4Si1	111
Anhang 3: Bilder Wandstruktur 6 kJ/cm Streckenenergie einreihig ($T_z = 100^\circ\text{C}$) G4Si1.....	112
Anhang 4: Bilder Wandstruktur 6 kJ/cm Streckenenergie einreihig ($T_z = 200^\circ\text{C}$) G4Si1	113
Anhang 5: Bilder Wandstruktur 8 kJ/cm Streckenenergie einreihig G4Si1	114
Anhang 6: Bilder Wandstruktur 4 kJ/cm Streckenenergie zweireihig G4Si1.....	115
Anhang 7: Bilder Wandstruktur 6 kJ/cm Streckenenergie zweireihig G4Si1.....	116
Anhang 8: Bilder Wandstruktur 8 kJ/cm Streckenenergie zweireihig G4Si1.....	117
Anhang 9: Bilder Wandstruktur 4 kJ/cm Streckenenergie dreireihig G4Si1	118
Anhang 10: Prüfmaschinen für Zugversuch, Kerbschlagbiegeversuch und Härtemessung	119
Anhang 11: Mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit zur Probenausrichtung G4Si1 ...	120
Anhang 12: Mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit von Versuchsparametern G4Si1	121
Anhang 13: Kerbschlagzähigkeit in Abhängigkeit von der Probenrichtung G4Si1.....	122
Anhang 14: Mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit von der Zwischenlagentemperatur G4Si1	123
Anhang 15: Mechanische Eigenschaften einreihig generierter Proben in Abhängigkeit von der Streckenenergie G4Si1	124
Anhang 16: Mechanische Eigenschaften zweireihig generierter Proben in Abhängigkeit von der Streckenenergie G4Si1	125
Anhang 17: Mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit von der Reihenanzahl aus der Wandgenerierung bei 6 kJ/cm und 8 kJ/cm Streckenenergie G4Si1.....	126
Anhang 18: Mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit zur Probenausrichtung G4Si1 ...	127
Anhang 19: Mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit von Versuchsparametern G4Si1	128
Anhang 20: Abkühlzeiten (800°C auf 500°C) in Abhängigkeit von Zwischenlagen-temperatur bei 6 kJ/cm Streckenenergie G4Si1.....	129
Anhang 21: Aufbauzeiten in Abhängigkeit von der Zwischenlagentemperatur bei 6 kJ/cm Streckenenergie G4Si1	130
Anhang 22: Aufbauzeiten in Abhängigkeit von der Reihenanzahl G4Si1	131
Anhang 23: Aufbauzeiten in Abhängigkeit von Wandstärke und Art der Generierung G4Si1	132
Anhang 24: Abkühlzeiten von 800°C auf 500°C ($t_{8/5}$ -Zeiten) G4Si1	133
Anhang 25: Messprotokoll Kerbschlagbiegeversuch G4Si1	134
Anhang 26: Messprotokoll Zugversuch 4 kJ/cm Streckenenergie einreihig (längs) G4Si1 ..	135
Anhang 27: Messprotokoll Zugversuch 4 kJ/cm Streckenenergie einreihig (quer) G4Si1 ...	136
Anhang 28: Messprotokoll Zugversuch 6 kJ/cm Streckenenergie einreihig 100°C (längs) G4Si1	137

Anhang 29: Messprotokoll Zugversuch 6 kJ/cm Streckenenergie einreihig 100°C (quer) G4Si1	138
Anhang 30: Messprotokoll Zugversuch 6 kJ/cm Streckenenergie einreihig 200°C (längs) G4Si1	139
Anhang 31: Messprotokoll Zugversuch 6 kJ/cm Streckenenergie einreihig 200°C (quer) G4Si1	140
Anhang 32: Messprotokoll Zugversuch 8 kJ/cm Streckenenergie einreihig (längs) G4Si1 ..	141
Anhang 33: Messprotokoll Zugversuch 8 kJ/cm Streckenenergie einreihig (quer) G4Si1 ...	142
Anhang 34: Messprotokoll Zugversuch 4 kJ/cm Streckenenergie zweireihig (längs) G4Si1	143
Anhang 35: Messprotokoll Zugversuch 4 kJ/cm Streckenenergie zweireihig (quer) G4Si1 .	144
Anhang 36: Messprotokoll Zugversuch 6 kJ/cm Streckenenergie zweireihig (längs) G4Si1	145
Anhang 37: Messprotokoll Zugversuch 6 kJ/cm Streckenenergie zweireihig (quer) G4Si1 .	146
Anhang 38: Messprotokoll Zugversuch 8 kJ/cm Streckenenergie zweireihig (längs) G4Si1	147
Anhang 39: Messprotokoll Zugversuch 8 kJ/cm Streckenenergie zweireihig (quer) G4Si1 .	148
Anhang 40: Messprotokoll Zugversuch 4 kJ/cm Streckenenergie dreireihig (längs) G4Si1 .	149
Anhang 41: Messprotokoll Zugversuch 4 kJ/cm Streckenenergie dreireihig (quer) G4Si1 ..	150
Anhang 42: Härtewerte für 4 kJ/cm Streckenenergie G4Si1	151
Anhang 43: Härtewerte für 6 kJ/cm Streckenenergie G4Si1	152
Anhang 44: Härteverlauf bei 8 kJ/cm Streckenenergie G4Si1	153
Anhang 45: Härteverlauf bei 4 kJ/cm Streckenenergie RD100	154
Anhang 46: Härteverlauf bei 8 kJ/cm Streckenenergie RD100	155
Anhang 47: Gefügebilder 4 kJ/cm Streckenenergie einreihig G4Si1	156
Anhang 48: Gefügebilder 6 kJ/cm Streckenenergie einreihig ($T_z = 100^\circ\text{C}$) G4Si1	157
Anhang 49: Gefügebilder 6 kJ/cm Streckenenergie einreihig ($T_z = 200^\circ\text{C}$) G4Si1	158
Anhang 50: Gefügebilder 8 kJ/cm Streckenenergie einreihig G4Si1	159
Anhang 51: Gefügebilder 4 kJ/cm Streckenenergie zweireihig G4Si1	160
Anhang 52: Gefügebilder 6 kJ/cm Streckenenergie zweireihig G4Si1	161
Anhang 53: Gefügebilder 8 kJ/cm Streckenenergie zweireihig G4Si1	162
Anhang 54: Gefügebilder 4 kJ/cm Streckenenergie dreireihig G4Si1.....	163

Anhang 1: Datenblatt Schweißzusatzwerkstoff (G4Si1)

WDI 16 L SG • VDG 16/60 L • WEKO 4 L						
Norm-bezeichnung	DIN EN ISO 14341-A		AWS A 5.18			
	G4Si1		ER70 S-6			
Eigenschaften und Anwendungsgebiet	Drahtelektrode für das Metall-Schutzgasschweißen an unlegierten und niedrig legierten Stählen, analytisch optimiert auf geringe Porenbildung in der Schweißnaht.					
Grundwerkstoffe	DIN 1629 St 37.0, St 44.0, St 52.0 DIN 1630 St 37.4, St 44.4, St 52.4 DIN 1681 GS 38, GS 45, GS 52 DIN 17102 StE 255, StE 315, StE 380, StE 420 DIN 17175 St 35.8, St 45.8, 19 Mn 5 EN 10025..... S185, S355JG3, E355 EN 10028-2 P235GH, P265GH, P295GH, P355GH EN 10028-3 P275N, P355N, P460N EN 10113-2 S355N, S460N, S500N, S500NL Schiffsbaustähle A-E, A 32 - E 32, A 36 - E 36					
Richtanalyse des Schweißdrahtes %	C	Si	Mn			
	0,07	1,05	1,75			
Mechanische Güterwerte des Schweißgutes nach EN 1597-1 (Mindestwerte bei RT)	Wärme-behandlung	Schutzgas	Streckgrenze N/mm ²	Zugfestigkeit N/mm ²	Dehnung (L ₀ =5d ₀) %	Kerbschlagarbeit ISO-V in Joule
	U	C	420	530	24	90
	U	M2	460	560	27	100
Schweißpositionen						Stromart= + Schutzgas (EN 439) CO ² Argon-Mischgase
Zulassungen:	① WDI 16 L SG • VDG 16/60 L • WEKO 4 L: TÜV, DB ① = Werk Hamm ② = Werk Rothenburg					
Lieferformen						

Anhang 2: Bilder Wandstruktur 4 kJ/cm Streckenenergie einreihig G4Si1



Anhang 3: Bilder Wandstruktur 6 kJ/cm Streckenenergie einreihig ($T_z = 100^\circ\text{C}$) G4Si1



Anhang 4: Bilder Wandstruktur 6 kJ/cm Streckenenergie einreihig ($T_z = 200^\circ\text{C}$) G4Si1



Anhang 5: Bilder Wandstruktur 8 kJ/cm Streckenenergie einreihig G4Si1



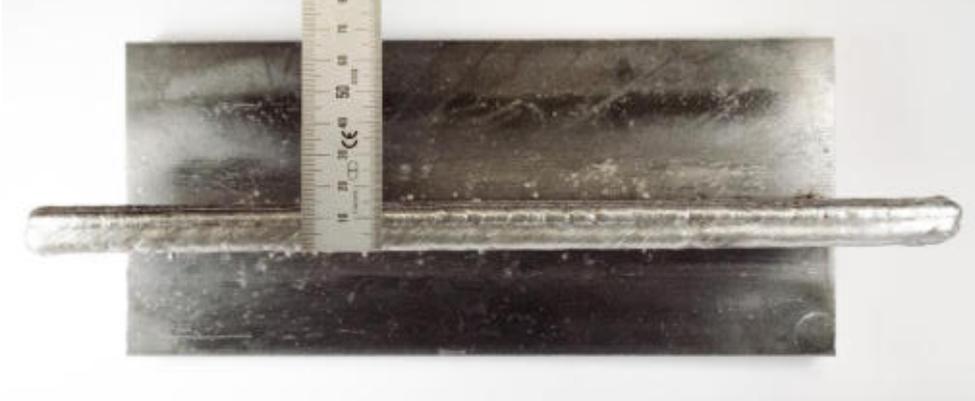
Anhang 6: Bilder Wandstruktur 4 kJ/cm Streckenenergie zweireihig G4Si1



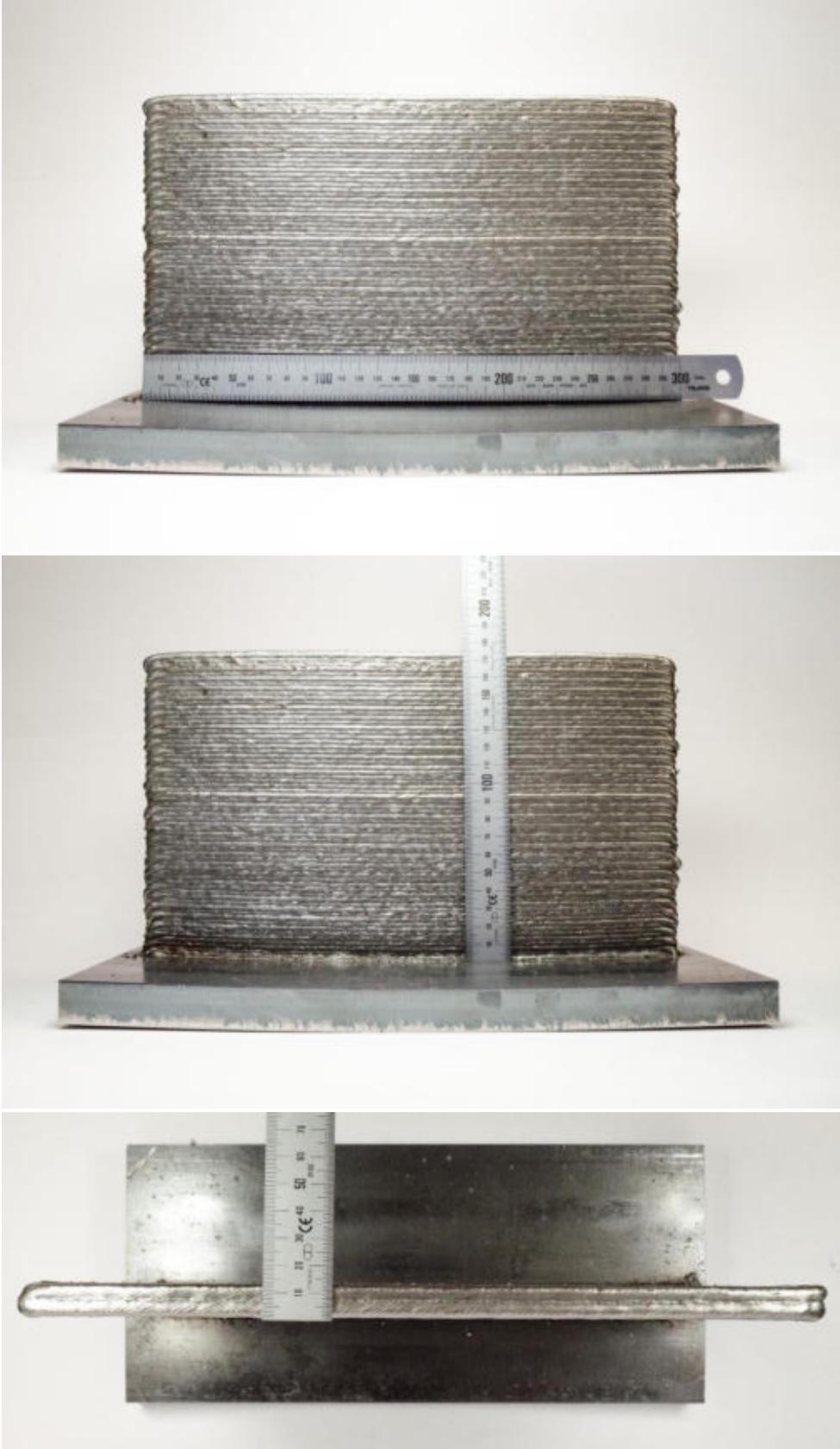
Anhang 7: Bilder Wandstruktur 6 kJ/cm Streckenenergie zweireihig G4Si1



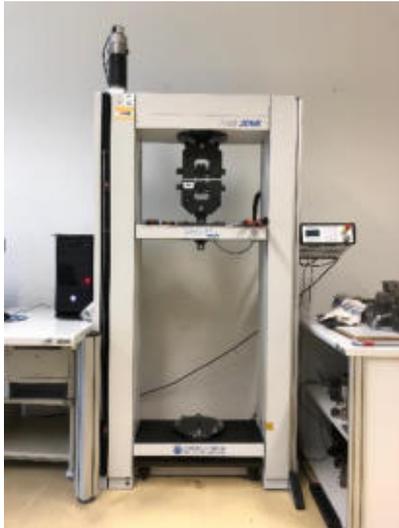
Anhang 8: Bilder Wandstruktur 8 kJ/cm Streckenenergie zweireihig G4Si1



Anhang 9: Bilder Wandstruktur 4 kJ/cm Streckenenergie dreireihig G4Si1



Anhang 10: Prüfmaschinen für Zugversuch, Kerbschlagbiegeversuch und Härtemessung
Universalprüfmaschine Zwick 1455 (Zugversuch):



Pendelschlagwerk WSD PSd 350/150 (Kerbschlagbiegeversuch)



Struers Durascan 70 (Härtemessung):



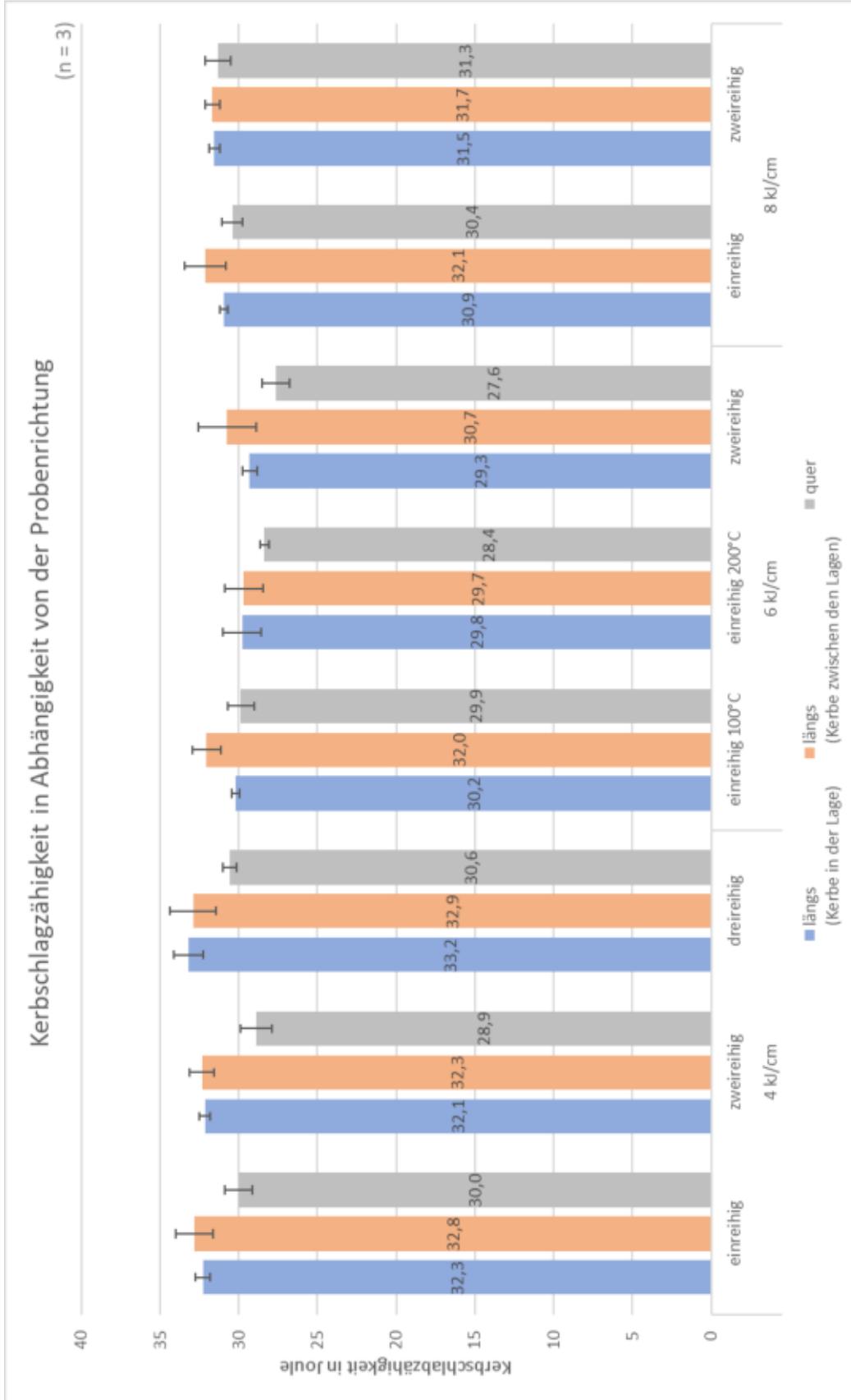
Anhang 11: Mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit zur Probenausrichtung G4Si1

Mechanische Größe	Parameter der Probe	Probenentnahmerichtung							
		quer	Standardabweichung (n=3)	längs	Standardabweichung (n=3)	längs (Kerbe in der Lage)	Standardabweichung (n=3)	längs (Kerbe zwischen der Lage)	Standardabweichung (n=3)
Zugfestigkeit in N/mm ²	4 kJ/cm	einreihig	537,99	3,10	534,96	0,80	-	-	-
		zweireihig	573,95	4,27	568,38	0,71	-	-	-
		dreireihig	596,15	8,36	587,07	1,49	-	-	-
	6 kJ/cm	einreihig 100°C	502,70	4,70	508,26	1,35	-	-	-
		einreihig 200°C	518,81	8,06	509,72	1,80	-	-	-
		zweireihig	579,33	3,77	569,35	12,09	-	-	-
	8 kJ/cm	einreihig	510,01	4,19	505,23	0,33	-	-	-
		zweireihig	561,50	6,86	554,34	5,41	-	-	-
		einreihig	426,77	11,23	431,05	8,90	-	-	-
Streckgrenze in N/mm ²	4 kJ/cm	zweireihig	486,50	11,35	464,37	4,87	-	-	-
		dreireihig	512,20	11,89	495,07	1,77	-	-	-
		einreihig 100°C	381,37	6,34	388,35	2,18	-	-	-
	6 kJ/cm	einreihig 200°C	385,63	6,54	386,40	5,33	-	-	-
		zweireihig	452,20	3,16	455,97	3,26	-	-	-
		einreihig	382,53	0,40	371,97	2,19	-	-	-
	8 kJ/cm	zweireihig	456,00	6,81	442,73	2,68	-	-	-
		einreihig	30,01	0,87	-	-	32,28	0,45	32,84
		zweireihig	28,88	0,99	-	-	32,14	0,34	32,34
Kerbschlag- zähigkeit in Joule	4 kJ/cm	dreireihig	30,58	0,42	-	-	33,21	0,94	32,91
		einreihig 100°C	29,88	0,85	-	-	30,21	0,24	32,04
		einreihig 200°C	28,38	0,29	-	-	29,78	1,22	29,68
	6 kJ/cm	zweireihig	27,64	0,90	-	-	29,31	0,48	30,74
		einreihig	30,41	0,66	-	-	30,94	0,24	32,14
		zweireihig	31,31	0,79	-	-	31,54	0,33	31,68
	8 kJ/cm	einreihig	31,31	0,79	-	-	-	-	-
		zweireihig	31,31	0,79	-	-	-	-	-
		einreihig	31,31	0,79	-	-	-	-	-

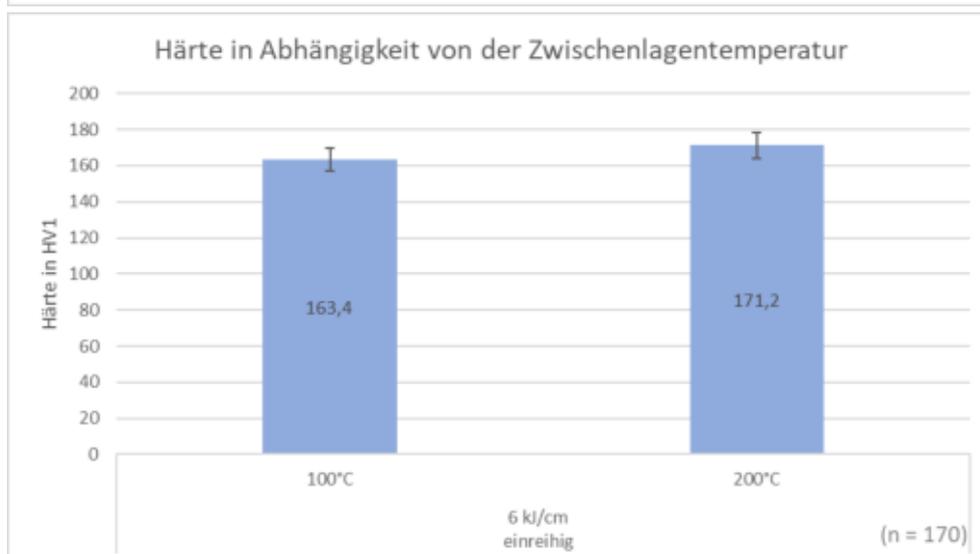
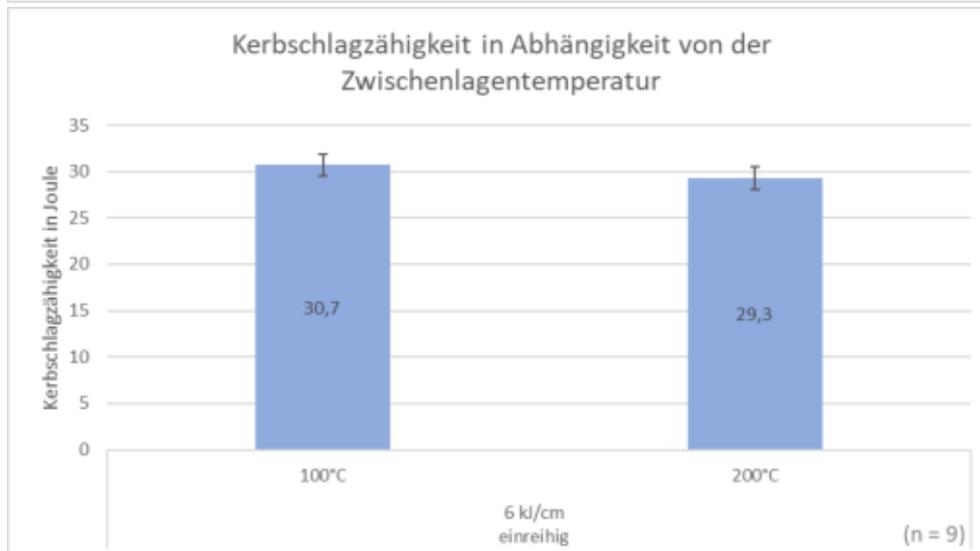
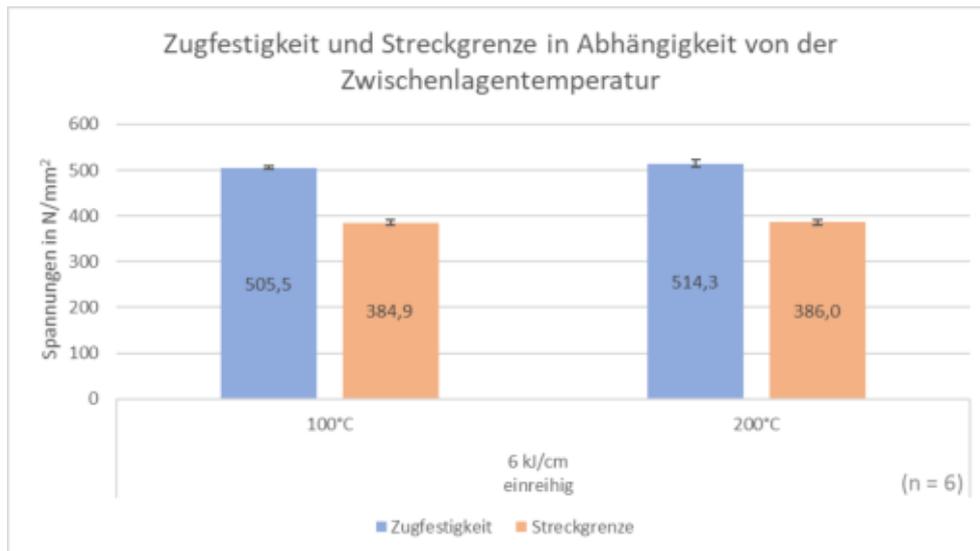
Anhang 12: Mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit von Versuchsparametern G4Si1

Parameter der Probe		Mechanische Größe									
		Zugfestigkeit in N/mm ²	Standard- abweichung in N/mm ² (n=6)	Streck- grenze in N/mm ²	Standard- abweichung in N/mm ² (n=6)	Bruch- dehnung in %	Standard- abweichung in % (n=6)	Kerbschlag- zähigkeit in Joule	Standard- abweichung in Joule (n=9)	Härte in HV1	Standard- abweichung in HV1 (n=170)
4 kJ/cm	einreihig	536,47	2,73	428,91	10,57	34,25	1,02	31,71	1,51	174,34	7,36
	zweireihig	571,16	4,14	475,43	14,10	31,23	1,14	31,12	1,76	188,99	7,65
	dreireihig	591,61	7,53	503,63	12,07	31,28	0,84	32,23	1,57	200,05	10,80
6 kJ/cm	einreihig 100°C	505,48	4,44	384,86	5,89	33,72	1,64	30,71	1,19	163,41	6,10
	einreihig 200°C	514,26	7,40	386,02	5,98	34,12	1,65	29,28	1,20	171,17	7,04
8 kJ/cm	zweireihig	574,34	10,26	454,08	3,72	30,15	2,83	29,23	1,75	184,59	7,81
	einreihig	507,62	3,81	377,25	5,51	35,30	1,06	31,16	1,12	166,14	6,88
	zweireihig	557,92	7,14	449,37	8,41	31,25	2,76	31,51	0,58	173,77	6,49

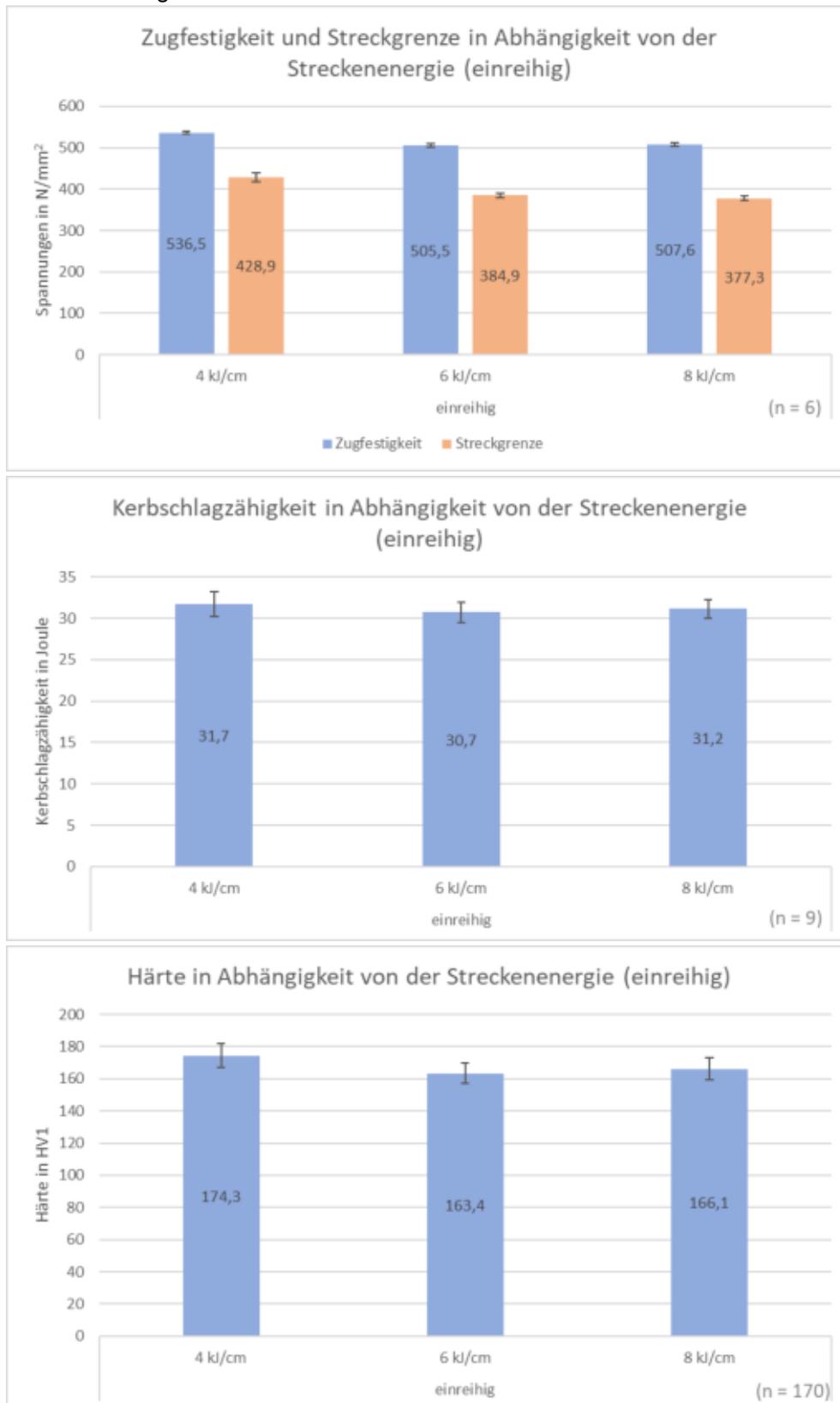
Anhang 13: Kerbschlagzähigkeit in Abhängigkeit von der Probenrichtung G4Si1



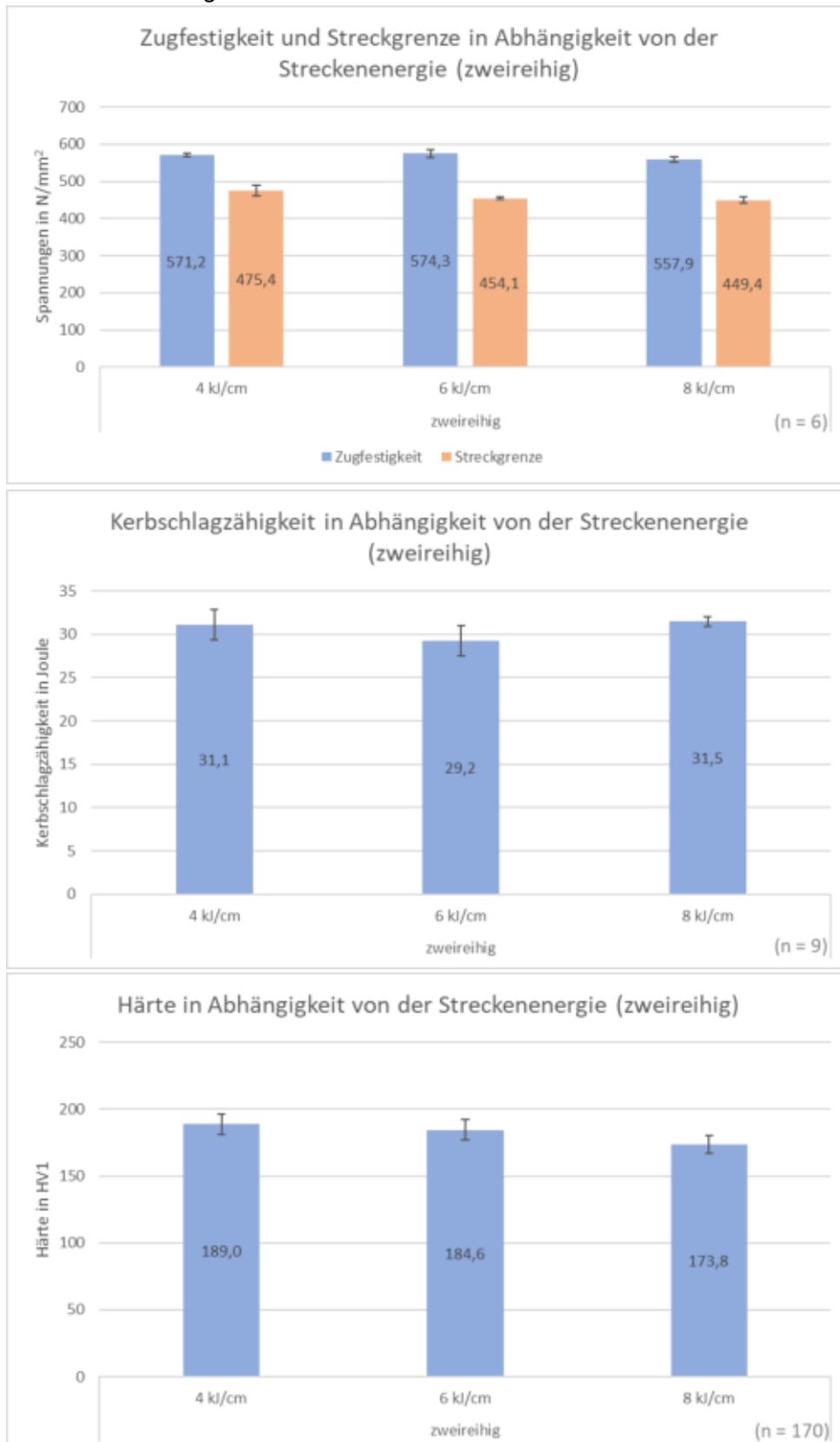
Anhang 14: Mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit von der Zwischenlagentemperatur G4Si1



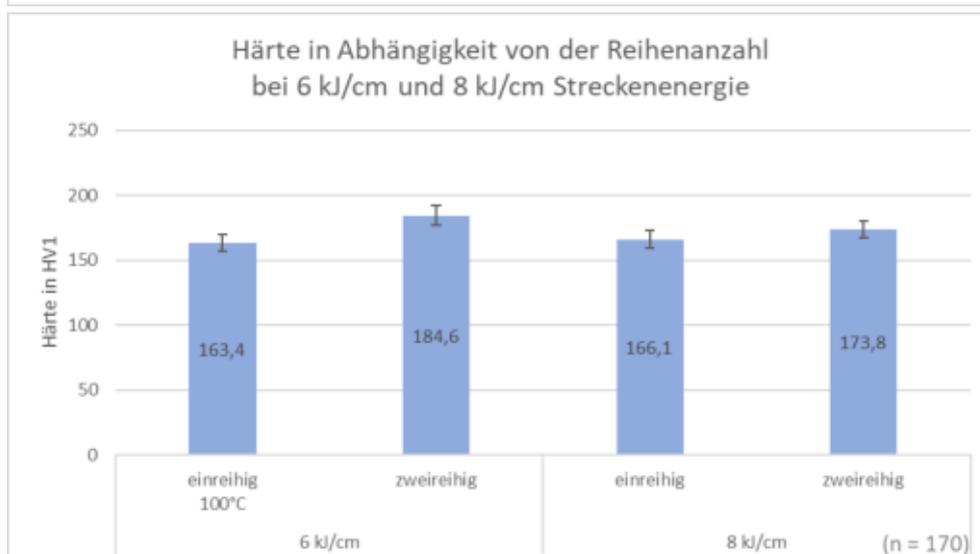
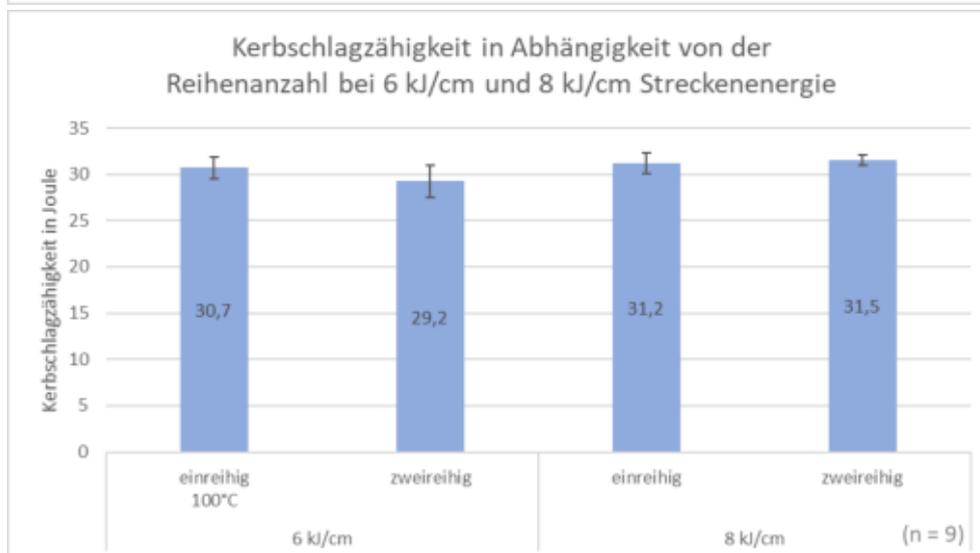
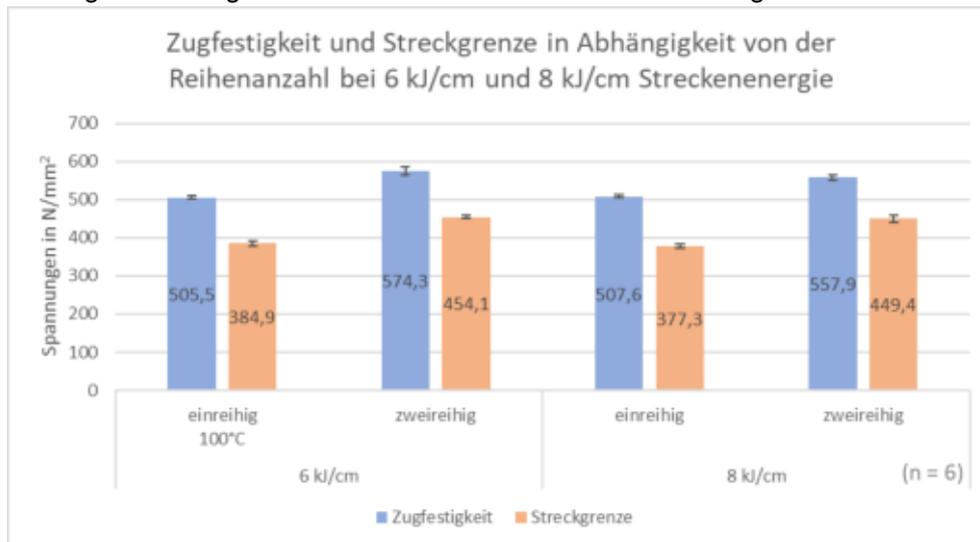
Anhang 15: Mechanische Eigenschaften einreihig generierter Proben in Abhängigkeit von der Streckenenergie G4Si1



Anhang 16: Mechanische Eigenschaften zweireihig generierter Proben in Abhängigkeit von der Streckenergie G4Si1



Anhang 17: Mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit von der Reihenanzahl aus der Wandgenerierung bei 6 kJ/cm und 8 kJ/cm Streckenenergie G4Si1



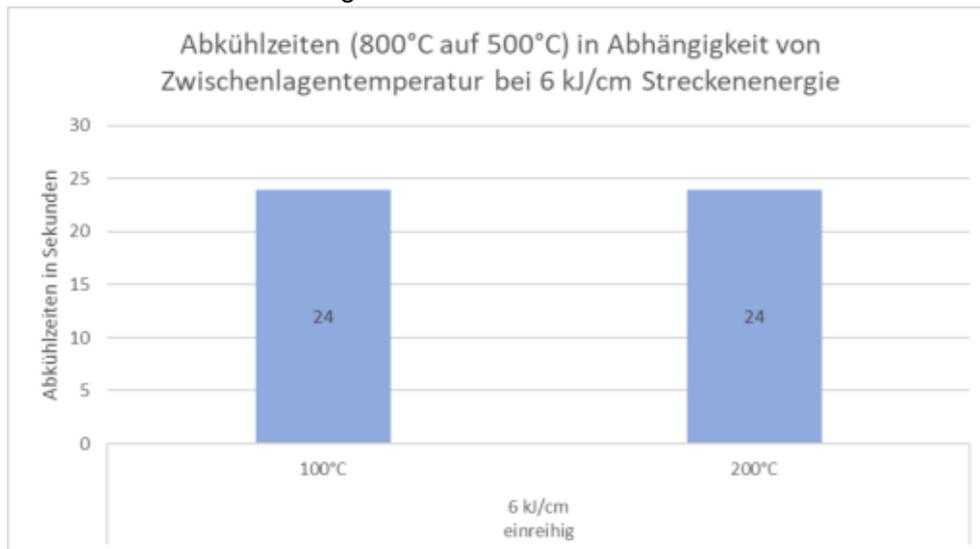
Anhang 18: Mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit zur Probenausrichtung G4Si1

Mechanische Größe	Parameter der Probe	Probenentnahmerichtung									
		quer	Standardabweichung (n=3)	längs	Standardabweichung (n=3)	längs (Kerbe in der Lage)	Standardabweichung (n=3)	längs (Kerbe zwischen der Lage)	Standardabweichung (n=3)		
Zugfestigkeit in N/mm ²	4 kJ/cm	einreihig	537,99	3,10	534,96	0,80	-	-	-	-	-
		zweireihig	573,95	4,27	568,38	0,71	-	-	-	-	-
		dreireihig	596,15	8,36	587,07	1,49	-	-	-	-	-
	6 kJ/cm	einreihig 100°C	502,70	4,70	508,26	1,35	-	-	-	-	-
		einreihig 200°C	518,81	8,06	509,72	1,80	-	-	-	-	-
		zweireihig	579,33	3,77	569,35	12,09	-	-	-	-	-
	8 kJ/cm	einreihig	510,01	4,19	505,23	0,33	-	-	-	-	-
		zweireihig	561,50	6,86	554,34	5,41	-	-	-	-	-
		einreihig	426,77	11,23	431,05	8,90	-	-	-	-	-
Streckgrenze in N/mm ²	4 kJ/cm	zweireihig	486,50	11,35	464,37	4,87	-	-	-	-	-
		dreireihig	512,20	11,89	495,07	1,77	-	-	-	-	-
		einreihig 100°C	381,37	6,34	388,35	2,18	-	-	-	-	-
	6 kJ/cm	einreihig 200°C	385,63	6,54	386,40	5,33	-	-	-	-	-
		zweireihig	452,20	3,16	455,97	3,26	-	-	-	-	-
		einreihig	382,53	0,40	371,97	2,19	-	-	-	-	-
	8 kJ/cm	zweireihig	456,00	6,81	442,73	2,68	-	-	-	-	-
		einreihig	30,01	0,87	-	-	32,28	0,45	32,84	1,18	-
		zweireihig	28,88	0,99	-	-	32,14	0,34	32,34	0,80	-
Kerbschlag- zähigkeit in Joule	4 kJ/cm	dreireihig	30,58	0,42	-	-	33,21	0,94	32,91	1,48	-
		einreihig 100°C	29,88	0,85	-	-	30,21	0,24	32,04	0,88	-
		einreihig 200°C	28,38	0,29	-	-	29,78	1,22	29,68	1,23	-
	6 kJ/cm	zweireihig	27,64	0,90	-	-	29,31	0,48	30,74	1,83	-
		einreihig	30,41	0,66	-	-	30,94	0,24	32,14	1,31	-
		zweireihig	31,31	0,79	-	-	31,54	0,33	31,68	0,45	-

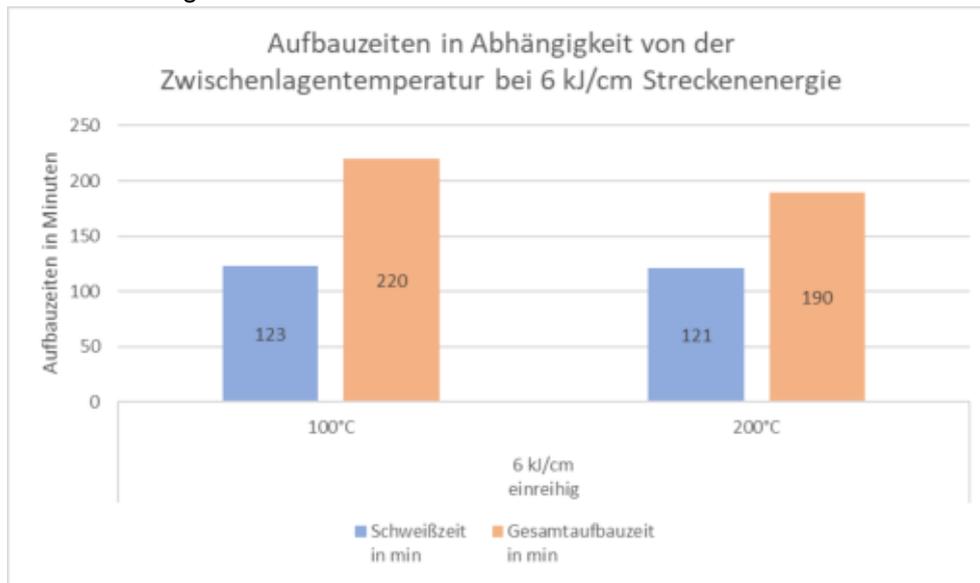
Anhang 19: Mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit von Versuchsparametern G4Si1

Parameter der Probe		Mechanische Größe									
		Zugfestigkeit in N/mm ²	Standard- abweichung in N/mm ² (n=6)	Streck- grenze in N/mm ²	Standard- abweichung in N/mm ² (n=6)	Bruch- dehnung in %	Standard- abweichung in % (n=6)	Kerbschlag- zähigkeit in Joule	Standard- abweichung in Joule (n=9)	Härte in HV1	Standard- abweichung in HV1 (n=170)
4 kJ/cm	einreihig	536,47	2,73	428,91	10,57	34,25	1,02	31,71	1,51	174,34	7,36
	zweireihig	571,16	4,14	475,43	14,10	31,23	1,14	31,12	1,76	188,99	7,65
	dreireihig	591,61	7,53	503,63	12,07	31,28	0,84	32,23	1,57	200,05	10,80
6 kJ/cm	einreihig 100°C	505,48	4,44	384,86	5,89	33,72	1,64	30,71	1,19	163,41	6,10
	einreihig 200°C	514,26	7,40	386,02	5,98	34,12	1,65	29,28	1,20	171,17	7,04
8 kJ/cm	zweireihig	574,34	10,26	454,08	3,72	30,15	2,83	29,23	1,75	184,59	7,81
	einreihig	507,62	3,81	377,25	5,51	35,30	1,06	31,16	1,12	166,14	6,88
	zweireihig	557,92	7,14	449,37	8,41	31,25	2,76	31,51	0,58	173,77	6,49

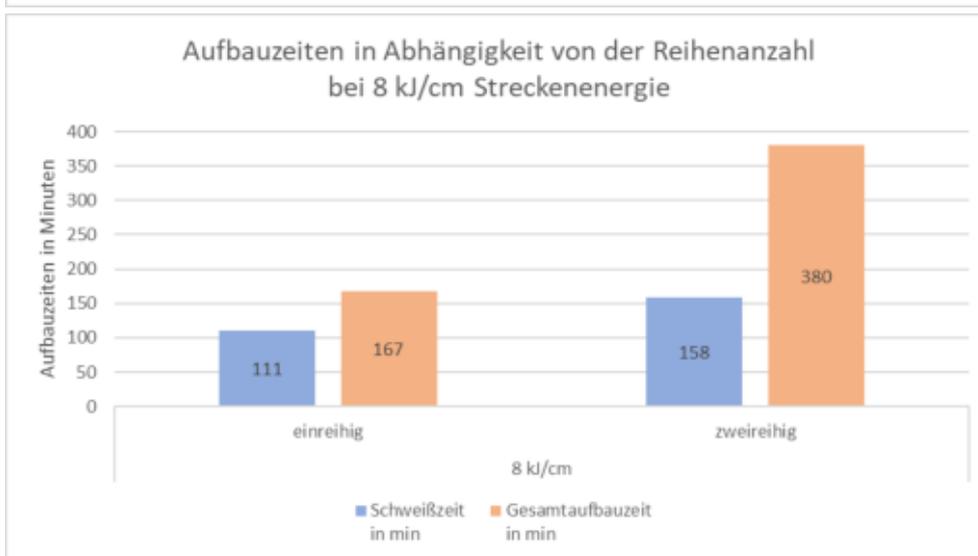
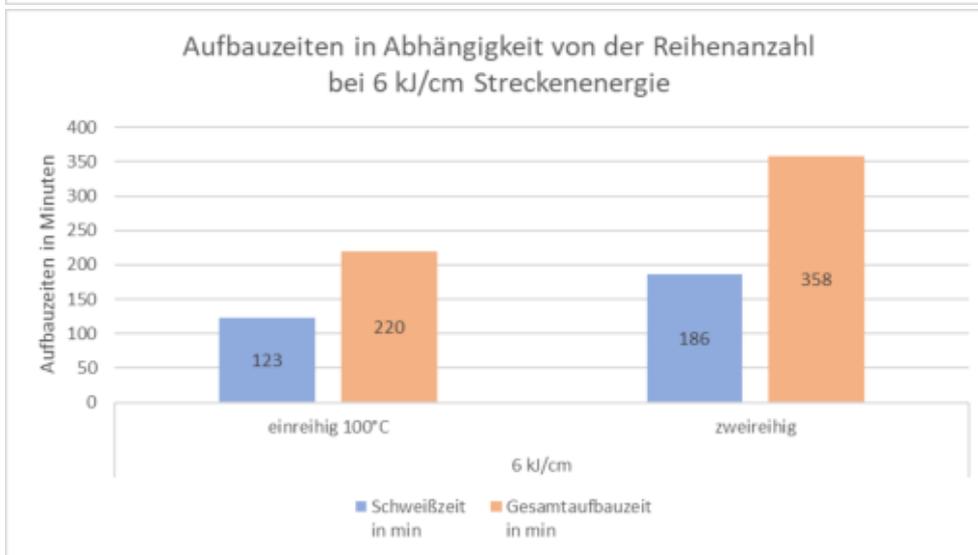
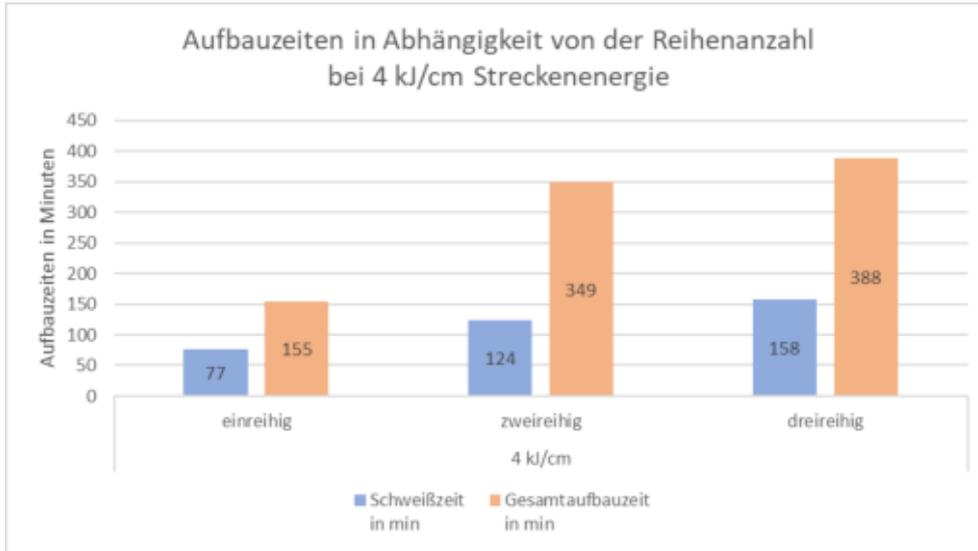
Anhang 20: Abkühlzeiten (800°C auf 500°C) in Abhängigkeit von Zwischenlagen-temperatur bei 6 kJ/cm Streckenenergie G4Si1



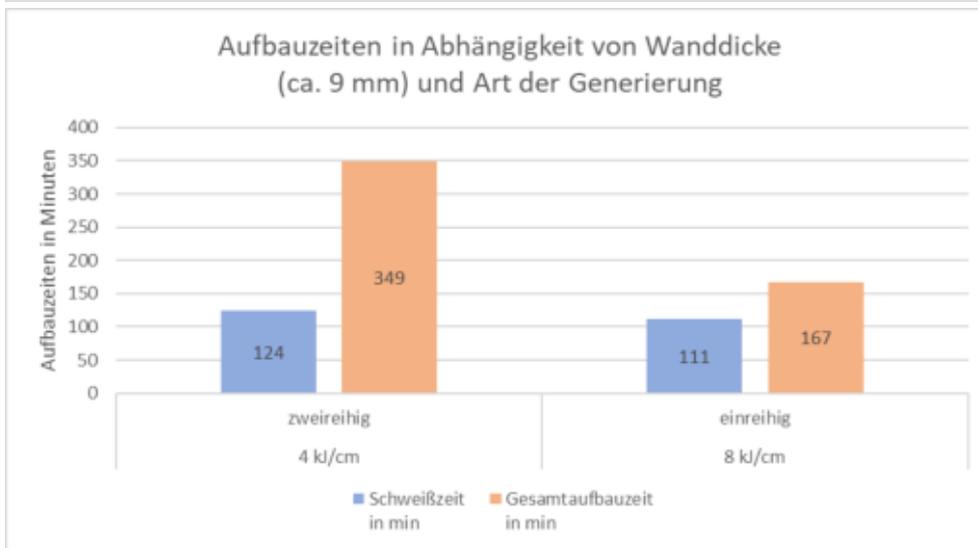
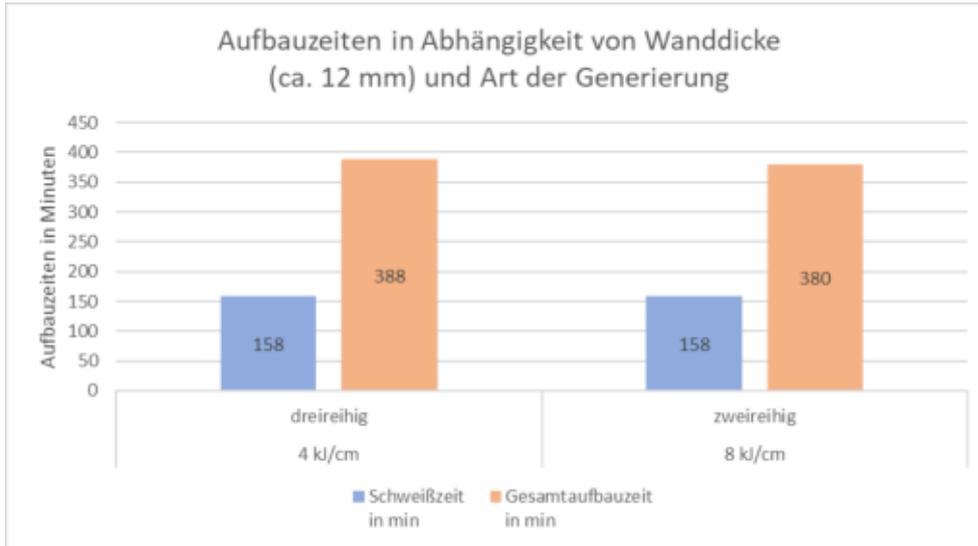
Anhang 21: Aufbauzeiten in Abhängigkeit von der Zwischenlagentemperatur bei 6 kJ/cm Streckenenergie G4Si1



Anhang 22: Aufbauzeiten in Abhängigkeit von der Reihenanzahl G4Si1



Anhang 23: Aufbauzeiten in Abhängigkeit von Wandstärke und Art der Generierung G4Si1



Anhang 24: Abkühlzeiten von 800°C auf 500°C ($t_{8/5}$ -Zeiten) G4Si1

Parameter der Probe		gemessene Abkühlzeit ($t_{8/5}$-Zeit) in Sekunden	gerundete Abkühlzeit ($t_{8/5}$-Zeit) in Sekunden
4 kJ/cm	einreihig	15,94	16,00
	zweireihig	14,20	14,00
	dreireihig	8,03	8,00
6 kJ/cm	einreihig 100°C	24,02	24,00
	einreihig 200°C	23,98	24,00
	zweireihig	16,10	16,00
8 kJ/cm	einreihig	30,06	30,00
	zweireihig	19,96	20,00

Anhang 25: Messprotokoll Kerbschlagbiegeversuch G4Si1

Probenbezeichnung	gemessene Kerbschlagzähigkeit in Joule	Kerbschlagzähigkeit in Joule (verlustfrei)	Probenbezeichnung	gemessene Kerbschlagzähigkeit in Joule	Kerbschlagzähigkeit in Joule (verlustfrei)
4 kJ/cm 1-reihig			4 kJ/cm 2-reihig		
1	31,8	32,8	1	32,1	32,1
2	31,4	33,4	2	31,9	31,9
3	32,5	35,5	3	31,3	31,3
4	30,8	34,8	4	33,1	33,1
5	33,4	38,4	5	31,4	31,4
6	33,2	39,2	6	31,4	31,4
7	28,7	35,7	7	29,3	29,3
8	29,4	37,4	8	27,1	27,1
9	30,8	39,8	9	29,1	29,1
6 kJ/cm 1-reihig 100°C			6 kJ/cm 2-reihig		
1	30	31	1	28,7	28,7
2	29,5	31,5	2	28,5	28,5
3	30	33	3	29,6	29,6
4	30,9	34,9	4	29,9	29,9
5	31,2	36,2	5	32,8	32,8
6	32,9	38,9	6	28,4	28,4
7	29	36	7	26,9	26,9
8	28,8	36,8	8	26,4	26,4
9	30,7	39,7	9	28,5	28,5
6 kJ/cm 1-reihig 200°C			8 kJ/cm 2-reihig		
1	28,8	29,8	1	31,4	31,4
2	28,3	30,3	2	30,7	30,7
3	31,1	34,1	3	31,4	31,4
4	27,7	31,7	4	31,8	31,8
5	30,7	35,7	5	31,4	31,4
6	29,5	35,5	6	30,7	30,7
7	27,7	34,7	7	30,7	30,7
8	27,9	35,9	8	30,1	30,1
9	28,4	37,4	9	32	32
8 kJ/cm 1-reihig			4 kJ/cm 3-reihig		
1	30,4	31,4	1	34	34
2	30,4	32,4	2	32,8	32,8
3	30,9	33,9	3	31,7	31,7
4	30,6	34,6	4	34	34
5	31,1	36,1	5	33,1	33,1
6	33,6	39,6	6	30,5	30,5
7	30,5	37,5	7	29,9	29,9
8	29,1	37,1	8	29,9	29,9
9	30,5	39,5	9	30,8	30,8

Anhang 26: Messprotokoll Zugversuch 4 kJ/cm Streckenenergie einreihig (längs) G4Si1

IFt

Prüfbericht

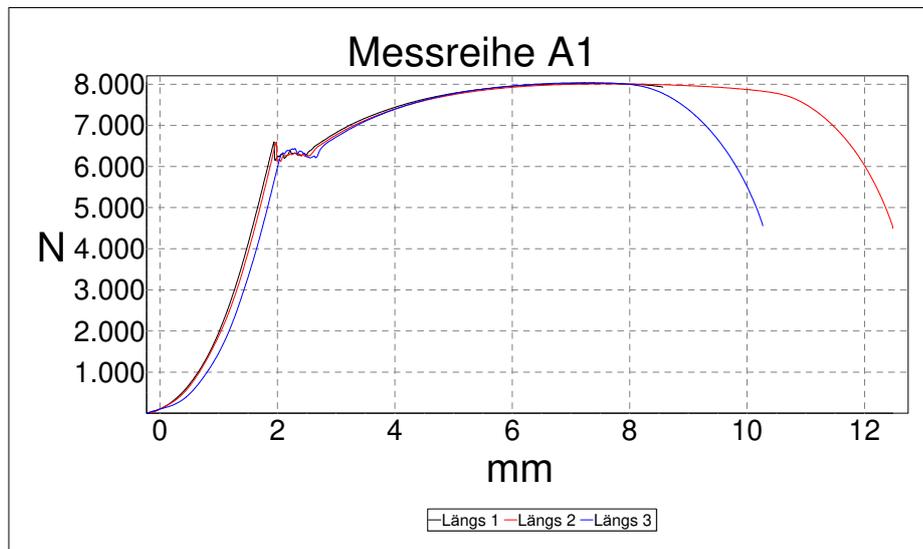
Maschinentyp : inspekt 20kN
Kraftmesszelle : 20000 N
Testgeschwindigkeiten: ab 0 s 10 mm/min

Resultate Messreihe A1:

Name	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm²]	a [mm]	b [mm]
Längs 1	8022	534,775	15,000	3,000	5,000
Längs 2	8011	534,077	15,000	3,000	5,000
Längs 3	8040	536,020	15,000	3,000	5,000

Statistik Messreihe A1:

	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm²]	a [mm]	b [mm]
MW	8024	534,957	15	3	5
MINI	8011	534,077	15	3	5
MAXI	8040	536,02	15	3	5
s	15	0,984	0	0	0



So = Querschnittsfläche a = Dicke
Rm = Zugfestigkeit (DIN EN 10002) b = Breite

Kommentar :

Anhang 27: Messprotokoll Zugversuch 4 kJ/cm Streckenenergie einreihig (quer) G4Si1

IFt

Prüfbericht

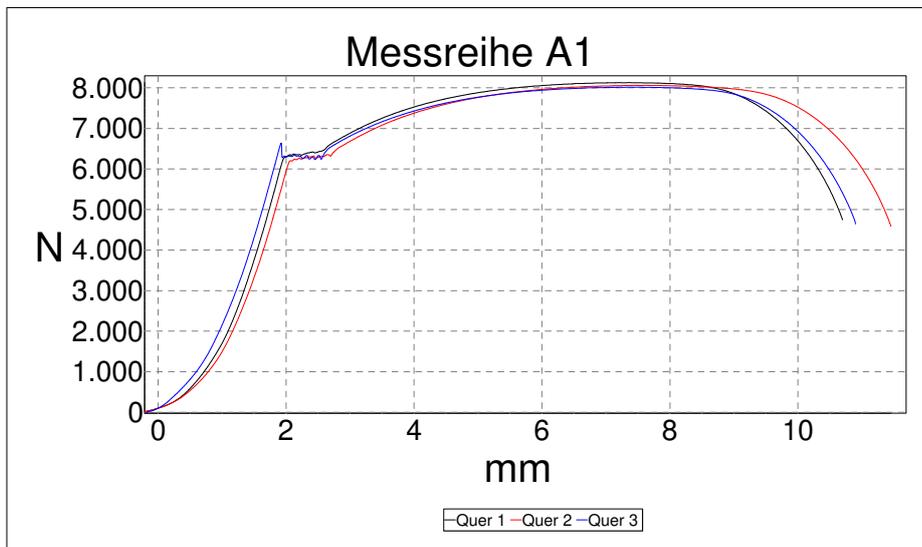
Maschinentyp : inspekt 20kN
Kraftmesszelle : 20000 N
Testgeschwindigkeiten: ab 0 s 10 mm/min

Resultate Messreihe A1:

Name	Fmax [N]	Rm [MPa]	a [mm]	b [mm]	So [mm²]
Quer 1	8130	542,019	3,000	5,000	15,000
Quer 2	8062	537,467	3,000	5,000	15,000
Quer 3	8017	534,471	3,000	5,000	15,000

Statistik Messreihe A1:

	Fmax [N]	Rm [MPa]	a [mm]	b [mm]	So [mm²]
MW	8070	537,986	3	5	15
MINI	8017	534,471	3	5	15
MAXI	8130	542,019	3	5	15
s	57	3,801	0	0	0



Fmax = Maximalkraft (global) a = Dicke
Rm = Zugfestigkeit (DIN EN 10002) b = Breite
So = Querschnittsfläche

Kommentar :

Anhang 28: Messprotokoll Zugversuch 6 kJ/cm Streckenenergie einreihig 100°C (längs) G4Si1

IFt

Prüfbericht

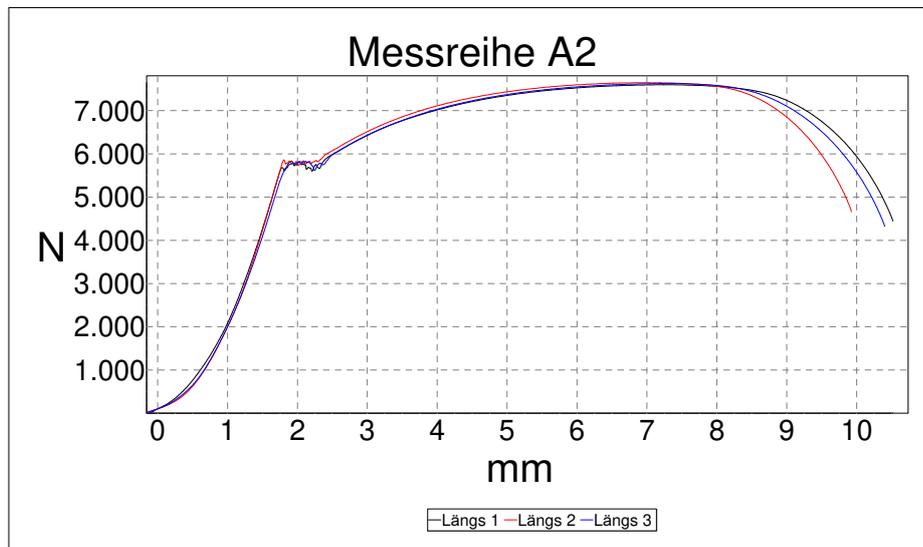
Maschinentyp : inspekt 20kN
Kraftmesszelle : 20000 N
Testgeschwindigkeiten: ab 0 s 10 mm/min

Resultate Messreihe A2:

Name	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm²]	a [mm]	b [mm]
Längs 1	7598	506,547	15,000	3,000	5,000
Längs 2	7648	509,839	15,000	3,000	5,000
Längs 3	7626	508,400	15,000	3,000	5,000

Statistik Messreihe A2:

	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm²]	a [mm]	b [mm]
MW	7624	508,262	15	3	5
MINI	7598	506,547	15	3	5
MAXI	7648	509,839	15	3	5
s	25	1,65	0	0	0



So = Querschnittsfläche a = Dicke
Rm = Zugfestigkeit (DIN EN 10002) b = Breite

Kommentar :

Anhang 29: Messprotokoll Zugversuch 6 kJ/cm Streckenenergie einreihig 100°C (quer) G4Si1

IFt

Prüfbericht

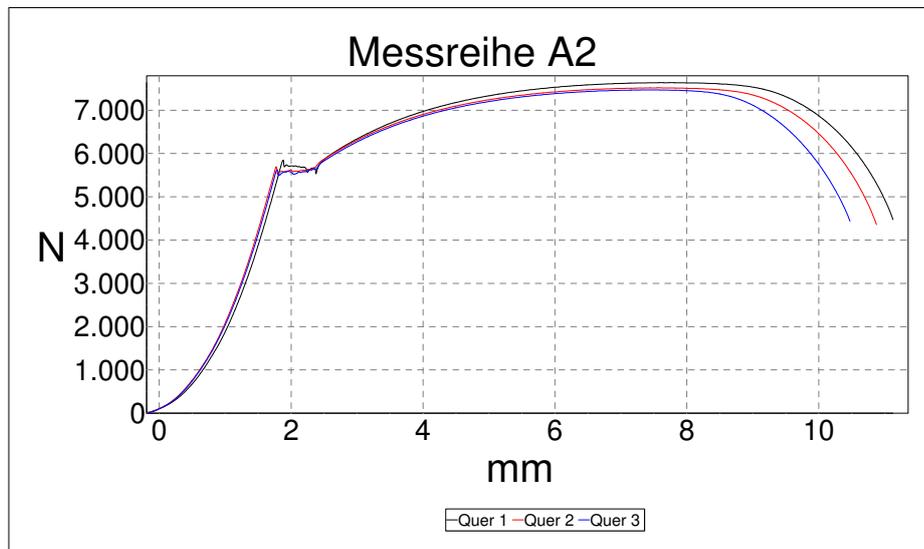
Maschinentyp : inspekt 20kN
Kraftmesszelle : 20000 N
Testgeschwindigkeiten: ab 0 s 10 mm/min

Resultate Messreihe A2:

Name	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm ²]	a [mm]	b [mm]
Quer 1	7637	509,104	15,000	3,000	5,000
Quer 2	7515	501,023	15,000	3,000	5,000
Quer 3	7469	497,960	15,000	3,000	5,000

Statistik Messreihe A2:

	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm ²]	a [mm]	b [mm]
MW	7540	502,696	15	3	5
MINI	7469	497,96	15	3	5
MAXI	7637	509,104	15	3	5
s	87	5,757	0	0	0



Fmax = Maximalkraft (global) a = Dicke
Rm = Zugfestigkeit (DIN EN 10002) b = Breite
So = Querschnittsfläche

Kommentar :

Anhang 30: Messprotokoll Zugversuch 6 kJ/cm Streckenenergie einreihig 200°C (längs) G4Si1

IFt

Prüfbericht

Maschinentyp : inspekt 20kN
Kraftmesszelle : 20000 N
Testgeschwindigkeiten: ab 0 s 10 mm/min

Resultate Messreihe A3:

Name	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm²]	a [mm]	b [mm]
Längs 1	7683	512,219	15,000	3,000	5,000
Längs 2	7621	508,067	15,000	3,000	5,000
Längs 3	7633	508,860	15,000	3,000	5,000

Statistik Messreihe A3:

	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm²]	a [mm]	b [mm]
MW	7646	509,715	15	3	5
MINI	7621	508,067	15	3	5
MAXI	7683	512,219	15	3	5
s	33	2,204	0	0	0



So = Querschnittsfläche a = Dicke
Rm = Zugfestigkeit (DIN EN 10002) b = Breite

Kommentar :

Anhang 31: Messprotokoll Zugversuch 6 kJ/cm Streckenenergie einreihig 200°C (quer) G4Si1

IFt

Prüfbericht

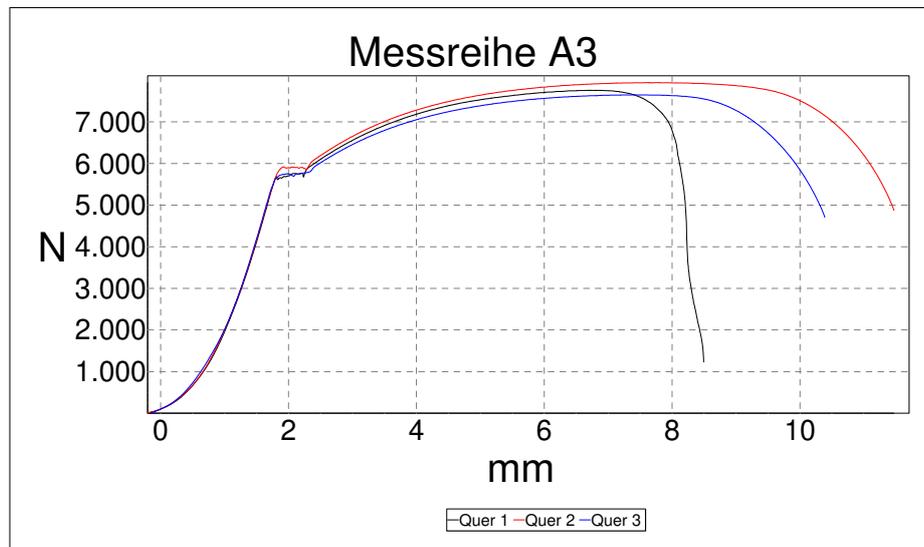
Maschinentyp : inspekt 20kN
Kraftmesszelle : 20000 N
Testgeschwindigkeiten: ab 0 s 10 mm/min

Resultate Messreihe A3:

Name	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm ²]	a [mm]	b [mm]
Quer 1	7756	517,091	15,000	3,000	5,000
Quer 2	7941	529,421	15,000	3,000	5,000
Quer 3	7649	509,913	15,000	3,000	5,000

Statistik Messreihe A3:

	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm ²]	a [mm]	b [mm]
MW	7782	518,808	15	3	5
MINI	7649	509,913	15	3	5
MAXI	7941	529,421	15	3	5
s	148	9,867	0	0	0



Fmax = Maximalkraft (global) a = Dicke
Rm = Zugfestigkeit (DIN EN 10002) b = Breite
So = Querschnittsfläche

Kommentar :

Anhang 32: Messprotokoll Zugversuch 8 kJ/cm Streckenenergie einreihig (längs) G4Si1

IFt

Prüfbericht

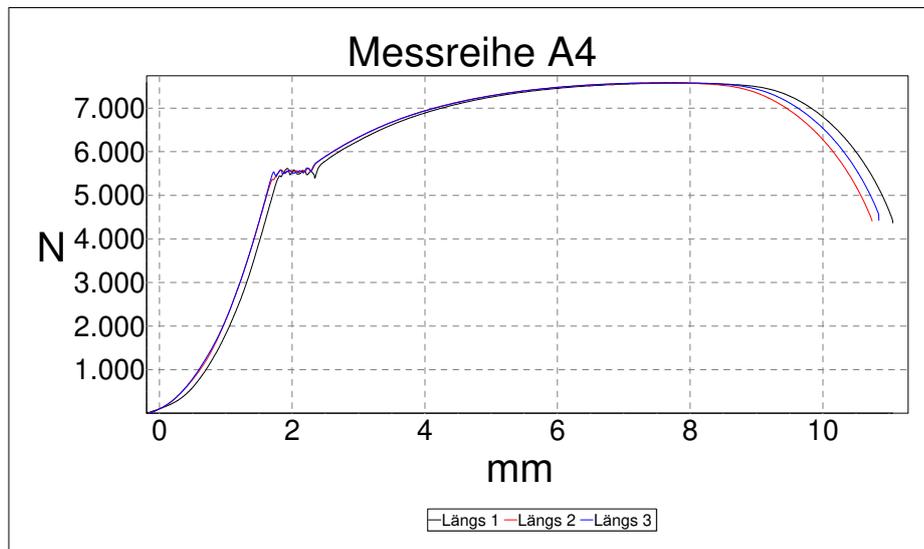
Maschinentyp : inspekt 20kN
Kraftmesszelle : 20000 N
Testgeschwindigkeiten: ab 0 s 10 mm/min

Resultate Messreihe A4:

Name	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm ²]	a [mm]	b [mm]
Längs 1	7573	504,833	15,000	3,000	5,000
Längs 2	7578	505,227	15,000	3,000	5,000
Längs 3	7585	505,635	15,000	3,000	5,000

Statistik Messreihe A4:

	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm ²]	a [mm]	b [mm]
MW	7579	505,232	15	3	5
MINI	7573	504,833	15	3	5
MAXI	7585	505,635	15	3	5
s	6	0,401	0	0	0



So = Querschnittsfläche a = Dicke
Rm = Zugfestigkeit (DIN EN 10002) b = Breite

Kommentar :

Anhang 33: Messprotokoll Zugversuch 8 kJ/cm Streckenenergie einreihig (quer) G4Si1

IFt

Prüfbericht

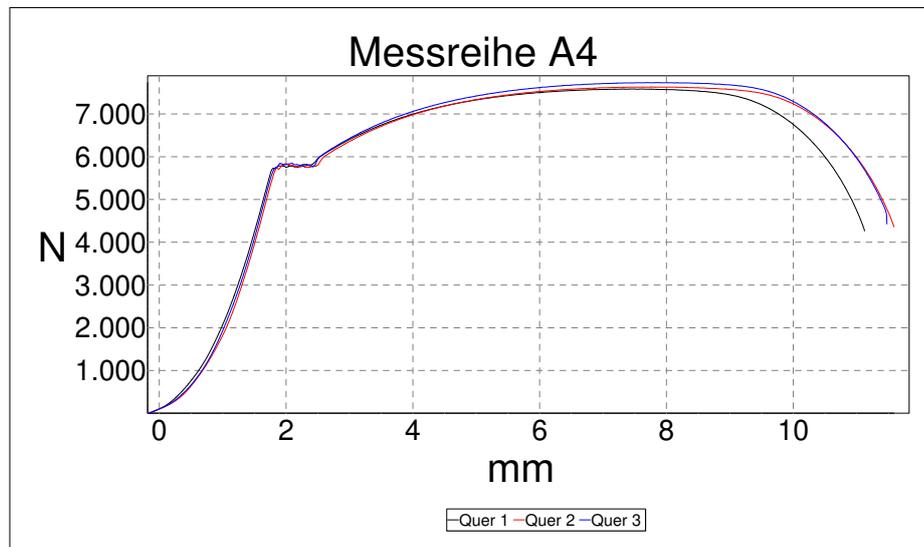
Maschinentyp : inspekt 20kN
 Kraftmesszelle : 20000 N
 Testgeschwindigkeiten: ab 0 s 10 mm/min

Resultate Messreihe A4:

Name	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm ²]	a [mm]	b [mm]
Quer 1	7584	505,620	15,000	3,000	5,000
Quer 2	7632	508,771	15,000	3,000	5,000
Quer 3	7735	515,652	15,000	3,000	5,000

Statistik Messreihe A4:

	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm ²]	a [mm]	b [mm]
MW	7650	510,014	15	3	5
MINI	7584	505,62	15	3	5
MAXI	7735	515,652	15	3	5
s	77	5,13	0	0	0



Fmax = Maximalkraft (global)
 Rm = Zugfestigkeit (DIN EN 10002)
 So = Querschnittsfläche

a = Dicke
 b = Breite

Kommentar :

Anhang 34: Messprotokoll Zugversuch 4 kJ/cm Streckenenergie zweireihig (längs) G4Si1

IFt

Prüfbericht

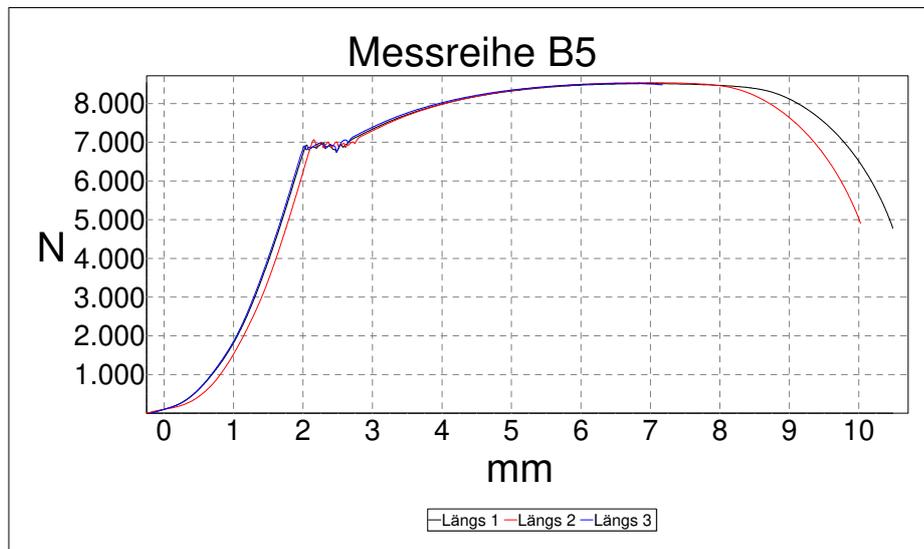
Maschinentyp : inspekt 20kN
Kraftmesszelle : 20000 N
Testgeschwindigkeiten: ab 0 s 10 mm/min

Resultate Messreihe B5:

Name	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm²]	a [mm]	b [mm]
Längs 1	8517	567,771	15,000	3,000	5,000
Längs 2	8541	569,379	15,000	3,000	5,000
Längs 3	8520	567,985	15,000	3,000	5,000

Statistik Messreihe B5:

	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm²]	a [mm]	b [mm]
MW	8526	568,378	15	3	5
MINI	8517	567,771	15	3	5
MAXI	8541	569,379	15	3	5
s	13	0,873	0	0	0



So = Querschnittsfläche a = Dicke
Rm = Zugfestigkeit (DIN EN 10002) b = Breite

Kommentar :

Anhang 35: Messprotokoll Zugversuch 4 kJ/cm Streckenenergie zweireihig (quer) G4Si1

IFt

Prüfbericht

Maschinentyp : inspekt 20kN
Kraftmesszelle : 20000 N
Testgeschwindigkeiten: ab 0 s 10 mm/min

Resultate Messreihe B5:

Name	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm ²]	a [mm]	b [mm]
Quer 1	8673	578,191	15,000	3,000	5,000
Quer 2	8633	575,559	15,000	3,000	5,000
Quer 3	8521	568,099	15,000	3,000	5,000

Statistik Messreihe B5:

	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm ²]	a [mm]	b [mm]
MW	8609	573,95	15	3	5
MINI	8521	568,099	15	3	5
MAXI	8673	578,191	15	3	5
s	79	5,235	0	0	0



Fmax = Maximalkraft (global) a = Dicke
Rm = Zugfestigkeit (DIN EN 10002) b = Breite
So = Querschnittsfläche

Kommentar :

Anhang 36: Messprotokoll Zugversuch 6 kJ/cm Streckenenergie zweireihig (längs) G4Si1

IFt

Prüfbericht

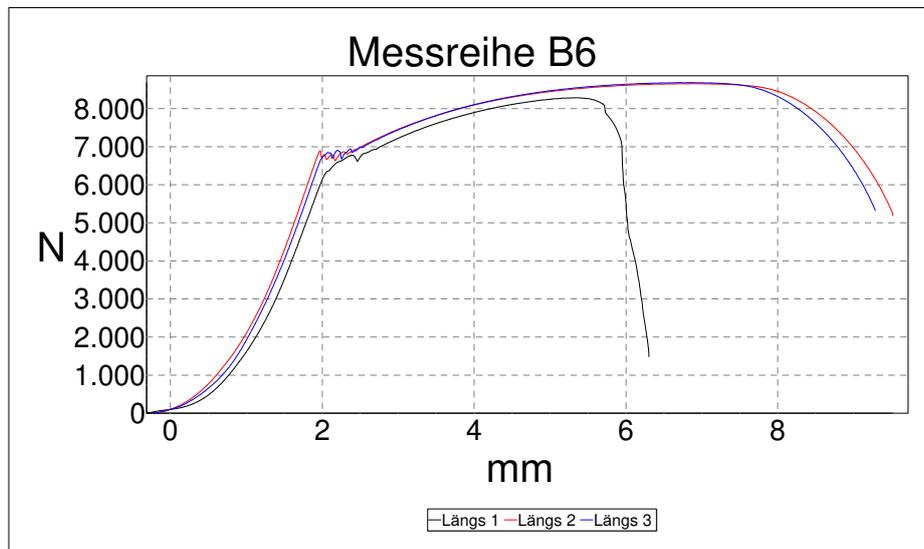
Maschinentyp : inspekt 20kN
Kraftmesszelle : 20000 N
Testgeschwindigkeiten: ab 0 s 10 mm/min

Resultate Messreihe B6:

Name	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm ²]	a [mm]	b [mm]
Längs 1	8284	552,276	15,000	3,000	5,000
Längs 2	8654	576,949	15,000	3,000	5,000
Längs 3	8682	578,809	15,000	3,000	5,000

Statistik Messreihe B6:

	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm ²]	a [mm]	b [mm]
MW	8540	569,345	15	3	5
MINI	8284	552,276	15	3	5
MAXI	8682	578,809	15	3	5
s	222	14,811	0	0	0



So = Querschnittsfläche
Rm = Zugfestigkeit (DIN EN 10002) a = Dicke
b = Breite

Kommentar :

Anhang 37: Messprotokoll Zugversuch 6 kJ/cm Streckenenergie zweireihig (quer) G4Si1

IFt

Prüfbericht

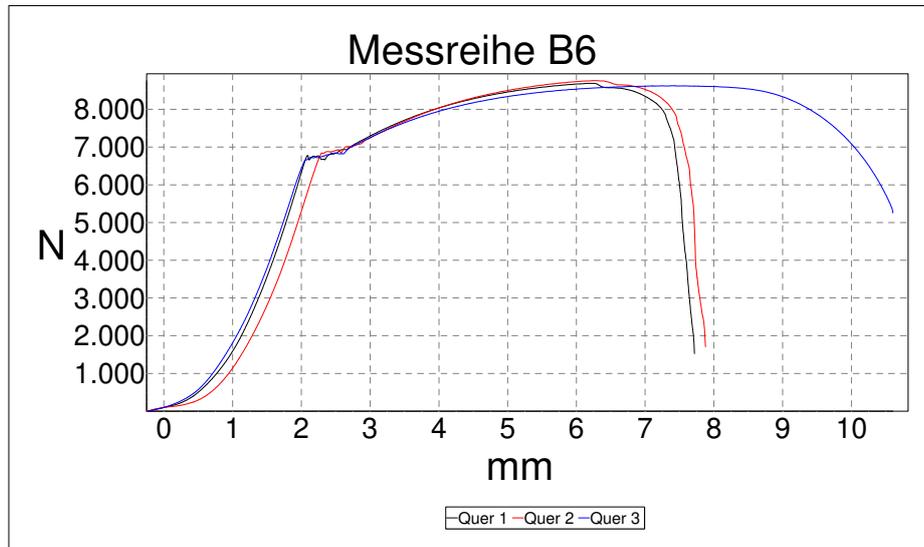
Maschinentyp : inspekt 20kN
Kraftmesszelle : 20000 N
Testgeschwindigkeiten: ab 0 s 10 mm/min

Resultate Messreihe B6:

Name	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm ²]	a [mm]	b [mm]
Quer 1	8689	579,271	15,000	3,000	5,000
Quer 2	8760	583,985	15,000	3,000	5,000
Quer 3	8621	574,747	15,000	3,000	5,000

Statistik Messreihe B6:

	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm ²]	a [mm]	b [mm]
MW	8690	579,334	15	3	5
MINI	8621	574,747	15	3	5
MAXI	8760	583,985	15	3	5
s	70	4,619	0	0	0



Fmax = Maximalkraft (global) a = Dicke
Rm = Zugfestigkeit (DIN EN 10002) b = Breite
So = Querschnittsfläche

Kommentar :

Anhang 38: Messprotokoll Zugversuch 8 kJ/cm Streckenenergie zweireihig (längs) G4Si1

IFt

Prüfbericht

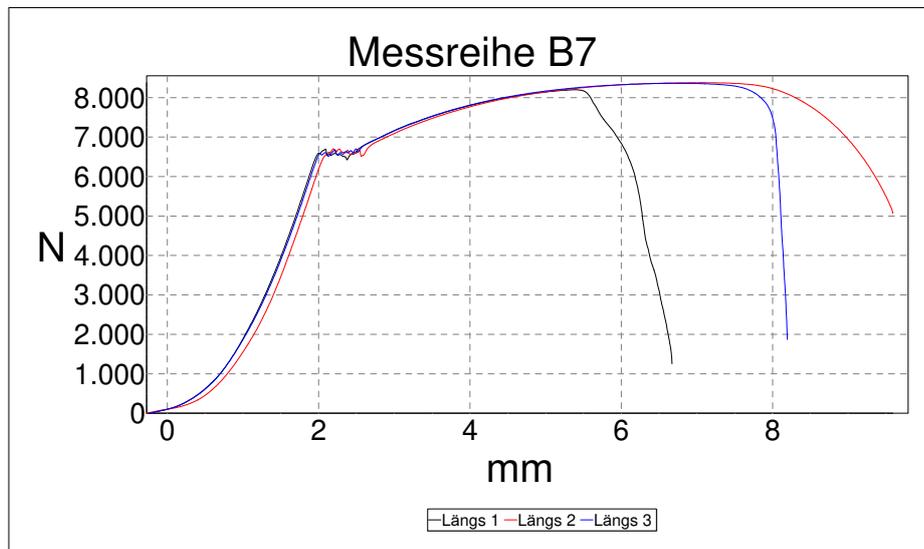
Maschinentyp : inspekt 20kN
Kraftmesszelle : 20000 N
Testgeschwindigkeiten: ab 0 s 10 mm/min

Resultate Messreihe B7:

Name	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm ²]	a [mm]	b [mm]
Längs 1	8201	546,719	15,000	3,000	5,000
Längs 2	8381	558,715	15,000	3,000	5,000
Längs 3	8364	557,589	15,000	3,000	5,000

Statistik Messreihe B7:

	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm ²]	a [mm]	b [mm]
MW	8315	554,341	15	3	5
MINI	8201	546,719	15	3	5
MAXI	8381	558,715	15	3	5
s	99	6,625	0	0	0



So = Querschnittsfläche a = Dicke
Rm = Zugfestigkeit (DIN EN 10002) b = Breite

Kommentar :

Anhang 39: Messprotokoll Zugversuch 8 kJ/cm Streckenenergie zweireihig (quer) G4Si1

IFt

Prüfbericht

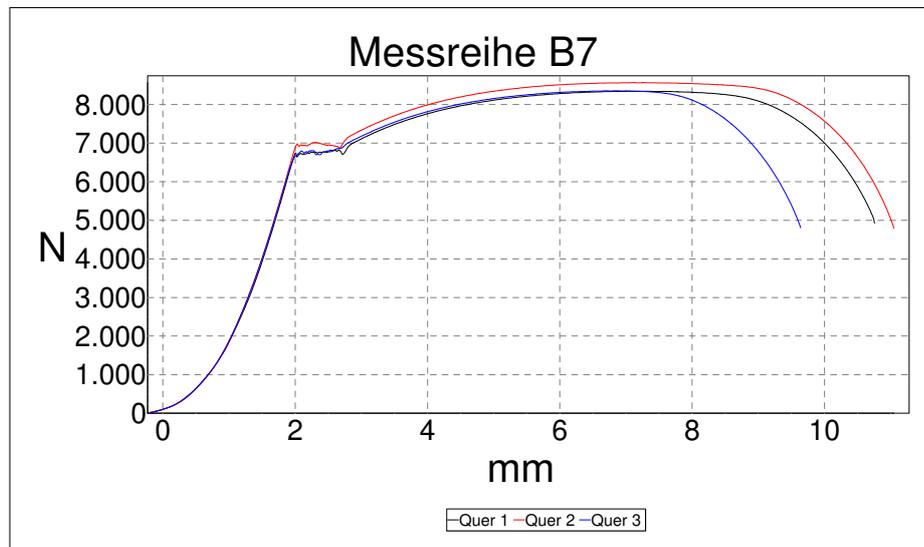
Maschinentyp : inspekt 20kN
 Kraftmesszelle : 20000 N
 Testgeschwindigkeiten: ab 0 s 10 mm/min

Resultate Messreihe B7:

Name	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm ²]	a [mm]	b [mm]
Quer 1	8345	556,364	15,000	3,000	5,000
Quer 2	8568	571,197	15,000	3,000	5,000
Quer 3	8354	556,932	15,000	3,000	5,000

Statistik Messreihe B7:

	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm ²]	a [mm]	b [mm]
MW	8422	561,498	15	3	5
MINI	8345	556,364	15	3	5
MAXI	8568	571,197	15	3	5
s	126	8,405	0	0	0



Fmax = Maximalkraft (global)
 Rm = Zugfestigkeit (DIN EN 10002)
 So = Querschnittsfläche

a = Dicke
 b = Breite

Kommentar :

Anhang 40: Messprotokoll Zugversuch 4 kJ/cm Streckenenergie dreireihig (längs) G4Si1

IFt

Prüfbericht

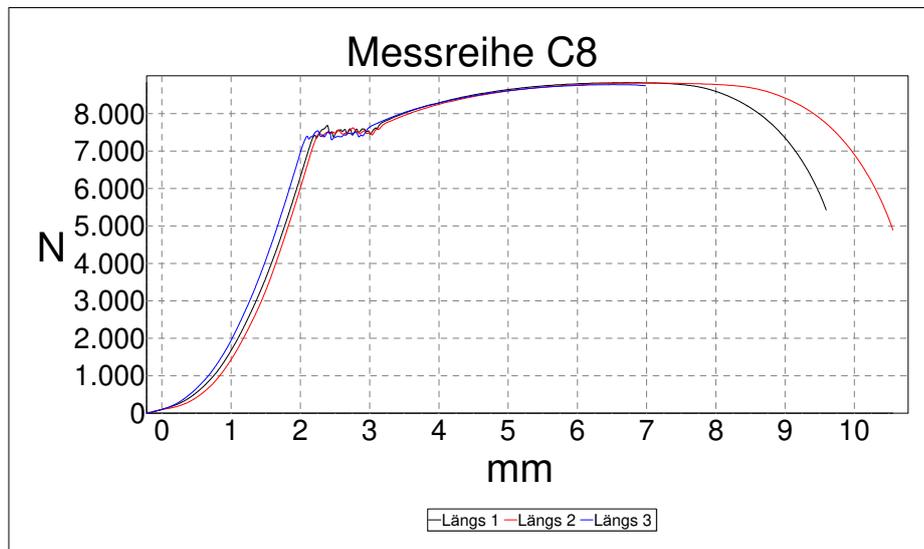
Maschinentyp : inspekt 20kN
Kraftmesszelle : 20000 N
Testgeschwindigkeiten: ab 0 s 10 mm/min

Resultate Messreihe C8:

Name	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm²]	a [mm]	b [mm]
Längs 1	8827	588,447	15,000	3,000	5,000
Längs 2	8817	587,772	15,000	3,000	5,000
Längs 3	8775	584,993	15,000	3,000	5,000

Statistik Messreihe C8:

	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm²]	a [mm]	b [mm]
MW	8806	587,071	15	3	5
MINI	8775	584,993	15	3	5
MAXI	8827	588,447	15	3	5
s	28	1,831	0	0	0



So = Querschnittsfläche a = Dicke
Rm = Zugfestigkeit (DIN EN 10002) b = Breite

Kommentar :

Anhang 41: Messprotokoll Zugversuch 4 kJ/cm Streckenenergie dreireihig (quer) G4Si1

IFt

Prüfbericht

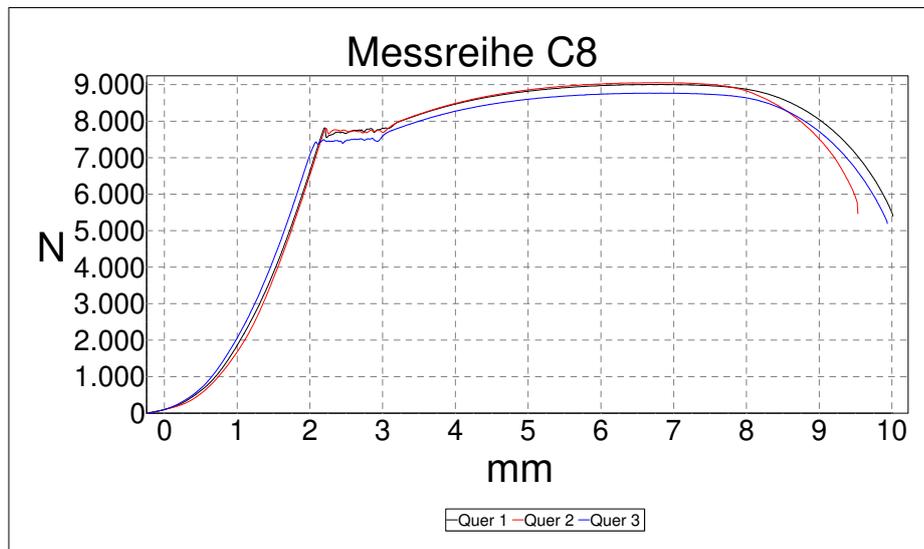
Maschinentyp : inspekt 20kN
Kraftmesszelle : 20000 N
Testgeschwindigkeiten: ab 0 s 10 mm/min

Resultate Messreihe C8:

Name	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm ²]	a [mm]	b [mm]
Quer 1	9005	600,311	15,000	3,000	5,000
Quer 2	9055	603,647	15,000	3,000	5,000
Quer 3	8767	584,485	15,000	3,000	5,000

Statistik Messreihe C8:

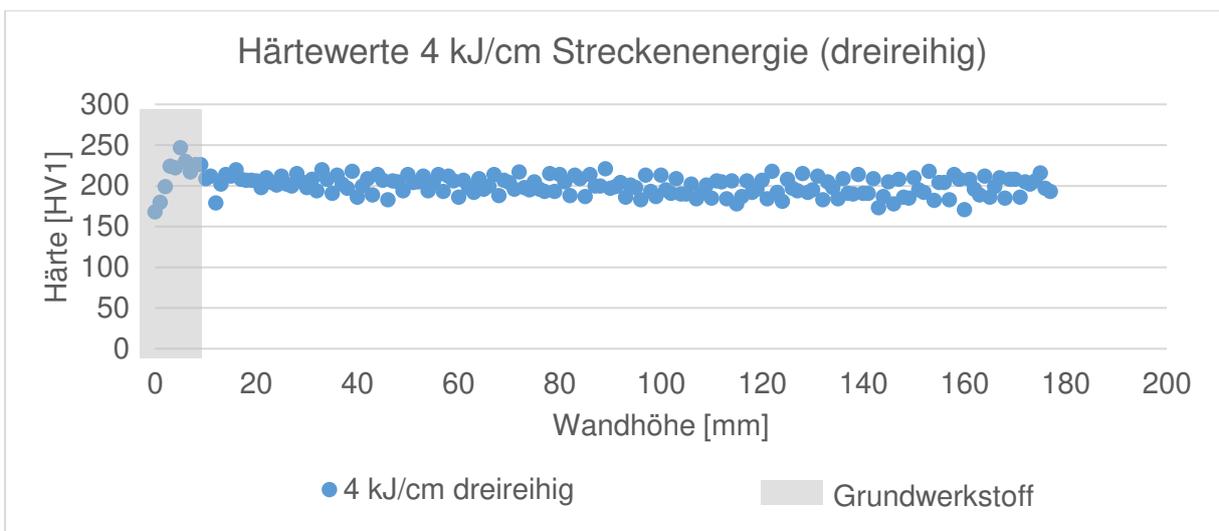
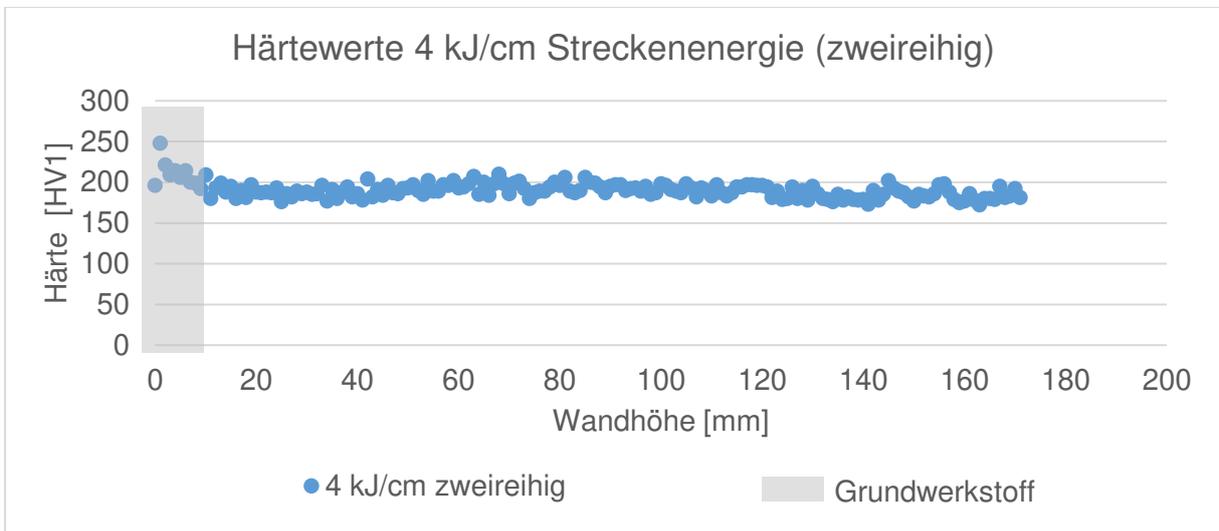
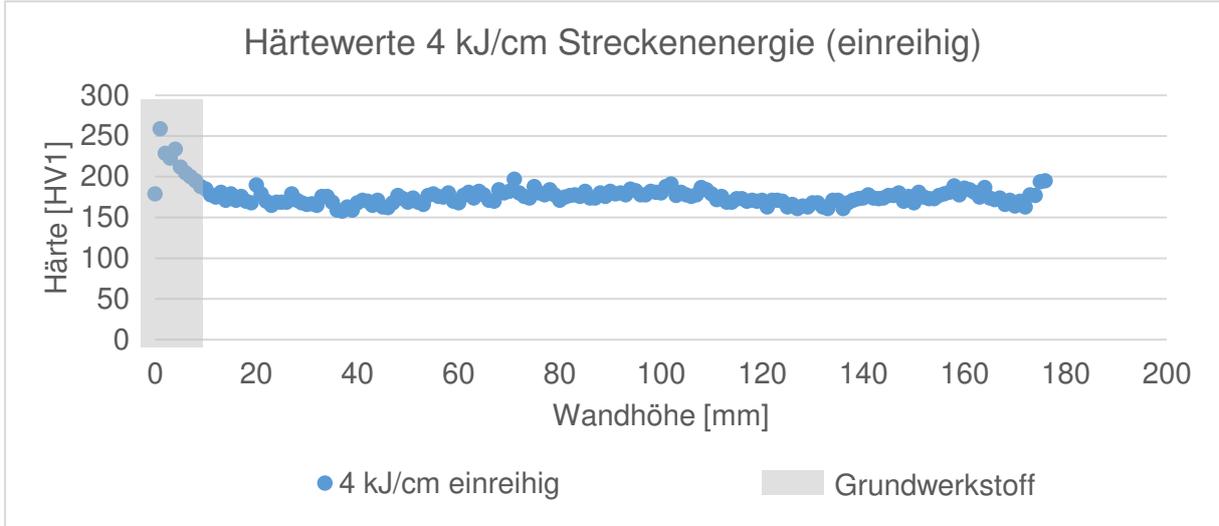
	Fmax [N]	Rm [MPa]	So [mm ²]	a [mm]	b [mm]
MW	8942	596,148	15	3	5
MINI	8767	584,485	15	3	5
MAXI	9055	603,647	15	3	5
s	154	10,237	0	0	0



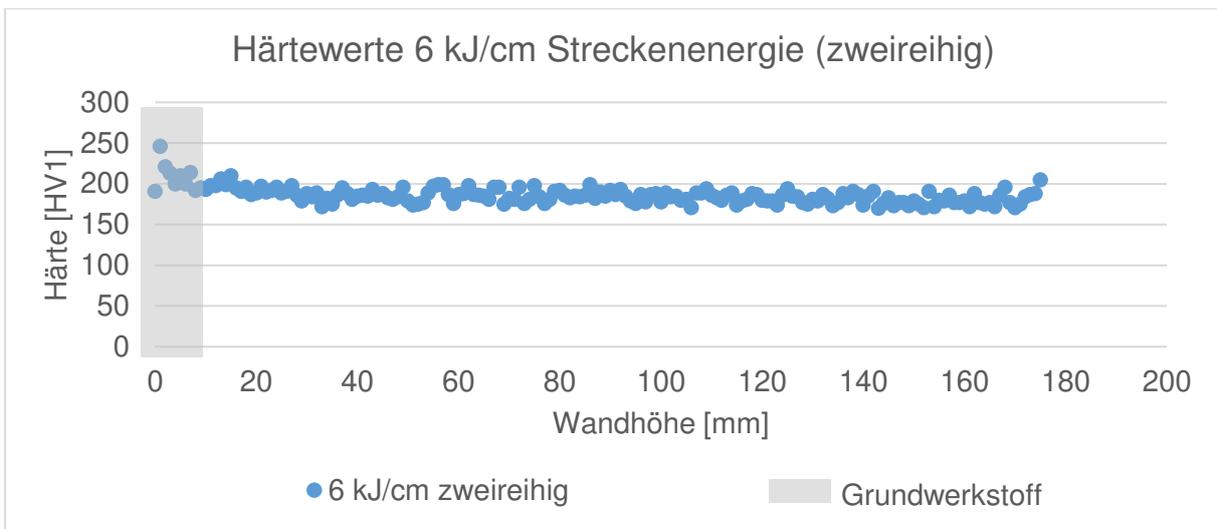
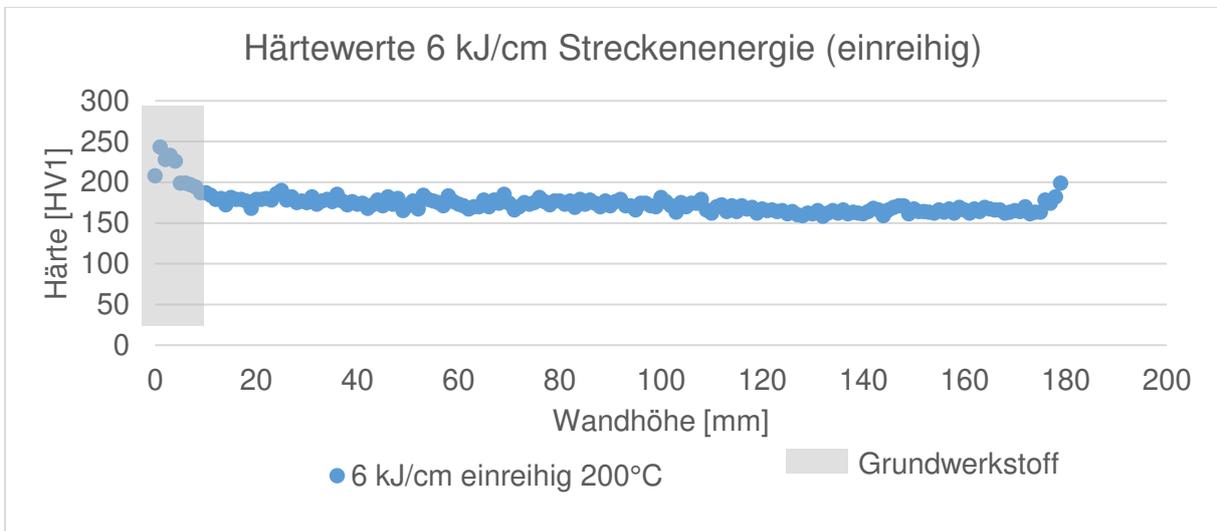
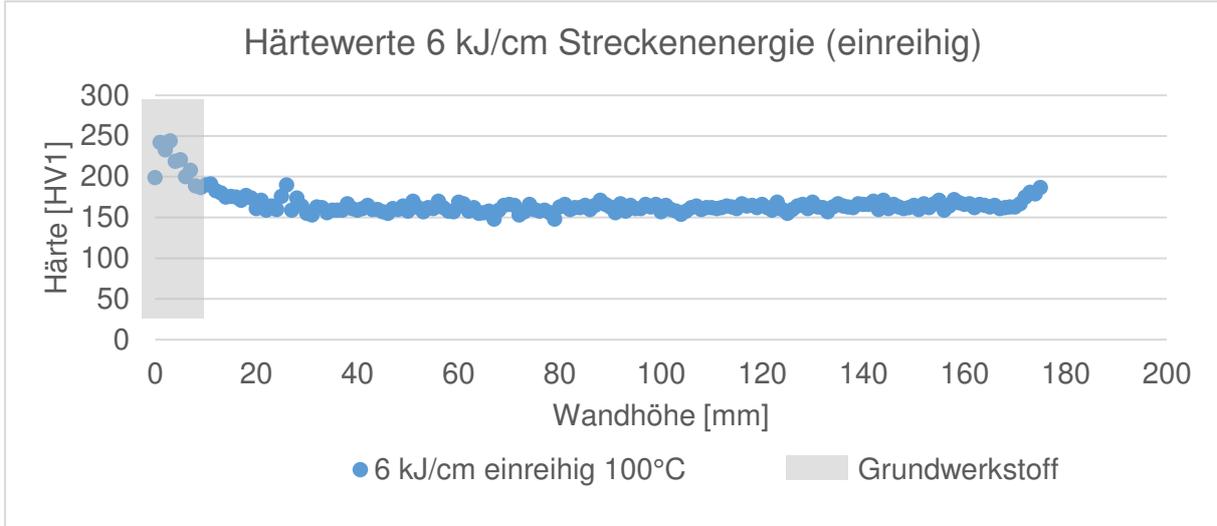
Fmax = Maximalkraft (global) a = Dicke
Rm = Zugfestigkeit (DIN EN 10002) b = Breite
So = Querschnittsfläche

Kommentar :

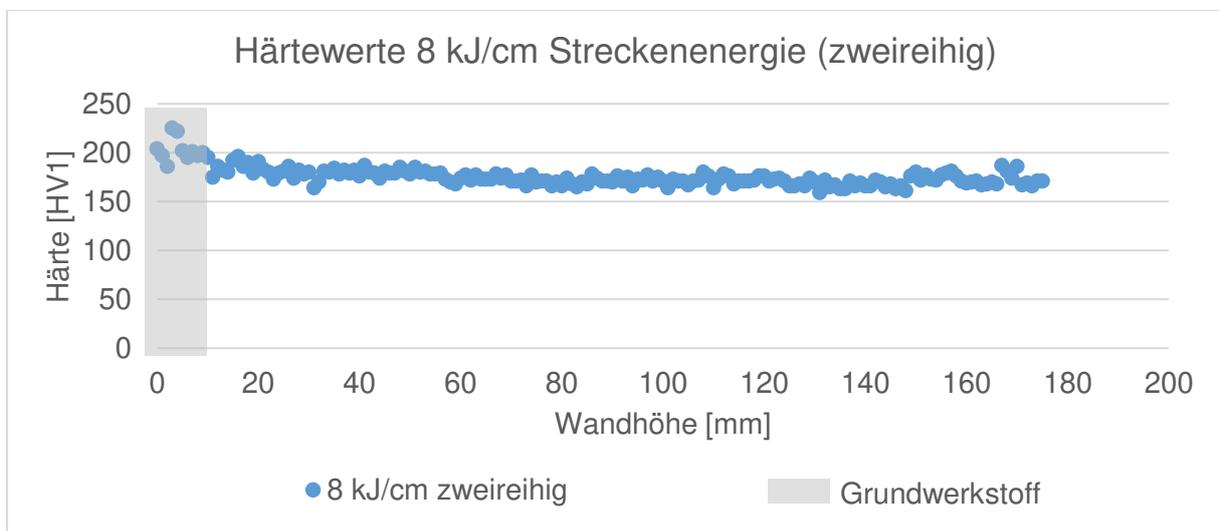
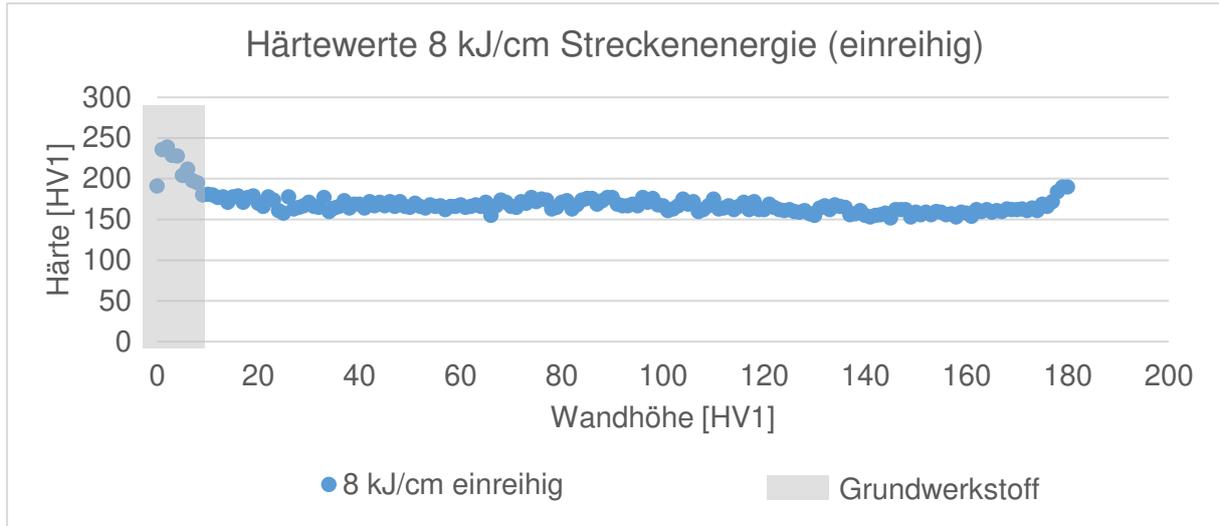
Anhang 42: Härtewerte für 4 kJ/cm Streckenenergie G4Si1



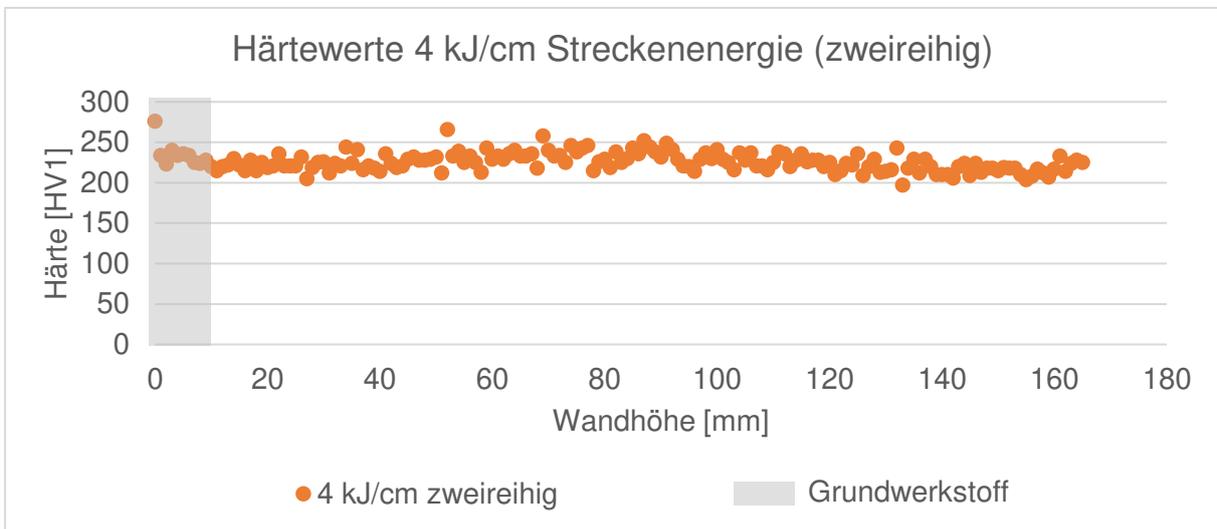
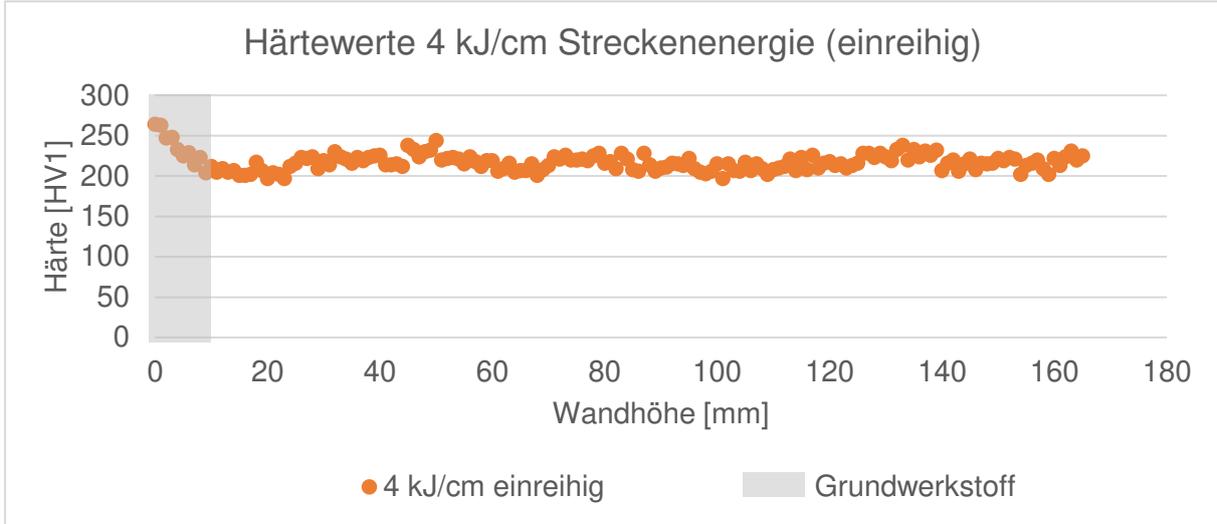
Anhang 43: Härtewerte für 6 kJ/cm Streckenenergie G4Si1



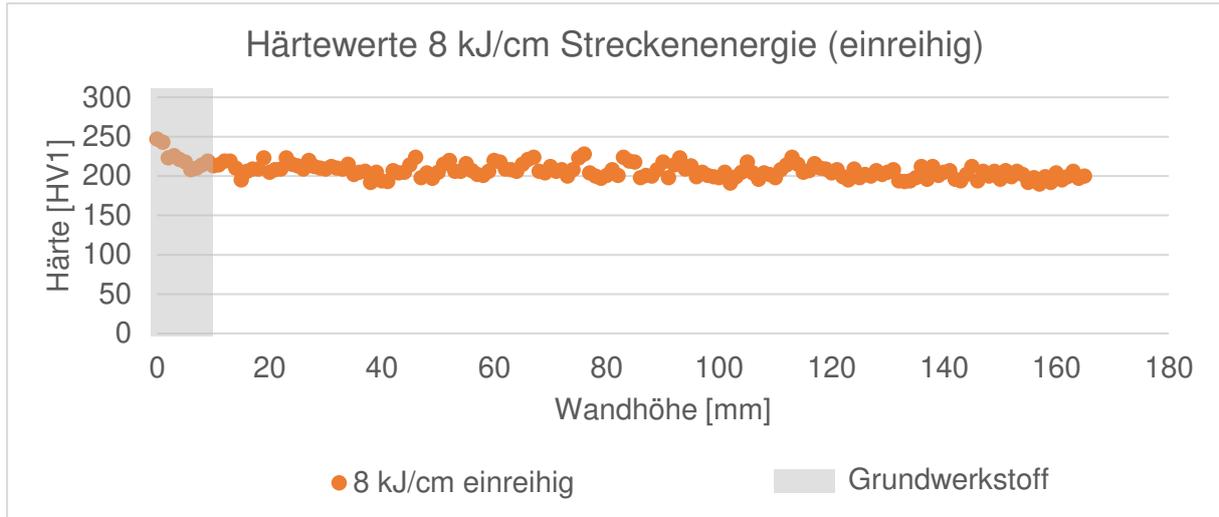
Anhang 44: Härteverlauf bei 8 kJ/cm Streckenenergie G4Si1



Anhang 45: Härteverlauf bei 4 kJ/cm Streckenenergie RD100

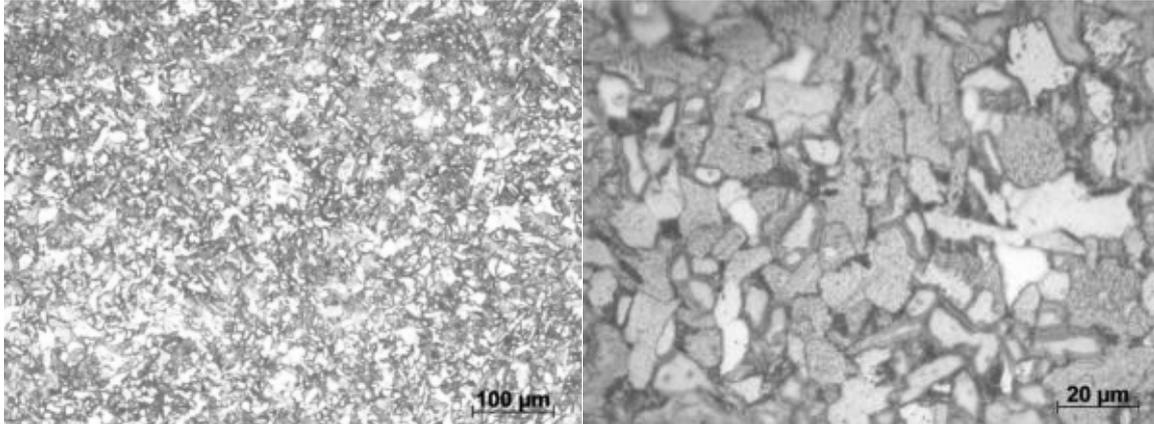


Anhang 46: Härteverlauf bei 8 kJ/cm Streckenenergie RD100

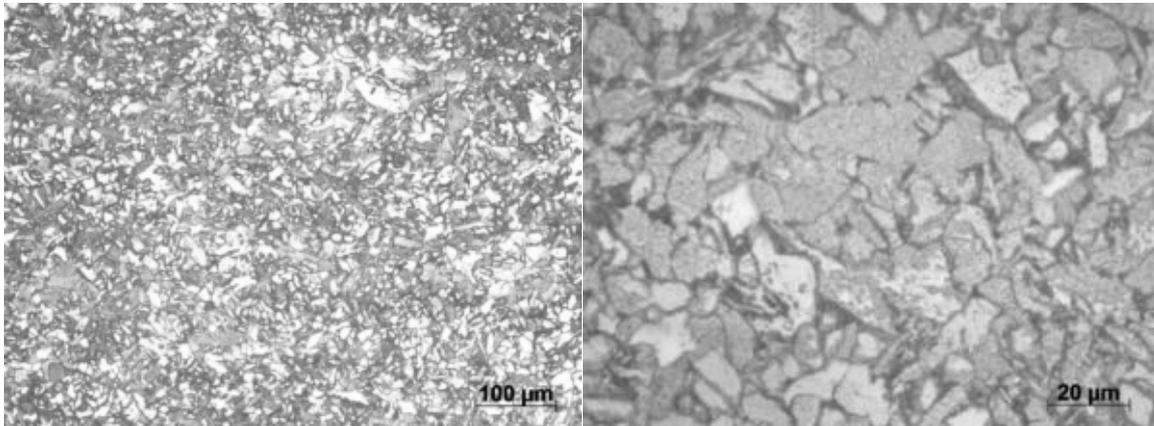


Anhang 47: Gefügebilder 4 kJ/cm Streckenenergie einreihig G4Si1

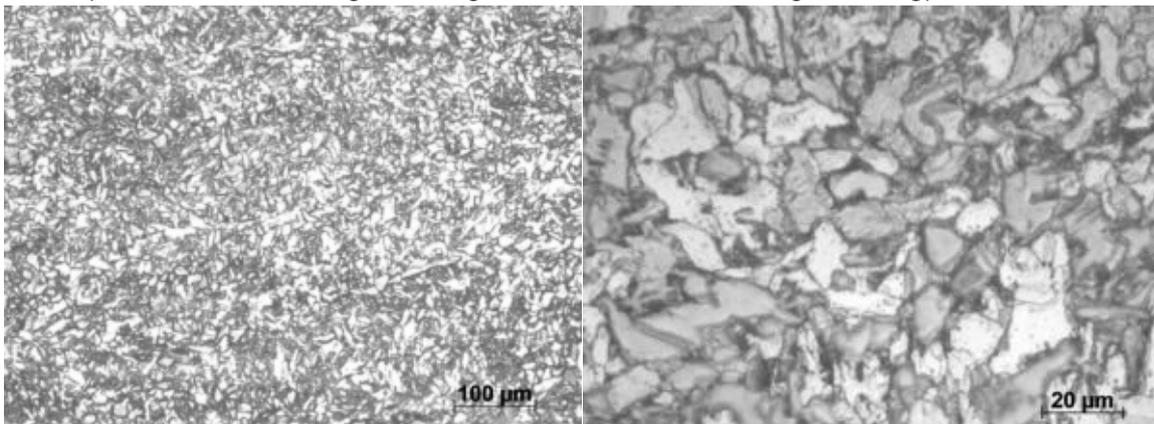
Unten (links 200-fache Vergrößerung; rechts 1000-fache Vergrößerung)



Mitte (links 200-fache Vergrößerung; rechts 1000-fache Vergrößerung)

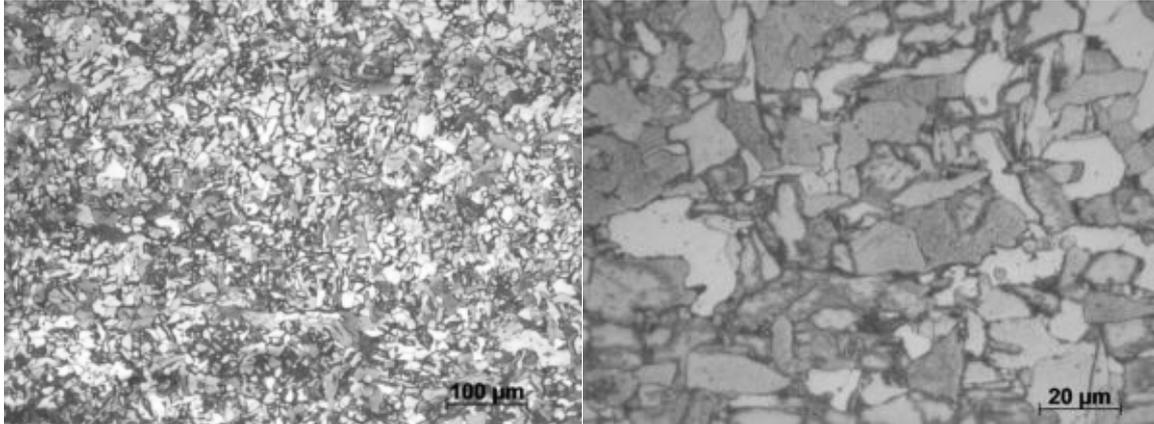


Oben (links 200-fache Vergrößerung; rechts 1000-fache Vergrößerung)

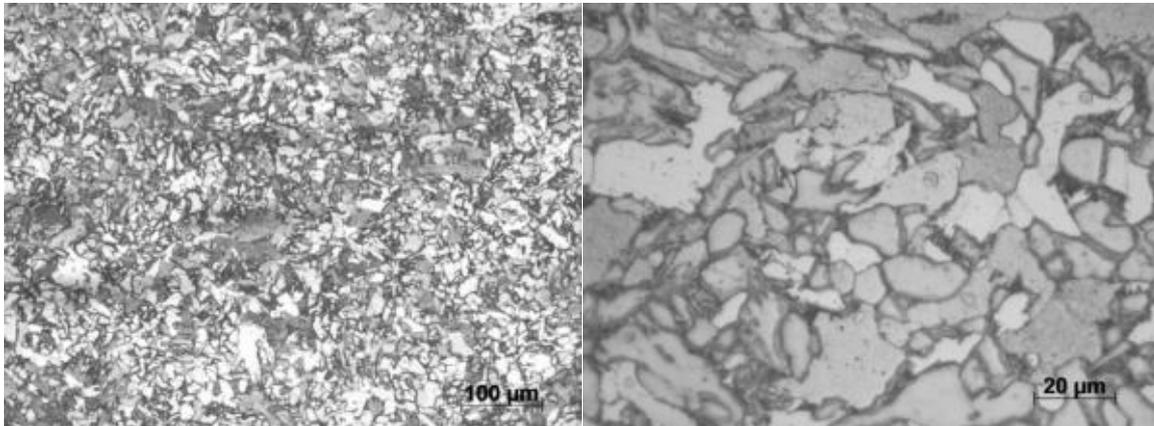


Anhang 48: Gefügebilder 6 kJ/cm Streckenenergie einreihig ($T_z = 100^\circ\text{C}$) G4Si1

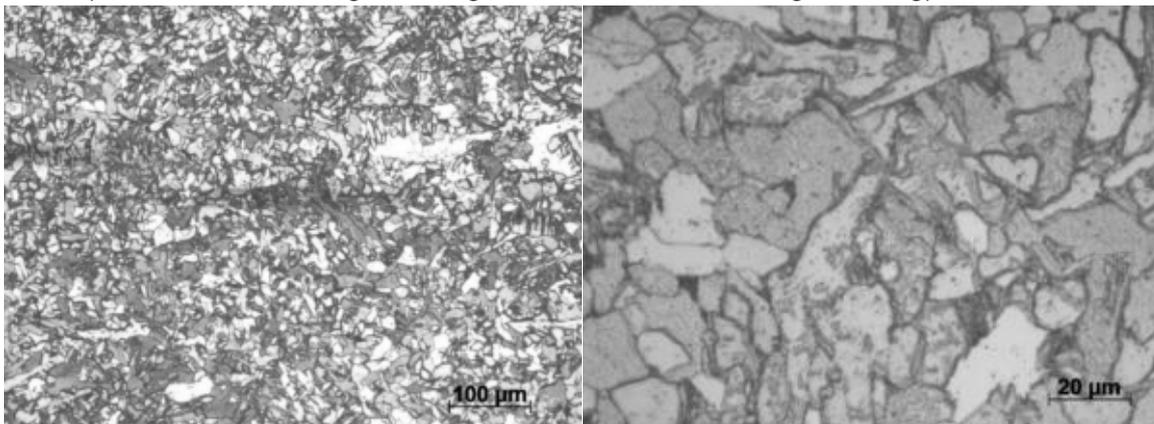
Unten (links 200-fache Vergrößerung; rechts 1000-fache Vergrößerung)



Mitte (links 200-fache Vergrößerung; rechts 1000-fache Vergrößerung)

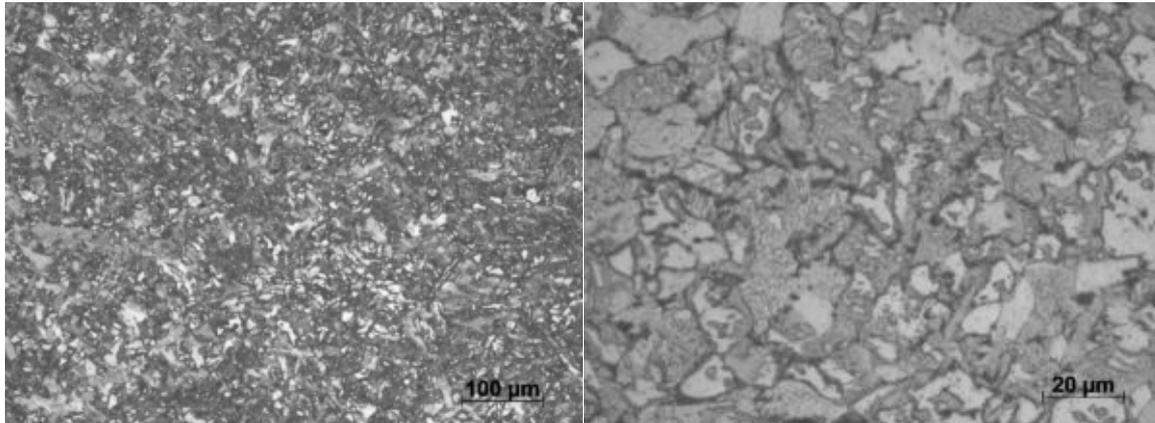


Oben (links 200-fache Vergrößerung; rechts 1000-fache Vergrößerung)

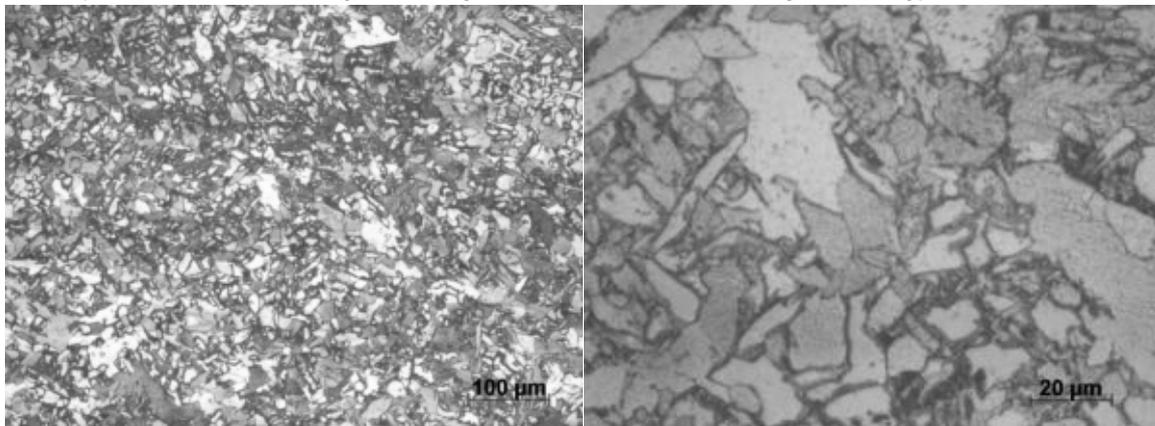


Anhang 49: Gefügebilder 6 kJ/cm Streckenenergie einreihig ($T_z = 200^\circ\text{C}$) G4Si1

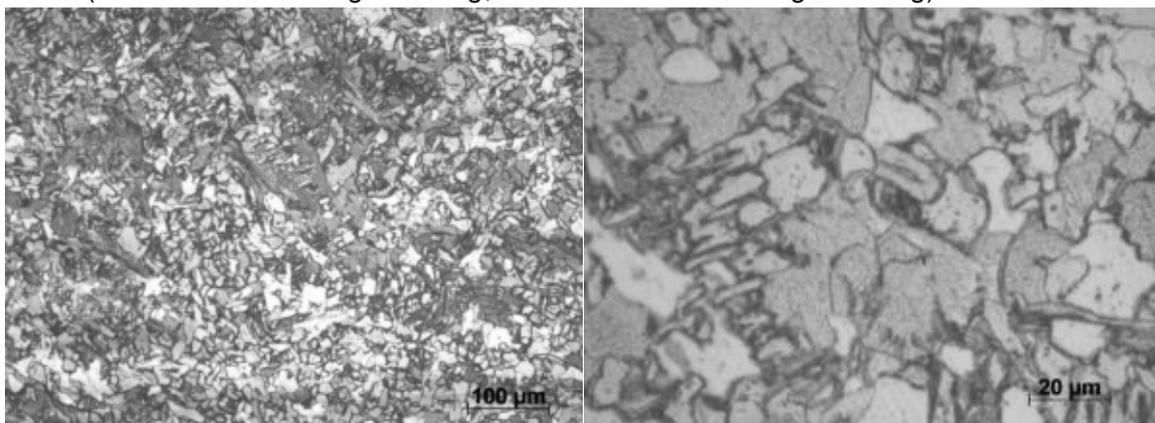
Unten (links 200-fache Vergrößerung; rechts 1000-fache Vergrößerung)



Mitte (links 200-fache Vergrößerung; rechts 1000-fache Vergrößerung)

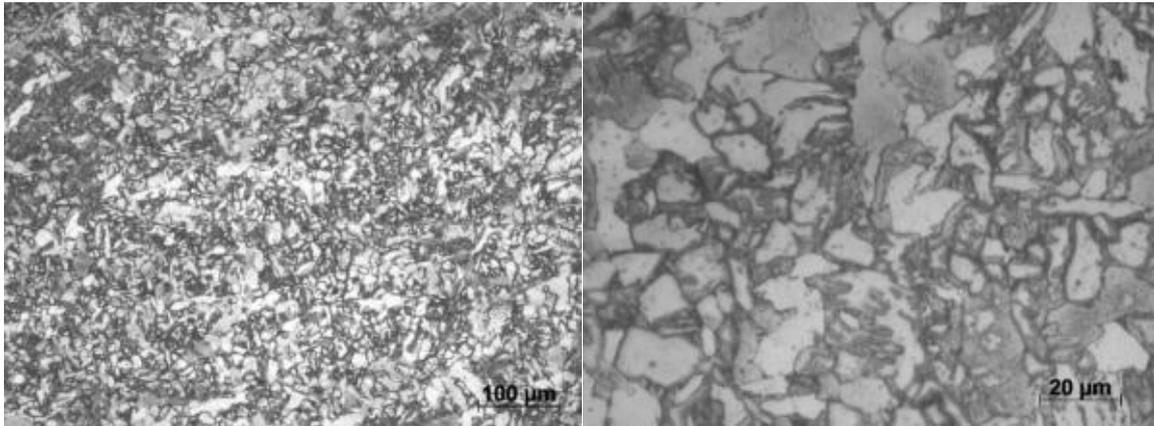


Oben (links 200-fache Vergrößerung; rechts 1000-fache Vergrößerung)

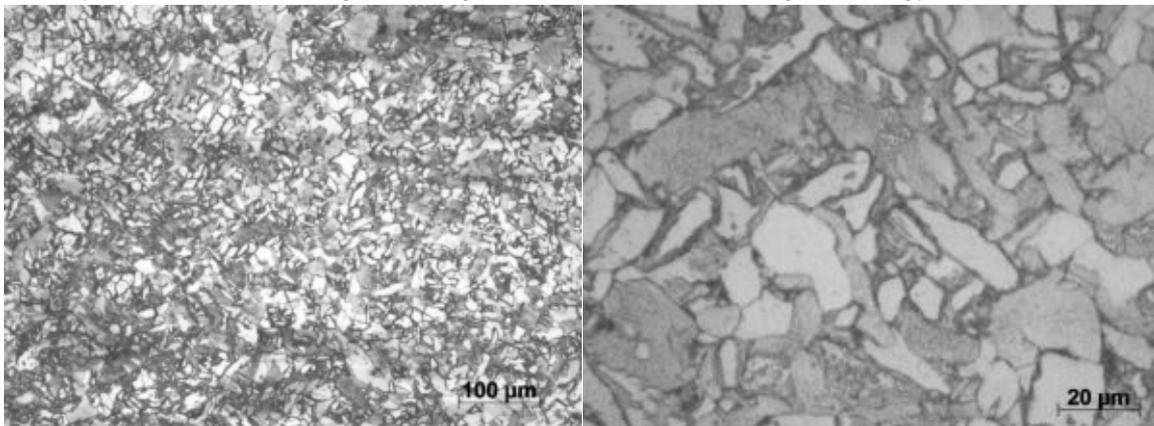


Anhang 50: Gefügebilder 8 kJ/cm Streckenenergie einreihig G4Si1

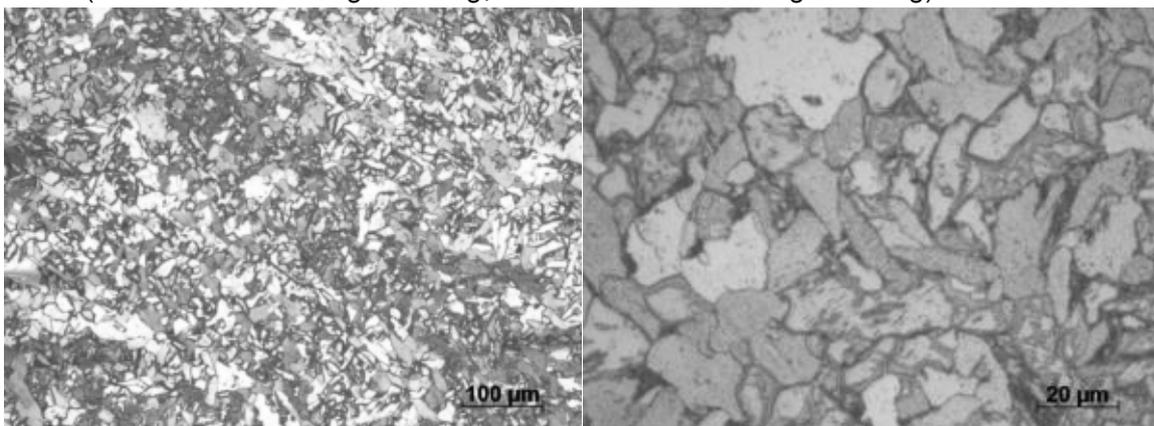
Unten (links 200-fache Vergrößerung; rechts 1000-fache Vergrößerung)



Mitte (links 200-fache Vergrößerung; rechts 1000-fache Vergrößerung)

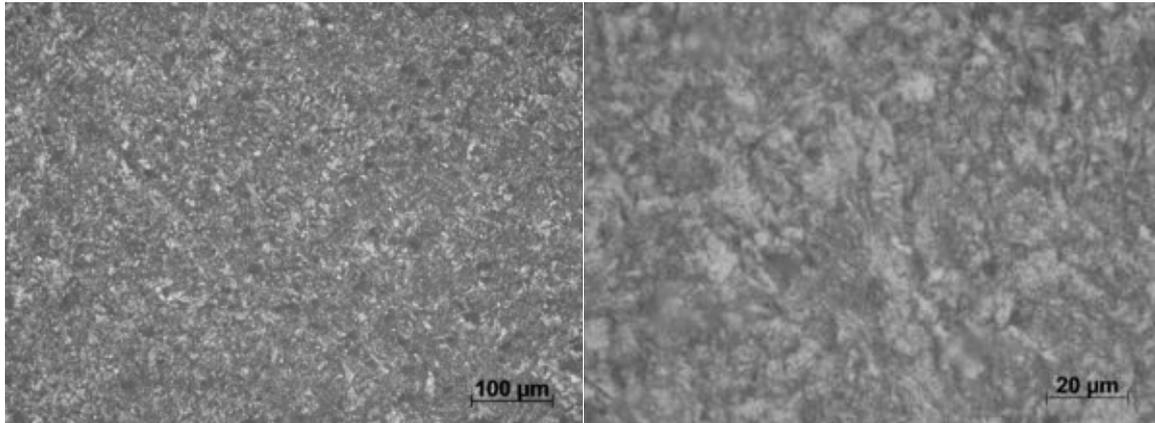


Oben (links 200-fache Vergrößerung; rechts 1000-fache Vergrößerung)

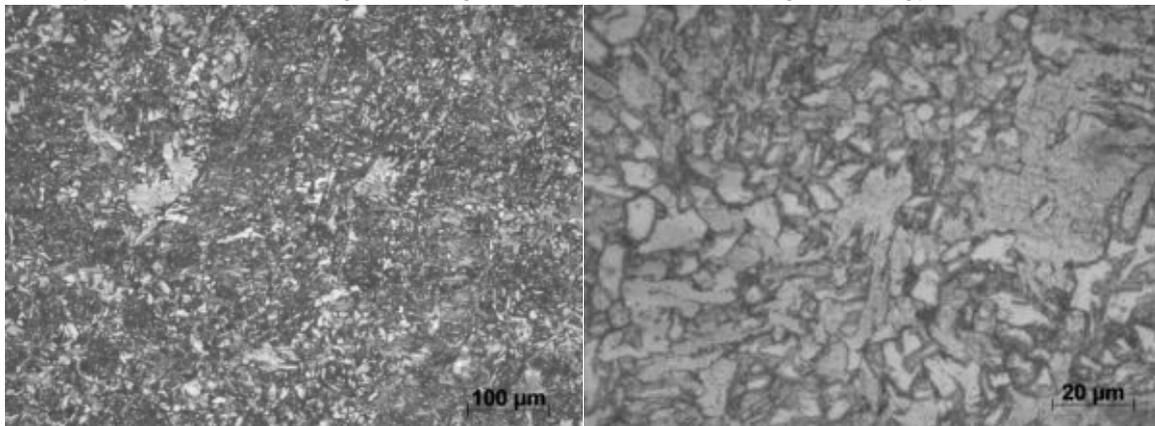


Anhang 51: Gefügebilder 4 kJ/cm Streckenenergie zweireihig G4Si1

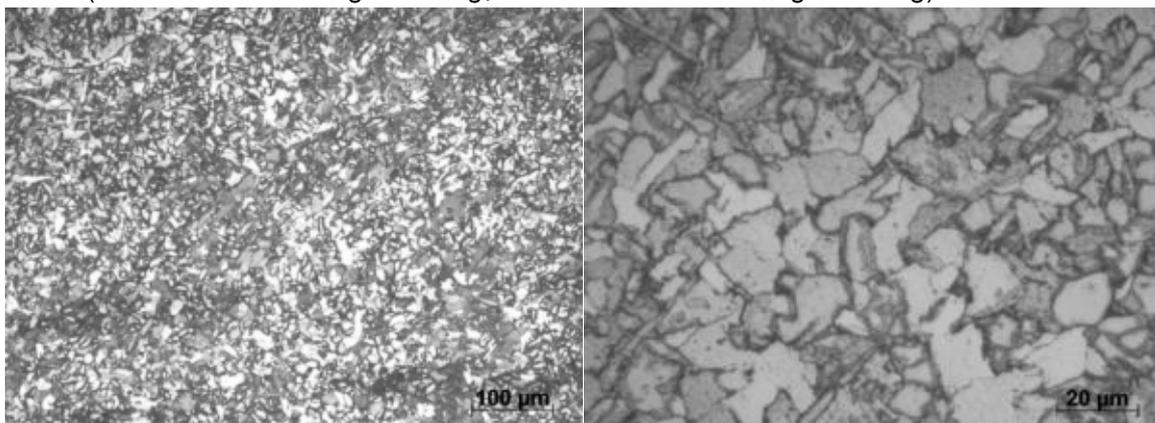
Unten (links 200-fache Vergrößerung; rechts 1000-fache Vergrößerung)



Mitte (links 200-fache Vergrößerung; rechts 1000-fache Vergrößerung)

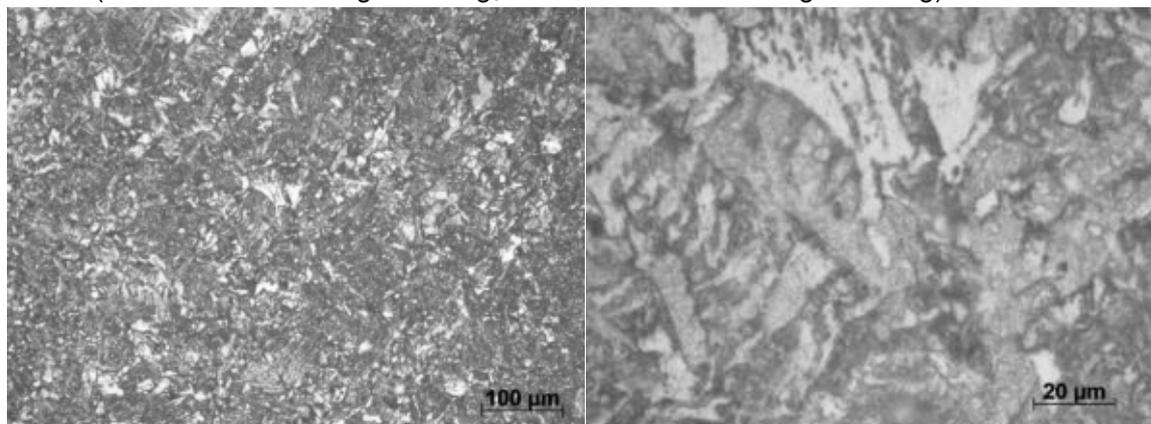


Oben (links 200-fache Vergrößerung; rechts 1000-fache Vergrößerung)

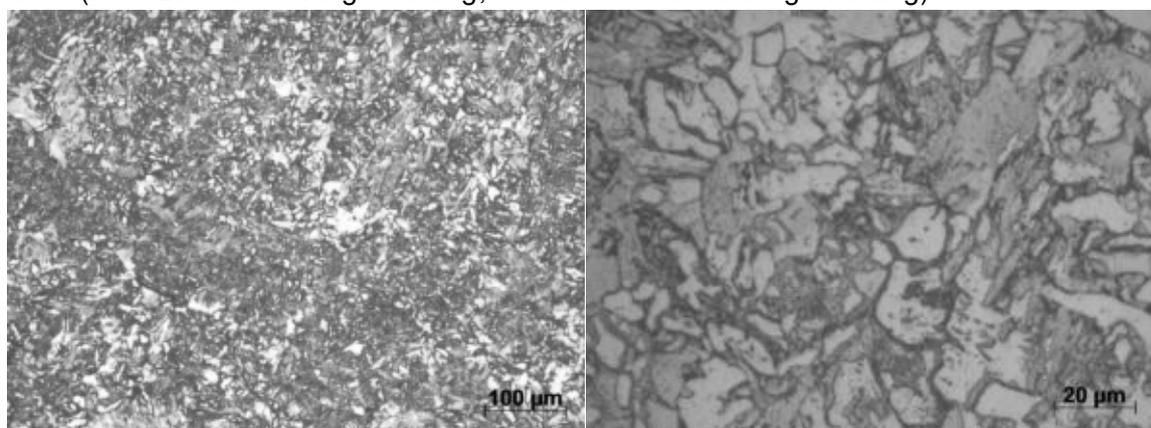


Anhang 52: Gefügebilder 6 kJ/cm Streckenergie zweireihig G4Si1

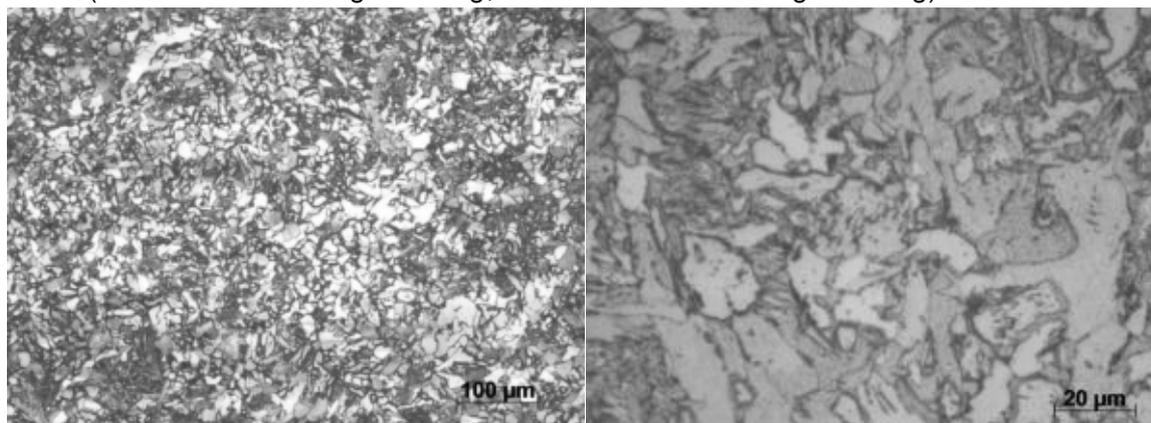
Unten (links 200-fache Vergrößerung; rechts 1000-fache Vergrößerung)



Mitte (links 200-fache Vergrößerung; rechts 1000-fache Vergrößerung)

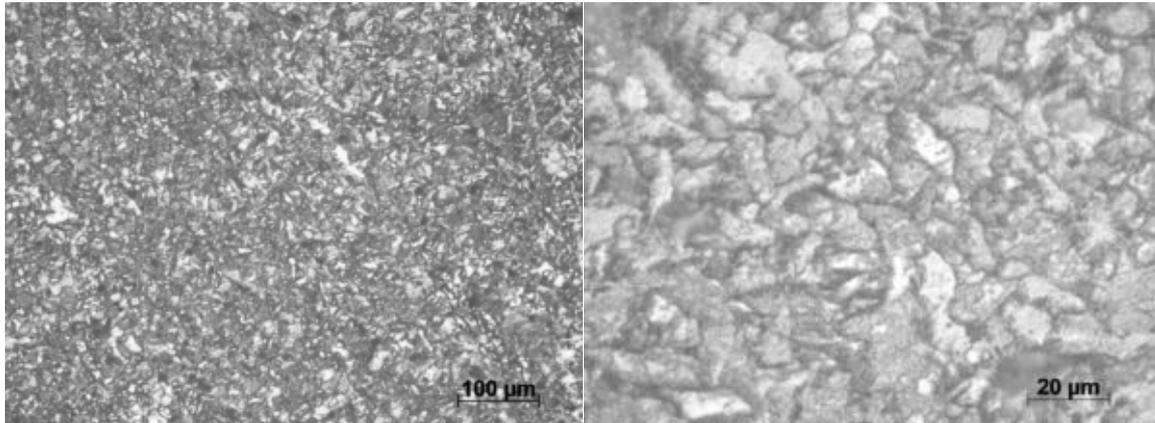


Oben (links 200-fache Vergrößerung; rechts 1000-fache Vergrößerung)

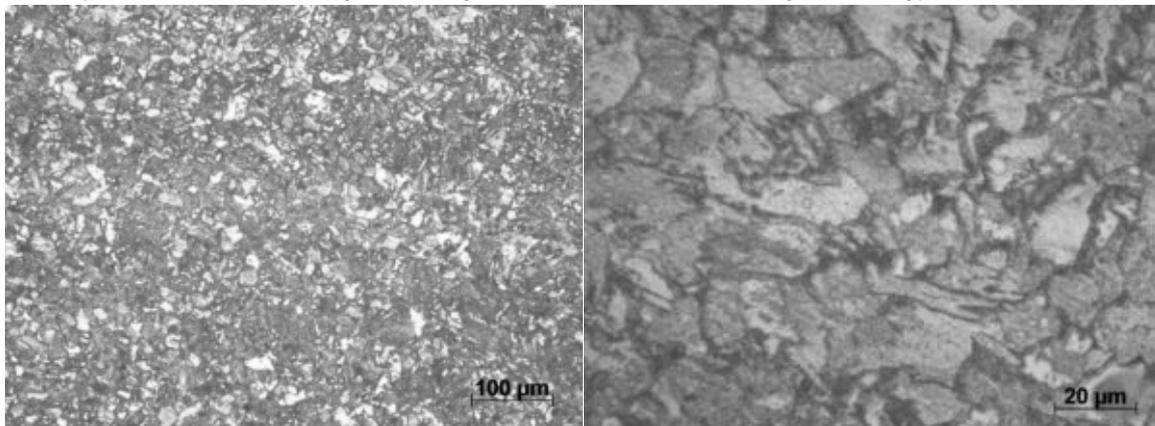


Anhang 53: Gefügebilder 8 kJ/cm Streckenenergie zweireihig G4Si1

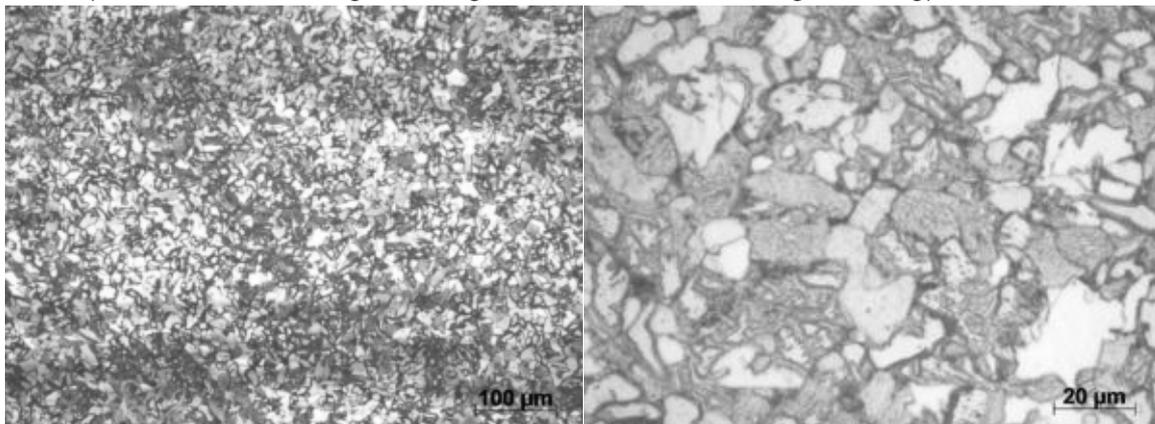
Unten (links 200-fache Vergrößerung; rechts 1000-fache Vergrößerung)



Mitte (links 200-fache Vergrößerung; rechts 1000-fache Vergrößerung)

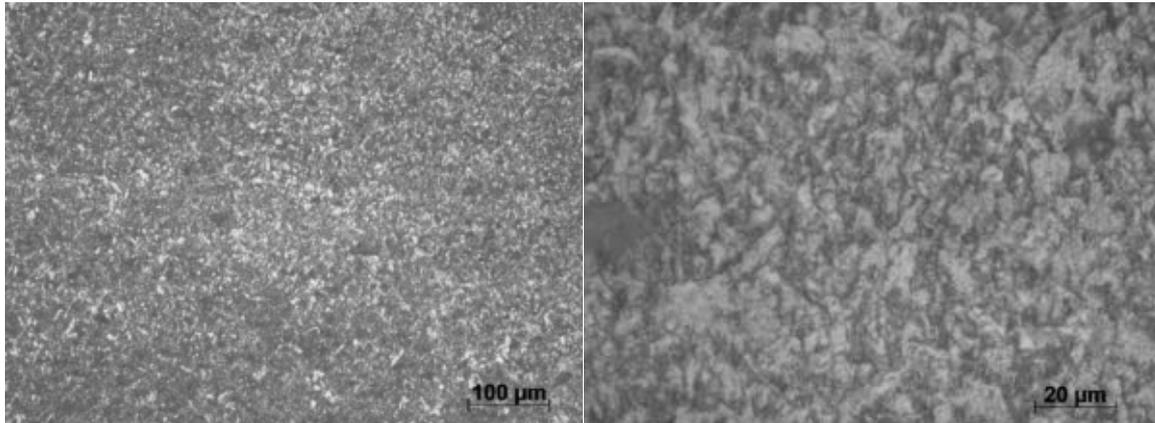


Oben (links 200-fache Vergrößerung; rechts 1000-fache Vergrößerung)

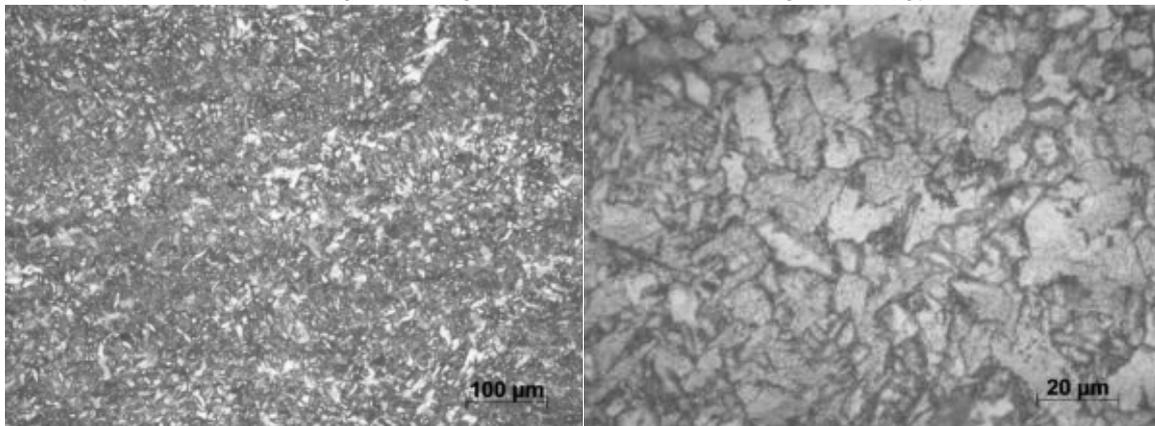


Anhang 54: Gefügebilder 4 kJ/cm Streckenenergie dreireihig G4Si1

Unten (links 200-fache Vergrößerung; rechts 1000-fache Vergrößerung)



Mitte (links 200-fache Vergrößerung; rechts 1000-fache Vergrößerung)



Oben (links 200-fache Vergrößerung; rechts 1000-fache Vergrößerung)

